

# ENVIRO MIS 22



## INTERNATIONAL CONFERENCE

and Early Career Scientists School  
on Environmental Observations,  
Modeling and Information Systems

September 12–17, 2022,  
Tomsk, Russia

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

и школа молодых ученых по измерениям,  
моделированию и информационным системам  
для изучения окружающей среды

12–17 сентября 2022 года,  
Томск, Россия

# SELECTED PAPERS

## **ENVIROMIS 2022** organizers

Institute of Monitoring of Climatic  
and Ecological Systems SB RAS

G.I. Marchuk Institute of Numerical  
Mathematics RA

Moscow Center of Fundamental  
and Applied Mathematics

MSU Research Computing Center

Scientific Council of the Russian Academy  
of Sciences on the problems of the Earth,  
Future Earth and NEFI programs

## Организаторы **ENVIROMIS 2022**

Институт мониторинга климатических и экологи-  
ческих систем СО РАН

Институт вычислительной математики  
им. Г.И. Марчука РАН

Научно-исследовательский вычислительный  
центр МГУ

Московский центр фундаментальной  
и прикладной математики

При содействии Научного совета РАН  
по проблемам климата Земли,  
координирующего соответствующие  
фундаментальные и поисковые научные  
исследования РАН,  
Сибирского отделения РАН,  
Российского национального комитета  
Международной программы «Будущее Земли»  
и программы NEFI.

© ИМКЭС СО РАН 2022

© SCERT, 2022

ISBN 978-5-89702-488-9

## СЕКЦИЯ 2

Мониторинг  
климатических  
изменений  
в Северной Евразии

## SESSION 2

Monitoring  
of Climate Changes  
over Northern  
Eurasia

## Тенденции климатических изменений на территории северной Евразии в XX–XXI веках

Переведенцев Ю.П.<sup>1</sup>, Шерстюков Б.Г.<sup>2</sup>,  
Мирсаева Н.А.<sup>1</sup>, Шанталинский К.М.<sup>1</sup>,  
Исмагилов Н.В.<sup>1</sup>, Николаев А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Казань, Россия

<sup>2</sup>ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Россия

E-mail: [ypereved@kpfu.ru](mailto:ypereved@kpfu.ru)

Доклад посвящен оценке изменений температуры воздуха на территории Евразии по данным реанализа ERA5 о температуре воздуха (ТВ) с разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  на 51 изобарической поверхности (до высоты 80 км, 0,01 гПа) за 1950 – 2020 г. Кроме того, рассмотрены сезонные перестройки стратосферной циркуляции в период 1979 – 2020 гг. на изобарических поверхностях 30, 20 и 10 гПа в широтной зоне 30 – 90° с.ш. В своих более ранних работах авторы рассматривали затронутые проблемы, но для других периодов времени и исходных данных [2, 3].

Рассмотрим вначале пространственно-временные особенности поведения температуры воздуха в нижнем слое атмосферы, в большей степени находящемся под влиянием состояния подстилающей поверхности, атмосферной циркуляции и радиационного режима. Для этого по всей континентальной территории России, а также девяти квази-однородным климатическим регионам России (I – Север ЕЧР и Западной Сибири, II – Северная часть Восточной Сибири и Якутии, III – Чукотка и север Камчатки, IV – Центр ЕЧР, V – Центр и юг Западной Сибири, VI – Центр и юг Восточной Сибири, VII – Дальний Восток, VIII – Алтай и Саяны, IX – Юг ЕЧР) проведено осреднение средних месячных, средних годовых, летних и зимних температур воздуха. По указанным регионам и временным интервалам рассчитаны основные статистические характеристики (среднее многолетнее значение, СКО, КНЛТ, коэффициент детерминации линейного тренда и др.) и проведено сглаживание временных рядов с помощью НЧ фильтра с точкой отсечения 20 лет.

Анализ характеристик низкочастотных изменений зимней (XII–II) температуры воздуха у поверхности Земли показывает, что с 1950 по 2020 гг. в среднем по всей территории Российской Федерации эта температура росла в линейном приближении со скоростью около  $0,38^\circ\text{C}/10$  лет. При этом наибольшая скорость повышения зимней температуры ( $0,5^\circ\text{C}/10$  лет) наблюдалась в четвертом регионе, включающем в себя центр ЕЧР. В результате за исследуемый период температура

здесь выросла на  $3,5^{\circ}\text{C}$ , если определять это изменение по линейному тренду, и на  $2,6^{\circ}\text{C}$ , если оценивать его по низкочастотной компоненте с периодом более 20 лет. Наибольший вклад в общую дисперсию (22%) линейный рост температуры имеет в седьмом регионе (Дальний Восток), где наблюдается наименьшая изменчивость зимних температур ( $\text{СКО} = 1,46^{\circ}\text{C}$ ). Линейный тренд в изменении зимней температуры практически отсутствует в третьем (Чукотка и север Камчатки) и восьмом (Алтай и Саяны) регионах. Это связано с тем, что в 3 регионе активный рост зимних температур начался лишь в последние двадцать лет, а в восьмом повышение температур зимнего периода в конце 1990-х годов сменилось даже некоторым ее понижением.

Летом (VI–VIII) в среднем по территории Российской Федерации температуры у поверхности Земли росли существенно слабее. Коэффициент наклона линейного тренда (КНЛТ) в этом случае составил  $0,20^{\circ}\text{C}/10$  лет. При этом наибольшая скорость повышения летних температур в линейном приближении имела место в третьем регионе ( $0,34^{\circ}\text{C}/10$  лет), где в зимний период линейный тренд незначим. Также достаточно велик КНЛТ летней температуры воздуха во втором и девятом районах, где он составил величину около  $0,26^{\circ}\text{C}/10$  лет. Наименее выражено летнее повышение температур в четвертом регионе, где зимнее ее повышение, наоборот, максимально. Это связано с тем, что в период до конца 70-х годов XX столетия летние температуры в этом регионе заметно понижались, затем до 2012 г. наблюдался их рост и в последние годы вновь происходит их понижение.

Таким образом, в большинстве регионов зимнее повышение температуры воздуха выше летнего. Исключением являются регион центра ЕЧР и регион Алтая и Саян, где по линейному тренду скорость повышения зимних и летних температур практически одинакова, а по кривой НЧК летнее повышение ТВ даже несколько выше. Те же статистические характеристики были рассчитаны в узлах сетки с шагом  $1^{\circ}$  по широте и долготы по территории континентальной России. По результатам представленным в картографическом виде выполнен анализ особенностей пространственного распределения и временной изменчивости ТВ.

Распределение ТВ, СКО, величин КНЛТ на 51-й изобарической поверхности, осредненных по территории России для года, зимы и лета, имеет следующие особенности: в тропосфере ТВ с высотой понижается (зимой до  $-60,6^{\circ}\text{C}$ , летом до  $-51,4^{\circ}\text{C}$ ), в стратосфере наблюдается ее инверсия (зимой под стратопаузой  $T=+1,01^{\circ}\text{C}$ ) и в мезосфере она вновь понижается (на уровне 80 км ( $0,01$  гПа) зимой  $T\approx -73^{\circ}\text{C}$ , летом  $T=-99,8^{\circ}\text{C}$ ), что соответствует известным физическим представлениям [1]. На всех уровнях отмечается годовая амплитуда колебаний ТВ и если в тропосфере происходит заметный рост температуры особенно в ее нижней части (зимой на уровне 1000 гПа КНЛТ= $0,43^{\circ}\text{C}/10$  лет, летом КНЛТ= $0,15^{\circ}\text{C}/10$ лет), то в стратосфере наблюдается похолодание (так, в нижней стратосфере и зимой и летом КНЛТ достигает значения  $-0,370^{\circ}\text{C}/10$  лет). Наибольшая межгодовая изменчивость, согласно распределению СКО, наблюдается в мезосфере (зимой на высоте 60 км СКО= $6,97^{\circ}\text{C}$ ), где летние температуры ниже зимних. Так, на уровне 0,01 гПа (80 км) летом ТВ= $-99,8^{\circ}\text{C}$ , а зимой  $-73^{\circ}\text{C}$ . Тенденция похолодания в летней стратосфере проявляется на более низких уровнях, чем зимой. Возможно, это объясняется тем, что зимой в стратосфере динамические процессы протекают более активно - в стратосфере возникают внезапные потепления, в условиях установившейся западной циркуляции на стратосферных уровнях планетарные волны проникают из тропосферы через тропопаузу вверх и др., что сдерживает понижение ТВ.

Анализ первых разностей ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) низкочастотной компоненты (НЧК) с периодом более 20 лет средней зимней и средней летней ТВ на территории северной Евразии до уровня 32 км выявил расположение и интенсивность очагов потепления и похолодания в 32-х километровой толще атмосферы. В частности, зимой в тропосфере в 1975–1990 и 2005–2020 гг. выделяются зоны интенсивного роста температуры, в то же время, в нижней стратосфере формируется область понижения температур, которая значительно усиливается в средней стратосфере. В летний период контрасты изменения температуры выражены заметно слабее. Выделяется обширный очаг потепления в тропосфере с 1985 по 2015 гг., в стратосфере же в слое 18–26 км в 1975–2000 гг. происходило значительное похолодание. Анализ рассчитанных коэффициентов корреляции ( $r$ ) между температурой различных изобарических уровней показывает, что связи наиболее тесные в тропосфере, они ослабевают и меняют знак с положительного на отрицательный при переходе через тропопаузу.

Одной из важнейших особенностей стратосферной циркуляции (СЦ) является наличие ее сезонных перестроек – весной западная циклоническая циркуляция переходит в летнюю антициклоническую, а осенью процесс идет в обратном направлении. При этом даты перестроек, особенно весенних испытывают значительный межгодовой разброс. Анализ дат весенних перестроек СЦ и их межгодовой изменчивости путем расчета величины среднего квадратического отклонения (СКО) на 3-х уровнях 10, 20 и 30 гПа выявил следующие закономерности в рассматриваемый период.

В слое 10-30 гПа весенняя перестройка циркуляции чаще всего происходит сверху вниз (в 29 случаях из 42), что находит свое отражение в средних многолетних датах перестроек: 18 апреля на уровне 10 гПа, 19 апреля на уровне 20 гПа и 23 апреля на уровне 30 гПа. Межгодовая изменчивость дат весенних перестроек увеличивается с высотой: на уровне 30 гПа СКО составляет 15 дней, на уровне 20 гПа



– 17 дней и на уровне 10 гПа – 18 дней. Сроки весенних перестроек на уровнях 10 и 20 гПа достаточно близки. В 33 случаях из 42 разница по модулю не превышает трех дней. Коэффициент линейной корреляции между датами перестроек на уровнях 10 и 20 гПа равен 0,97.

Сроки весенних перестроек на уровнях 10 и 30 гПа отличаются сильнее, в отдельные годы разница может достигать 22-25 (1986, 2003, 2014, 2017 гг.) и даже 40 дней (1992 год). В эти годы перестройка циркуляции на уровнях 10 и 20 гПа происходила в ранние сроки (2 декада марта – 1 декада апреля), а на уровне 30 гПа еще долго сохранялся зимний режим циркуляции. Поздние перестройки происходят более синхронно на рассматриваемых трех уровнях; разница в датах не превышает 10 дней. Коэффициент линейной корреляции между датами перестроек на уровнях 10 и 30 гПа составляет 0,84.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-27-20080).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и мезосферы. М., Физматлит, 2011, 452 с.
2. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Васильев А.А., Гурьянов В.В. Термический режим в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере Северного полушария в 1979-2016 гг. / Метеорология и гидрология. – 2019. – №8. – 5–20.
3. Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М.; Климатические изменения на территории России в конце XX – начале XXI века / Метеорология и гидрология. – 2021. – №10. – 14–26.

## Investigation of Rossby wave breaking features in the region of jet streams

Gochakov A.V.<sup>1</sup>, Antokhina O.Yu.<sup>2</sup>, Krupchatnikov V.N.<sup>1,3</sup>, Martynova Yu.V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Siberian Regional Hydrometeorological research institute, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia,

<sup>3</sup>ICMMG SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [vkrupchatnikov@yandex.ru](mailto:vkrupchatnikov@yandex.ru)

The report discusses some results of the study of Rossby wave breaking processes in the region of a subtropical jet stream [1]. In [2], an overview of the key processes associated with the overturning (collapse) of Rossby waves was presented, as well as a method for their identification and clustering. In the present paper, the possibilities of applying this method to the analysis of climatology and long-term variability in the number of capsizing are discussed. The formation of large-scale weather-forming phenomena in the Troposphere is often associated with the breaking of long Rossby waves [3,4,5,6]. In [7, 8], the Rossby wave breaking (RWB) process was defined. Depending on the direction of inclination of the overturning PV contours, RWB is subdivided into the anticyclonic type of wave breaking (hereinafter referred to as AC-type) and the cyclonic type (C-type) [12]. Wave breaking processes are closely related to the regimes and characteristics of jet streams. The jet flow regime is largely determined by the ratio between the two types of jets observed in the lower atmosphere: subtropical and mid-latitude. In addition to different latitudinal positions, these two types of jet streams differ in their vertical structure, variability characteristics, and outward forcing. The subtropical jet is concentrated near the subtropical boundary of the Hadley cell, it is relatively stable and is largely due to the transfer of the absolute angular momentum by the mean meridional circulation. The report presents the results of a study of climatology and variability of anticyclonic (AC-type) and cyclonic (C-type) overturning processes in the region of the subtropical jet stream. For this, potential vorticity data at the level of 350K from two reanalysis archives ERA-Interim (EI) and ERA5 (E5) for 1979-2018 were used. with a resolution of 0.75°.

*This work was supported by the Russian Science Foundation (project code 19-17-00154).*

#### REFERENCES:

1. A V. Gochakov, O. Yu. Antokhina, V. N. Krupchatnikov, Yu. V. Martynova Long-term Variability of Rossby Wave Breaking in the Sub tropical Jet Stream Area // Russian Meteorology and Hydrology, 2022, Vol. 47, No. 2, pp. 79–88.
2. Gochakov A. V., Antokhina O. Yu., Krupchatnikov V. N., Martynova Yu. V. Method for identification and clustering of Rossby wave breaking events in the Northern Hemisphere based on the analysis of the contour of a potential vortex on an isentropic surface. - Meteorology and Hydrology, 2021, No. 1, p. 17-28.

3. Barnes E.A., Hartmann D.L. Detection of Rossby wave breaking and its response to shifts of the mid-latitude jet with climate change. - *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012. vol. 117, No. D9.
4. Krupchatnikov V.N., Borovko I.V. Rossby wave breaking and blocking events associated with some atmospheric circulation regimes in the Northern Hemisphere based on a climate system model (PlaSim-ICMMG-1.0). - *J. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 611, p. 012015
5. Lupo A., Jensen A., Mokhov I., Timazhev A., Eichler T., Efe, B. Changes in Global Blocking Character in Recent Decades. - *J. Atmosphere*, 2019, vol. 10, No 2, p. 92.
6. Maher P. et al. Is the subtropical jet shifting poleward? - *J. Climate Dynamics*, 2019, vol. 54, No 3-4, pp. 1741–1759
7. McIntyre M. E., Palmer T. N. Breaking planetary waves in the stratosphere. - *J. Nature*, 1983, vol. 305, pp. 593–600.
8. McIntyre M. E., Palmer T. N. The 'surf zone' in the stratosphere. - *J. Atmos. Terrest. Phys.*, 1984, vol. 46, No. 9, pp. 825–849.
9. Orlanski I. Bifurcation of eddy life cycles: Implications for storm track variability. - *J. Atmos.Sci.*, 2003, vol. 60, No. 8, pp. 993–1023
10. Postel G.A., Hitchman M.H. A Climatology of Rossby Wave Breaking along the Subtropical Tropopause. - *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, vol. 56, No. 3, pp. 359–373.
11. Strong C., Magnusdottir G. Tropospheric Rossby wave breaking and the NAO/NAM. - *J. Atmos. Sci.*, 2008, vol. 65, No. 9, pp. 2861–2876.
12. Thorncroft C. D., Hoskins B. J., McIntyre M. E. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. - *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1993, vol. 119, No. 509, pp. 17–55.

## Исследование особенностей обрушения волн Россби в районе струйных течений

Гочаков А.В.<sup>1</sup>, Антохина О.Ю.<sup>2</sup>, Мартынова Ю.В.<sup>4</sup>, Крупчатников В.Н.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [vkрупчатnikov@yandex.ru](mailto:vkрупчатnikov@yandex.ru)

В докладе обсуждаются некоторые результаты исследования процессов обрушения волн Россби в районе субтропического струйного течения [1]. В работе [2] был представлен обзор ключевых процессов, связанных с опрокидыванием (обрушением) волн Россби, а также метод их идентификации и объединения в кластеры. В представленной работе обсуждаются возможности применения данного метода к анализу климатологии и долговременной изменчивости количества опрокидываний. Образование крупномасштабных погодообразующих явлений в Тропосфере часто связано с процессом обрушения длинных волн Россби [3,4,5,6]. В работах [7, 8] было дано определение процесса обрушения волн Россби (Rossby wave breaking - RWB), который возникает, когда адвекция в вихревом потоке приводит к меридиональному опрокидыванию контуров потенциальной завихренности (PV-potential vorticity или P), так что меридиональная производная PV отрицательна. В зависимости от направления наклона опрокидывающихся контуров PV, RWB подразделяется на антициклонический тип обрушения волн (далее в работе АС-тип) и циклонический тип (С-тип) [12]. Обрушение волн Россби происходит при образовании потоков потенциальной завихренности с перемещением к полюсу воздушных масс с низкой PV и к экватору воздуха с высокой PV [12]. Так, процесс обрушения волны, при котором поток низкой PV смещается к полюсу и на запад относительно потока высокой PV, классифицируется как АС-тип обрушения. В случае, когда поток низкой PV смещается к полюсу и на восток относительно потока высокой PV, определяется как С-тип обрушения. Два типа RWB обладают разными свойствами переноса и перемешивания. В процессах RWB существует множество закономерностей, которые изучены в разной степени. Данные наблюдения поля потенциальной завихренности (PV) показывают, что верхняя часть тропосферы субтропиков является областью сильного обрушения волн Россби, аналогично «зоне приобья» в средних широтах зимней стратосферы. Так же, как и в стратосфере, тропосферный поток здесь очень неоднороден, с волнообразным типом в непосредственной близости от областей обрушения волн, где течение очень нелинейно.

**Процессы опрокидывания волн тесно связаны с режимами и характеристиками струйных течений.** Режим струйного течения во многом определяется соотношением между двумя типами струй, наблюдаемых в нижней атмосфере: субтропическими и среднеширотными. Помимо различного широтного положения эти два типа струйных течений различаются по своей вертикальной структуре, характеристикам изменчивости и внешнему форсингу. **Субтропическая струя сконцентрирована вблизи субтропической границы ячейки Гадлея**, она относительно устойчива и в значительной степени обусловлена переносом абсолютного углового момента средней меридиональной циркуляцией. Среднеширотная струя расположена внутри ячейки Ферреля и связана со шторм-треками в средних широтах. Эта струя образуется в основном в результате конвергенции потока вихревого момента бароклинических волн. Обе струи характеризуются вертикальным сдвигом ветра, который связан с меридиональным градиентом температуры на нижнем уровне, но вертикальный сдвиг и градиент температуры сильнее для субтропической струи. Два типа струй могут сливаться в единую струю или разделяться на две отдельные взаимодействующие струи, что приводит к сложному поведению. В атмосфере сильная струя в верхней тропосфере вблизи субтропической границы ячейки Гадлея наблюдается зимой в обоих полушариях. Зимой в Северном полушарии струя имеет выраженную долготную структуру, с двумя струями над Атлантическим океаном и одной струей над Азией и Тихим океаном. Тем не менее, зимняя струя Тихого океана в Северном полушарии, которую часто называют «субтропической» из-за ее широтного положения, частично формируется и поддерживается вихрями, точнее ее можно рассматривать как струю с термическим и вихревым форсингом. Для летнего периода очень интересной особенностью является т.н. «скачок к северу» субтропической струи. Это тесно связано с увеличением числа обрушений волн и блокирований в летний период. Подход с использованием представления возмущений PV в виде нормальных мод в рамках моделей динамики атмосферы, показывает, что масштаб длины вихря является ключевым параметром, определяющим характер обрушения волн и обратной связи вихрей со средним потоком. Когда бароклинность в верхних слоях тропосферы усиливается, длинные волны становятся более неустойчивыми и обрушаются антициклонически, сдвигая струю к полюсу. В ряде исследований было показано, что повышение влажности способствует более частому возникновению циклонических обрушений волн по сравнению с антициклоническими обрушениями. В работе [9] дано объяснение этому факту: скрытое тепловыделение увеличивает интенсивность циклонов в большей степени, чем антициклонов, и, следовательно, происходит больше событий С-типа. Поскольку АС-тип и С-тип смещают струю, соответственно, к полюсу и к экватору [12], увеличение С-типа будет иметь тенденцию перемещать струи к экватору. В работе [11] был впервые проведен объективный анализ антициклонических и циклонических типов обрушения волн Россби для Северного полушария за зимний период 1958–2006 гг. Авторы показали, что зимняя климатология частоты и размера (зональной протяженности) как антициклонического, так и циклонического типа обрушения волн Россби на изоэнтропической поверхности 350 К в Северном полушарии, и пространственное распределение RWB согласуется с теоретическими представлениями о RWB в потоке со сдвигом. При распространении волн Россби из внетропической тропосферы в стратосферу, основным потоком является зонально осредненный поток со сдвигом, который включает западные ветры, сменяющиеся восточными ветрами. В предположении, что основной поток движется со скоростью, которая является функцией широты, и что волны имеют определенную фазовую скорость, существует место, где скорость потока совпадает с фазовой скоростью волны. Это линия, которая при фиксированном значении широты называется критической линией, а ее окрестность – критическим слоем, где происходит обрушение волн Россби.

В докладе представлены результаты исследования климатологии и изменчивости процессов антициклонического (АС-тип) и циклонического (С-тип) опрокидываний в районе субтропического струйного течения. Для этого были использованы данные потенциальной завихренности на уровне 350К из двух архивов реанализа ERA-Interim (EI) и ERA5 (E5) за 1979-2018 гг. с разрешением 0.75°. В целом результаты применения методов для двух архивов согласуются, однако для циклонических опрокидываний существует большая неопределённость, особенно в региональных масштабах в периоды максимальной повторяемости (лето, осень). Характер циклонических опрокидываний для рассматриваемых архивов нуждается в дальнейшем детальном исследовании на синоптическом уровне.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 19-17-00154).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. A V. Gochakov, O. Yu. Antokhina, V. N. Krupchatnikov, Yu. V. Martynova Long-term Variability of Rossby Wave Breaking in the Sub tropical Jet Stream Area // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, Vol. 47, No. 2, pp. 79–88.
2. Гочаков А. В., Антохина О. Ю., Крупчатников В. Н., Мартынова Ю. В. Метод идентификации и объединения в кластеры событий обрушения волн Россби в Северном

- полушарии на основе анализа контура потенциального вихря на изоэнтропической поверхности. - *Метеорология и гидрология*, 2021, №1, с. 17-28.
3. Barnes E.A., Hartmann D.L. Detection of Rossby wave breaking and its response to shifts of the mid-latitude jet with climate change. - *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012. vol. 117, No. D9.
  4. Krupchatnikov V.N., Borovko I.V. Rossby wave breaking and blocking events associated with some atmospheric circulation regimes in the Northern Hemisphere based on a climate system model (PlaSim-ICMGG-1.0). - *J. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 611, p. 012015
  5. Lupo A., Jensen A., Mokhov I., Timazhev A., Eichler T., Efe, B. Changes in Global Blocking Character in Recent Decades. - *J. Atmosphere*, 2019, vol. 10, No 2, p. 92.
  6. Maher P. et al. Is the subtropical jet shifting poleward? - *J. Climate Dynamics*, 2019, vol. 54, No 3-4, pp. 1741–1759
  7. McIntyre M. E., Palmer T. N. Breaking planetary waves in the stratosphere. - *J. Nature*, 1983, vol. 305, pp. 593–600.
  8. McIntyre M. E., Palmer T. N. The 'surf zone' in the stratosphere. - *J. Atmos. Terrest. Phys.*, 1984, vol. 46, No. 9, pp. 825–849.
  9. Orlanski I. Bifurcation of eddy life cycles: Implications for storm track variability. - *J. Atmos.Sci.*, 2003, vol. 60, No. 8, pp. 993–1023
  10. Postel G.A., Hitchman M.H. A Climatology of Rossby Wave Breaking along the Subtropical Tropopause. - *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, vol. 56, No. 3, pp. 359–373.
  11. Strong C., Magnusdottir G. Tropospheric Rossby wave breaking and the NAO/NAM. - *J. Atmos. Sci.*, 2008, vol. 65, No. 9, pp. 2861–2876.
  12. Thorncroft C. D., Hoskins B. J., McIntyre M. E. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. - *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1993, vol. 119, No. 509, pp. 17–55.

## The seasonal and multi-year variability of turbulent exchange between the seas of the western sector of russian Arctic and the atmosphere

Romanenko V.A.

Lomonosov Moscow State University, Scientific research computing center, Moscow, Russia  
E-mail: [romanenko.victor.geo@mail.ru](mailto:romanenko.victor.geo@mail.ru)

The Barents and the Kara seas are the marginal seas of the north-east part of Russia. This water area is very important for Russia due to economic activities. Thus it is very important to research the climatology of that region. Within this work next researches was performed: Calculation and analysis of the distribution of the total average annual and average monthly fluxes over the waters of the Barents and Kara Seas, calculation and analysis of spatial and temporal variability of heat fluxes over the Barents and Kara Seas, calculation and analysis of trends in the annual sum of heat fluxes over the Barents and Kara Seas. Era-Interim reanalysis was used for initial data. The novelty of this study is the spatial and temporal variability of heat fluxes were calculated for the first time. In addition, the trend of the annual amount of heat fluxes was investigated for the first time. The main results of this work: The spatial structure of the foci of maximum and minimum heat transfer over the Barents and Kara Seas in recent decades has not undergone significant changes compared to the middle and second half of the XX century. In winter and spring, the Barents Sea is characterized by strong spatial variability of turbulent heat fluxes, in summer and autumn, the spatial variability of turbulent heat fluxes in both seas is low. However, in the Kara Sea, the maximum variability is expressed in autumn, which is explained by active ice melting. In the Kara Sea, the temporal variability of sensible heat flux in 4 times less than in the Barents Sea, since inversions are often formed and destroyed over the water area during the year. Due to the predominance of fogs during the year, the variability of latent heat flux is low. From 1989 to 2000 the positive trend of heat fluxes was detected. It is explained by increase of temperature. From 2000 to 2010 there is a negative trend of heat fluxes, which can be explained by the pause of global warming.



# Сезонная и многолетняя изменчивость турбулентного энергообмена между морями западного сектора российской Арктики и атмосферой

**Романенко В.А.**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр,  
Москва, Россия  
E-mail: romanenko.victor.geo@mail.ru

**Б**аренцево и Карское море - окраинные моря северо-запада России. Они относятся к Западному сектору российской Арктики, стратегически важному району для нашей страны, поскольку южная и юго-западная часть Баренцева моря вследствие тепляющего воздействия течений Атлантического океана даже в самые суровые годы не замерзает. Этот факт положительно влияет на хозяйственную деятельность в регионе. В связи с этим изучение климатологии данного региона очень актуально в настоящее время. Турбулентный теплообмен осуществляется в виде потоков явного (H) и скрытого тепла (LE). Их существование влияет на усиление и ослабление циклонической деятельности в арктическом регионе, на адвекцию тепла и влаги, на интенсификацию западного переноса [2].

В рамках настоящей работы производились следующие исследования:

- Расчет и анализ распределения суммарных среднесезонных и среднемесячных потоков H и LE над акваториями Баренцева и Карского морей.
- Расчет и анализ пространственной и временной изменчивости потоков тепла над Баренцевым и Карским морями.
- Расчет и анализ трендов годовой суммы потоков тепла над Баренцевым и Карским морями.

Изучением потоков тепла над Арктическим бассейном занимались различные ученые. В справочнике [1] рассматривалось пространственное распределение турбулентных потоков тепла в Баренцевом и Карском морях. Работы последнего десятилетия дополняют ранние исследования. В частности, в статьях [2,3] рассматривался крупномасштабный процесс взаимодействия атмосферы и океана в атлантическом секторе Арктики, был сделан вывод о взаимосвязи турбулентных потоков тепла, площади ледового покрова и характере атмосферной циркуляции, изучалась связь с процессом «атлантизации» - ослаблением стратификации в океане, сокращением ледового покрова в западных акваториях морей российской Арктики, подверженным влиянию теплого Нордкапского течения.

Новизна данного исследования заключается в том, что пространственная и временная изменчивость H и LE была рассчитана впервые. Кроме того, впервые был исследован тренд годовой суммы потоков тепла.

В качестве исходных данных использовались среднемесячные и среднегодовые потоки H и LE, полученные из реанализа Era-Interim [4] в Вт/м<sup>2</sup> с 6 часовым временным разрешением, с пространственным разрешением 0.125\*0.125 градусов по широте и долготе за период с 1979 по 2016 гг. для Баренцева и Карского морей. Для отражения интегральных величин по площади моря, потоки были переведены в МДж/м<sup>2</sup>. Наибольшие потоки как H, так и LE наблюдаются над южной частью Баренцева моря, в особенности над теплым Нордкапским течением (900 - 1200 МДж/м<sup>2</sup>), наименьшие - над севером Баренцева моря и над Карским морем в целом (200 - 300 МДж/м<sup>2</sup>), поскольку данные акватории большую часть года покрыты сплошным льдом. Стоит отметить, что пространственная структура очагов максимальной и минимальной теплоотдачи над Баренцевым и Карским морями в последние десятилетия не претерпела существенных изменений по сравнению с серединой и второй половиной XX века.

Для анализа пространственной изменчивости турбулентных потоков для каждого моря рассчитывались диаграммы размаха на основе среднемесячных данных. В зимнее и весеннее время для Баренцева моря характерна сильная пространственная изменчивость турбулентных потоков тепла, обусловленная тем, что в районе теплого Нордкапского течения велики значения H и LE. В северной части моря, а также в Карском море потоки тепла в данное время года невелики, поскольку теплообмен между атмосферой и покрытой льдом поверхностью моря практически отсутствует. Летом и осенью пространственная изменчивость турбулентных потоков тепла в обоих морях низкая. Однако в Карском море максимум изменчивости выражен в осеннее время, что объясняется активным ледотаянием.

Для анализа временной изменчивости H и LE рассчитывались диаграммы размаха отдельно для каждого моря на основе данных о средних потоках для каждого года с 1979 по 2016 гг. за каждый месяц. Временная изменчивость отражает разброс многолетних значений для каждого месяца. Она значительна в холодное время года для Баренцева моря и объясняется активной циклонической деятельностью. В теплые годы при высокой ее активности потоки большие. В Карском море временная изменчивость H в



4 раза меньше, чем в Баренцевом, поскольку в течение года над акваторией часто формируются и разрушаются инверсии. Из-за преобладания в течение года туманов невелика изменчивость LE. Временная изменчивость потоков не сильно различается между месяцами, так как синоптическая обстановка над данным морем более однородна в течение года по сравнению с таковой над Баренцевым. Однако изменчивость H на порядок больше изменчивости LE, так как LE незначителен вследствие того, что море большую часть года покрыто льдом.

Для выявления возможных изменений потоков тепла были построены и проанализированы их многолетние изменения для каждого моря. Оказалось, что в течение всего исследуемого периода значения суммарного по площади моря годового потока сильно изменялись. В наибольшей степени это характерно для Баренцева моря. В многолетних изменениях H с 1989 по 2000 годы прослеживается положительный тренд как для Баренцева, так и для Карского моря, который связан с активным потеплением воздуха и ростом градиента температур. Однако с 2000 по 2010 гг. наблюдался отрицательный тренд потока H, вызванный паузой в глобальном потеплении и большой инерцией океана. На протяжении всего исследуемого периода линейный тренд изменения суммарного потока LE не выражен, поскольку рассматриваемые десятилетия зашумлены другими процессами.

*Благодарю за консультации и сотрудничество д.г.н. профессора Суркову Г.В.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Ред. Ф.С.Терзиева и др. Л.: Гидрометеоиздат, 1990, 280с.*
2. *Сизов А.А., Н.В. Михайлова, Т.М. Баянкина. Режимы крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана в Норвежском и Баренцевом морях. Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 2019, с. 615 - 618.*
3. *Polyakov et al., Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean// Science. 2017. 356, 285–291.*
4. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

## Assessment of thunderstorm activity above 60° North latitude in the Russian Federation

**Kravets K.A.<sup>1</sup>, Nечepurenko O.E.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia,

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [foreveryoungfox@mail.ru](mailto:foreveryoungfox@mail.ru)

The study of the spatial and temporal variability of thunderstorm activity in the northern regions in recent decades is an extremely relevant topic. First of all, this is due to the increased attention to global climate change on the planet. Thunderstorms in the north and near the Arctic Circle are being recorded more and more often, which makes the study of this region a necessity.

The research methodology consists of the following: formation of an array of weather stations above 60N; compilation of a database on dangerous convective phenomena from the WAREP base for a 7-year period (2015–2021); analysis of changes in thunderstorm activity; comparison of the number of days per year with a thunderstorm with climatological indicators; and presentation of the results in GIS-mapped form. The number of weather stations studied in the work is 40 (8 of them belong to the Arctic).

The most thunderstorm year can be considered 2020 (146 days), the least – 2015 (71 days). Active thunderstorm activity occurs in July. When moving from west to east, the number of days with a thunderstorm gradually decreases. The highest values are in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug and the Tyumen Region; the lowest values are in Yakutia and Chukotka. In the Arctic sector, August can be considered the stormiest month.

Based on the State Report "On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2020," it can be concluded that air temperatures are gradually increasing [1]. Thunderstorms are associated with the presence of strong instability of air stratification at high moisture content [2, 3]. The higher the air temperature in the northern regions and in the Arctic, the more active is the melting of sea ice, vast expanses of water are released, the evaporation of which is the cause of the formation of thunderclouds.

*This research is supported by Russian Science Foundation (RSF), project # 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494> (accessed on 18 April 2022).*

## REFERENCES:

1. *On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2020. State report.* – Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2021. – 864.
2. Gorbatenko V.P. Synoptic conditions of formation and development of thunderstorms over the territory of Western Siberia and Kazakhstan // *Bulletin of Tomsk State University.* 2001. No. 274. P. 148-154.
3. Tarasov L.V. *Winds and thunderstorms in the Earth's atmosphere: a textbook.* – Dolgoprudny.: Intellect ID, 2011. [In Russian]

# Оценка грозовой активности выше 60° Северной широты в РФ

Кравец К.А.<sup>1</sup>, Нечепуренко О.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИ Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [foreveryoungfox@mail.ru](mailto:foreveryoungfox@mail.ru)

Изучение пространственно-временной изменчивости грозовой активности в северных районах в последние десятилетия является крайне актуальной темой. В первую очередь, это связано с возросшим вниманием к глобальным изменениям климата на планете. Многие ученые и различные институты по всему миру впервые сталкиваются со столь явными последствиями и фактами – грозы на севере и вблизи Полярного круга фиксируются все чаще. Арктический регион всегда притягивал внимание самых разных научных сфер. Сведений, интересных с точки зрения метеорологии, недостаточно, и в эпоху климатических перемен более внимательное изучение северных широт становится необходимостью.

Материалом для исследования служит информация о количестве грозовых дней, представленная в виде кода WAREP, для временного промежутка в 7 полных лет (2015–2021 гг.) над территориями севернее 60° и Арктическим районом РФ. Методика заключается в следующем: формирование массива метеостанций выше 60° с.ш., составление базы данных по опасным конвективным явлениям из журнала WAREP за 7-летний период, анализ изменений грозовой активности, сравнение числа дней в году с грозой с климатологическими показателями, представление полученных результатов в ГИС-картированном виде.

Количество метеорологических станций, соответствующих основному критерию отбора по широте, а также с фиксацией интересующих нас явлений грозы, составляет 40. В их числе к Арктическому сектору принадлежат 8 пунктов, анализируемых отдельно.

При выделении границ Арктики применяются следующие трактовки, систематизированные специальной комиссией при Арктическом совете – АМАР – рабочая группа Арктического Совета под названием «Программа Арктического мониторинга и оценки» (The Arctic Monitoring and Assessment Programme):

- По широте Северного полярного круга (66,5° с.ш.);
- Севернее июльской изотермы +10°C;
- По границе безлесной территории;
- По океанической границе Северного ледовитого океана с учетом солёности и температуры воды [1].

В настоящей работе использовался первый вариант определения Арктической территории. Основные результаты анализа грозовых явлений выше 60° с.ш. представлены ниже.

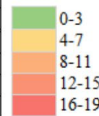
Изменение количества грозовых дней по годам отображено в таблице 1. Максимальное количество дней с грозой выявляется на станции Радужный (Тюменская область): в 2016 году оцениваемый показатель равен 17. Наиболее грозовым годом можно считать 2020 (146 дней). Год с наименьшим количеством дней с грозой – 2015 (71 день). Среди Арктических станций РФ выделяются станции Игарка (скачок от 1 дня с грозой в год до 7) и Усть-Оленек (в 2020 г. там впервые за рассматриваемый период наблюдались грозы).

Распределение в наиболее грозовой год представлено на рисунке 1. Максимум наблюдается в Ханты-Мансийском АО (ст. Угут) – 14 дней, минимальные значения принадлежат станциям Красноярского края, Якутии и Чукотки – не более 1 дня.

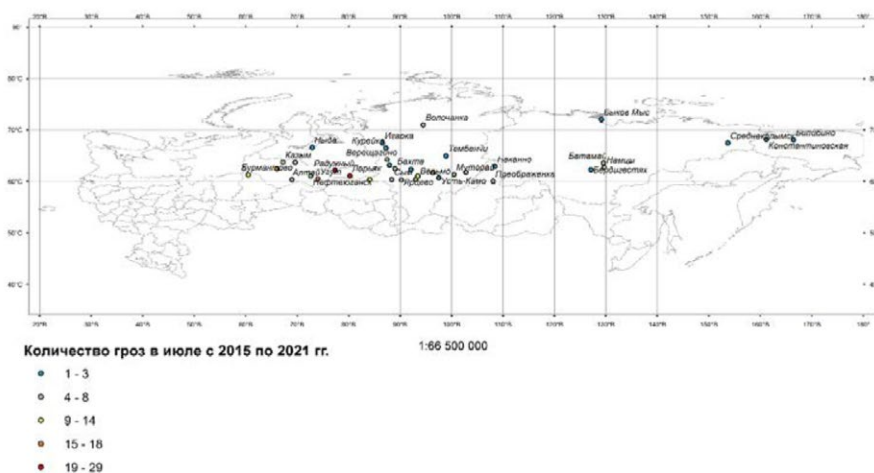
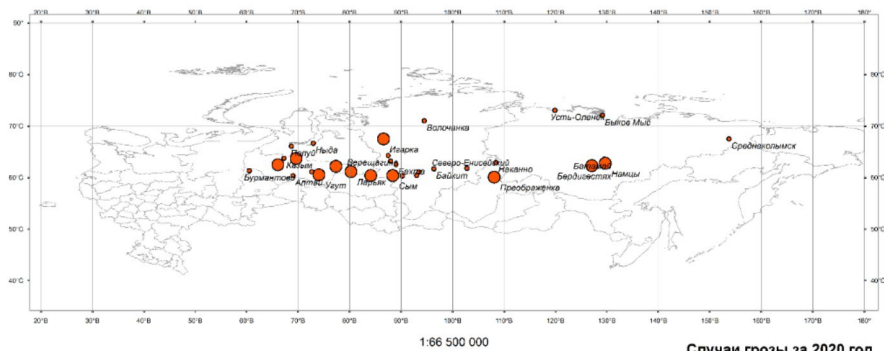
Активная грозовая деятельность приходится на июль (рис. 2). При движении с Запада на Восток количество дней с грозой постепенно уменьшается. Наибольшие значения приходятся на Ханты-Мансийский автономный округ и Тюменскую область, что объясняется усилением роли циклонов в летний период и формированием штормовой погоды в этом регионе; минимальные – наблюдаются в Якутии и

		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Свердловская область	Бурмантово	6	7	-	-	-	4	10
Ханты-Мансийский АО	Алтай	11	7	7	3	5	2	7
	Казым	-	5	2	2	5	4	2
	Ларьяк	7	11	7	5	11	13	11
	Нефтеюганск	13	7	11	2	2	2	2
	Угут	7	9	12	5	8	14	7
Ямало-Ненецкий АО	Ныда	-	5	3	1	2	3	4
	Полуй	-	2	2	2	-	2	-
Тюменская область	Октябрьское	-	9	16	4	3	6	4
	Радужный	10	17	12	4	5	8	4
Томская область	Ванжиль-Кынак	3	9	6	5	10	8	6
Красноярский край	Байкит	-	-	6	10	9	5	8
	Бахта	-	-	1	7	7	4	1
	Вельмо	-	-	1	10	6	5	4
	Верещагино	-	-	5	4	2	1	1
	Верхнеимбатск	-	-	4	2	4	3	2
	Волочанка	-	-	3	3	4	1	-
	Игарка	-	2	2	1	1	7	1
	Кузюмовка	-	-	1	-	1	-	-
	Курейка	-	-	-	-	-	-	1
	Муторай	-	-	1	6	7	-	3
	Северо-Енисейский	-	-	5	2	11	1	3
	Стрелка Чуныя	2	-	4	1	2	2	4
	Сым	-	-	6	8	10	9	8
	Тембенчи	-	-	-	-	3	-	-
Усть-Камо	1	-	1	1	-	-	-	
Ярцево	-	3	2	5	6	5	3	
Иркутская область	Наканно	-	-	-	-	-	3	2
	Преображенка	6	3	7	8	8	7	3
Республика Саха (Якутия)	Батамай	-	2	-	-	-	1	4
	Бердигестях	-	2	-	-	-	6	4
	Быков Мыс	-	-	-	-	-	1	-
	Намцы	-	6	-	-	-	6	1
	Среднеколымск	-	1	-	-	-	1	-
Усть-Оленек	-	-	-	-	-	3	-	
Чукотский АО	Анадырь	-	1	-	-	-	-	-
	Билибино	2	3	-	-	-	-	-
	Константиновская	1	2	-	-	-	-	-
	Танюрер	1	2	-	-	-	-	-

**Таблица 1.**  
Распределение гроз за период с 2015 по 2021 гг.



**Рис. 1.**  
Год с максимальным количеством гроз.



**Случаи грозы за 2020 год**  
● 1 - 4  
● 5 - 8  
● 9 - 14

**Рис. 2.**  
Месяц с максимумом гроз за период с 2015 по 2021 гг.

Чукотке. В Арктическом секторе грозным месяцем можно считать август, что связано с более поздним прогревом подстилающей поверхности.

Опираясь на Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году», можно сделать вывод о постепенном росте температур воздуха. В течение

1936-2020 гг. повышение среднегодовой температуры составило 1,87°C [2]. Известно, что гроза связана с наличием сильной неустойчивости стратификации воздуха при высоком влагосодержании [3,4]. Чем выше температура воздуха, в том числе в Арктике, тем активнее происходит таяние морских льдов, освобождаются обширные водные пространства, испарение которых является причиной формирования грозных облаков.

Атмосферные процессы в северных регионах, связанные с грозовой деятельностью, требуют повышенного научного внимания, т.к. данные регионы раньше прочих реагируют на климатические изменения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494>.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. ARCTIC MONITORING & ASSESSMENT PROGRAMME, MAPS & GRAPHICS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.amap.no/documents/doc/arctic-boundaries-physical/380>
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. — 864 с
3. Горбатенко В. П. Синоптические условия образования и развития гроз над территорией Западной Сибири и Казахстана // Вестник Томского государственного университета. 2001. № 274. С. 148–154
4. Тарасов Л.В. Ветры и грозы в атмосфере Земли: учебное пособие. -Долгопрудный.: Интеллект ИД, 2011.

## Complex analysis of the variability of the undisturbed electric field in Tomsk

Pustovalov K.N.<sup>1,2</sup>, Nagorskiy P.M.<sup>1</sup>, Oglezneva M.V.<sup>1</sup>, Smirnov S.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University, Russia

E-mail: [const.pv@yandex.ru](mailto:const.pv@yandex.ru)

In the study, estimates of the surface electric field variability in undisturbed atmospheric conditions in Tomsk were obtained. It is noted, the average and mode of the potential gradient in Tomsk under fair-weather conditions are ~280 and 250 V/m, and it is a typical range is 160–370 V/m. The diurnal variations in potential gradient per year on average are characterized by oscillations of the continental type with a double maximum and minimum. The main minimum of diurnal variations is 7 h and the main maximum is 21 h of local time (00 and 14 UTC, respectively). According to the annual mode, the maximum potential gradient is observed in February, and the minimum is recorded in June. In the warm period of the year, the average and range of the potential gradient are 1.2 and 1.5 times, which less than in the cold period.

Acknowledgements: This research is supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-27-00482, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>.

#### REFERENCES:

1. Israël H. Atmospheric Electricity. — Springfield: NTIS, 1973. — 570 p.
2. Harrison R.G. The Carnegie Curve // Surveys in Geophysics. — 2013. — V. 34. — P. 209–232.
3. Bennett A.J., Harrison R.G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // Journal of Physics: Conference Series. — 2008. — V. 142. — P. 012046.
4. Adzhiev A.K., Kupovykh G.V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2015. — V. 51. — 633–638.
5. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // Atmospheric Research. — 2016. — V. 172–173. — P. 119–125.
6. Nicoll K.A., Harrison R.G., Barta V., et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2019. — V. 184. — P. 18–29.
7. VNIIGMI-WDC [Электронный ресурс]. — URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 14.03.2022).



# Комплексный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля в г. Томске

Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>, Нагорский П.М.<sup>1</sup>, Оглезнева М.В.<sup>1</sup>, Смирнов С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

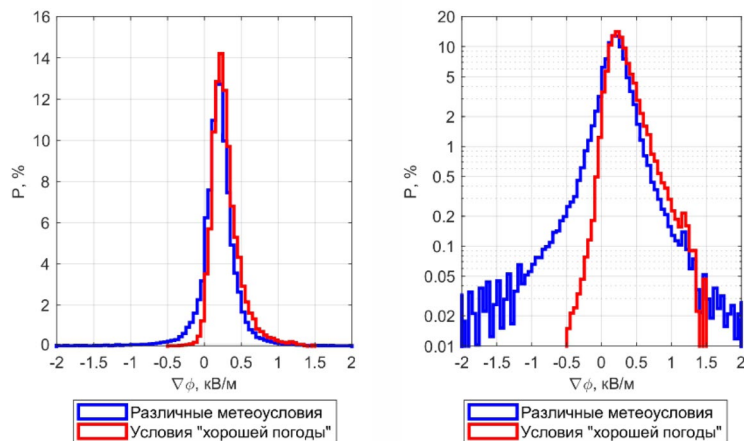
E-mail: const.pv@yandex.ru

Измерения характеристик атмосферного электричества в приземном слое проводятся уже более 150 лет, и дают информацию как об локальном электрическом состоянии, так и о функционировании всей Глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1]. Осреднённая суточная вариация градиента потенциала электрического поля (кривая Карнеги или унитарная вариация), не зависящая от места измерения, представляет собой глобальный ежедневный вклад грозовой активности в районах нарушенной погоды [2]. При этом на изменчивость электрического поля, обусловленную глобальными факторами, накладывается вклад региональных и локальных факторов [3–5]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных природных и антропогенных факторов, для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости электрических величин в различных регионах Земли [6]. К настоящему времени детальные исследования изменчивости электрического поля в невозмущённых условиях (условиях «хорошей погоды»), а также влияющих на них факторов выполнены для ряда регионов земного шара, однако для юга Западной Сибири подобные исследования практически не проводились. В связи с этим, целью данной работы является комплексный анализ изменчивости градиента потенциала электрического поля в условиях «хорошей погоды» на юге Западной Сибири на примере г. Томска, включающий оценку его средних значений и характерных суточных и сезонных вариаций, а также их связи с изменчивостью условий окружающей среды.

Исследование было основано на данных измерений градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ) выполняемых в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС) с помощью флюксметров «Поле-2» (ГГО им. А. И. Воейкова) и «CS110» (Campbell Scientific, Inc). Для оценки влияния различных факторов на изменчивость  $\nabla\phi$  дополнительно привлекались данные синхронных измерений метеорологических и геофизических величин. Анализировались ряды среднеминутных значений величин за 2006–2020 гг.

При отборе случаев, соответствующих условиям «хорошей погоды», использовались данные наблюдений за облачностью и атмосферными явлениями в стандартные сроки, полученные на метеостанции Томск (WMO ID 29430) [7], расположенной в 6 км от ГО ИМКЭС. Для исследования использовались только случаи (3-х часовые интервалы), для которых в предшествующий и текущий стандартные сроки (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 UTC), а также в период между сроками выполнялись следующие условия: общая облачность не более 5 баллов; отсутствуют нижняя облачность и облака вертикального развития; отсутствуют грозы, осадки, туманы, мгла, метели, пыльные бури и задымления; средняя скорость ветра менее 6 м/с. Далее отбирались вариации  $\nabla\phi$ , соответствующие отобранному интервалу времени, и производился их статистический анализ.

Перейдём к анализу результатов. Согласно рисунку 1, ход градиента потенциала в Томске в условиях «хорошей погоды», в целом, определяется логнормальным распределением. При этом имеет место сильная асимметрия распределения – правое «плечо» распределения более пологое чем левое. Значения  $\nabla\phi$  в условиях «хорошей погоды» в подавляющем большинстве случаев являются положительными.



**Рис. 1.** Распределение  $\nabla\phi$  в различных метеорологических условиях и в периоды «хорошей погоды» в линейном (слева) и логарифмическом масштабах оси ординат (справа).



Вершина распределения  $\nabla\phi$ ) в невозмущённых атмосферных условиях смещена вправо, а его основание является более узким чем в распределение  $\nabla\phi$ ) в различных метеоусловиях.

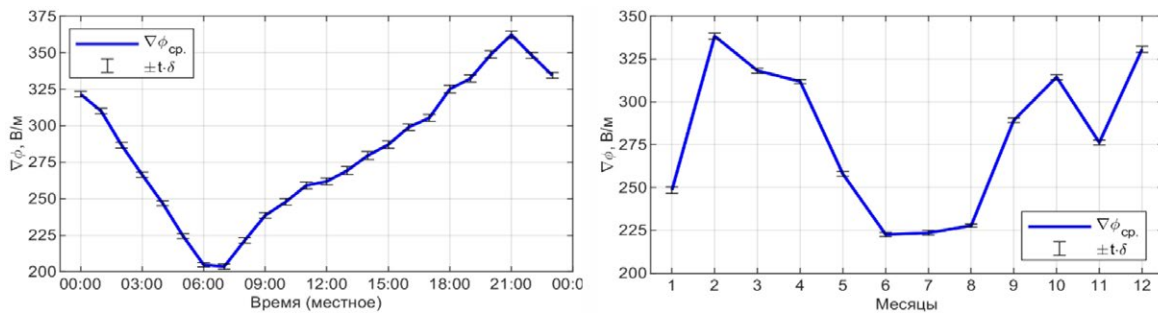
Среднее арифметическое и модальное значения  $\nabla\phi$ ) в Томске в условиях «хорошей погоды», согласно табл. 1, составляют 282 и 252 В/м, что, соответственно, в 1,6 и 1,3 раза больше, чем аналогичные значения для различных метеорологических условий. Типичный диапазон изменения  $\nabla\phi$ ) (P25÷P75) в условиях «хорошей погоды» составляет 160–370 В/м.

**Таблица 1.**

Среднее арифметическое (M), среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ), медиана (Me), интерквартильный размах (IQR), а также значения 5-, 25-, 75- и 95-перцентилей (P5, P25, P75 и P95) для  $\nabla\phi$ ) в периоды «хорошей погоды» (I) и в различных метеоусловиях (II).

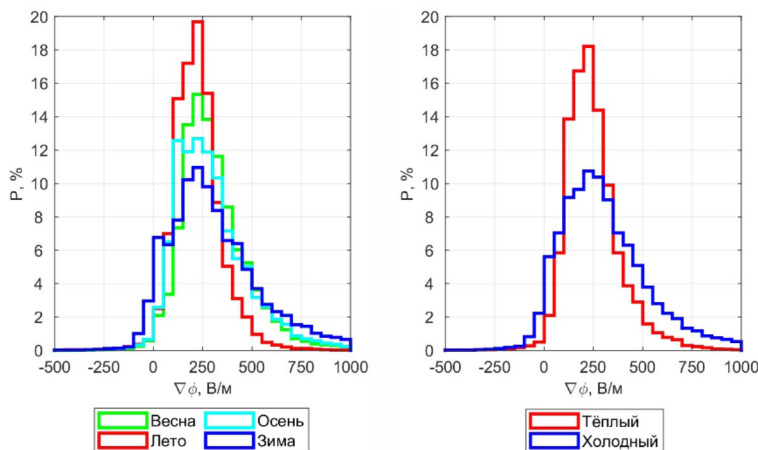
Условия	M, В/м	$\sigma$ , В/м	Me, В/м	IQR, В/м	P5, В/м	P25, В/м	P75, В/м	P95, В/м
I	282	182	252	211	37	161	372	638
II	180	680	195	221	-218	86	307	588

Согласно рис. 2, среднегодовой суточный ход  $\nabla\phi$ ) имеет характерный вид с утренним минимумом (~ 7 ч) и вечерним максимумом (~ 21 ч), который согласно классификации [1, 5] соответствует континентальному типу. В летние месяцы наблюдаются вторичные максимум и минимум, приходящиеся на ~10 и ~13 ч соответственно, обусловлены конвективным генератором. Внутригодовую изменчивость  $\nabla\phi$ ) можно описать простой волной с минимумом летом и максимумом зимой. Весной и осенью, в целом, отмечаются промежуточные значения  $\nabla\phi$ ). Среднее арифметическое и медианное значения  $\nabla\phi$ ) зимой составляют 301 и 267 В/м, весной – 301 и 278 В/м, осенью – 290 и 263 В/м, а летом – 225 и 218 В/м. Распределение значений  $\nabla\phi$ ) во все сезоны описывается логнормальным законом, однако летом оно является более островершинным чем весной и осенью и, тем более, зимой.



**Рис. 2.**

Суточный (слева) и многолетний годовой (справа) ходы  $\nabla\phi$ ) в условиях «хорошей» погоды в Томске. На рисунке:  $\pm t \cdot \delta$  – доверительный интервал, где  $t$  – коэффициент Стьюдента,  $\delta$  – стандартная ошибка среднего арифметического, равная  $\sigma/\sqrt{N}$ ,  $\sigma$  – стандартное отклонение,  $N$  – длина выборки).



**Рис. 3.**

Распределение  $\nabla\phi$ ) в условиях «хорошей погоды» в различные сезоны (слева) и периоды (справа) года.

В целом, в тёплый период года как модальные значения  $\nabla\phi$ ), так и разброс его значений значительно ниже, чем в холодный. Так, среднее арифметическое и медиана  $\nabla\phi$ ) для тёплого периода составляют 246 и 228 В/м, а для холодного – 299 и 270 В/м.

**Таблица 2.**

Статистические характеристики  $\nabla\varphi$  (аналогичных табл. 1) в условиях «хорошей погоды» в тёплый (I; май–сентябрь) и холодный (II; ноябрь–март) периоды.

Период	M, В/м	$\sigma$ , В/м	Me, В/м	IQR, В/м	P5, В/м	P25, В/м	P75, В/м	P95, В/м
I	246	140	228	153	69	158	311	501
II	299	213	270	270	0	146	416	714

Были получены оценки связи изменчивости невозмущённого электрического поля с изменчивостью метеорологических и геофизических величин. Отмечено, что наибольшее влияние на суточные вариации  $\nabla\varphi$  оказывает изменчивость солнечной радиации, с которой связаны изменения интенсивности конвективных потоков и турбулентного перемешивания, которые, в свою очередь, вызывают перераспределение в атмосфере радона и продуктов его распада и аэрозольных частиц. Внутригодовая изменчивость  $\nabla\varphi$ , главным образом, связана с изменчивостью радиационного фона и содержания аэрозоля в воздухе.

*Благодарности.* Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (РНФ), № 22-27-00482, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Israël H. Atmospheric Electricity. – Springfield: NTIS, 1973. – 570 p.*
2. *Harrison R.G. The Carnegie Curve // Surveys in Geophysics. – 2013. – V. 34. – P. 209–232.*
3. *Bennett A.J., Harrison R.G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – V. 142. – P. 012046.*
4. *Adzhiev A.K., Kupovykh G.V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2015. – V. 51. – 633–638.*
5. *Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // Atmospheric Research. – 2016. – V. 172–173. – P. 119–125.*
6. *Nicoll K.A., Harrison R.G., Barta V., et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2019. – V. 184. – P. 18–29.*
7. *ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс] – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения 14.03.2022).*

## Long-term changes in Siberia snow cover characteristics according to different data sets

**Matyukhina A.A.<sup>1</sup>, Voropay N.N.<sup>2,3</sup>, Martynova Yu.V.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geography V.B. Sochavy SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [matyukhina\\_nastya08@mail.ru](mailto:matyukhina_nastya08@mail.ru)

**B**ased on 50 years of observations from 1970 to 2020. For the territory of Siberia, an analysis of the long-term course of the dates of appearance and melting of snow cover (SC), the dates of formation and destruction of stable snow cover (SSC) was carried out using two different data sets - observations at weather stations and satellite data.

Snow cover contributes to significant changes in the radiation and heat balance of the underlying surface compared to open soil, so the data obtained during the study are important characteristics of the state of the environment under modern climate change. Siberia is a vast geographic region in northern Asia, bounded on the west by the Ural Mountains, on the east by watershed ranges running along the Pacific Ocean, on the north by the Arctic Ocean, and on the south by the state border of Russia. Siberia is characterized by a continental and sharply continental climate; spread of permafrost.

Earlier dates of snow cover formation are in september at stations located in the northern latitudes according to satellite observations, and in the north, northeast and mountainous areas of the southeast region according to ground based observations. In some areas in the south of the territory, according to satellite observations, the SC forms in november. Earlier dates of establishing the SSC fall on September: in the northern

latitudes according to satellite observations and to the north, northeast and mountainous areas of the southeast according to ground-based observations. According to satellite observations, SSC is established in october-november, in the territories south of 55° N. latitude. november prevails.

Earlier dates for the destruction of stable snow cover fall on march-april at southern latitudes according to satellite data. With increasing latitude, the date of destruction of the SSC shifts to a later date. Earlier dates of snow cover melting occur in southern latitudes and are observed in april; with increasing latitude, the date of snow cover increases; in the northern territories, snow melts later. According to satellite observations, the SC in the northern regions covers the underlying surface until june, observations at the stations mark the SC until august.

To assess long-term changes, the period with stable snow cover was calculated and analyzed. On the territory of Siberia, there is a reduction in the duration of the SSC period by 2-5 days in 10 years. Figure 1 shows the geographical distribution of trends in changes in the dates of formation of the SC and the establishment of the SSC based on satellite and meteorological data; significant trends are highlighted. In a long-term course, according to observations at weather stations, the appearance of SCs shifts to later periods from 2 to 5 days in 10 years, and this shift occurs at stations in Western Siberia. This conclusion is consistent with the results obtained by V. V. Popova, A. V. Shiryayeva, P. A. Morozova [3].

Figure 6 shows the geographical distribution of trends in the dates of the vanishing of the SP and the destruction of the SSC. Ground and satellite data are consistent over a long period of time, and it can be concluded that in most cases, the timing of snow cover shifts to earlier, by about 2 days every 10 years for two sets of data, which is confirmed by the values of significant trends highlighted in the figures. According to significant satellite data trends, there is a shift in the timing of SSC destruction to earlier ones by 2-5 days in 10 years. Significant trends of observations at weather stations in Western Siberia are dominated by negative values of statistically significant trends, a shift of 5-10 days for 10 years to earlier dates.

The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation states that in the past four decades, according to satellite observations, the area of snow cover in the transitional seasons of the year on the territory of Russia has been decreasing, which is confirmed by the data obtained for the territory of Siberia [5].

## Многолетние изменения характеристик снежного покрова в Сибири по разным наборам данных

**Матюхина А.А.<sup>1</sup>, Воропай Н.Н.<sup>2,3</sup>, Мартынова Ю.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

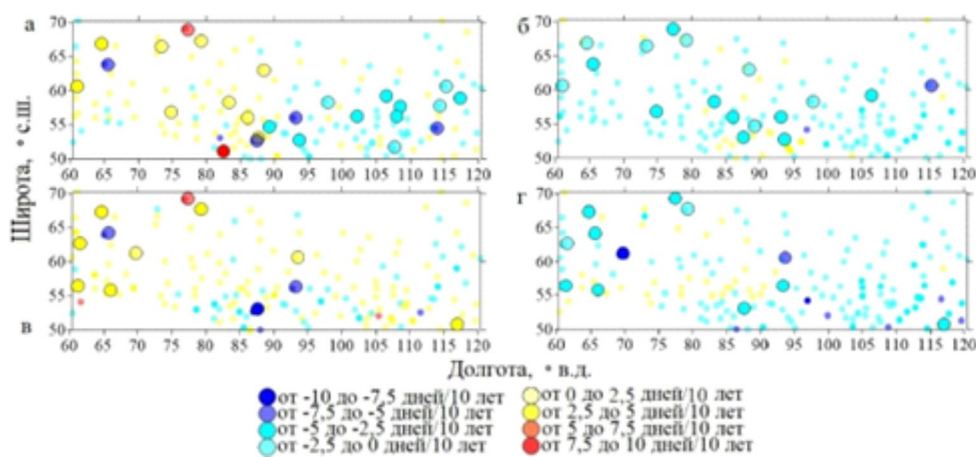
E-mail: [matyukhina\\_nastya08@mail.ru](mailto:matyukhina_nastya08@mail.ru)

При анализе многолетнего изменения дат образования и разрушения снежного покрова за 1970-2020 гг. использованы ежедневные измерения на 160 станциях Сибири, находящихся в пределах 60-120° в.д. и 50-70° с.ш. Использовались ежедневные данные о степени покрытия окрестности станции снегом по 10-балльной шкале. Данные наблюдений были скачаны с базы данных ВНИИГМИ-МЦД [1]. А также для исследования были использованы данные спутниковых наблюдений NOAA, полученные на основе еженедельных отчетов по Северному полушарию, данные о протяженности снежного покрова, которые были оцифрованы с карт снежного покрова на декартовую сетку, наложенную на полярную стереографическую проекцию. Наличием снега в ячейке считается ее покрытие снегом более чем на 50%. Данные имеют недельное разрешение по времени (начало каждой 7-дневки – вторник) и пространственное разрешение 190,6 км на широте 60°, обновляются ежемесячно, и охватывают период с 4 октября 1970 года по настоящее время. Доступ к данным предоставляется в сетевой форме общих данных (netCDF) и архивировано Национальным центром климатических данных NOAA в рамках программы спутниковой записи климатических данных [2].

Более ранние даты образования снежного покрова приходятся на сентябрь на станциях, расположенных в северных широтах по данным спутниковых наблюдений, и на севере, северо-востоке и горных территориях юго-востока региона по данным наземных наблюдений. В отдельных районах на юге территории по данным спутниковых наблюдений СП образуется в ноябре. Более ранние даты установления УСП приходятся на сентябрь: в северных широтах по данным спутниковых наблюдений и на севере, северо-восток и горные территории юго-востока по данным наземных наблюдений. По данным спутниковых наблюдений УСП устанавливается в октябре-ноябре, на территориях южнее 55° с.ш. преобладает ноябрь.

На рисунке 1 представлено географическое распределение тенденций изменения дат образования СП и установления УСП по спутниковым и метеорологическим данным, выделены значимые тренды. В многолетнем ходе по наблюдениям на метеорологических станциях появление СП сдвигается на более поздние сроки от 2 до 5 дней за 10 лет и происходит данный сдвиг на станциях Западной Сибири. Данный вывод согласуется с результатами, полученными В. В. Поповой, А. В. Ширяевой, П. А. Морозовой в работе «Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950-2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением». Исследователи приходят к выводу о том, что сдвиги сроков установления СП в 2000–2013 гг. (по сравнению с 1950–1970 гг.) на более поздние охватывают практически всю территорию, но существенные изменения наблюдаются в основном на ЕТР и в Западной Сибири [3]. На станциях Восточной Сибири СП появляется раньше на срок от 7 до 2 дней за 10 лет. Спутниковые данные схожи для восточных станций, для западных значимых положительных трендов по спутниковым данным не выявлено.

Значимые тренды установления УСП по наблюдениям на метеорологических станциях в большинстве случаев положительные. Установление УСП происходит позже на 2-5 дней за 10 лет и данный сдвиг наблюдается на более западных станциях. По спутниковым данным значимые тренды показывают сдвиг на более ранние даты установления УСП от 7 до 2 дней за 10 лет.



**Рис. 1.**

Географическое распределение трендов образования СП по данным метеостанций (а) и спутников (б), установления УСП по данным метеостанций (в) и спутников (г).

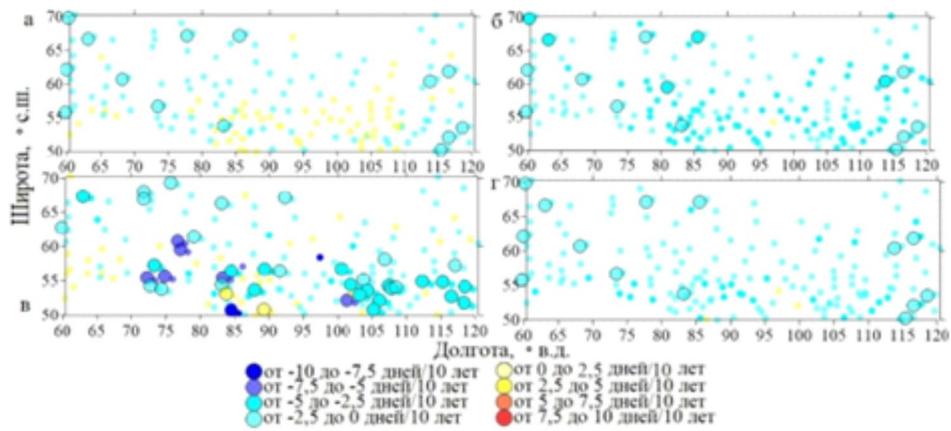
Более ранние даты разрушения устойчивого снежного покрова приходятся на март-апрель южных широт по спутниковым данным. С увеличением широты дата разрушения УСП сдвигается на более позднюю. Более ранние даты схода снежного покрова приходятся на южные широты и отмечаются в апреле, с увеличением широты увеличивается дата схода, на северных территориях снег стаивает позже. По данным спутниковых наблюдений СП в северных районах покрывает подстилающую поверхность до июня, наблюдения на станциях отмечают СП до августа.

На рисунке 2 представлено географическое распределение тенденций изменения дат схода СП и разрушения УСП. Наземные и спутниковые данные согласуются в многолетнем ходе и можно сделать вывод, что в большинстве случаев, сроки схода снежного покрова смещаются на более ранние, примерно, на 2 дня каждые 10 лет по двум наборам данных, что подтверждают значения значимых трендов, выделенных на рисунках. По значимым трендам спутниковых данных происходит сдвиг сроков разрушения УСП на более ранние на 2-5 дней за 10 лет. По значимым трендам наблюдений на метеостанциях на территории Западной Сибири преобладают отрицательные значения статистически значимых трендов, сдвиг 5-10 дней на более ранние сроки за 10 лет.

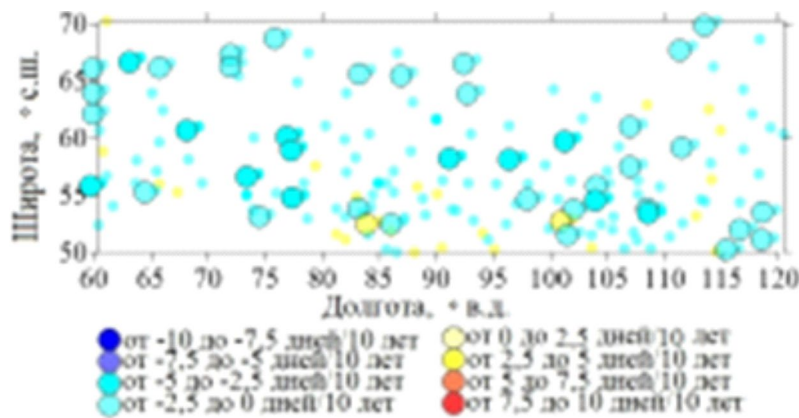
Во втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации говорится о том, что в последние четыре десятилетия, по данным спутниковых наблюдений, площадь снежного покрова в переходные сезоны года на территории России уменьшается, что подтверждают полученные данные для территории Сибири [4].

Для оценки многолетних изменений был рассчитан и проанализирован период с устойчивым снежным покровом (Рисунок 3). На территории Сибири происходит сокращение продолжительности периода УСП на 2-5 дней за 10 лет. Полученные результаты схожи с выводами других авторов [5, 6].





**Рис. 2.** Географическое распределение трендов схода СП по данным метеостанций (а) и спутников (б), разрушения УСП по данным метеостанций (в) и спутников (г).



**Рис. 3.** Географическое распределение трендов продолжительности периода устойчивого снежного покрова.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива данных характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР».
2. Martynova Yu. V. 2020 Special aspects of snow cover formation in Western and Eastern Siberia IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 611 (2020).
3. Попова, В. В. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950-2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением / В. В. Попова, А. В. Ширяева, П. А. Морозова // Криосфера Земли. – 2018. – Т. 22. – № 4. – С. 65-75.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – Москва, 2021. – 104 стр.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г. В. Алексеев, М. Д. Ананичева, О. А. Анисимов [и др.]; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Москва: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2014. – 1009 с.
6. Павлова Т.В., Катцов В.М., Пикалева А.А., Спорышев П.В., Говоркова В.А., 2013: Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений в 21-м веке. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Вейкова, вып. 569, с. 38-61.





# Microphysical characteristics frontal cloud systems of different types with the presence of embedded convection according to CloudSat satellite

Zhukov D.F.<sup>1</sup>, Pustovalov K.N.<sup>1,2</sup>, Nagorskiy P.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [den1szhuk0v@yandex.ru](mailto:den1szhuk0v@yandex.ru)

In the second half of XX – beginning of XXI centuries in the regions of Northern Eurasia, there was an increase in the share of convective clouds [1]. To date, one of the least studied mesoscale phenomena remains embedded convection – cloud formations consisting of convective clouds clusters, which are embedded («masked») in frontal layered clouds [2, 3]. Due to this peculiarity, the most effective means of their study are mathematical modeling methods and Earth remote sensing (ERS) data. At the same time, a high recurrence of mesoscale convective clouds was recorded in the south of Western Siberia [4].

The aim of this work is to analyze the microphysical characteristics of the embedded convection depending on the type of front where it was formed (cold front, warm front, and occlusion front), according to CloudSat satellite. The following data were used for the research: products of the second processing level "2B-GEOPROF" and "2B-CWC-RO" obtained from CPR radar data (CloudSat satellite) [5]; satellite images according to the MODIS spectroradiometer [6].

Based on the research, the following microphysical characteristics of the embedded convection of frontal cloud systems of different types (cold front, warm front, and occlusion front, respectively) according to CloudSat satellite are noted:

- horizontal length of the bands of increased  $Z$  and  $Q$  values – ~165, 170 and 230 km;
- heights of the foci – ~4–8 km, 5–9 km and 3–6 km;
- maximums of radar reflectivity ( $Z$ ) – 49,9, 48,8 and 50 dB;
- maximums of water content ( $Q$ ) – 5,20, 1,56 and 5 g/m<sup>3</sup>;
- 75th percentile radar reflectance values –6,36, –0,52, and –4,50 dB;
- 75th percentile values for water content 0,17, 0,21, and 0,26 g/m<sup>3</sup>.

The embedded convection cells in frontal cloud systems are characterized by the following values of the studied values:  $Z$  – from 15 to 50 dB;  $Q$  – from 200 to 1000 mg/m<sup>3</sup>.

*Acknowledgements: This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. 121031300154-1.*

## REFERENCES:

1. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Research Letters*. 2011. V. 6, № 3. P. 035202.
2. Schmeter, S.M. Characteristics of Embedded Convection in Frontal Clouds and Conditions of Its Formation // *Russian Meteorology and Hydrology*. 1990. №4. P 36–44.
3. Hobbs P.V. Organization and Structure of Clouds and Precipitation on the Mesoscale and Microscale in Cyclonic Storms // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. November 1978. Vol. 16, № 4. P. 741–755.
4. Koshikova, T.S., Zhukova, V.A., and Kuzhevskaya, I.V. Estimation of parameters of mesoscale convective complexes based on satellite and aerological data // *Geosphere Research*. 2019. № 2. P. 86–97.
5. CloudSat Data Processing Center. URL: <ftp1.cloudsat.cira.colostate.edu> (30 November 2021).
6. EOSDIS Worldview. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (15 April 2022).
7. Khromov S.P. *Meteorology and Climatology: Textbook / S.P. Khromov, M.A. Petrosyants*. – Moscow: Moscow State University, 2012. – P. 584.

# Микрофизические характеристики фронтальных облачных системах различных типов с наличием затопленной конвекции по данным космического аппарата CloudSat

Жуков Д.Ф.<sup>1</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>, Нагорский П.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: den1szhuk0v@yandex.ru

Во второй половине XX – начале XXI вв. в регионах Северной Евразии, отмечалось увеличение доли конвективных облаков [1]. Сохранение данной тенденции приведёт к дальнейшему увеличению повторяемости конвективных облаков и связанных с ними неблагоприятных и опасных явлений (грозы, града, интенсивных ливневых осадков, шквалов и др.). Одним из наименее изученных мезомасштабных конвективных явлений остаётся затопленная конвекция – облачные образования, состоящие из скоплений конвективных облаков возникающие в зонах атмосферных фронтов, которые затоплены («замаскированы») во фронтальной слоистообразной облачности [2, 3]. В связи с данной особенностью эти облачные системы практически незаметны при наблюдении с земной поверхности, поэтому наиболее эффективными средствами для их обнаружения являются системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При этом на юге Западной Сибири зафиксирована высокая повторяемость мезомасштабной конвективной облачности [4]. Таким образом, исследование затопленной конвекции и связанных с ней явлений на данной территории является весьма актуальным.

Целью работы является анализ микрофизических характеристик затопленной конвекции в зависимости от типа фронта, где она образовалась (холодного фронта, тёплого и фронта окклюзии), по данным космического аппарата (КА) CloudSat.

Исходными данными для определения микрофизических характеристик затопленной конвекции стали продукты второго уровня обработки «2B-GEOPROF» и «2B-CWC-RO», полученные по данным радара CPR (КА «CloudSat») [5].

Дешифрирование случаев прохождения облачных систем атмосферных фронтов, в которых имелись мезонеоднородности, предположительно, связанные с затопленной конвекцией, осуществлялось на основе спутниковых изображений MODIS [8]. Посредством визуального анализа RGB-композиций и продукта Cloud Optical Thickness (оптическая плотность облачности) по данным MODIS, определялось прохождение фронтальных облачных систем совместно с пролётами КА CloudSat. Были выделены временные интервалы и определены координаты их прохождения над территорией исследования. Для отобранных случаев с сервера Data Processing Center [5] были загружены продукты второго уровня обработки, полученные на основе измерений радара CPR.

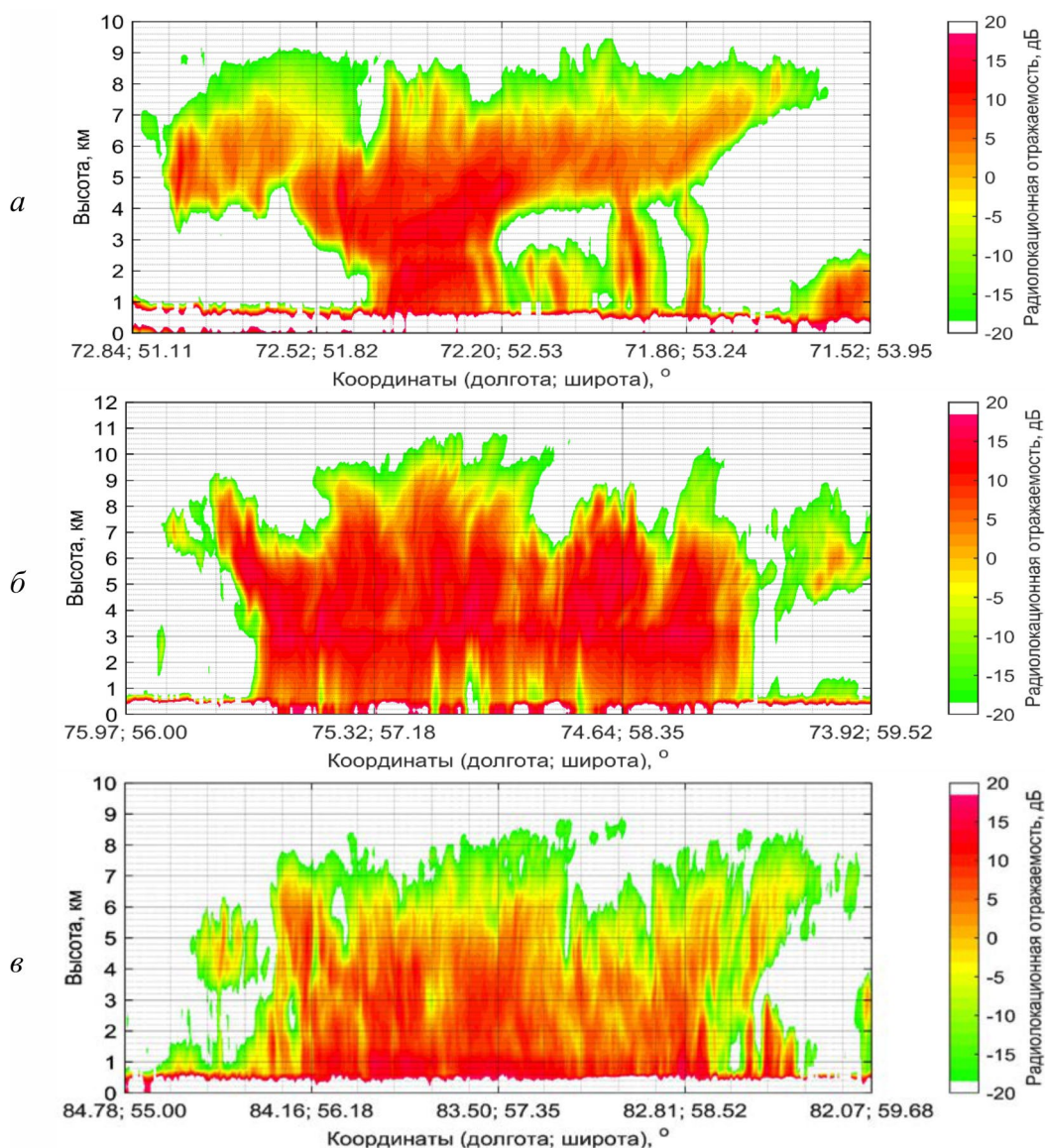
Далее с помощью программной среды MATLAB (The MathWorks, Inc.) выполнялся автоматизированный импорт, обработка и визуализация данных. В результате обработки были построены вертикальные профили радиолокационной отражаемости и водности по данным радара CPR в пределах отобранных случаев фронтальных облачных систем.

На основе описанной выше методики всего было отобрано и обработано порядка 80 случаев, 46 холодных фронтов, 7 тёплых и 27 фронтов окклюзии. Типичные примеры из общей выборки будут рассмотрены далее.

Рассмотрим детально вертикальные структуры облачных систем трёх типов атмосферных фронтов, характеризуемых профилями радиолокационной отражаемости ( $Z$ ) (рис. 1) и водности ( $Q$ ) (рис. 2) по данным КА CloudSat.

Согласно рисунку 1, во всех трёх приведённых фронтальных облачных системах (холодного фронта, тёплого и фронта окклюзии) в полях радиолокационной отражаемости на фоне модальных значений, обусловленных слоистообразной облачностью хорошо проявляются очаги (полосы) повышенных значений радиолокационной отражаемости ( $Z = \sim 12$  дБ и более). Горизонтальная протяжённость зон с этими очагами вдоль траектории полёта спутника имеет следующие значения: для холодного фронта  $\sim 165$  км, для тёплого  $\sim 170$  км и для фронта окклюзии  $\sim 230$  км. В нижней части очагов повышенной отражаемости в каждом из случаев отмечаются отроги, распространяющиеся в направлении подстилающей поверхности, которые связаны с нисходящими потоками и зонами ливневых осадков из затопленных конвективных ячеек.

В таблице 1 приведены некоторые статистические характеристики рассмотренных случаев по радиолокационной отражаемости.



**Рис. 1.** Профили радиолокационной отражаемости в пределах облачных систем холодного фронта за 18.05.2019 (а), тёплого фронта за 21.08.2018 (б) и фронта окклюзии за 21.09.2017 (в) по данным КА CloudSat.

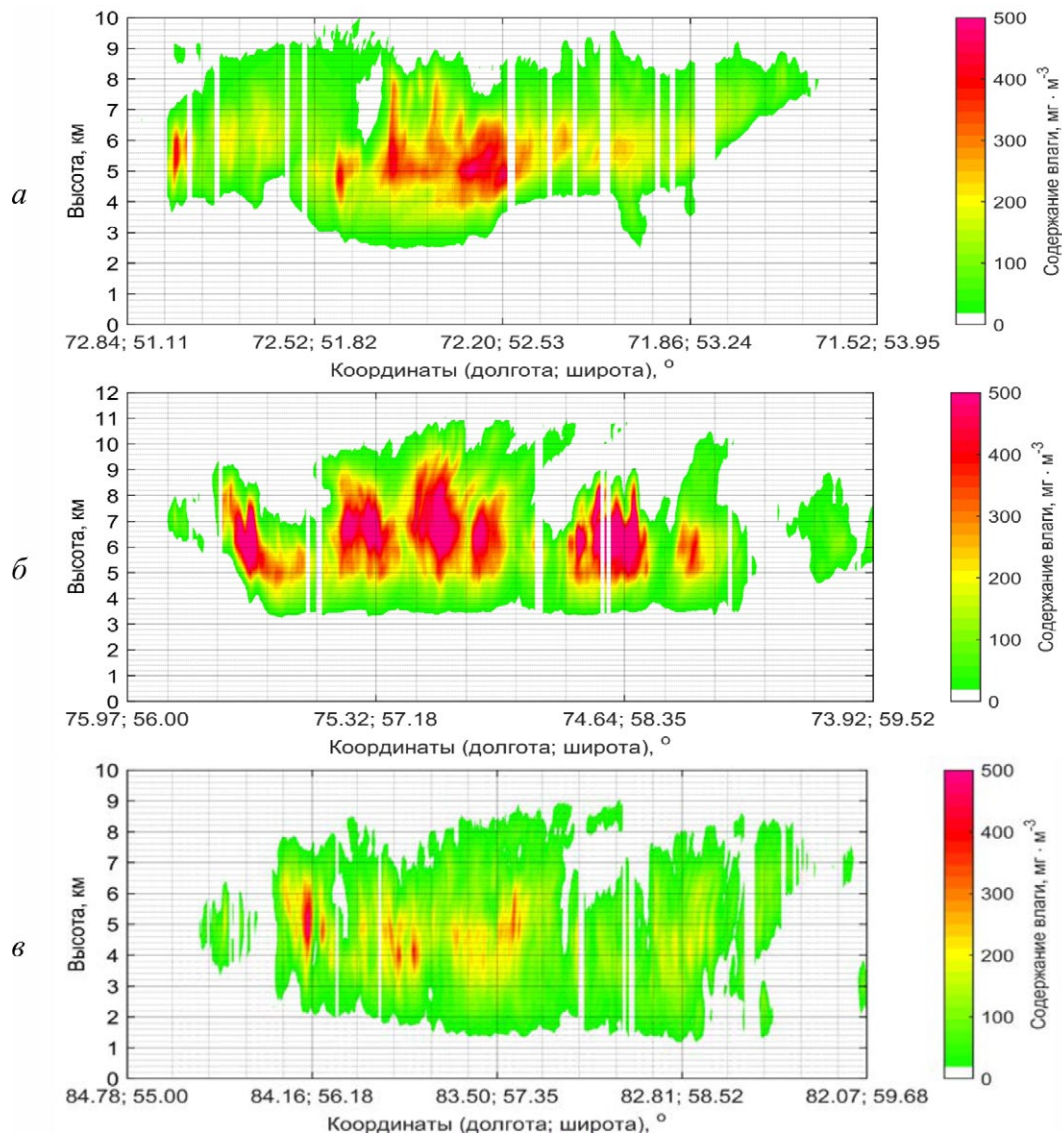
**Таблица 1.** Статистические характеристики фронтальных облачных систем с наличием затопленной конвекции по радиолокационной отражаемости (Z), дБ.

№	Среднее	Медиана	СКО	ИКР	Мин.	Макс.	P5	P25	P75	P95
а	-17,6	-24,7	16,6	22,5	-40	49,9	-36,2	-28,8	-6,36	12,1
б	-16,1	-24,4	17,5	28,4	-40	48,8	-36,2	-28,9	-0,52	13,4
в	-16,9	-24,6	17,4	24,6	-40	50,0	-36,4	-29,1	-4,50	13,1

Рассматривая рисунок 2, можно заключить, что в полях водности облачных систем атмосферных фронтов также выделяются очаги (полосы) повышенных значений водности ( $Q = \sim 400$  мг/м<sup>3</sup> и более). Высоты расположения этих очагов следующие: для холодного фронта от 4 до 8 км; для тёплого  $\sim 5-9$  км; для фронта окклюзии  $\sim 3-6$  км.

В таблице 2 приведены некоторые статистические характеристики рассмотренных случаев по водности.





**Рис. 2.** Профили водности в пределах облачных систем холодного фронта за 18.05.2019 (а), тёплого фронта за 21.08.2018 (б) и фронта окклюзии за 21.09.2017 (в) по данным КА CloudSat.

**Таблица 2.** Статистические характеристики фронтальных облачных систем с наличием затопленной конвекции по водности ( $Q$ ),  $г/м^3$ .

№	Среднее	Медиана	СКО	ИКР	Мин.	Макс.	P5	P25	P75	P95
а	0,14	0,08	0,26	0,14	0	5,20	0,00	0,02	0,17	0,41
б	0,14	0,08	0,16	0,18	0	1,56	0,01	0,03	0,21	0,46
в	0,09	0,05	0,19	0,09	0	5,00	0,00	0,02	0,11	0,26

В целом, приведённые данные позволяют связать вышеописанные очаги с наличием конвективных ячеек, затопленных («замаскированных») во фронтальной слоистообразной облачности, для которой значения  $Z$  и  $Q$  значительно ниже. Высота верхней границы этих очагов, а также средние значения  $Z$  и  $Q$  в целом соответствуют аналогичным параметрам, характерным для одиночных кучево-дождевых облаков [7]. Для ячеек затопленной конвекции во фронтальных облачных системах вне зависимости от типа фронта характерны следующие значения исследуемых величин:  $Z$  – от 15 до 50 дБ;  $Q$  – от 200 до 1000  $мг/м^3$ .

В итоге можно выделить следующие особенности микрофизических характеристик фронтальных облачных системах различных типов (холодного фронта, тёплого и фронта окклюзии, соответственно) с наличием затопленной конвекции по данным КА CloudSat:

- горизонтальная протяжённость полос повышенных значений  $Z$  и  $Q$  (зон конвективной облачности) – для холодного фронта ~165 км; для тёплого ~170 км и для фронта окклюзии ~230 км;
- высоты расположения очагов – ~4–8 км, 5–9 км и 3–6 км;
- максимумы по радиолокационной отражаемости – 49,9, 48,8 и 50 дБ;
- максимумы по водности – 5,20, 1,56 и 5 г/м<sup>3</sup>;
- значения 75 перцентиля по радиолокационной отражаемости –6,36, –0,52 и –4,50 дБ;
- значения 75 перцентиля по водности – 0,17, 0,21 и 0,26 г/м<sup>3</sup>.

Для ячеек затопленной конвекции во фронтальных облачных системах характерны следующие значения исследуемых величин:  $Z$  – от 15 до 50 дБ;  $Q$  – от 200 до 1000 мг/м<sup>3</sup>.

*Благодарности. Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы (номер госрегистрации 121031300154-1).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Research Letters*. 2011. V. 6, № 3. P. 035202.
2. Шметер С.М. Характеристики затопленной конвекции во фронтальных облаках и условия её образования // *Метеорология и гидрология*. 1990. №4. С 36–44.
3. Hobbs P.V. Organization and Structure of Clouds and Precipitation on the Mesoscale and Microscale in Cyclonic Storms // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. November 1978. Vol. 16, № 4. P. 741–755.
4. Кошикова Т.С., Жукова В.А., Кужевская И.В. Оценка параметров мезомасштабных конвективных комплексов на основе спутниковых и аэрологических данных // *Геосферные исследования*. 2019. № 2. С. 86–97.
5. CloudSat Data Processing Center [Электронный ресурс]. URL: <ftp1.cloudsat.cira.colostate.edu> (Дата обращения: 30.10.2021).
6. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 15.04.2020).
7. Хромов С.П. Метеорология и климатология: Учебник / С.П. Хромов, М.А. Петросяну. – Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2012. – 584 с.

## Assessment of greenhouse gas emissions from the natural and disturbed areas in the southern part at the Priobskoye field

**Kaverin A.A., Belkova D.D., Kaverina A.V.**

Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia  
E-mail: [alexkaverinzevs@gmail.com](mailto:alexkaverinzevs@gmail.com)

The proposed assessment aims to solve the problems associated with the insufficient level of scientific and methodological support in the field of environmental monitoring, accounting the greenhouse gas emissions, contributing to make the science-based management decisions in the field of environmental protection.

A large-scale assessment of the carbon balance of terrestrial ecosystems, the fluxes of the main greenhouse gases (carbon dioxide and methane) and the potential for their reduction through the optimization of spatial planning, mitigation technologies and ecosystem restoration will allow the systematic introduction of low-carbon principles of land use in the study area.

Natural ecosystems contain stored carbon in the form of biomass and soil carbon. While functioning of natural ecosystems, exchange processes occur, as a result the greenhouse gases exchange with the atmosphere (release and accumulation). These processes in natural ecosystems are balanced. The processes of absorption of gases prevail over the processes associated with their release. The disturbed ecosystem loses the balance, greenhouse gas emissions prevail over absorption and the carbon stock of biomass and soil passes into the atmosphere. In case of minimization impact, these losses and greenhouse gas emissions can be reduced; in case of ecosystems restoration, the carbon accumulation can be significantly increased [5].

The amount of emissions or uptake as a basis for calculating emission coefficients can be measured directly, taken from the reference tables and publications, or calculated based on the determination of carbon pools in ecosystems and calculation of its changes over time in the natural state or under anthropogenic impact.



A carbon pool is the ecosystem component in which carbon stocks accumulate and change: biomass, dead wood, leaf litter and soil organic matter. Special attention should be paid to the ecosystems with the large carbon pools, such as biotopes with organogenic soils.

Using the value of the emission factors it is possible to determine which disturbances of which biotopes lead to the largest emission of greenhouse gases. For example, the terraced forest bogs getting to the extremely high sources both during drainage and during flooding. Forested oligotrophic bogs actively respond with emissions to the drainage, floodplain meadows – for flooding, and open ridge-hollow complex – to flooding, sand mounds also show high coefficients for a 20-year perspective (due to methane, which is not a long-lived gas). Fires make an exceptionally large contribution, especially peat fires.

Layers with potential and real emissions calculated for 20 and 100 years were created in the GIS database (Fig. 1). These layers are recommended to be used for the future planning of measures to reduce greenhouse gas emissions by eliminating or minimizing impacts, as well as restoring ecosystems. Spatial information will allow to plan the most effective activities to reduce greenhouse gas emissions, depending on the type of biotope and type of disturbance.

## Оценка эмиссии парниковых газов с естественных и нарушенных участков на территории южной части Приобского месторождения

Каверин А.А., Белькова Д.Д., Каверина А.В.

Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия  
E-mail: alexkaverinzevs@gmail.com

**П**редлагаемая оценка направлена на решение проблем, связанных с недостаточным уровнем научно-методического обеспечения в области ведения экологического мониторинга и учёта эмиссии парниковых газов на территории активного освоения недр, способствующего принятию научно-обоснованных управленческих решений в области природопользования.

Широкомасштабная оценка углеродного баланса наземных экосистем, потоков основных парниковых газов (углекислого газа и метана) и потенциала для их сокращения за счёт оптимизации пространственного планирования, смягчающего воздействие технологий и позволяющих восстанавливать экосистемы, позволит планомерно внедрить низкоуглеродные принципы землепользования на исследуемой территории.

Природные экосистемы содержат запас накопленного углерода в виде биомассы и почвенного углерода. В ходе функционирования в естественных экосистемах происходит обмен газов с атмосферой (выделение и поглощение), включая парниковые газы. Эти процессы сбалансированы и в естественном состоянии, как правило, процессы поглощения газов преобладают над процессами выделения. При внешнем воздействии баланс экосистемы нарушается, эмиссия парниковых газов начинает преобладать над поглощением. Таким образом, запас углерода биомассы и почвы переходит в атмосферу. При минимизации воздействий потоки парниковых газов можно сократить, а при восстановлении экосистем – значительно увеличить поглощение [5].

Единственной наиболее проработанной методикой по количественному определению объема выбросов и поглощения парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации следует признать документ, утверждённый Распоряжением Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июня 2017 г. №20-р «О методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов» [1]. Методические указания нацелены на подсчет поглощения парниковых газов и его изменения при осуществлении деятельности и применимо только для управляемых земель. Несмотря на то, что в методических указаниях в сфере землепользования традиционно ведется учет поглотителей, в методических указаниях количественное определение объема выбросов и поглощения парниковых газов в природных экосистемах проводится на основе так называемых коэффициенты выбросов (эмиссии) парниковых газов, что соответствует Методическим указаниям МГЭИК [7]. Коэффициент эмиссии выражается в CO<sub>2</sub> эквиваленте, который для иных чем CO<sub>2</sub> газов рассчитывается по формуле:

$$CO_{2\text{-эквивалент}} = ПГ * ППП,$$

где: CO<sub>2-эквивалент</sub> - величина выбросов или поглощения иных парниковых газов, кроме CO<sub>2</sub>, в единицах CO<sub>2-эквивалент</sub>, тонн; ПГ - величина выброса или поглощения иного парникового газа, кроме CO<sub>2</sub>, тонн; ППП - потенциал глобального потепления данного парникового газа (не имеет размерности: 28 для CH<sub>4</sub> и 298 для N<sub>2</sub>O).

Коэффициент эмиссии может быть положительным, что отражает эмиссию или выбросы парниковых газов, или отрицательным, что обозначает поглощение. Также, методические рекомендации приводят алгоритм подсчёта эмиссии парниковых газов в результате пожаров. Дополнительно рекомендуется учитывать так называемый смыв углерода с территории, так как он приравнивается к потере углерода в результате антропогенного воздействия.

Величина выбросов или поглощения, как основа для расчёта коэффициентов эмиссии, может быть измерена натурно, взята из справочных таблиц и публикаций или рассчитана на основе определения пула углерода в экосистемах и расчёте его временной динамики в естественном состоянии и при антропогенном воздействии. Пул углерода – это компонент экосистемы, в котором происходит накопление и изменение запасов углерода: биомасса, мертвая древесина, подстилка и органическое вещество почвы. Особое внимание следует уделить экосистемам с большими запасами углерода, в частности биотопам с органомогенными почвами (например, болота).

В данной работе использован комплексный метод определения факторов эмиссии ПГ для естественных и нарушенных биотопов. Прямые измерения потоков нарушенных экосистем фрагментарны, но могут быть использованы в качестве предварительных цифр. Также, нами были использованы результаты многолетних наблюдений за потоками ПГ на станции «Мухрино» для факторов эмиссии естественных экосистем (таблица 1). Недостающие данные были заимствованы из международно признанных публикаций и руководства МГЭИК по Инвентаризации источников и стоков парниковых газов IPCC, 2006 и Дополнения к ним (IPCC, 2014) [8].

**Таблица 1.**

Факторы эмиссии в естественных биотопах и потенциал поглощения экосистем в границах нарушенных участков до нарушения.

Экосистема		Удельный GWP 20 с учетом микро-рельефа, т CO <sub>2-экв</sub> га в год	Удельный GWP 100 с учетом микро-рельефа, т CO <sub>2-экв</sub> га в год	Площадь биотопа, га	Суммарный GWP 20 на территорию место-рождения, т CO <sub>2-экв</sub> га	Суммарный GWP 100 на территорию место-рождения, т CO <sub>2-экв</sub>
Пойма	Пойменные осоковые луга	-1,35	-1,86	27408,36	-37001,29	-50979,55
	Пойменные злаковые луга	-1,35	-1,86	17182,21	-23195,98	-31958,91
Терраса и водораздел	Притеррасные лесные болота (согры)	1,31	0,39	10089,61	13217,39	3934,95
	Леса на минеральных почвах	0,25	0,3	64000,53	16000,132	19200,159
	Высокий рям	-6,05	-6,08	18767,42	-113542,89	-114105,91
	Низкий рям	-4,64	-4,79	30372,4	-140927,94	-145483,8
	Открытые грядово-мочажинные болотные комплексы с облесенными грядам	4,25	4,8	21208,78	90137,31	101802,14
Сфагновые олиготрофные топи и открытые ГМК	5,97	1,12	11367,68	67865,05	12731,8	
Водные объекты		0,5	0,15	25673,58	12836,79	3851,04
<b>Суммарный GWP</b>					<b>-114611,42</b>	<b>-201008,08</b>

Естественные болотные экосистемы за счёт естественных потоков метана, по результатам баланса могут являться источниками ПГ. Наиболее активным естественным поглотителем являются пойменные осоковые и травяные болота, облесённые участки верховых болот – рямы. Из расчёта на 20 лет, если бы в границах нарушений экосистемы оставались ненарушенными, то они бы поглотили 114 611.42 тонн CO<sub>2-экв</sub>•а за 100 лет — 201 008.08 CO<sub>2-экв</sub>•а.

Факторы эмиссии нарушенных экосистем представлены в матрице, учитывающей тип биотопа и тип нарушений. Представлены только реально выявленные нарушения в границах лицензионного участка.

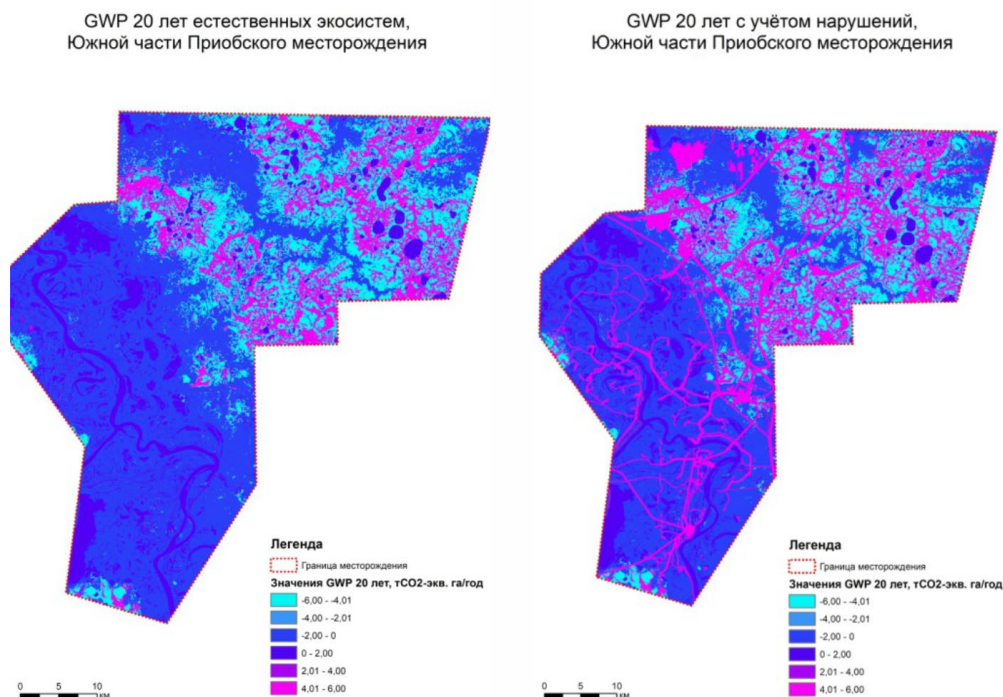
Несмотря на то, что в естественном состоянии водораздельные грядово-мочажинные комплексы являются слабыми источниками ПГ, нарушение всех типов болотных экосистем приводит к их переводу

их в разряд мощного источника. Происходит это за счёт вовлечение в круговорот углерода, содержащегося в торфе.

По значению факторов эмиссии можно определить какие нарушения, в каких типах биотопов приводят к наибольшему потокам выбросов парниковых газов. Так, очевидным образом выделяются при-террасные лесные болота, которые переходят в разряд экстремально высоких источников, как при осушении, так и при обводнении. Облесённые олиготрофные болота активно отвечают выбросами на осушение, пойменные луга – на затопление, и открытые ГМК на подтопление, насыпи также показывают высокие коэффициенты на 20-летней перспективе (за счёт метана, который является не долгоживущим газом). Исключительно большой вклад дают пожары, особенно при возгорании торфяников.

На основе полученных значений факторов эмиссии мы можем оценить текущий и будущий вклад экосистем в поглощение и эмиссию парниковых газов в границах лицензионного участка.

В результате воздействия объектов инфраструктуры на лицензионном участке болотные экосистемы перешли из поглотителей или слабых источников ПГ в мощные источники ПГ. В результате с поверхности нарушенных биотопов будет выделено в атмосферу 515 682.93 тонн  $\text{CO}_2\text{-экв}$  в год из расчёта 20-летнего периода и 315 067.50 тонн  $\text{CO}_2\text{-экв}$  в год для столетнего периода. Любые мероприятия по исключению, минимизации воздействия и восстановлению экосистем будут рассматриваться как мероприятия по сокращению этих выбросов.



**Рис. 1.**  
Потенциальные и реальные эмиссии парниковых газов GWP20.

В базе данных ГИС были созданы слои с потенциальными и реальными эмиссиями из расчёта 20 и 100 лет (рис. 1). Эти слои рекомендуется использовать для дальнейшего планирования мероприятий по сокращению выбросов парниковых газов за счёт исключения или минимизации воздействий, а также для восстановления экосистем. Пространственная информация позволит планировать наиболее эффективные мероприятия по сокращению эмиссии парниковых газов в зависимости от типа биотопа и типа нарушения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Акт министерств и ведомств "О методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов" от 30 июня 2017 г. № N 20-р // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2017.*
2. *Minayeva T., Filippov I., Tysiachniouk M., Markina A., Kiselev S., Lapshina E., Sirin A. Connecting biodiversity and human dimensions through ecosystem services: The Numto Nature Park in West Siberia // Ambio. 2021. Vol. 50(11). Pp. 2009–2021. 10.1007/s13280-021-01625-8.*
3. *Sirin A., Medvedeva M., Korotkov V., Itkin V., Minayeva T., Ilyasov D., Suvorov G., Joosten H. Addressing Peatland Rewetting in Russian Federation Climate Reporting // Land. 2021. 10. 1200. 10.3390/land10111200.*

4. Мещерякова А.В., Каверин А.А., Заров Е.А., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Дюкарев Е.А., Минаева Т.Ю., Лапишина Е.Д. *Природные и нарушенные экосистемы приобского месторождения // Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление: Материалы Четвертой международной научной конференции 1 октября–8 октября 2021 года, г. Томск, Россия*. – Томск: "Издательство Ипполитова", 2021. С. 48-52 ISBN 978-5-93856-502-9.
5. Минаева Т.Ю. *Проекты восстановления торфяных болот как мероприятия на пути к низкоуглеродному развитию // Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление: Материалы Четвертой международной научной конференции 1 октября–8 октября 2021 года, г. Томск, Россия*. – Томск: "Издательство Ипполитова", 2021. С. 136-139 ISBN 978-5-93856-502-9.
6. Сирин А.А., Медведева М.А., Ильясов Д.В., Коротков В.Н., Минаева Т.Ю., Суворов Г.Г. *Обводненные торфяники в климатической отчетности Российской Федерации // Фундаментальная и прикладная климатология, том 7, № 3, с. 84-112 DOI 10.21513/2410-8758-2021-3-84-112*.
7. *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2013гг. Часть 2. Приложения. Москва, 2015*.
8. *IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland*.

## Long-term changes in hydrothermal conditions in Siberia

Voropay N.N.<sup>1,2</sup>, Ryazanova A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: voropay\_nn@mail.ru, raa@scert.ru

The territory of South Siberia includes different landscape zones. For correct comparison of occurring hydrothermal changes it is necessary to use, as it was shown in our works and works of other authors, normalized indices, which include the Ped Aridity Index (S) and standardized index of precipitation and evaporation SPEI. Data on air temperature and precipitation totals at 134 weather stations and Era5 reanalysis grid nodes for 1950-2020 were used as input information for calculating the indices. Changes in hydrothermal conditions within the territory are characterized as follows. In May, aridity increases in most of the territory, except for the mountainous regions of Transbaikalia. In June, moisture increases in the central areas of Western Siberia, while the south of Eastern Siberia becomes more arid. In July, the contrasts increase, with S trends across the territory varying from -1.0 to +1.4 units/10 years. In August and September, there is a latitudinal distribution of trends - from positive in the south to negative in the north of Siberia. However, not all trends are statistically significant. There is no direct linear dependence of hydrothermal conditions on large-scale circulation processes for most weather stations located in southern Siberia. This does not mean its complete absence, but only indicates a more complex nature of the relationships. The greatest number of statistically significant correlation coefficients (for each month at 50-60 weather stations out of 134) was obtained for the SCAND indices, AO and various Atlantic fluctuations.



# Многолетние изменения гидротермических условий на территории Сибири

Воропай Н.Н.<sup>1,2</sup>, Рязанова А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

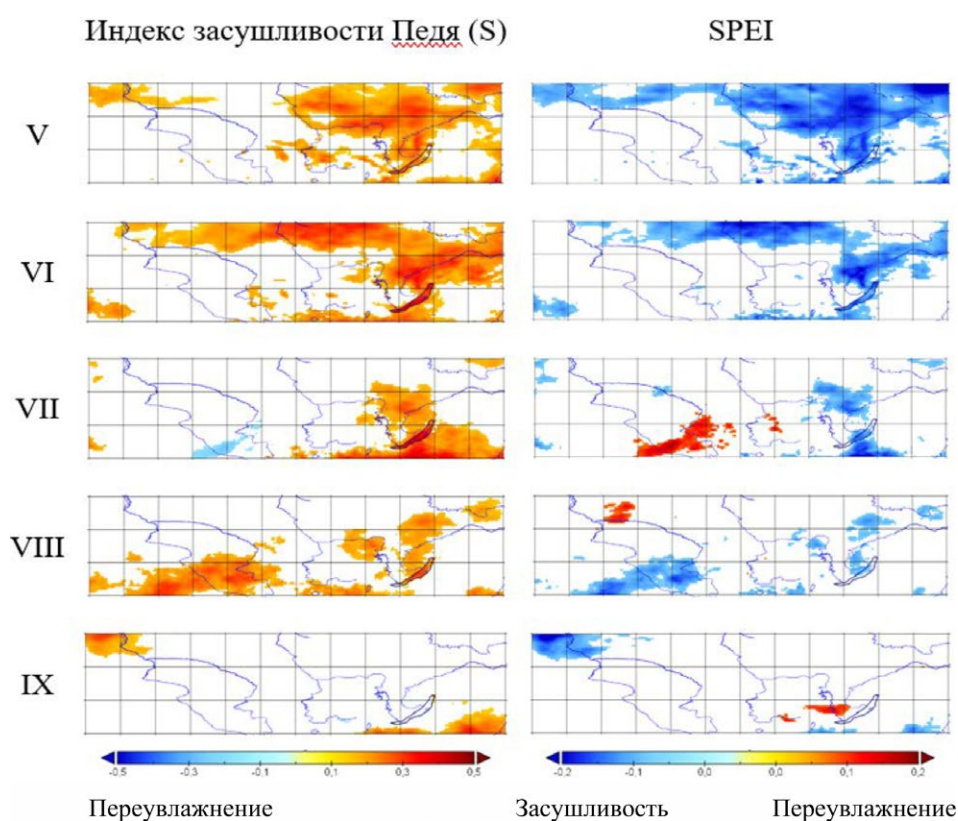
<sup>2</sup>Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: voropay\_nn@mail.ru, raa@scert.ru

Происходящие на фоне современного потепления изменения гидротермических условий на территории Южной Сибири можно описать при использовании различных индексов. Для корректного сравнения происходящих в разных ландшафтных зонах изменений нужно использовать, как это было показано в наших работах и работах других авторов, нормированные показатели, к числу которых относятся индекс засушливости Педея (S) и стандартизированный индекс осадков и испарения SPEI. В качестве исходной информации для расчета индексов на территории Южной Сибири (50–65 °с.ш. 60–120 °в.д.) использованы данные о температуре воздуха и суммах атмосферных осадков на 134 метеорологических станциях и в узлах сетки реанализа Era5 ECMWF за 1950–2020 гг. Набор данных реанализа имеет пространственное разрешение  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , что примерно соответствует 27,7 км по широте и 16,5 км по долготе для рассматриваемой территории. Ежемесячные данные наблюдений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков с метеостанций в районе исследований были получены из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (НИИГМИ – МЦД) (<http://www.meteo.ru>). Поскольку пропуски в данных могут отрицательно повлиять на долгосрочные оценки, были отобраны станции с пропусками менее 5% значений. Расстояние между ближайшими станциями варьируется от 37 км (Иркутск – Хомутово) до 682 км (Тутончаны – Байкит). Средняя площадь, покрываемая одной станцией, составляет  $44\,592 \pm 33\,978 \text{ км}^2$  (медианное значение  $32\,864$ ) в диапазоне от  $4\,910 \text{ км}^2$  (Иркутск) до  $198\,759 \text{ км}^2$  (Угут).

Для получения корректных выводов при площадной оценке гидротермических условий на первом этапе проведена корректировка базы данных высокого разрешения месячных значений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков, полученных на основе данных реанализа ERA5 по данным наземных наблюдений.

Локализация областей значимых трендов индекса засушливости Педея (S) и стандартизированного индекса осадков и испарения SPEI одинаковая, хотя их площади немного отличаются (рис.1). При этом тенденции к увеличению засушливости охватывают большую площадь при использовании значений индекса засушливости Педея.



**Рис. 1.** Статистически значимые тенденции изменения (1950–2020 г.), ед. за 10 лет.

Изменения гидротермических условий в пределах территории, согласно результатам анализа индекса Si, характеризуются следующим образом. В мае на большей части территории увеличивается засушливость, лишь в горных районах Забайкалья наблюдается небольшое уменьшение Si. В июне в центральных районах Западной Сибири растет увлажнение, в то время как юг Восточной Сибири становится более засушливым. В июле контрасты увеличиваются – тренды Si на территории изменяются от -1,0 до +1,4 ед./10 лет. В августе и сентябре отмечается широтное распределение трендов – от положительных на юге к отрицательным на севере Сибири. Однако, при этом не все тенденции статистически значимы.

Для оценки влияния характеристик глобальной и региональной циркуляции атмосферы на межгодовые изменения гидротермических условий на территории Сибири были рассчитаны коэффициенты корреляции между гидротермическими характеристиками (S, SPEI), полученные по данным о температуре воздуха и суммах атмосферных осадков для 134 метеорологических станций и в узлах сетки (по данным реанализа), и характеристиками атмосферной циркуляции: 1) Продолжительность ЭЦМ (по Дзердзиевскому) по типам (зональная циркуляция, нарушения зональной циркуляции, меридиональная северная, меридиональная южная); 2) телеконнекционные индексы, описывающие основные циркуляционные режимы (EA, EAWR, EPNP, ExplVar, NAO, PNA, POL, PT, SCAND, TNH, WP). Анализ проведен для аналогичных месяцев, когда в расчете участвуют ряды данных гидротермического индекса и какой-либо характеристики циркуляции атмосферы за один и тот же месяц (например, SCAND-VI/S-VI) и с учетом запаздывания на 1-3 месяца (например, SCAND-VI/S-VIII). В результате расчетов получено, что для большинства метеостанций, расположенных на территории Южной Сибири отсутствует прямая линейная зависимость гидротермических условий от крупномасштабных циркуляционных процессов. Это не означает ее полное отсутствие, а лишь говорит о более сложной природе взаимосвязей. Наибольшее количество статистически значимых коэффициентов корреляции (для каждого месяца на 50-60 метеостанциях из 134) получено для индексов SCAND, AO и различных Атлантических колебаний. Причем в первом случае, это индексы за аналогичные месяца, а в случае Атлантических колебаний прослеживается сдвиг на 1-3 месяца для отклика гидротермических условий на метеостанциях. Наиболее тесная связь (K=50) гидротермических условий с индексом SCAND.

## Verification of reconstructed total precipitation from GPM IMERG data in the south of Western Siberia

Kartavykh M.S.<sup>1</sup>, Pustovalov K.N.<sup>1,2</sup>, Nagorskiy P.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: ms.kartavykh@gmail.com

This paper presents the results of verification of reconstructed precipitation totals based on GPM IMERG satellite measurements with standard observations at hydrometeorological stations in the south of Western Siberia. Two products - "HQprecipitation" and "precipitationCal" - were considered in the "GPM\_3IMERGDF" dataset. The former represents precipitation intensity information reconstructed from microwave channel data only, the latter from microwave and longwave channel data. The average unconformity of both GPM IMERG datasets is 3.7 mm, with median values of 1.9 and 2.0 mm for the "HQprecipitation" and "precipitationCal" datasets, respectively. It was also found that for extreme precipitation events the uncertainty for both products increases significantly. For coordinates of mountainous meteorological stations, a predominant underestimation of both products is observed. Comparison of GPM IMERG data in different seasons showed that both products are 2 times more accurate in winter than in summer. The results show that in general both GPM IMERG products have acceptable accuracy for all precipitation events.

*Acknowledgements: This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. 121031300154-1.*

### REFERENCES:

1. Spinoni J., et al. Future global meteorological drought hot spots: A study based on CORDEX Data // *Journal of Climate*. – 2020. – V. 33, №. 9. – P. 3635–3661.
2. Global Precipitation Measurement Mission NASA, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/GPM/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview/index.html).
3. Anisimov, A.E., Efimov, V.V., Lvova, M.V. Verification of GPM IMERG remote sensing data and quantitative estimates of atmospheric precipitation in the Crimean region in warm seasons // *Marine Hydrophysical Journal*. 2021. – T. 37, № 4. – P. 490–504.

4. *GES DISC. GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06 (GPM\_3IMERGDF)*, [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM\\_3IMERGDF\\_06/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_06/summary).
5. *Russian Research Institute for Hydrometeorological Information - World Data Centre (RIHMI-WDC)*, URL: <http://meteo.ru/>.

## Верификация восстановленных сумм осадков по данным GPM IMERG для территории юга Западной Сибири

Картавых М.С.<sup>1</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>, Нагорский П.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [ms.kartavykh@gmail.com](mailto:ms.kartavykh@gmail.com)

Знание о том, где и сколько осадков выпадает в глобальном масштабе, жизненно важно для понимания влияния погоды и климата на окружающую среду, а также на водные и энергетические циклы Земли, включая воздействие на сельское хозяйство, доступность пресной воды и меры реагирования на стихийные бедствия [1].

Поскольку атмосферные осадки характеризуются сильной пространственно-временной изменчивостью, для выполнения ряда научно-практических задач стандартных наблюдений за осадками (раз в 12 ч) на относительно редкой сети метеорологических станций часто оказывается недостаточно. Спутники могут обеспечить более детальные и равномерные наблюдения за осадками по всему земному шару, в частности в тех районах, где наблюдения за осадками затруднены или вовсе невозможны [1, 2]. Примером широкого использования данных высокого разрешения об атмосферных осадках являются продукты GPM IMERG, восстановленные на основе спутниковых измерений.

GPM IMERG представляет собой базу данных восстановленных сумм атмосферных осадков в ячейках  $0,1 \times 0,1^\circ$  по широте и долготе, рассчитанных с помощью алгоритма Integrated MultisatellitE Retrievals from GPM (IMERG) по данным группировки спутников Global Precipitation Measurement (GPM) [2].

Согласно [3], продукт GPM IMERG существенно превосходит альтернативные массивы данных об осадках и с определенными ограничениями может быть использован для практических задач. Также в этой работе было отмечено, что на равнинных территориях ошибка восстановления осадков в GPM IMERG значительно меньше, чем в горных и прибрежных районах.

В связи с тем, что Западная Сибирь представляет собой преимущественно равнинную территорию, данные GPM IMERG представляются перспективными. Однако, для определения степени приемлемости данных продуктов GPM IMERG для научного и практического применения необходима оценка точности восстановления характеристик осадков в этих продуктах.

Целью данной работы является оценка качества данных дистанционного зондирования GPM IMERG для территории юга Западной Сибири.

В работе были использованы следующие материалы:

1. данные GPM IMERG финального уровня обработки, содержащие информацию о накопленной за сутки сумме осадков – набор данных «GPM\_3IMERGDF» [4];
2. данные наблюдений за количеством осадков за сутки на гидрометеорологических станциях за 2017–2020 гг. [5].

Для проведения верификации были рассмотрены осадки на 20-и гидрометеорологических станциях: Александровское, Томск, Колпашево, Бакчар, Пудино, Омск, Тара, Огурцово, Барабинск, Барнаул, Рубцовск, Бийск-Зональная, Тайга, Кемерово, Кош-Агач, Яйлю, Усть-Кокса, Ненастная, Абакан, Кызыл.

С сервера ВНИИГМИ-МЦД [6] были получены массивы данных, содержащие суммы осадков за сутки на выбранных метеостанциях, за период 2017–2020 гг.

В наборе данных «GPM\_3IMERGDF» были рассмотрены два продукта – «HQprecipitation» и «rprecipitationCal». Первый представляет собой информацию об интенсивности осадков, восстановленную по данным только микроволновых каналов, второй – по данным микроволновых и длинноволновых каналов.

С помощью языка программирования Python была написана программа для получения файлов с данными GPM\_3IMERGDF с сервера GES DISC [5] и извлечения значений каждого из продуктов для узлов, ближайших к координатам гидрометеостанций.

Таким образом, было проведено сравнение более 1400 значений сумм осадков за сутки по данным гидрометеостанций и продуктов «HQprecipitation» и «rprecipitationCal».

Согласно таблице 1, средняя невязка обоих наборов данных GPM IMERG составляет 3,7 мм, медианные значения составляют 1,9 и 2,0 мм для наборов «HQprecipitation» и «precipitationCal» соответственно. При этом для обоих продуктов наименьшая невязка отмечается на метеостанции Кош-Агач (2,4 и 2,5 мм соответственно), а наибольшая – на метеостанции Ненастная (7,1 и 6,4 мм соответственно).

**Таблица 1.** Невязка суточных сумм осадков по данным GPM IMERG для координат гидрометеостанций на юге Западной Сибири.

Субъект РФ	Метеостанции	Средняя невязка, мм	
		«HQprecipitation»	«precipitationCal»
Томская область	Александровское	4,1	5,2
	Томск	3,5	3,7
	Колпашево	3,9	3,7
	Бакчар	3,4	3,5
	Пудино	3,2	3,3
Омская область	Омск	2,9	3,0
	Тара	3,6	3,7
Новосибирская область	Огурцово	3,2	3,3
	Барабинск	3,1	3,1
Алтайский край	Барнаул	3,3	3,4
	Рубцовск	3,0	3,4
	Бийск-Зональная	3,6	3,9
Кемеровская область	Тайга	3,2	3,5
	Кемерово	3,3	3,5
Республика Алтай	Кош-Агач	2,4	2,5
	Яйло	5,3	5,2
	Усть-Кокса	4,3	3,4
Хакасия	Ненастная	7,1	6,4
	Абакан	3,9	3,6
Тыва	Кызыл	4,5	3,4
Среднее		3,7	3,7
Медиана		1,9	2,0
5-й процентиль		0,1	0,1
25-й процентиль		0,7	0,7
75-й процентиль		4,8	4,8
95-й процентиль		14,1	13,4

В среднем по всем случаям минимальное и максимальное значения невязки (при уровне значимости 0,05), характеризуемые 5-м и 95-м процентилями, для продукта «HQprecipitation» составляют 0,1 и 14,1 мм, а для продукта «precipitationCal» – 0,1 и 13,4 мм соответственно. Диапазон типичных значений невязки, ограниченный 25-м и 75-м процентилями, для обоих продуктов составляет ~0,7÷4,8 мм.

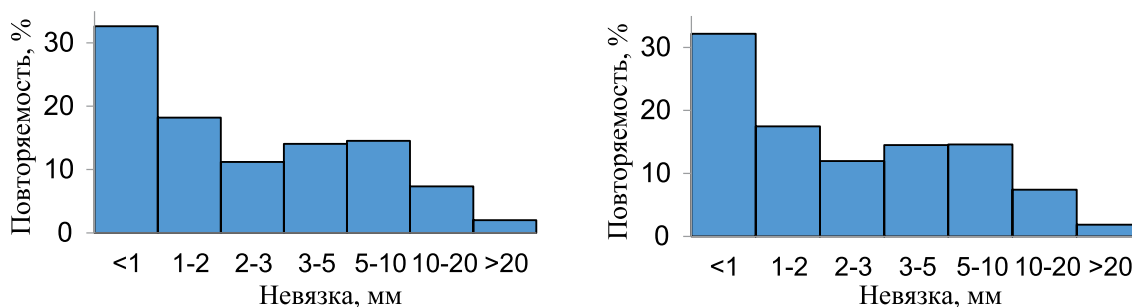
Также было обнаружено, что для экстремальных осадков невязка для данных обоих продуктов существенно возрастает. Так для значений суммы осадков в диапазоне 20–40 мм средняя невязка для наборов «HQprecipitation» и «precipitationCal» составляет 20,3 и 17,2 мм соответственно. При этом точность данных продукта «precipitationCal» для этих событий на ~18 % выше, чем продукта «HQprecipitation».

При сравнении точности данных GPM IMERG для различных форм рельефа на юге Западной Сибири было отмечено, что невязка продуктов «HQprecipitation» и «precipitationCal» в горных районах на 35 % и 14 % выше чем на равнине. Для координат горных метеостанций отмечается преимущественное занижение данных обоих продуктов.

Сравнение данных GPM IMERG в разные сезоны показало, что зимой точность данных обоих продуктов в 2 раза лучше, чем летом (невязка 2,3–2,4 и 4,6–4,8 мм соответственно).

Как видно из рисунка 1, распределение повторяемости значений невязки близка у обоих наборов данных GPM IMERG («HQprecipitation» и «precipitationCal»). Наибольшая повторяемость значений невязки – значения менее 1 мм (~32 %), наименьшую повторяемость имеют значения невязки более 20 мм.





**Рис. 1.** Повторяемость значений невязки данных метеостанций и массивов данных GPM IMERG: слева – «HQprecipitation», справа – «precipitationCal».

На основе проведённого исследования было отмечено, что в целом по всем случаям осадков данные обоих продуктов GPM IMERG имеют приемлемую точность.

*Благодарности. Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы (номер госрегистрации 121031300154-1).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Spinoni J., et al. Future global meteorological drought hot spots: A study based on CORDEX Data // *Journal of Climate*. – 2020. – V. 33, №. 9. – P. 3635–3661.
2. Global Precipitation Measurement Mission NASA: [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/GPM/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview/index.html) (Дата обращения: 15.11.2021).
3. Анисимов А.Е., Ефимов В.В., Львова М.В. Верификация данных дистанционного зондирования GPM IMERG и количественные оценки атмосферных осадков в Крымском регионе в теплое время года // *Морской гидрофизический журнал*. – 2021. – Т. 37, № 4. – С. 490–504.
4. GES DISC. GPM\_3IMERGDF [Электронный ресурс]. – URL: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM\\_3IMERGDF\\_06/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_06/summary) (дата обращения: 08.06.2022).
5. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 08.06.2022).

## The cyclone activity monitoring on North Atlantic and European region based on ESIMO indicators

Viazilova N.A.

RIHMI-WDC, Obninsk, Russia  
E-mail: [nav@meteo.ru](mailto:nav@meteo.ru)

The cyclone activity monitoring over North Atlantic and Europa carried out as part of the applied task of the Unified State System of Information on the Global Ocean (ESIMO) project [<http://portal.esimo.ru>]. The cyclone parameters were calculated based on automated cyclone identification and tracking algorithm using the 6-hourly MSLP, surface wind and precipitation rate from the NCEP-DOE reanalyses.

The cyclone activity monitoring over North Atlantic includes: 1) the creating of cyclone parameters maps for last calendar month; 2) the integral cyclone activity indicators for selected regions.

Cyclone trajectory maps for last calendar month are presented on ESIMO portal with an indication in the centers of cyclones at each observation period of atmospheric pressure, maximum wind speed and precipitation intensity.

The integral cyclone activity indicators show the change in monthly values of cyclonic activity parameters in selected areas for the period from 1999 to the present.

The list of integral cyclone activity indicators includes density of cyclone tracks, density of cyclone centers and index cyclone activity. The density of cyclone tracks is calculated as number of the cyclone tracks in region during month. The density of cyclone centers is calculated as number of the cyclone centers in region during month. The index cyclone activity is calculated as sum of pressure anomaly in cyclones centers during the month.

# О мониторинге циклонической активности в Северной Атлантике и европейском регионе на основе показателей ЕСИМО

Вязилова Н.А.

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск, Россия

E-mail: nav@meteo.ru

**М**ониторинг циклонической и штормовой активности в Северной Атлантике и Европе, в том числе, на европейской территории России, проводится в рамках прикладной задачи Единой системы информации обстановки в Мировом океане (ЕСИМО). Мониторинг включает ежемесячный расчет показателей, представление значений показателей на портале ЕСИМО в виде информационных ресурсов, и построение средствами интерфейса карт пространственного распределения и графиков временного изменения значений показателей. Перечень основных показателей циклонической активности, представленных на портале ЕСИМО, включает траектории циклонов, количество центров циклонов и индекс циклонической активности, представляющий сумму аномалий давления в центрах циклонов. Все показатели рассчитываются по 6-часовым данным реанализа NCEP-DOE [1]. Положение центров циклонов и траектории их смещения рассчитываются по данным атмосферного давления на уровне моря (MSLP) с использованием метода автоматической идентификации [2]. Для расчета параметров циклонической активности отбираются только циклоны с продолжительностью жизни от 12 часов и более.

Карты траекторий циклонов представлены с индикацией в центрах циклонов в каждый срок наблюдения значений атмосферного давления, максимальной скорости ветра и интенсивности осадков (рис.1). Кроме траекторий на портале ЕСИМО представлены карты пространственного распределения интегральных значений (за календарный месяц) количества центров циклонов и индекса циклонической активности. Для всего исследуемого региона, а также для отдельных выделенных районов, Балтийского и Баренцева морей, Арктической зоны РФ, рассчитываются интегральные ежемесячные показатели количества траекторий циклонов, центров циклонов, индекс циклонической активности. Ежемесячные значения интегральных показателей представлены в соответствующих информационных ресурсах на портале ЕСИМО за период с 1999г. по настоящее время. Средствами интерфейса можно получить графики их временного изменения.

Для оценки штормовой активности в отдельных районах, Балтийского и Баренцева морей, по значениям максимальной скорости ветра в центрах циклонов для каждого календарного месяца рассчитывается повторяемость центров циклонов по градациям скорости ветра по шкале Бофорта.



**Рис. 1.**

Пример представления на портале ЕСИМО траектории шторма, вышедшего на территорию России в феврале 2022г.: а) положение центров циклона, б) изменение атмосферного давления в центрах, в) изменение максимальной скорости ветра, и г) изменение интенсивности осадков (мм/сутки) в циклоне.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, vol. 83, pp. 1631–1643.
2. Вязилова Н.А. Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантике // *Метеорология и гидрология*, 2012, N 7, с.5-14.

# Extratropical cyclones of the North Atlantic and atmospheric circulation oscillations based on reanalysis ERA5

Vyazilova N.A.<sup>1</sup>, Viazilov A.E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

<sup>2</sup>RPA Typhoon, Obninsk, Russia

E-mail: nav@meteo.ru

The aim of this work is to show relationship between the interannual variability of cyclonic activity in the main areas of generation and regeneration of cyclones, entering European region of Russia, with North Atlantic (NAO) and East Atlantic (EAC) oscillations of large-scale atmospheric circulation. The analysis was performed for 42 winter seasons from October to March for the period from winter 1979/1980 to winter 2020/2021 based on reanalysis ERA5/ ECMWF.

Cyclones are identified based on 6-hour mean sea level pressure (MSLP) data in North Atlantic region [30°n-80°n, 50°w-70°e]. For analysis the cyclone trajectories with life of 12 hours or more were selected. In this work the number of cyclone centers and cyclone activity index were calculated as main characteristics of cyclonic activity in selected regions. The cyclone activity index was calculated as the summa of pressure anomalies in cyclone centers points of region for season. An analysis of the inter-annual variability of cyclonic activity parameters is presented for areas of Icelandic Low, Barents, Baltic and Mediterranean Seas. The maximum cyclonic activity during the entire period of the study was observed over Icelandic minimum region, the minimum – over Mediterranean Sea area. In Barents and Baltic regions trend of inter-annual variability in the number of cyclones and cyclonic activity index is similar to the trend of variability of these parameters in the area of the Icelandic low, although the values of the parameters themselves in these regions are weaker. The maximum increase in cyclonic activity in the areas of Icelandic Low, Barents and Baltic Seas was observed in winter seasons 1989-1990, 1999-2000, 2013-2014, 2019-2020. The maximum weakening in cyclonic activity in these areas was observed in 1984-1985, 2005-2006, 2009-2010 winter seasons. In the area of the Mediterranean Sea in these years, the opposite trend was observed.

The inter-annual variability in the selected regions of the North Atlantic is largely due to large-scale circulation fluctuations - the North Atlantic and East Atlantic oscillations. The North Atlantic Oscillation has a significant impact on the activity of cyclones in the winter season, primarily in the area of the Icelandic Low, as well as in the subpolar regions of the Atlantic, including the Barents Sea. An increase in the activity of cyclones in these areas is observed precisely during the years of the development of an intense positive phase of NAO. The maximum intensification of cyclonic activity both in the area of the Icelandic Low and in the area of the Barents and Baltic Seas is observed during the years when the positive phases of NAO and EAC coincide. In the same years, the maximum weakening of the activity of the Mediterranean cyclones is noted. During the years of development of the positive phase of the East Atlantic oscillation against the background of the negative phase NAO in the area of Icelandic Low was observed the significant weakening of cyclone centers number and cyclone activity index. At the same time, an increase in cyclonic activity is observed in the eastern part of the ocean and on the European continent. The increased activity of cyclones in Europe can be observed both in temperate and southern latitudes. Significant increase in cyclonic activity in the Mediterranean region in winter season 2009-2010 and it's weakening in areas of Icelandic Low and Barents Sea was noted precisely at intense negative values of the NAO index and intense positive values of the EA index.

# Внетропические циклоны Северной Атлантики и колебания атмосферной циркуляции по данным реанализа ERA5

Вязилова Н.А.<sup>1</sup>, Вязилов А.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск, Россия,

<sup>2</sup>ФГБУ «НПО -Тайфун», Обнинск, Россия

E-mail: nav@meteo.ru

**Введение.** Межгодовая изменчивость количества и интенсивности циклонов и штормов, выходящих на европейскую территорию России, в значительной степени может определяться общей циркуляцией атмосферы в районах их генерации и регенерации, - Исландского минимума, Баренцева, Балтийского и Средиземного морей. Согласно выводам целого ряда исследований, в том числе работ [1, 2], определяющим фактором, влияющим на погоду и климат в Северной Атлантике, является Северо-Атлантическое колебание (САК). Для количественной оценки развития САК обычно используется индекс NAO, рассчитываемый по полю давления на уровне моря, для которого существует наиболее длительный ряд инструментальных наблюдений. Однако, как показали некоторые исследования, например [2], индекс NAO отражает изменения только широтного положения основной зоны штормов в Северной Атлантике, но не изменение количества и интенсивности циклонов в европейском регионе. Для более полной картины развития аномалий циркуляции в Европе необходимо учитывать индексы, представляющие и другие колебания климатической системы в данном регионе: восточно-атлантического колебания, колебания Восточная Атлантика - Западная Россия, скандинавского колебания. Следует отметить, что региональные колебания климатической системы могут совпадать, а могут и не совпадать по фазе развития, и в различной комбинации друг с другом обеспечивать существенные различия в картине аномалий циркуляции в исследуемом регионе.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы показать взаимосвязь межгодовой изменчивости циклонической активности в основных районах генерации и регенерации циклонов, выходящих на европейскую территорию России в зимний сезон, с северо-атлантическим (САК) и восточно-атлантическим (ВАК) колебаниями крупномасштабной атмосферной циркуляции.

**Данные и методика анализа.** Анализ выполнен за период с 1979 по 2021 гг. на основе данных реанализа ERA5 [3], созданного в Европейском центре Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF). Идентификация циклонов проводилась на основе 6-часовых данных давления на уровне моря в узлах сетки с шагом  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$  в регионе Северной Атлантики и Европы с координатами: от  $30^\circ$  с.ш. до  $80^\circ$  с.ш., от  $50^\circ$  з.д. до  $70^\circ$  в.д. Процедура идентификации центров циклонов и расчета траекторий их смещения подробно представлена в работе [4]. Для расчета параметров циклонической активности в данном исследовании отбирались только циклоны, в период жизни которых хотя бы раз давление в центре было меньше 1000 гПа, и с продолжительностью жизни от 12 часов и более.

Основные характеристики циклонической активности, рассчитываемые в данной работе, представляют плотность циклонов и индекс циклонической активности. *Плотность циклонов* представляет количество идентифицированных центров циклонов в данной точке за календарный месяц. *Индекс циклонической активности* вычисляется как сумма аномалий атмосферного давления в центрах циклонов в каждой точке сетки за календарный месяц. Аномалии приземного давления в центрах циклонов были рассчитаны относительно ежемесячных климатических данных за период 1981-2010 гг.

Анализ межгодовой изменчивости параметров циклонической активности представлен для районов Исландского минимума, Балтийского, Баренцева и Средиземного морей. Для выбранных районов на основе данных в узлах сетки для каждого зимнего сезона, с октября по март, были рассчитаны интегральные показатели циклонической активности (суммарные по выбранному региону за сезон), а также их скользящие 5-летние средние значения.

Для анализа особенностей крупномасштабной атмосферной циркуляции в Северной Атлантике и Европе были построены карты плотности центров циклонов и индекса циклонической активности, представляющие, как среднемноголетнее распределение характеристик циклонической активности, так и композитные средние характеристики для выборок лет с различной комбинацией положительных и отрицательных фаз северо-атлантического и восточно-атлантического колебаний. Знак и интенсивность фаз САК и ВАК определялись соответственно по индексам NAO и EA, публикуемым на сайте Национального метеорологического центра США.

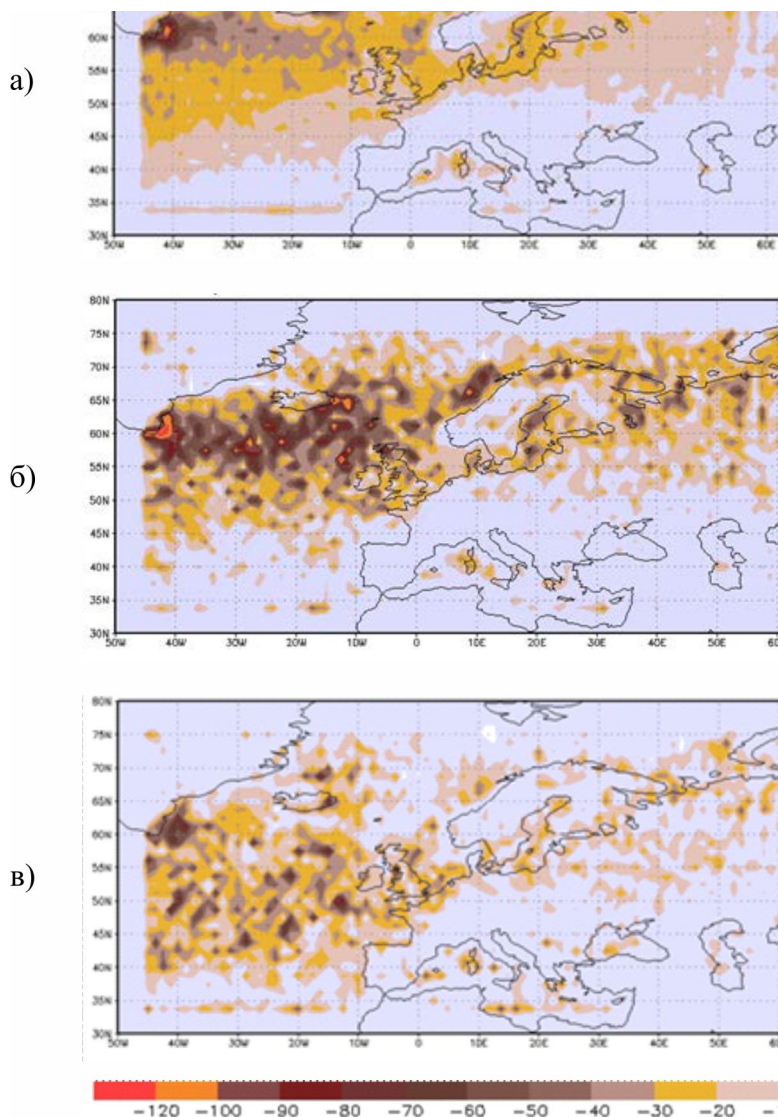
**Результаты исследования.** Сравнение межгодового изменения количества центров циклонов и индекса циклонической активности в выбранных районах Северной Атлантики в зимний сезон показывает, что максимальной циклонической активностью в течение всего периода исследования отличается



район Исландского минимума, минимальной – район Средиземного моря. В районе Балтийского и Баренцева моря тенденция межгодовой изменчивости количества циклонов и индекса циклонической активности в течение всего периода исследования аналогична тенденции изменчивости данного параметра в районе Исландского минимума, хотя сами значения параметров в этих районах слабее. Максимальное усиление циклонической активности и в районе Исландского минимума, и в районе Балтийского и Баренцева моря отмечалось в зимние сезоны 1989-1990, 1999-2000, 2013-2014, 2019-2020 гг. Минимальные значения индекса циклонической активности в данных районах отмечены в зимние сезоны 1984-1985, 2005-2006, 2009-2010. В районе же Средиземного моря в эти годы наблюдалась обратная тенденция. Максимальное усиление циклонической активности наблюдалось в 1984-1985, 2005-2006, 2009-2010, существенное ослабление отмечено в зимний сезон 1989-1990, 1999-2000 гг. В целом, период ослабления циклонической активности в этом районе отмечен с начала 1990-х до 2000-х годов, а затем наблюдается значительное усиление активности циклонов.

Межгодовая изменчивость в выделенных районах Северной Атлантики в значительной степени обусловлена колебаниями крупномасштабной циркуляции – северо-атлантическим и восточно-атлантическим колебаниями. Анализ пространственного распределения параметров циклонической активности в годы развития САК и ВАК позволяет сделать следующие выводы. Северо-атлантическое колебание оказывает значительное влияние на активность циклонов в зимний сезон, прежде всего, в районе Исландского минимума, а также в субполярных районах Атлантики, в том числе в районе Баренцева моря. Усиление активности циклонов в этих районах наблюдается именно в годы развития интенсивной положительной фазы САК. Это подтверждает вывод о смещении циклонической активности в более северные широты в годы положительных значений индекса NAO, полученный в работах других авторов. Максимальное усиление циклонической активности и в районе Исландского минимума, и в районе Баренцева и Балтийского моря наблюдается в годы совпадения положительных фаз САК и ВАК, в эти же годы отмечается максимальное ослабление активности средиземноморских циклонов. В годы развития положительной фазы ВАК на фоне отрицательной фазы САК в районе Исландского минимума от-

мечается значительное ослабление и количества циклонов, и их интенсивности, в то же время на восточной акватории океана и на европейском континенте наблюдается усиление циклонической активности. При этом усиление активности циклонов в Европе может отмечаться как в умеренных, так и южных широтах. Значительное усиление циклонической активности в средиземноморском регионе в зимний сезон 2009-2010 гг., и ее ослабление в районах Исландского минимума и Баренцева моря, отмечено именно при интенсивных отрицательных значениях индекса NAO и интенсивных положительных значениях индекса EA.



**Рис. 1.** Пространственное распределение средних значений индекса циклонической активности в зимний сезон (в гПа): а) для всего периода исследований; б) для лет с положительной фазой САК и положительной фазой EA (1989/90, 2013/14, 2019/20), в) для лет с отрицательной фазой САК и отрицательной фазой EA (1984/85, 1995/96, 2005/06).

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Бардин М.Ю., Полонский А. Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т.41, N2. С. 147-157.
2. Нестеров Е.С. О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. 2009. N12. С. 32-40.
3. Hersbach et. al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol.146, no.730. P. 1999-2049.
4. Viazilova N. A. and Viazilov A E. On climatology of storm cyclones entering European region of Russia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 611, no 1. 012004.

## Analysis of Changes in Surface Air Temperature in the Northern Hemisphere in Different Climatic Periods

**Alympieva M.A., Morozova S.V., Polyanskaya E.A.**

Saratov State University, Saratov, Russia  
E-mail: [alimpieva@rambler.ru](mailto:alimpieva@rambler.ru)

Changes in the near-surface air temperature on the planet, including in the Northern Hemisphere, are quite detailed and thoroughly presented in modern literature. However, for the most part, studies are not tied to the natural climatic periods of the state of the earth's climate system. We point out that the term "natural climatic period" was proposed by S.V. Morozova [1-3]. Statistical substantiation of the boundaries of the periods is also given in [1-3].

In this study, the authors set the task of quantifying the change in surface air temperature during two natural climatic periods of the state of the Earth's climate system - the period of stabilization and the second wave of global warming - in the Northern Hemisphere. air temperature of the Northern Hemisphere with a spatial resolution of  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ . Based on these data, the average long-term fields were calculated during the period of stabilization (1949–1974) and during the second wave of global warming (1975–2020). Further, the difference between the values of surface air temperature during the second wave of global warming and during the period of stabilization was determined. The temperature difference was visualized on a geographic grid using the MAPINFO software package. The study was completed for January.

An analysis of the constructed map showed that the largest increase in air temperature corresponds to the high latitudes of the Northern Hemisphere. The air temperature in this zone from the period of stabilization to the second wave of global warming increased by an average of 4 - 6 °C. The most "bright" warming centers are recorded in a narrow latitudinal zone in the region of the 75th parallel, which approximately corresponds to the localization area of the Gulf Stream. The second "bright" focus is noted on the American continent in the area of the Great Plains. Significantly (by 3 °C - 5 °C) from the period of stabilization to the second wave of global warming in January, the temperature increased in North Africa (Sahara Desert) and Central Asia.

The strongest temperature changes from one studied climatic period to another are noted in the area of influence of the Aleutian Low and in the region of the Japanese Islands. The decrease was 3 - 4 °C. According to the map of the distribution of the temperature difference between the second wave of global warming and the period of stabilization over the central part of Greenland, in the second climatic period under study (second wave of global warming), temperatures became lower than in the first (stabilization period). Note that this focus is observed against the background of the warming of the Arctic. Thus, from the period of stabilization to the second wave of global warming, the temperature of the ocean surface mainly decreased, with the exception of the Arctic basin, on land, on the contrary, positive anomalies are recorded.

**REFERENCES:**

1. Morozova S.V. The role of planetary circulation objects in global climate processes. Saratov. Publishing house SSU. 2019. 132 p.
2. Morozova SV, Polyanskaya EA, Ivanova GF, Levitskaya NG, Denisov KE, Molchanova NP. Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). Volume 107. 2018.
3. Morozova SV, Polyanskaya EA, Kononova NK, Molchanova NP and Solodovnikov AP Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 381. 2019. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1>

# Анализ изменения приповерхностной температуры воздуха Северного полушария в различные климатические периоды

Алимпиева М.А., Морозова С.В., Полянская Е.А.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
Саратов, Россия  
E-mail: [alimpiewa@rambler.ru](mailto:alimpiewa@rambler.ru)

Изменения приповерхностной температуры воздуха на планете, в том числе и на Северном полушарии, довольно подробно и обстоятельно представлены в современной литературе, например, в [1-4]. В Оценочных докладах [1,2] публикуются материалы о будущих тенденциях изменения метеорологических величин, в том числе и температуры воздуха. Очевидным является пространственно - временная неоднородность развивающегося потепления. Наибольшая скорость потепления фиксируется в Арктике, в низких широтах потепление практически не выражено, или выражено очень слабо [1,2]. Временная неоднородность наблюдающегося потепления тоже хорошо изучена [1-4]. Помимо сезонных особенностей (потепление зимне-весенних сезонов), внутри потепления выделяют периоды, различающиеся тенденцией изменения приповерхностной температуры. Морозова С.В. предложила называть эти временные интервалы *естественными климатическими периодами* состояния земной климатической системы [7 – 9].

Авторами исследования поставлена задача дать количественную оценку изменений приповерхностной температуры воздуха от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления. Для решения этой задачи по данным сайта (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/#>) построен график хода средней приповерхностной температуры воздуха Северного полушария и проведен статистический анализ изменения температуры. К временному ряду средних годовых температур применен метод ступенчатого тренда [5, 6]. Оценка значимости изменений проводилась с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Дополнительно использовался метод доверительных интервалов с применением критерия Стьюдента (уровень значимости 95 %). Используемые статистические приемы позволили выделить годы нарушения однородностей и провести датировку известных климатических периодов – малого ледникового периода в Европе, первой волны глобального потепления, периода стабилизации, второй волны глобального потепления. Датировка климатических интервалов приведена в табл. 1, сами периоды представлены на графике (рис. 1), Внутри каждого естественного климатического периода проведена линия тренда.

Данные табл. 1 указывают на статистическую значимость изменения приповерхностной температуры Северного полушария. Визуализация представленных в табл. 1 естественных климатических периодов состояния земной климатической системы (ЗКС) показана на рис. 1.

**Таблица 1.**

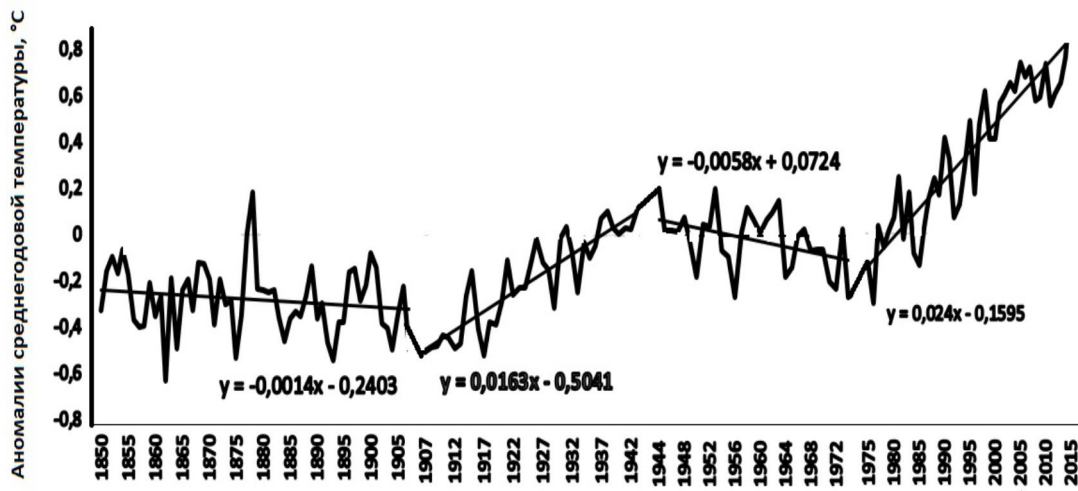
Оценка статистической значимости изменений аномалий средней годовой температуры Северного полушария.

Периоды, гг.	Статистические характеристики значимости изменений			Доверительные интервалы
	$\alpha$	$\bar{\chi}$	$\sigma$	
1) малый ледниковый (1850-1907)	-0,0014	-0.283	0.147	[-0,508; -0, 315]
2) первая волна (1908 – 1943)	0,0163	-0.185	0.194	[-0,240; -0,130]
3) стабилизация (1944 – 1974)	-0,0058	-0.020	0.124	[-0,078; 0,038]
4) вторая волна (1975 – 2016)	0,0240	0.356	0.320	[0,273; 0,439]

Оказывается интересным посмотреть, насколько сильно произошли изменения приземной температуры воздуха в различных районах Северного полушария от одного климатического периода к другому. Для анализа временной изменчивости температуры выбран центральный месяц зимнего сезона – январь. Именно в зимний сезон развивающееся потепление выражено наиболее сильно. Для решения такой задачи необходимо построить карту, на которой представить распределение разницы температур по Северному полушарию.

Для построения карты использовались данные реанализа NCER/NCAR о приземной температуре воздуха Северного полушария с пространственным разрешением  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ . В связи с имеющимися



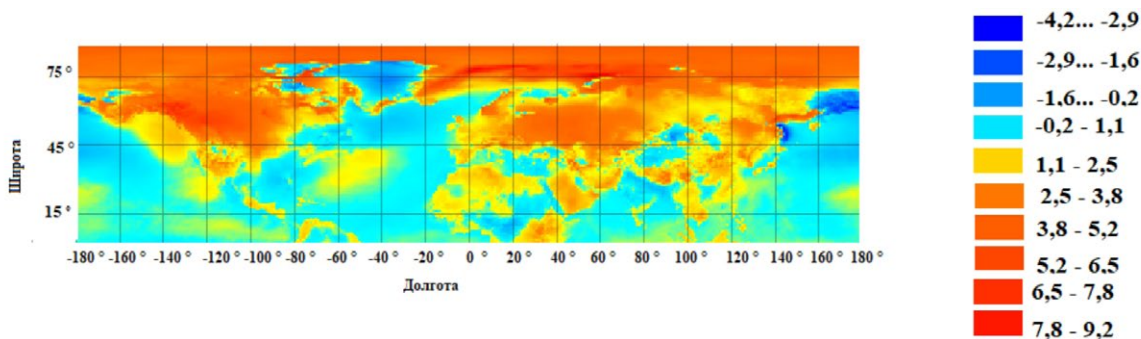


**Рис. 1.** Временной ход аномалий приповерхностной температуры воздуха Северного полушария.

данными исследования проведены для периода стабилизации и второй волны глобального потепления. Были построены матрицы распределения средних многолетних значений температуры воздуха для периода стабилизации (1949 – 1974 гг.) и для второй волны глобального потепления (1975 – 2020 гг.) в январе. Разница определялась разностью температур между второй волной глобального потепления и периодом стабилизации. Картирование полученного цифрового материала проводилось с помощью программного комплекса MAPINFO.

На рис. 2 представлена карта распределения разницы температур на Северном полушарии в январе. По рис. 2 можно заключить, что наибольший рост температуры воздуха соответствует высоким широтам Северного полушария. Температура воздуха в этой зоне от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления выросла в среднем на 4 – 6 °С. Самые «яркие» очаги потепления фиксируются в узкой широтной зоне в районе 75 параллели, что примерно соответствует области прохождения Гольфстрима. Второй «яркий» очаг отмечается на Американском континенте в районе Великих равнин. Следует отметить, что существенно от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления повысилась температура в Северной Африке (пустыня Сахара) и Центральной Азии.

Наиболее сильные отрицательные изменения температуры от одного исследуемого климатического периода к другому отмечаются в области влияния Алеутского минимума и в районе Японских островов. Понижение составило 3 – 4 °С. По карте распределения разности температур между второй волной глобального потепления и периодом стабилизации над центральной частью Гренландии во второй исследуемый климатический период (вторая волна глобального потепления) температуры стали ниже, чем в первый (период стабилизации). Отметим, что этот очаг наблюдается при повсеместном потеплении Арктики.



**Рис. 2.** Распределение разницы приземной температуры воздуха на Северном полушарии.

Таким образом от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления в основном понижалась температура океанической поверхности, за исключением Арктического бассейна, на суше, наоборот, фиксируются положительные аномалии



## ЛИТЕРАТУРА:

1. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.*
2. *Второй Оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: 2014. 60 с.*
3. *Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Изд-во Казан. ун – та. 2009. 504 с.*
4. *Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: Изд-во ВНИГМИ-МЦД. 2008. 246 с.*
5. *Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во Высшая школа, 2003. 480 с.*
6. *Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатологическая обработка метеорологической информации. Ленинград: Гидрометеиздат. 1978, 294 с.*
7. *Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов. Изд-во СГУ. 2019. 132 с.*
8. *Morozova SV, Polyanskaya EA, Ivanova GF, Levitskaya NG, Denisov KE, Molchanova NP. Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). Volume 107. 2018.*
9. *Morozova SV, Polyanskaya EA, Kononova NK, Molchanova NP and Solodovnikov AP Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 381. 2019. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1>*

# Analysis of the temporal and spectral dynamics of air temperature recorded at the Mikhnevo observatory in 2021

Riabova S.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia

E-mail: [riabovasa@mail.ru](mailto:riabovasa@mail.ru)

The air temperature in the near-surface layer of the Earth's atmosphere is one of the main meteorological elements that reflect the physical and geographical features of a particular region.

Temperature changes near the Earth's surface affect many areas of economic activity, mainly agriculture. Information about the temporal and spatial dynamics of air temperature is necessary for the effective development of many sectors of the national economy.

The aim of this work is to study the temporal and spectral temperature variations in the near-surface layer of the Earth for the period from January to December 2021 for the Moscow region according to the Mikhnevo Geophysical Observatory of Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences (54°57' N; 37°46' E). For processing and analysis, we used data from atmospheric temperature measurements obtained with the Davis Vantage Pro2 automated digital weather station.

In order to study the temporal dynamics of the air temperature recorded at the Mikhnevo observatory, average monthly values (as an average value over the selected interval) were calculated from every minute registration data, as well as maximum and minimum values and standard deviation. In addition, in this work, we performed a spectral analysis of temperature recording data. The spectra of temperature variations in the surface layer of the atmosphere were estimated by the Lomb-Scargle method.

An analysis of the daily variation showed that the minimum air temperature is observed before sunrise, its maximum is registered 2–3 hours after noon. In 2021 the lowest average monthly temperature was observed in February (-11.86° C). The highest average monthly temperature was in July (20.28° C). The lowest temperature was observed in February (-30.7° C). The highest temperature was in June (34.7° C).

The results of the studies show that the spectra of temporal temperature variations in the near-surface layer of the atmosphere recorded at the Mikhnevo geophysical observatory in 2021 contain both harmonics associated with solar forcing (daily periodicity and its harmonics) and harmonics corresponding to planetary waves (quasi-2-day, quasi-5-day, quasi-10-day and quasi-16-day waves).

*Experimental studies were carried out within the framework of the state task of the IDG RAS No. 1220329000185-5 "Manifestation of processes of natural and technogenic origin in geophysical fields". The interpretation of the results was carried out within the framework of the state task of the IPE RAS.*



# Анализ временной и спектральной динамики температуры воздуха, зарегистрированной на обсерватории «Михнево» в 2021 г.

Рябова С.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

E-mail: riabovasa@mail.ru

## ВВЕДЕНИЕ

По официальным оценкам Росгидромета [1] «на территории России в последние десятилетия потепление климата происходило быстрее и масштабнее, чем в среднем по Земному шару. Так скорость современного роста глобальной температуры, вызванного в основном увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, составила за последние сорок лет около 0,17 °С за 10 лет. Температура на территории России растет значительно быстрее – 0,45 °С за 10 лет, и особенно быстро в Арктике, где скорость роста достигает 0,8 °С за 10 лет». Более того, именно с потеплением Росгидромет связывает рост опасных гидрометеорологических явлений.

Температура воздуха в приповерхностном слое атмосферы Земли является одним из основных метеорологических элементов, отражающих физико-географические особенности того или иного региона [2].

Изменения температуры у земной поверхности оказывают влияние на многие области хозяйственной деятельности, главным образом на сельское хозяйство [3, 4]. Сведения о временной и пространственной динамике температуры воздуха необходимы для эффективного развития многих отраслей народного хозяйства [5].

Целью настоящей работы является исследование временных и спектральных вариаций температуры в приповерхностном слое Земли за период с января по декабрь 2021 г. для Московской области по данным Геофизической обсерватории «Михнево» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При исследовании временных и спектральных вариаций в Московской области в качестве исходных данных использовались данные инструментальных наблюдений за температурой, выполненных на среднеширотной геофизической обсерватории «Михнево» Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук.

Геофизическая обсерватория «Михнево» расположена в 85 км к югу от города Москвы, на юге Московской области (неподалеку от города Серпухов). Географические координаты обсерватории «Михнево»: 54°57' с.ш., 37°46' в.д.

Для обработки и анализа использовались данные измерений температуры атмосферы, полученные с помощью автоматизированной цифровой метеостанции Davis Vantage Pro2. Регистрация выполнялась с дискретизацией 1 мин с точностью 0,1° С. Результаты регистрации выложены на сайте ИДГ РАН в графическом и цифровом виде (<http://idg-comp.chph.ras.ru/>).

## МЕТОДЫ

С целью изучения временной динамики температуры воздуха, зарегистрированной на обсерватории «Михнево», по ежеминутным данным регистрации вычислялись среднемесячные значения (как среднее значение на выбранном интервале), а также максимальные и минимальные значения и среднеквадратичное отклонение.

Кроме того, в настоящей работе выполнялся спектральный анализ данных регистрации температуры. Были оценены спектры вариаций температуры в приземном слое атмосферы методом Ломба-Скаргла [6]. Следует отметить, что метод Ломба-Скаргла позволяет осуществить спектральный анализ непосредственно над неравномерно дискретным сигналом. В основе метода лежит МНК-аппроксимация сигнала гармоническими функциями [7].

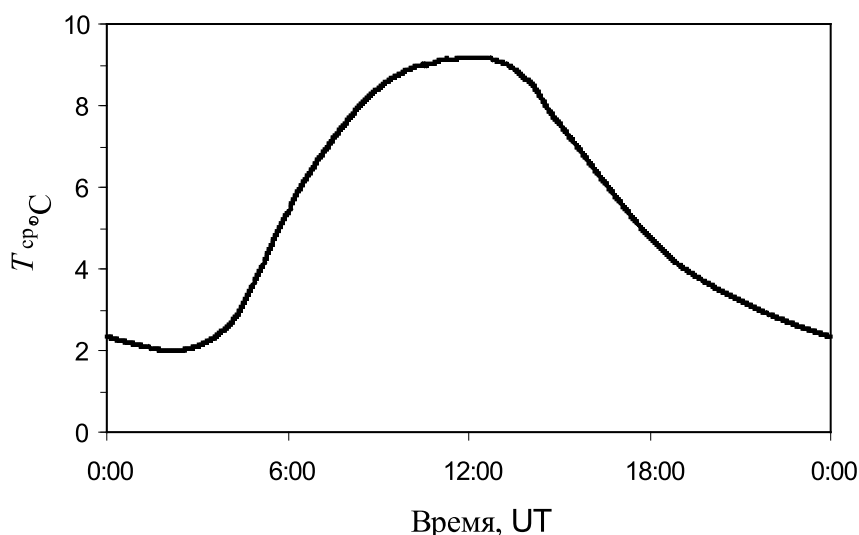
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ суточной вариации показал, что минимальная температура воздуха наблюдается перед восходом Солнца. По мере его поднятия над горизонтом температура воздуха в течение 2–3 ч быстро повышается. Затем рост температуры замедляется. Максимум ее наступает через 2–3 ч после полудня. Далее

температура понижается – сначала медленно, а затем более быстро. На рис. 1 представлен средний суточный ход температуры на обсерватории «Михнево» за период 2021 г.

Некоторые статистические характеристики температуры воздуха приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что в 2021 г. наиболее низкая среднемесячная температура наблюдалась в феврале (-11,86° С). Отдельные дни января и марта были достаточно холодными, минимальные значения составили -28,4° и -28,6° С соответственно. Однако среднемесячная температура в марте была выше. С увеличением прихода солнечной радиации весной происходил заметный рост температуры. В апреле температура была выше, чем в марте примерно на 6,8° С. От мая к июню температура повысилась приблизительно на 5,9° С.

Наиболее высокие показатели приходились на июль. От июля к августу начался медленный спад температуры воздуха. Значительный спад термического напряжения начался с августа: от сентября к октябрю примерно на 9,6° С, от октября к ноябрю на 4,9° С и от ноября к декабрю на 8,9° С.



**Рис. 1.** Средний за период 2021 г. суточный ход температуры в приземном слое атмосферы, по данным регистрации на обсерватории «Михнево». Локальное время: UT + 3 часа.

**Таблица 1.**

Некоторые статистические характеристики температуры воздуха, зарегистрированной на обсерватории «Михнево» в 2021 г.

Месяц	Минимум	Максимум	Среднее значение	Среднеквад. отклонение
Январь	-28,4	2	-6,99	6,69
Февраль	-30,7	6,1	-11,86	7,38
Март	-28,6	11,6	-2,52	6,94
Апрель	-4,6	23,1	6,01	5,77
Май	-0,5	31	12,8	6,26
Июнь	3,2	34,7	18,67	6,5
Июль	6,4	33,1	20,28	5,97
Август	5,8	33	18,49	4,94
Сентябрь	-2,5	23,4	8,9	4,46
Октябрь	-4,8	15,4	4,94	4,45
Ноябрь	-11,1	12,3	1,46	4,11
Декабрь	-26,1	2,4	-7,44	5,97

Результаты проведенных исследований показывают, что в спектрах временных вариаций температуры в приповерхностном слое атмосферы, зарегистрированных на геофизической обсерватории «Михнево» в 2021 г., наблюдаются как гармоники, связанные с солнечным воздействием (суточная периодичность и ее гармоники), так и гармоники, соответствующие планетарным волнам (квази-2-дневные, квази-5-дневные, квази-10-дневные и квази-16-дневные волны).

*Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1220329000185-5 «Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях», интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*



## ЛИТЕРАТУРА:

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург. 2017. 106 с
2. IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M.M.B., Miller H.L. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo, Delhi: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
3. Wheeler T., von Braun J. *Climate change impacts on global food security* // *Science*. 2013. Vol. 341. P. 508-513.
4. Kaiser H.M. *Climate change and agriculture* // *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics*. 1991. Vol. 20. No. 2. doi:10.1017/S0899367X0000297X.
5. Zhao C., Bing Liu B., Piao S., Wang X., Lobell D.B., Huang Y., Huang M., Yao Y., Bassu S., Ciais P., Durand J.-L., Joshua Elliott J., Ewert F., Janssens I.A., Li T., Lin E., Liu Q., Martre P., Müller C., Peng S., Peñuelas J., Ruane A.C., Wallach D., Wang T., Wu D., Liu Z., Zhu Y., Zhu Z., Asseng S. *Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates* // *Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 114. No. 35. P. 9326-9331.
6. Scargle J.D. *Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data* // *Astrophysical Journal*. 1982. Vol. 263. Part 1. P. 835-853.
7. Витязев В.В. *Анализ неравномерных временных рядов: Учебное пособие*. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. 68 с.

## Distribution of Temperature and Humidity in the Atmospheric Boundary Layer over the Siberian Region

Lomakina N.Ya., Lavrinenko A.V.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: lnya@iao.ru, gfm@iao.ru

Statistical (climatic) data on the altitude distribution of temperature and humidity in the atmospheric boundary layer (ABL) are necessary for information support of various problems of climatology, hydro-meteorology, ecology, and atmospheric optics. Modern climate warming is accompanied by an increase in atmospheric air humidity, so there is a need to reassess the statistical characteristics of temperature and humidity, taking into account the latest data, both at the global and regional levels, especially for the atmospheric boundary layer, which contains up to 50% of the total mass of water vapor, while as there is 98–99% in the troposphere.

In this work, to analyze the air temperature and humidity in the atmospheric boundary layer of Siberia, we used data of long-term (1981–2020) two-time (00 and 12 GMT) radiosonde observations (<http://www.weather.uwyo.edu/>) of 24 aerological stations located in different latitudinal zones of the region. The initial aerological sounding data obtained at the main isobaric surfaces and the levels of the special points were previously reduced by linear interpolation to a system of the more frequent geometric heights: 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, and 1600 m. The altitude profiles of the mean monthly, mean seasonal, and mean annual air temperatures and the mass fraction of water vapor were calculated for each 24 stations. For the results presentation clarity, maps of the spatial distribution of the mean annual (seasonal) temperature and humidity were constructed for four altitude levels of the ABL: 0 (ground level), 400, 800, and 1600 m.

Analysis of the spatial and temporal distribution of the average annual, average seasonal and average monthly air temperature and humidity in the atmospheric boundary layer over the Siberian region according to the data of 24 aerological stations for the period from 1981 to 2020 showed the following results.

On average for the year, as well as in winter, spring and autumn, the air temperature and the mass fraction of water vapor decrease in the northeast direction in the ABL in Siberia. In summer, there is a zonal distribution of temperature and humidity: a decrease from south to north.

Air temperature inversions are observed in the polar and subpolar latitudes of Western Siberia from November to April, and they are observed in temperate latitudes until March. For Eastern Siberia, the presence of temperature inversions is typical from October to April, and for the central regions of Yakutia – from September to April. The most thick temperature inversions are observed in the central regions of Yakutia in January.

Inversion distribution of average monthly humidity is observed in most of Siberia in the cold half-year from October to March. There are humidity inversions in the subpolar regions of Western Siberia, as well as in



the polar and subpolar latitudes of Eastern Siberia for a longer period (from October to April). Humidity inversions are present in temperate latitudes of Western Siberia from October to February.

*The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences).*

## Распределение температуры и влажности в пограничном слое атмосферы Сибирского региона

Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: lnya@iao.ru, gfm@iao.ru

Статистические (климатические) данные о высотном распределении температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы (ПСА) необходимы для информационного обеспечения различных задач климатологии, гидрометеорологии, экологии, оптики атмосферы (например, для моделирования и прогноза глобального и региональных климатов, гидродинамического прогноза облачности и осадков, оценки радиационных составляющих климата и переноса загрязняющих веществ, парниковых газов, скорости образования озона, для интерпретации данных лидарного зондирования и учета атмосферной рефракции и т.п.).

Температурный режим воздуха у земной поверхности [1–3] и в свободной атмосфере [4–6] хорошо исследован. Вертикальная структура метеорологических полей в пограничном слое атмосферы менее изучена [7, 8], особенно в таком обширном и малоосвещенном данными наблюдений регионе, как Сибирь. Потепление климата в значительной степени зависит от увеличения в атмосфере концентрации парниковых газов, среди которых главную роль играет водяной пар (влажность воздуха) [9, 10], удерживающий тепло в приземном слое атмосферы, поглощая уходящую от земной поверхности длинноволновую радиацию в инфракрасном диапазоне [11]. При увеличении температуры воздуха увеличивается влагосодержание атмосферы, что вызывает усиление парникового эффекта и приводит к дальнейшему повышению температуры воздуха [10]. Современное потепление климата [6, 10] сопровождается увеличением атмосферной влажности воздуха, поэтому возникает необходимость переоценки статистических характеристик температуры и влажности с учетом новейших данных [3], как на глобальном, так и региональном уровнях и особенно для пограничного слоя атмосферы, где содержится до 50% общей массы водяного пара, в то время как в тропосфере – 98–99% [12].

Данная работа охватывает ряд наблюдений за температурой и влажностью пограничного слоя территории Сибири за период с 1981 по 2020 гг. В качестве исходного материала послужили данные многолетних (1981–2020 гг.) двухразовых (00 и 12 ч. GMT) радиозондовых наблюдений (<http://www.weather.uwyo.edu/>) 24 аэрологических станций, расположенных в различных широтных зонах Сибирского региона. Исходные данные аэрологического зондирования, полученные на главных изобарических поверхностях и уровнях особых точек, были предварительно приведены к системе учащенных геометрических высот: 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м (с помощью линейной интерполяции).

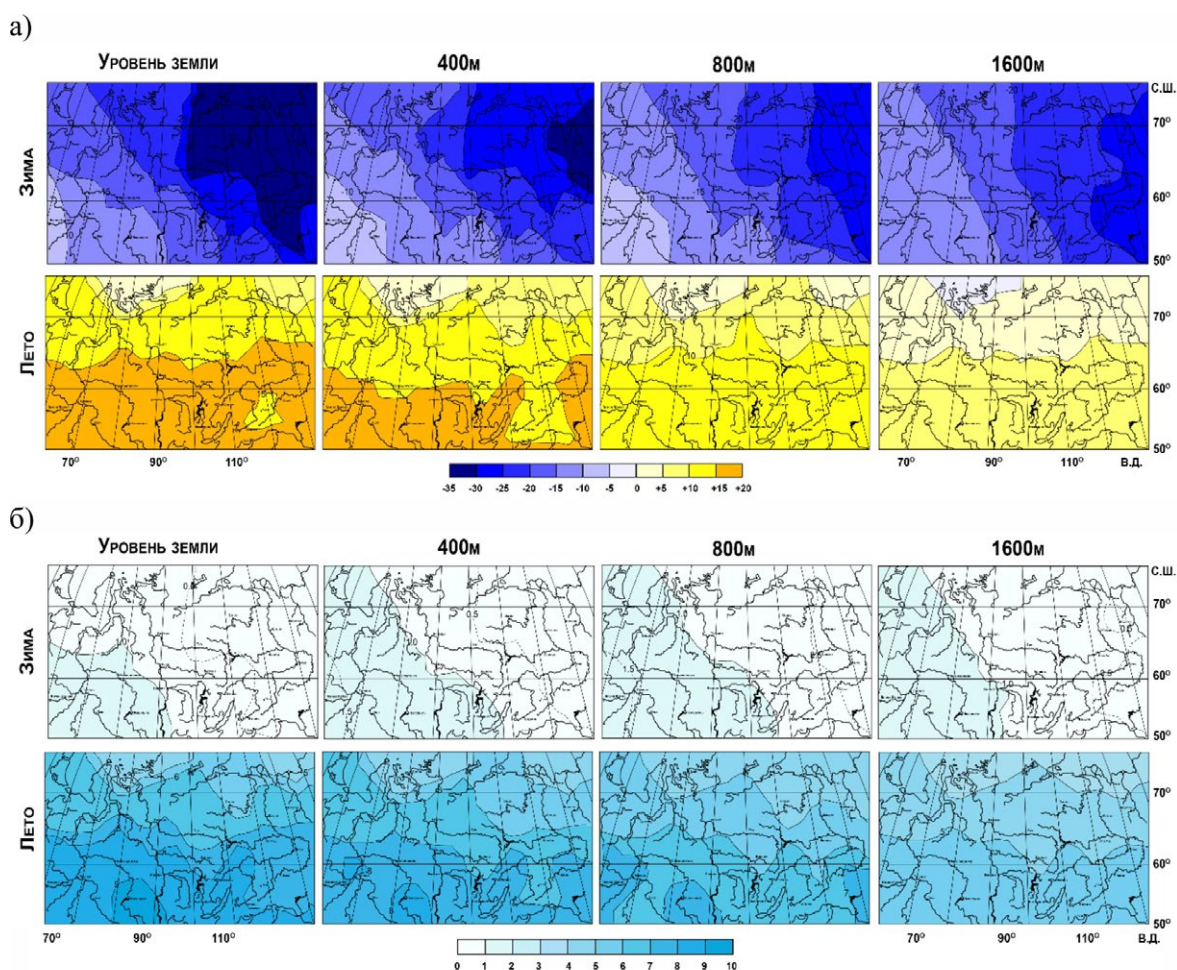
Для каждой станции вычислялись высотные профили среднемесячной, среднесезонной и среднегодовой температуры воздуха (°C) и массовой доли водяного пара (о/оо). Для наглядности представления результатов были построены карты пространственного распределения среднегодовой (среднесезонной) температуры и влажности для четырех высотных уровней ПСА: 0 (уровень земной поверхности), 400, 800 и 1600 м.

В годовом ходе температуры воздуха и массовой доли водяного пара во всем пограничном слое атмосферы большей части территории Сибири минимум наблюдается в январе, и только в полярных широтах Западной Сибири у земной поверхности – в феврале. Максимальные значения температуры и влажности воздуха в ПСА Сибири характерны для июля, за исключением полярной зоны региона, где максимум приходится на август.

Анализ вертикального распределения среднемесячной температуры воздуха показал, что в Западной Сибири инверсии температуры наблюдаются в полярных и субполярных широтах с ноября по апрель, а в умеренных – по март. Для Восточной Сибири характерно наличие температурных инверсий с октября по апрель, а для центральных районов Якутии – с сентября по апрель. Наиболее мощные температурные инверсии наблюдаются в центральных районах Якутии в январе, при этом по высоте они достигают уровня 1200–1600 м, где значения температуры воздуха могут превышать приземную температуру на 15–20°C. С мая по август температура воздуха в пограничном слое атмосферы убывает с высотой на всей территории Сибири. Сентябрь характеризуется наличием неглубоких инверсий тем-

пературы, высота которых составляет 100–300 м, в субполярных и умеренных широтах Восточной Сибири. В октябре инверсионное высотное распределение температуры наблюдается на всей территории Восточной Сибири, высота инверсий увеличивается до 200–600 м. В ноябре инверсии температуры воздуха наблюдаются уже почти на всей территории Сибири, кроме зоны умеренных широт Западной Сибири, где преобладает изотермическое вертикальное распределение температуры или слабое падение температуры с высотой.

Вертикальные инверсии среднемесячной массовой доли водяного пара наблюдается в ПСА на большей части территории Сибири в холодное полугодие с октября по март, а в субполярных широтах Западной Сибири и в полярных и субполярных районах Восточной Сибири – с октября по апрель. Максимальная высота инверсий влажности (1600 м) характерна для полярных и субполярных областей Восточной Сибири с декабря по февраль. В умеренных широтах Западной Сибири инверсии влажности присутствуют с октября по февраль. В октябре и ноябре их высота составляет 100–200 м, а до высоты 300–600 м наблюдается постоянство массовой доли водяного пара с высотой. В зимние месяцы (с декабря по февраль) в умеренных широтах Западной Сибири высота инверсий влажности составляет 600–800 м. Массовая доля водяного пара убывает с высотой в ПСА Сибири в теплое полугодие: с марта по сентябрь на юге Западной Сибири; с апреля по сентябрь в полярных областях Западной Сибири и в умеренных широтах Восточной Сибири; с мая по сентябрь в субполярных районах всего Сибирского региона.



**Рис. 1.** Пространственное распределение по территории Сибири среднесезонной температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) (а) и массовой доли водяного пара ( $\text{‰}$ ) (б) на различных уровнях пограничного слоя атмосферы для зимы и лета.

Анализ температурно-влажностного режима пограничного слоя атмосферы показал, что поле температуры и влажности воздуха над территорией Сибири является неоднородным по пространству и зависит от сезона. На рис. 1 в качестве примера представлено пространственное распределение по территории Сибири среднесезонной температуры и влажности воздуха на четырех уровнях ПСА для зимы и лета.

Зимой, весной и осенью наибольшие значения температуры и влажности воздуха наблюдаются на юго-западе региона, они убывают в направлении на северо-восток территории.

Летом в пограничном слое атмосферы Сибири наблюдается зональное распределение температуры и влажности воздуха: их среднесезонные значения уменьшаются в направлении с юга на север. Максимальная температура и влажность воздуха отмечается на юге региона: 13,9–18,2°C и 8,43–9,02% на уровне земной поверхности и 4,9–9,2°C и 5,40–5,60% на высоте 1600 м, минимальная – в полярных широтах от 4,0–6,7°C до -0,1–1,9°C и 4,67–5,01 о/оо и 3,33–3,70%, соответственно.

Зимой инверсии температуры и влажности воздуха наблюдаются во всем ПСА Сибири. Весной инверсии температуры наблюдаются в полярных районах всего региона, субполярных широтах Западной Сибири, и в центральных областях Восточной Сибири, а инверсии массовой доли водяного пара – только в полярных широтах. Летом температура и влажность воздуха убывают с высотой в ПСА Сибирского региона. Осенью инверсионное распределение температуры и влажности наблюдается только в субполярных и умеренных широтах Восточной Сибири.

Для среднегодовой температуры воздуха и массовой доли водяного пара характерно их уменьшение в направлении с юго-запада на северо-восток территории Сибири.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кобышева Н.В. *Климат России*, СПб: Гидрометеиздат, 2001. 655 с.
2. *Национальный атлас России. Т.2. Природа. Экология* / Москва: Роскартография, 2007. 495 с.
3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. *Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха*. Обнинск: ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
4. *Справочник статистических характеристик температуры и влажности в свободной атмосфере над СССР. Часть I. Параметры распределения температуры* / Под ред. Комарова В.С. М.: Гидрометеиздат, 1972. 160 с.
5. Зуев В.Е., Комаров В.С. *Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
6. *Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год*. Москва: Росгидромет, 2021. 104 с.
7. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. *Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири*. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 222 с.
8. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. *Особенности вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы над территорией Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24. № 07. С. 560–567.
9. Кондратьев К.Я. *Глобальный климат // Итоги науки и техники. Серия «Метеорология и климатология»*. М.: ВИНТИ, 1987. Т.17. 313 с.
10. *Переведенцев Ю.П. Теория климата*. Казань: Изд-во Казанского университета, 2009. 504 с.
11. Исаев А.А. *Экологическая климатология*. М.: Научный мир, 2001. 458 с.
12. Хромов С.П., Петросяни М.А. *Метеорология и климатология*. М.: Изд-во МГУ; Колос-С, 2001. 582 с.

## Tendencies in the variability of climatic values in permafrost zone of Western Siberia in the XXI century

Kharyutkina E.V.<sup>1,2</sup>, Martynova Yu.V.<sup>1</sup>, Moraru E.I.<sup>1</sup>, Loginov S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Center for Research and Invention, Veliky Novgorod, Russia

E-mail: [kh\\_ev@imces.ru](mailto:kh_ev@imces.ru)

In the framework of the study, we investigate spatiotemporal variability of the main climatic variables in the Arctic part of the territory of Western Siberia at the end of the XXth and beginning of the XXIst centuries, as well as their trends until the year of 2100 using the method of mathematical modeling. Calculations of the variability of the main climatic parameters (surface air temperature, wind speed, atmospheric precipitation, and soil temperature at depths) were carried out for the northern part of Western Siberia (60–70° N, 60–90° E). We used daily and monthly averaged values of these quantities measured at meteorological stations (VNIIGMI-WDC, <http://meteo.ru/data>), as well as ERA5 reanalysis data (<https://ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) with a spatial resolution of 0.25 × 0.25°. The study was conducted on the time interval of 1979–2020. To assess the regional response to global warming, the results of the INM-CM5.0 model calcula-



tion from the CMIP6 project data archive (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>) were used. The spatial resolution of the INM-CM5.0 model in the atmosphere is  $2^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  in longitude and latitude. Three climatic scenarios were considered: Historical for the period of 1979–2014, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for the period of 2080–2100.

For the territory of under study, seasonal and interannual variability of surface air and soil temperature, wind speed, and precipitation were obtained, as well as their trends until the end of the XXIst century: temperature and precipitation are expected to rise, no significant changes were found for wind speed.

Thus, according to the estimates of mathematical modeling methods, by the end of the XXIst century, the air temperature, as well as the soil temperature, will continue to grow, which, in turn, will lead to an increase in the depth of the seasonal thawing layer and a shift in the boundary of the permafrost zone to the north.

*This research was funded by the state budget topic no. 121031300154-1 and the Russian Science Foundation (RSF), project # 21-71-10052, <https://rscf.ru/en/project/21-71-10052>.*

## Тенденции в изменении климатических величин в зоне многолетнемерзлых пород Западной Сибири в XXI веке

Харюткина Е.В.<sup>1,2</sup>, Мартынова Ю.В.<sup>1</sup>, Морару Е.И.<sup>1</sup>, Логинов С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Центр научных исследований и разработок, Великий Новгород, Россия

E-mail: [kh\\_ev@imces.ru](mailto:kh_ev@imces.ru)

В последние десятилетия в высоких широтах отмечается более интенсивное потепление климата: среднегодовые тренды температуры в Арктике более, чем в два раза, превышают средние глобальные оценки [1]. Поэтому в условиях происходящих колебаний климата большой практический интерес представляет исследование именно изменений в арктической зоне, в частности, параметров зоны многолетней мерзлоты в изучаемом регионе. В первую очередь, изменения этих параметров оказывают влияние на инфраструктуру районов Крайнего Севера [2,3]. Во-вторых, при таянии многолетней мерзлоты существует вероятность увеличения концентрации парниковых газов, приводящее к изменению климата как на региональном, так и на глобальном уровнях [4]. В [5] было установлено, что во временном интервале 1979–1998 гг. практически во все сезоны наблюдаются положительные тренды температуры, по темпам потепления лидируют весна и лето. Эти результаты согласуются с оценками, полученными на глубине 320 см: тренд температуры почвы был положительным (от 0,022 до 0,034 °C/год за 1965–2007 гг.), что подтверждает общую концепцию повсеместного проявления современных тенденций деградации криолитозоны [6,7].

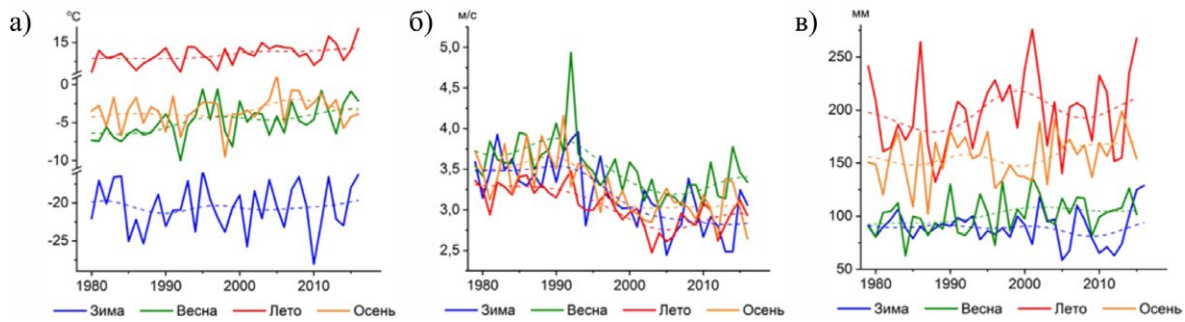
Важную роль в естественной климатической изменчивости играют долгопериодные изменения в системе атмосфера - океан – криосфера, которые вызывают изменения в структуре крупномасштабной циркуляции, оказывая тем самым значительное влияние на климат отдельных регионов, в частности, на Западную Сибирь [8]. Эти изменения выявляются, в том числе, и через поля составляющих скорости ветра в тропосфере.

В рамках работы проводится исследование пространственно-временной изменчивости основных климатических величин в арктической части территории Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков, а также тенденции их изменений до 2100 года с помощью метода математического моделирования

Расчеты изменчивости основных климатических параметров (температуры приземного воздуха, скорости ветра, атмосферных осадков, температуры почвы на глубинах) проводились для арктической части территории Западной Сибири ( $60^{\circ}$ – $70^{\circ}$  с.ш.,  $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$  в.д.). Использовались срочные (суточные) и среднемесячные значения этих величин, измеренные на метеорологических станциях (ВНИИГМИ-МЦД, <http://meteo.ru/data>), а также данные реанализа ERA5 (<https://ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) с пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25^{\circ}$ . Исследование проводилось на временном интервале: 1979–2016 гг. Для оценки регионального отклика на глобальное потепление использовались результаты расчета модели INM-CM5.0 [9] из архива данных проекта CMIP6 (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>). Пространственное разрешение модели INM-CM5.0 в атмосфере составляет  $2 \times 1,5^{\circ}$  по долготе и широте. Были рассмотрены три климатических сценария: Historical для периода 1979–2014 гг., SSP2-4.5 и SSP5-8.5 для периода 2080–2100 гг. [10]. Сценарий SSP2-4.5 характеризуется радиационным форсингом  $4,5 \text{ Вт/м}^2$ , а SSP5-8.5 – форсингом  $8,5 \text{ Вт/м}^2$ .

Сезонная и межгодовая изменчивость температуры воздуха, скорости ветра и количества осадков на севере Западной Сибири приведена на рис. 1. Для всего исследуемого временного интервала во все сезоны года характерно увеличение температуры воздуха и уменьшение скорости ветра на исследуемой территории, в целом (рис. 1а,б).





**Рис. 1.** Межгодовая изменчивость средних сезонных климатических величин на севере Западной Сибири по данным наблюдений: а) температура воздуха, б) скорость ветра, в) количество осадков. Пунктирная линия – сглаживание с использованием фильтра низких частот.

Максимальная величина отрицательного тренда скорости ветра за временной интервал 1979 – 2016 гг. наблюдается зимой. Количество осадков, в целом, в зимний сезон уменьшается, но при этом увеличивается амплитуда их изменчивости в начале XXI века. В остальные сезоны года наблюдается рост количества осадков (рис. 1в).

Применение методов численного математического моделирования, помимо методов статистического анализа позволяет выявить тенденции будущих изменений климатических параметров в арктической зоне (зоне многолетней мерзлоты) Западной Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата. В конце XXI века сохраняется тенденция к увеличению температуры воздуха (табл. 1).

**Таблица 1.** Среднее значение параметра модели INM-CM5.0. для арктической части Западной Сибири (60°-70° с.ш., 60°-90° в.д.).

Зима			
	Historical (1979-2014)	SSP-2-4.5 (2081-2100)	SSP5-8.5 (2081-2100)
Т, °С	-24,9	-19,6	-16,4
Скорость ветра, м/с	4,5	4,5	4,5
Осадки, мм	25,6	32,1	35,9
Весна			
	Historical (1979-2014)	SSP-2-4,5 (2081-2100)	SSP5-8,5 (2081-2100)
Т, °С	-7,5	-4,1	-1,9
Скорость ветра, м/с	4,3	4,2	4,2
Осадки, мм	46,3	53,9	56,5
Лето			
	Historical (1979-2014)	SSP-2-4,5 (2081-2100)	SSP5-8,5 (2081-2100)
Т, °С	12,1	14,6	16,7
Скорость ветра, м/с	3,7	3,7	3,7
Осадки, мм	79,8	87,3	91,9
Осень			
	Historical (1979-2014)	SSP-2-4,5 (2081-2100)	SSP5-8,5 (2081-2100)
Т, °С	-4,5	-0,4	1,9
Скорость ветра, м/с	4,4	4,5	4,4
Осадки, мм	47,9	56,9	62,7

При этом ее средние оценки в интервале 2081 – 2100 гг., по сравнению с 1979 – 2014 гг., при сценарии SSP2-4.5 могут измениться на 5,3°С зимой и на 2,5°С летом, а при самом неблагоприятном сценарии (SSP5-8.5) – на 8,5°С зимой и на 4,6°С летом. Эта тенденция будет сопровождаться повсеместным ростом количества атмосферных осадков, особенно ярко выраженным в осенний сезон. Так, изменение количества осадков к 2100 году по сценарию SSP2-4.5 составит 9,0 мм зимой, а по сценарию SSP5-8.5 – 14,8 мм. Для скорости ветра значимых изменений не выявлено. Стоит отметить, что выявленные по сценарию SSP2-4.5 тенденции для температуры воздуха проявляются схожим образом и на всей территории Западной Сибири, в целом [11].

Также получены и проанализированы оценки температуры почвы и с помощью методов математического моделирования выявлены тенденции их изменений до конца XXI века для арктического региона Западной Сибири, где в основном, располагается зона многолетнемерзлых пород.

Таким образом, по оценкам методов математического моделирования к концу XXI века температура воздуха, также, как и температура почвы, будет продолжать расти, что, в свою очередь, приведет к увеличению глубины слоя сезонного протаивания и смещению границы зоны многолетнемерзлых пород к северу.

*Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300154-1 и за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10052.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. – М.: Росгидромет, 2015. – 107 с.
2. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 6. – С. 15–22.
3. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16, № 1. – С. 22–32.
4. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – С. 124–142.
5. Харюткина Е.В., Логинов С.В. Тенденции временных изменений температуры почвы на глубинах в Западной Сибири по данным реанализа // География и природные ресурсы. 2019. №2. С. 95-102. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(95-102).
6. Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли. – 2008. – Т. 12, № 3. – С. 22–27.
7. Шерстюков А.Б. Температура почвогрунтов России на глубинах до 320 см в условиях изменяющегося климата // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2007. – Вып. 173. – С. 72–88.
8. Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Особенности динамики климата Северного полушария в XX столетии // Доклады Академии наук. 2002. Т. 384, № 5. С. 674–681.
9. Володин Е.М., Гришун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, №3. С. 1–12.
10. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G.A., Moss R., Riahi K., Sanderson B.M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 3461–3482.
11. Харюткина Е. В., Логинов С. В., Морару Е. И., Пустовалов К. Н., Мартынова Ю. В. Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 02. С. 136–142. DOI: 10.15372/AOO20220209.

## Зависимость между разрядами молний и очагами возгораний на территории Западной Сибири за 2016–2021 гг.

**Харюткина Е.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н.**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [kh\\_ev@imces.ru](mailto:kh_ev@imces.ru)

Учитывая возросший интерес к ситуации с пожарной активностью во всем мире, вызванное глобальным изменением климата, и недостатком знаний о природных пожарах в Западной Сибири, оценка пространственной и временной изменчивости природных пожаров, вызванных молниями, в различных ландшафтах представляется актуальной с этой точки зрения. Ранее было выявлено, что несмотря на наибольшее количество пожаров на юге территории, вероятность возгорания от молнии в течение всего теплого сезона выше в северных районах Западной Сибири; она достигает до 30% [1].

Целью настоящего исследования является анализ количественных оценок связи между грозовой активностью и природными пожарами в Западной Сибири с 2016 по 2021 гг.

В качестве исходных данных использовались данные Всемирной грозопеленгационной сети (WWLLN) и данные о тепловых аномалиях для теплого сезона (май–сентябрь) для различных природных зон Западной Сибири, которые рассчитывались для каждой ячейки  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Учитывались такие параметры, как количество дней (период), за которые определялось общее количество грозовых разрядов и очагов, количество очагов в ячейке за период, количество ударов молнии в ячейке за период. Корреляционный анализ выявил: наибольшие значения наблюдаются на 3-й и 4-й дни между первым ударом молнии и возникновением пожара (коэффициент корреляции изменяется от 0,76 до 0,85).

Результаты исследования связи между грозовой активностью и количеством очагов пожаров, а также оценки вероятности возникновения молниевых пожаров позволяют лучше понять изменчивость этих событий и выявить районы с наибольшим риском пожарной опасности от молнии.

*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494>.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Kharyutkina, E., Pustovalov, K., Moraru, E., Nechepurenko, O. Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016–2021. *Atmosphere*. 2022, 13, 669. <https://doi.org/10.3390/atmos13050669>.

## Relationship between lightning discharges and hotspots for the territory of Western Siberia during 2016–2021

**Kharyutkina E.V., Moraru E.I., Pustovalov K.N.**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [kh\\_ev@imces.ru](mailto:kh_ev@imces.ru)

Considering the increasing attention to fire activity worldwide driven by global climate change [1–4] and the lack of knowledge on natural fires in Western Siberia, the estimation of the spatial and temporal variability of lightning-ignited wildfires in different landscapes, appears relevant from this point of view. Early it was revealed that areas of hotspots and lightning activity most often coincide in the southwestern part of the territory (near Khanty-Mansiysk and Tyumen), in the mountain regions (Kuznetsk Alatau, Altai), and in the northern part of Kazakhstan. Despite the largest number of fires in the south of the territory, the probability of ignition from lightning over the whole warm season is higher in the northern parts of Western Siberia; it reaches up to 30% [5].

The present study aims to analyze quantitative estimates of the relationship between lightning activity and natural fires in Western Siberia from 2016 to 2021.

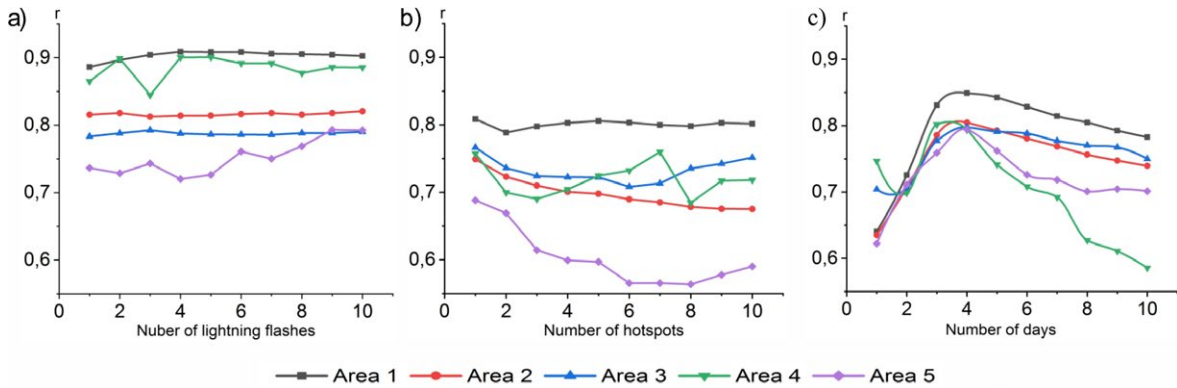
The study is based on the World Wide Lightning Location Network and The Fire Information for Resource Management System for the warm (May–September) season for different natural zones of West Siberia.

According to the most specific vegetation types for Western Siberia, we have chosen the following zones:

- Area 1 (65–75 N, 60–95 E) - the northern part, where shrubs and grasslands are dominated;
- Area 2 (55–65 N, 60–95 E) - the central part, occupied to a greater extent by the mixed forest and savannah zones;
- Area 3 (45–55 N, 60–95 E) - the southern part (including the north-eastern Kazakhstan), dominated by grasslands, with cropland, savannah and mixed forest;
- Area 4 (56–59 N, 75–84 E) - the Great Vasyugan Mire;
- Area 5 (61–64 N, 69–77 E) - permanent wetlands.

As a result of the foregoing investigation, similar patterns of spatial and temporal variability of lightning discharges and fire outbreaks in different zones of Western Siberia were identified. The correlation study during the warm season (May–September) was carried out to get these parameters in each cell  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . In this scenario, the timeframe was chosen based on the received data on lightning discharge recurrence. The number of days used to determine the total of lightning discharges and hotspots ( $N_d$ ), the number of hotspots in a cell for the period  $N_d$  ( $N_h$ ), and the number of lightning strikes in a cell for the period  $N_d$  ( $N_s$ ) were all factors taken into account. Each of the characteristics has a 0 to 10 range of variations. Changes in the correlation coefficient ( $r$ ) between the number of lightning discharges and the number of hotspots as a function of the previously mentioned time series features are shown in Figure 1. The value of the correlation coefficient remains constant for all regions when  $N_s$  changes, with the exception of Area 5 (Fig. 1a), where  $r$  increases as the number of

lightning discharges in a cell increases. Simultaneously, estimations of  $r$  appear to be more sensitive to changes in  $N_h$  in the cell:  $r$  drops to  $N_h = 6-7$  in Areas 2, 3, and 5, whereas maximum  $r$  values are found in Area 4 at  $N_h = 7$  (Fig. 1b). In the southern part of Western Siberia,  $r$  practically does not change with changes in  $N_s$  and  $N_h$  (Figs. 1a,b). It is worth considering that a fire does not necessarily start right after a lightning strike; it might also start after some time has passed. According to [3], this period is called the "smoulder period" and may take up to 3 days (for 80% of cases) and in some cases (in boreal ecosystems) – up to 10 days. The correlation analysis (Fig. 1c) verified the conclusion: the highest  $r$  values are seen on the 3rd and 4th days between the first lightning strike and the fire occurrence ( $r$  varies from 0.76 to 0.85).

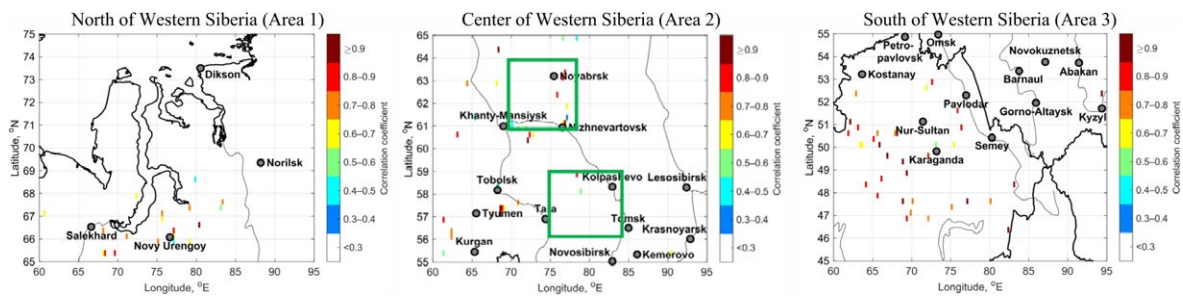


**Figure 1.** Correlation coefficients between the number of lightning discharges and hotspots in Western Siberia as a function of changes in time series characteristics: a)  $N_{dt}$ , b)  $N_h$ , and c)  $N_s$ .

As a consequence of the analysis, we were able to determine the characteristics of the examined time series (samples), which will be utilized in the future to build maps of the regional distribution of correlation coefficients across Western Siberia (Fig. 2).

In Area 3, the greatest  $r$  values are found primarily in northern Kazakhstan, where steppe zones prevail. The western section of Western Siberia has the highest  $r$  values in Area 2 (in particular, near Tyumen and Khanty-Mansiysk). There are also  $r$  maximum that occupy several cells near Noyabrsk; the permanent wetlands encompass this zone (Area 5). In the Bolshoi Great Vasyugan Mire, there are also regions with high  $r$  near Kolpashevo (Area 4). The highest  $r$  values are seen around the Gulf of Ob in the northern part of the region (Area 1).

In general, the largest estimates of the correlation between the number of lightning discharges and hotspots are found in Western Siberia, where the maximum values of the above parameters were previously mentioned [5].



**Figure 2.** Spatial distribution of the correlation between the number of lightning discharges and hotspots in Western Siberia during the warm season from 2016 to 2021. Green boxes: Area 4 – the lower one, Area 5 – the upper one.

Thus, the findings in the study on the associations between lightning activity and number of hotspots and on the estimation of lightning-ignited fire probability allows us to better understand these events' variability and to identify the areas with the greatest risk of fire danger from lightning. However, other climatic parameters and meteorological conditions should be taken into account in the future to identify the phenomenon of dry thunderstorms and their associations with fire ignition in more detail.

*This research is supported by Russian Science Foundation (RSF), project # 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494>.*



## REFERENCES:

1. Larjavaara, M.; Kuuluvainen, T.; Rita, H. *Spatial distribution of lightning-ignited forest fires in Finland. For. Ecol. Manag.* 2005, 208, 177–188.
2. Vasiliev, M.S.; Boroyev, R.N. *Remote method determining the formation of forest fires from thunderstorms on the example of Yakutia. Atmos. Phys.* 2020, 11560, 1156050.
3. Peterson, D.; Wang, J.; Ichoku, C.; Remer, L.A. *Effects of lightning and other meteorological factors on fire activity in the North American boreal forest: Implications for fire weather forecasting. Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10, 6873–6888.
4. Moris, J.V.; Conedera, M.; Nisi, L.; Bernardi, M.; Cesti, G.; Pezzatti, G.B. *Lightning-caused fires in the Alps: Identifying the igniting strokes. Agric. For. Meteorol.* 2020, 290, 107990.
5. Kharyutkina, E., Pustovalov, K., Moraru, E., Nechepurenko, O. *Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016–2021. Atmosphere.* 2022, 13, 669. <https://doi.org/10.3390/atmos13050669>.

## СЕКЦИЯ 3

Климатическое  
и метеорологическое  
моделирование

## SESSION 3

Climate and Weather  
Modeling

## Improving the skill of seasonal SL-AV Forecasts for the Northern Eurasia through statistical correction

**Khan V.M.<sup>1,2</sup>, Tishchenko V.A.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Mathematics RAS, Moscow,  
Russia

E-mail: [khan@mecom.ru](mailto:khan@mecom.ru)

In recent years, one of the directions of activities within the North Eurasia Climate Center (NEACC) aimed at the development and improvement of an adaptive scheme for surface temperature forecasting based on statistical post-processing of ensemble seasonal forecasts using the SLAV model. The scheme is being improved and in the latest version it is adapted to the SLAV forecast data for different versions of the model. The general methodology of the statistical interpretation scheme, which is based on the methods of multivariate statistics and the theory of pattern recognition, is described in the articles [Tishchenko et al., 2015, 2019]. In the recent version of the scheme, the initial information for statistical correction is the ERA5 reanalysis data and retrospective forecasts of the SLAV model. The post-processing procedure was applied to surface air temperature forecasts for 1–4 months lead time for the territory of Northern Eurasia, European part of Russia, Central Asia, Siberia and Northeast Asia. To assess the quality of forecasts, the traditional criteria were used such as the correlation coefficient of anomalies ACC, the skill score by the sign RO, the root mean square error (RMSE), the MSSS mean square skill score, and the Hanssen and Kuipers scaled indicator KSscaled. Average estimates of the quality of initial and corrected forecasts of mean monthly temperature anomalies for retrospective forecasts for the period 1985–2010 were received in the cross-validation mode. On hindcasts data the results demonstrated a significant improvement in the quality of deterministic surface temperature forecasts after the statistical correction procedure. Switching to operational forecasts (calculations were carried out for each seasonal forecast for the period 2018–2020), the effectiveness of the proposed statistical correction decreased compared to experiments with historical forecasts, but still demonstrates its usefulness to improve the quality of forecasts for certain regions of Northern Eurasia and in certain seasons of the year. Only in Central Asia, the statistical correction procedure does not improve the quality of forecasts. At the same time, for other regions, the application of the statistical correction procedure gives a steady improvement in the accuracy of forecasts. A particularly noticeable improvement was shown for the European part of Russia and the Far East region. During the transitional seasons, statistical correction significantly improves the quality of forecasts over Siberia and the Far East, and over the European territory in autumn.

# Повышение успешности сезонных прогнозов ПЛАВ для региона северной Евразии посредством статистической коррекции

Хан В.М.<sup>1,2</sup>, Тищенко В.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гидрометцентр России, Москва, Россия

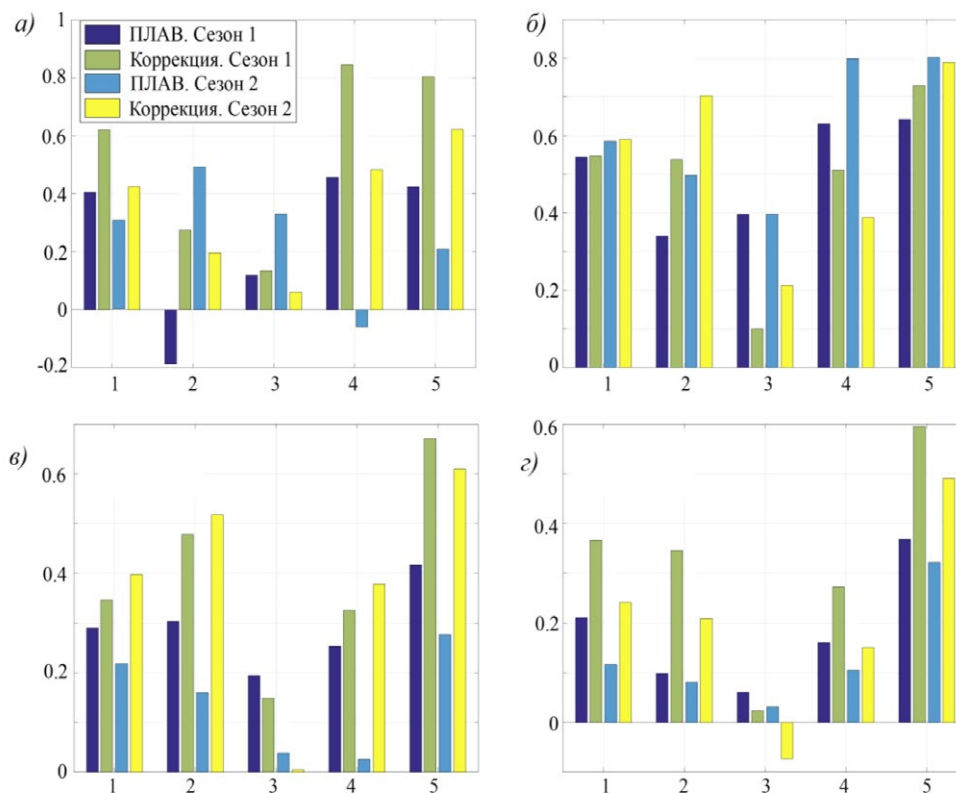
<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

E-mail: khan@mecom.ru

В оперативной деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) [Хан, 2015] на регулярной основе выпускаются вероятностные и детерминистские сезонные прогнозы на основе выходных данных МОЦА ПЛАВ [Толстых, 2010] и ГГО [Мирвис и др. 2006]. Модели участвуют в международных проектах по долгосрочному прогнозированию в рамках ВМО и АТЭС и их качество не уступает мировому уровню. Широкий набор переменных и ансамблевая реализация интегрирования прогнозов открывают большие перспективы к использованию выходных данных для разных прикладных задач. Однако, самым существенным ограничением на пути практического использования сезонных прогнозов является их невысокая успешность на территории Северной Евразии. Причем этим недостатком без исключения обладают все существующие мировые климатические и атмосферные модели. Ввиду сложного сочетания комплекса физико-географических условий регион Северной Евразии является наиболее трудно прогнозируемым на всем земном шаре. Непрерывная работа по усовершенствованию физического наполнения моделей позволяет несколько продвинуться в этом вопросе, однако разработка и использование различных приемов статистической интерпретации ансамблевых сезонных прогнозов является необходимой мерой для повышения качества прогнозов. В последние годы в СЕАКЦ ведутся работы по разработке и усовершенствованию адаптивной схемы прогноза приземной температуры на базе статистического постпроцессинга ансамблевых сезонных прогнозов по модели ПЛАВ. Схема усовершенствуется и в последней версии легко адаптируется к прогностическим данным ПЛАВ по разным версиям модели. Общая методология схемы статистической интерпретации, в основе которой используются приемы многомерной статистики и теории распознавания образов, описана в статьях [Тищенко и др., 2015, 2019]. В новой модификации в схеме исходной информацией для статистической коррекции служат поля реанализа ERA5 и ретроспективные прогнозы модели ПЛАВ полей среднемесячных и сезонных значений атмосферного давления на уровне моря (MSLP), геопотенциала поверхности 500 гПа (H500), температуры воздуха на поверхности 850 гПа (T850) и приземной температуры воздуха (TRSF) в регулярной географической сетке за период 1985–2010 гг.. Процедура постпроцессинга применялась к прогнозам приземной температуры воздуха на сроки 1–4 месяца по модели ПЛАВ для территории 1) Северной Евразии (35–80° с.ш. и 20° в.д. – 170° з.д.); 2) Европейской части России (40° с.ш. - 70° с.ш.; 20° в.д. - 60° в.д.); 3) Центральной Азии (35° с.ш. - 55° с.ш.; 50° в.д. - 85° в.д.); 4) Сибирь (50° с.ш. - 75° с.ш.; 60° в.д. - 110° в.д.); 5) Северо-восточной Азии (45° с.ш. - 75° с.ш.; 110° в.д. - 170° в.д.).

Для оценки качества прогнозов применялись следующие показатели: коэффициент корреляции аномалий ACC, оценка оправданности по знаку  $\rho$ , средняя квадратическая ошибка (RMSE), мера мастерства по отношению к климатическому прогнозу MSSS, а также показатель масштабированный показатель Ханссена и Куиперса  $KSS_{scaled}$ . Средние оценки качества исходных и скорректированных прогнозов аномалий средней месячной температуры по модели ПЛАВ для Северной Евразии для ретроспективных прогнозов за 1985–2010 гг. получены в режиме кроссвалидации. Полученные результаты на историческом материале продемонстрировали существенное улучшение качества детерминистских прогнозов приземной температуры с применением процедуры статистической коррекции по всем показателям успешности. При переходе к оперативным прогнозам эффективность применения статистической коррекции снизилась (расчеты проводились для каждого сезонного прогноза за период 2018–2020 гг.) по сравнению со скорректированными историческими прогнозами, но все равно заметным образом улучшило качество прогнозов для отдельных регионов Северной Евразии и в определенные сезоны года. На рисунке 1. в качестве примера представлены средние значения ACC оперативных сезонных прогнозов для температуры воздуха по модели ПЛАВ и с использованием статистической коррекции для районов Северной Евразии (районы 1–5) для следующих сезонов: апрель–июль (AMJJ), июль–октябрь (JASO), октябрь–январь (ONDJ), январь–апрель (JFMA). Показатели качества прогнозов аномалий температуры рассчитывались за каждый из четырех прогностических месяцев, а также для средних за 1–3 месяца (сезон 1) и за 2–4 месяца (сезон 2).

Как видно из графика для региона 3 - Центральная Азия успешность прогнозов приземной температуры воздуха по ПЛАВ ниже во все сезоны года по сравнению с другими регионами Северной Евра-



**Рис. 1.**

Средние значения АСС сезонных прогнозов температуры воздуха по модели ПЛАВ и с использованием СК для районов Северной Евразии: а) AMJJ, б) JJAS, в) ONDJ, г) JFMA. По оси абсцисс – номер района.

зии. По-видимому, физическое описание комплексных циркуляционных процессов в модели ПЛАВ в самой глубокой континентальной части континента не позволяет хорошо воспроизвести динамику температурного режима на сезонных масштабах времени. На фоне низких оценок успешности «сырых» прогнозов на территории Центральной Азии процедура статистической коррекции не улучшает качество прогнозов. Вместе с тем, для остальных регионов применение процедуры статистической коррекции дает устойчивое улучшение оправдываемости прогнозов. Особенно заметное улучшение отмечено для европейской части России и Дальневосточного региона. В переходные сезоны статистическая коррекция существенно улучшает качество прогнозов над Сибирью и Дальним Востоком, осенью над Европейской территорией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект №22-17-00247)

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. (2006) Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов. – Метеорология и гидрология, № 2, с. 5-16.
2. Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н. (2015) Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России. – Труды Гидрометцентра России, вып.358, с. 121-132.
3. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. (2019) Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени. – Метеорология и Гидрология, № 3, с. 24-39.
4. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. Обнинск: ФАО ФОП, 2010. 111 с.
5. Хан В.М. (2015) Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания. – Труды Гидрометцентра России, вып. 358, с. 5-12.



# Implementation of SL-AV 072L96 model for long range prediction of weather anomalies

Fadeev R.Yu.<sup>1,2,3</sup>, Tolstykh M.A.<sup>1,2,3</sup>, Shashkin V.V.<sup>1,2,3</sup>, Travova S.V.<sup>2</sup>, Mizyak V.G.<sup>2</sup>, Rogutov V.S.<sup>2</sup>, Goyman G.S.<sup>1,2,3</sup>, Alipova K.A.<sup>1,2</sup>, Zaripov R.B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Hydrometeorological Centre of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnii, Russia

E-mail: rost.fadeev@gmail.com

**S**LAV072L96 is the new version of the SLAV atmospheric model for the seasonal forecast system at Hydrometcentre of Russia. SLAV072L96 has actually been in use in parallel mode with the old system since the beginning of 2022. An important improvement in SLAV072L96 is the reduction of the zonally averaged wind profile bias.

Based on the results of the multiannual simulations with prescribed ocean and sea ice it appears that overestimation of zonal wind at 10 m and 850 hPa in intertropical convergence zone (ITCZ) is associated with the deep convection scheme solving the momentum budget equation (mass flux approach is used). The following was implemented to mitigate the double ITCZ problem mainly resulted from the zonal wind bias: modification and tuning deep convection and planet boundary layer parameterizations, new mixing length and improved marine low clouds schemes. We also introduced the dependence of roughness length and thermic coefficient on leaf area index in the land surface scheme (affects mainly tropical forests and mid-latitudes).

The results of 5-year experiment show a significant RMSE reduction in 10m zonal wind and 850 hPa wind (by a factor of 2) as compared with ERA5 data. The annual average ITCZ precipitation pattern also becomes better consistent with the TRMM observations. The long-range reforecasts accuracy for winter and summer seasons is also increased.

## Особенности реализации модели ПЛАВ 076L96 для долгосрочного прогноза аномалий погоды

Фадеев Р.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Толстых М.А.<sup>1,2,3</sup>, Шашкин В.В.<sup>1,2,3</sup>, Травова С.В.<sup>2</sup>, Мизяк В.Г.<sup>2</sup>, Рогутов В.С.<sup>2</sup>, Гойман Г.С.<sup>1,2,3</sup>, Алипова К.А.<sup>1,2</sup>, Зарипов Р.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометцентр России, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

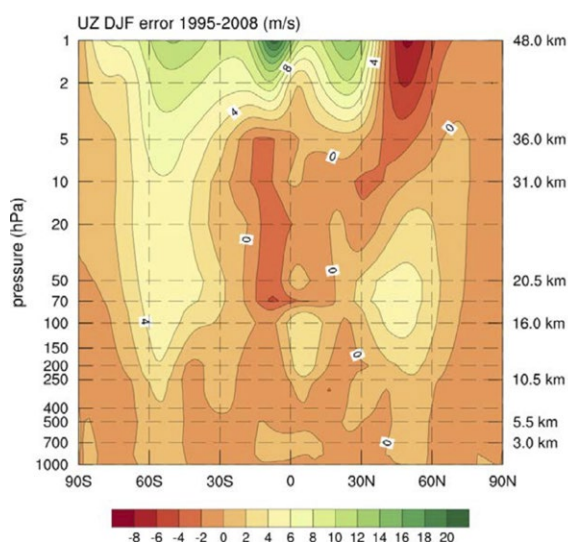
E-mail: rost.fadeev@gmail.com

**П**ЛАВ 072L96 является новой версией глобальной модели атмосферы ПЛАВ [1] с конфигурацией, адаптированной для субсезонного (от двух недель до одного месяца) и долгосрочного (до четырех месяцев) прогноза аномалий погоды. Аббревиатура 072L96 включает в себя информацию о разрешении расчетной сетки (применяется регулярная широтно-долготная сетка с шагом 0,720 по долготе и 0.90 по широте) и числе уровней по вертикали, равное 96. Ожидается, что ПЛАВ 072L96 заменит собой предыдущую версию ПЛАВ 2008, которая применяется сейчас в Гидрометцентре России в качестве одного из компонентов оперативной технологии долгосрочного прогнозирования аномалий погоды. Предполагается, что ПЛАВ 072L96 станет также инструментом прогнозирования погодных аномалий на субсезонном масштабе времени в Гидрометцентре России.

Помимо более высокого разрешения расчетной сетки и увеличенного числа уровней по вертикали ПЛАВ 072L96 превосходит модель ПЛАВ 2008, до сих пор применяемую для долгосрочного прогноза погоды, в детализации описания процессов подсеточного масштаба. В ПЛАВ 072L96 применяются более совершенные параметризации для описания эволюции снежного покрова и процессов в пограничном слое атмосферы; обновлены блоки описания распространения излучения в атмосфере Земли, которые позволяют разрешать существенно большее число спектральных диапазонов, учитывать наличие в атмосфере аэрозолей и малых газовых составляющих. Новая параметризация для описания процессов в почве позволяет учитывать один из немногочисленных источников долгосрочной предсказуемости - тепло и влагозапас почвы [2,3]. Уточненные схемы расчета предельной длины перемешивания и новая параметризация для диагностического расчета температуры морского льда позволили заметно уменьшить ошибки долгосрочного прогноза на основе ПЛАВ 072L96 в приполярных регионах.

Среди многочисленных изменений блока параметризованного описания процессов подсеточного масштаба следует отметить уточненную схему расчета потока горизонтального компонента импульса, обусловленного явлением глубокой конвекции. В оригинальном подходе [4, 5] допускается сосуществование нескольких конвективно активных сегментов в рамках одной колонки по вертикали. Горизонтальные компоненты скорости движения основания конвективного облака на верхней границе каждого сегмента рассчитываются на основе уравнения, являющегося следствием интегрального закона сохранения импульса поднимающегося вверх потока воздуха. Затем скорость основания облака распространяется на все нижерасположенные модельные уровни, участвующие в глубокой конвекции. В уточненной формулировке, используемой в ПЛАВ 072L96, расчет компонентов горизонтальной скорости, обусловленных конвективным подъемом воздушных масс, происходит без обратного распространения скорости основания конвективного облака. В сочетании с модифицированной формулой влияния морских волн на коэффициент шероховатости воды и уточненными значениями коэффициентов горизонтальной диффузии для завихренности и дивергенции, такой подход позволил существенно уменьшить ошибку воспроизведения поля зональной скорости на высоте 10 м. (U10) и высоте, соответствующей 850 гПа (U850). В частности, отклонение от реанализа ERA5 [6] осредненного с 1995 по 2000 гг поля зональной скорости U10 в ПЛАВ 072L96 в приэкваториальной части Тихого океана составляет величину менее 2 м/с. В сравнении с ПЛАВ 2008 среднеквадратическая интегральная ошибка поля U850 уменьшилась вдвое: с 2.8 до 1.3.

Для оценки качества воспроизведения атмосферной циркуляции во внутритропической зоне конвергенции был проведен расчет зимних ретроспективных долгосрочных прогнозов на четыре месяца за период с 1991 по 2010 гг. На рис. 1 иллюстрируется средняя за зимние месяцы ошибка зонально осредненного поля зонального компонента скорости ветра. Можно видеть отсутствие ложного максимума ошибки вблизи экватора на высотах вплоть до 100 гПа. Положение центра струйного течения несущественно смещено к северу.



**Рис. 1.** Ошибка поля зонально осредненного поля зональной скорости ветра по сравнению с реанализом ERA5.

Изменения в блоке параметризованного описания процессов подсеточного масштаба позволили, в том числе, уменьшить ошибку в поле давления на уровне моря. Следует отметить уменьшение заглупления Алеутского минимума и более точное соответствие поля давления в районе Азорского максимума.

Уменьшение систематических ошибок в поле давления на уровне моря и в поле приземного ветра позволяет продолжить работу над созданием совместной модели атмосферы, океана и морского льда, где в качестве атмосферного компонента используется модель ПЛАВ [7, 8]. Более точное соответствие осредненных по времени поверхностных и приземных характеристик ПЛАВ реанализу ERA5 позволяет надеяться на меньшую по амплитуде ошибку совместной модели, обусловленную, в том числе, процессами приспособления состояний модельной атмосферы и океана.

Представленные в докладе работы выполнены в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда (№ 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., et al. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model - Russian meteorology and hydrology, 2015, V. 40, pp. 374-382.
2. Travova S.V., Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Tolstykh M.A., Bogomolov V.Yu. Quality of soil simulation by the INM RAS-MSU soil scheme as a part of the SL-AV weather prediction model - Rus. Meteor. and Hydrol., 2022, V. 47, No. 3, pp. 159-173.

3. Fadeev R. Yu., Tolstykh M. A., Volodin E. M. Climate version of the global atmospheric model SLAV: development and preliminary results - *Russ. Meteor. and Hydrol.*, 2019, V. 1, pp. 22-35.
4. Bougeault P. A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection - *Mon. Wea. Rev.*, 1985, V. 113, pp. 2108-2121.
5. Gerard L., Geleyn, J.-F. Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution - *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 2005, V. 131, pp. 2293-2312.
6. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis - *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2020, V. 146, pp. 1999-2049.
7. Fadeev R., Ushakov K., Kalmykov V., et al. Coupled atmosphere–ocean model SLAV–INMIO: implementation and first results - *Russian J. Num. An. and Math. Mod.*, 2016, V. 31(6), pp. 329-337.
8. Fadeev R., Ushakov K., Tolstykh M., Ibrayev R. Design and development of the SLAV-INMIO-CICE coupled model for seasonal prediction and climate research - *Russian J. Num. An. and Math. Mod.*, 2018, V.33(6), pp. 333-340.

## An atmospheric boundary layer perspective on urban climates in the pan-Arctic towns

Igor Esau

UiT – The Arctic University of Norway, Tromsø, Norway  
E-mail: igor.ezau@uit.no

### ABSTRACT

Urban climates are frequently warmer and dryer than climates of the surrounding hinterland. These local climatic anomalies are created by specific aero- and thermo-dynamic properties of the urban land use – land cover as well as by seasonally significant direct anthropogenic heat release flux in towns. More than 100 pan-Arctic towns and cities are not exceptions. Results of HIARC and SERUS research projects under the Belmont Forum initiatives reveal large and persistent surface temperature anomalies in the pan-Arctic towns. More detailed observations with UHIARC network provide data for study of physical mechanisms shaping the urban climate anomalies, their spatial extent, and relationships with dynamics of the atmospheric turbulent boundary layer. The largest warm temperature anomalies – the most intensive urban heat island (UHI) as it is widely referred to – correspond to calm, clear-sky weather conditions, which are ubiquitously linked to seasonal temperature extremes both warm and cold days. Such extremes develop in shallow boundary layers where vertical turbulent mixing is restricted by the atmospheric static stability. Weak turbulent mixing localizes turbulent flux anomalies of heat, moisture, momentum, and not least pollutants, thus supporting distinct local climates. Surface energy deficit in high latitudes makes such shallow weakly mixed boundary layers much more common in this region than elsewhere. It results in significant UHI even in smaller pan-Arctic towns with a markable influence on ground stability, hydrological cycle, and ecosystem services.

### INTRODUCTION

The surface energy balance is shaped by both global, large-scale, and local factors. Among those factors, anthropogenic modification of the earth's surface and anthropogenic heat fluxes could be rather significant or even dominant factors in urbanized areas. Studies of the urban climate at the global scale revealed regular and persistent warm temperature anomalies that form so called urban heat island (UHI) over urban land use – land cover types. More detailed studies of local climates in the largest urban agglomerations further specified UHI intensity, persistence, extent. They established statistical and to some degree physical relations between different UHI aspects, e.g., surface temperature observed by satellite remote sensing, and physio-geographical elements or climate factors (Manoli et al., 2019). It is reasonable to conclude that global physical geography and statistics are now well established for both urban canopy air temperature UHI (CUHI) and surface temperature UHI (SUHI). Recent studies in the frameworks of HIARC and SERUS research projects under auspices of Belmont Forum have added to that record more studies focused on more than 100 pan-Arctic towns and cities. In the high northern latitudes, SUHI intensity ranges from 0.5 K to more than 5.5 K according to analysis based on MODIS land surface temperature remote sensing data products (Esau et al., 2021; Miles and Esau, 2020).

It is much less clear however how UHI is related to SUHI and to meteorological conditions in the upper atmospheric layers. Recent revisions of atmospheric factors shaping the UHI intensity, diurnal and seasonal cycles in different climates remained inconclusive. They neither considered stability effects on the turbulent mixing in the atmospheric boundary layer (ABL) nor included boreal and Arctic climates into analysis (Stewart et al., 2021). At the same time, HIARC and SERUS projects obtained observational data and conducted nu-

merical modeling that clarify the role of stably stratified shallow ABL in shaping and maintenance of large UHI in the pan-Arctic towns.

To address this knowledge gap, we combine our understanding of a plausible physical mechanism working for excessive temperature anomalies in shallow ABL with analysis of remote sensing and in situ observations in several Arctic towns.

## A PHYSICAL MECHANISM FOR URBAN TEMPERATURE ANOMALIES

A heat balance at the earth's surface is the key factor that shapes local climates. Turbulent mixing in the lower atmosphere, i.e., within ABL, tends to smooth the surface heat differences transporting the excessive heat both horizontally and upward into the urban canopy layer, further up to ABL, and eventually to the free atmosphere. Observations reveal that there is a certain level in the atmosphere – a blending height – where surface temperature differences become indistinguishable (blended) (Mahrt, 2000). The blending height depends on atmospheric static stability. Intensive turbulent mixing in the unstably, convectively, stratified atmosphere quickly erodes all differences. In this case, the urban heat will be visible only near the surface itself. Weak turbulent mixing in stably stratified ABL allows for accumulation of the heat differences. In this case, the blending height may reach the ABL height. A distinct urban ABL sometimes referred to as “urban heat dome” will be created (Fan et al., 2020).

The less air is involved into turbulent mixing the larger apparent raise of temperature will be achieved by the given urban heat fluxes. It is thus plausible that strengthening atmospheric stability could be a primary physical mechanism working for excessive urban temperature anomalies. The lower atmosphere is on average more stable in high northern latitudes (Davy et al., 2017; Davy and Esau, 2016) where the earth's surface exhibits strong energy deficit (Mayer et al., 2019). The Arctic ABL is shallow (Davy, 2018). Moreover, the Arctic lower atmosphere develops strong temperature inversion of radiative origin (Devasthale et al., 2010) that prevents ABL growth (Zilitinkevich et al., 2007).

The atmospheric boundary layer perspective on urban climates suggests that the pan-Arctic UHI are more tightly related to SUHI, and moreover could maintain more significant warm temperature anomalies than those in low- and mid-latitude cities.

## DATA AND METHOD

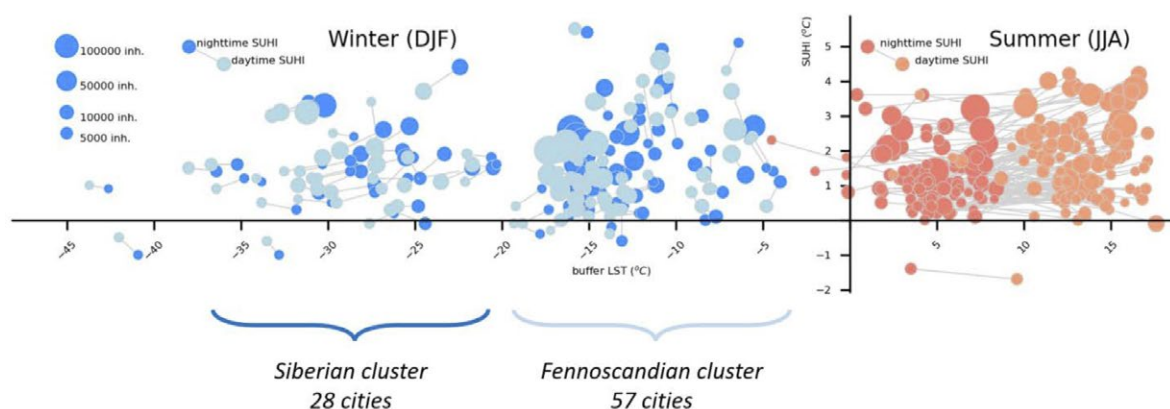
We obtained the SUHI intensity in more than 100 pan-Arctic towns from the MODIS land surface temperature remote sensing products (Esau et al., 2021). Global urban climate studies usually underrepresent cities in high latitudes and in boreal and cold climate regions in general, see, e.g., (Brozovsky et al., 2021). Even when presented, the pan-Arctic urban areas are frequently too small and compact to be correctly identified by machine-learning algorithms for SUHI processing. Examples of misidentification could be found in (Chakraborty and Lee, 2019) where even such a significant town as Nadym is missing. Our results are based on manual analysis of the urban surface types and subsequent identification of the urban boundaries and SUHI. A more nuanced discussion on satellite observation processing is given in (Esau et al., 2019; Esau and Miles, 2018; Miles and Esau, 2020).

More detailed observations with UHIARC network provide data for study of physical mechanisms shaping the urban climate anomalies, their spatial extent, and relationships with dynamics of the atmospheric turbulent boundary layer (Konstantinov et al., 2018, 2021; Varentsov et al., 2018). Description of data sets and data processing methods could be found in cited literature. The most detailed and repetitive observations in UHIARC were carried out for Apatity and Nadym, Russia. The UHIARC data sets and related literature could be found at the web site <http://urbanreanalysis.ru/uhiarc.html>.

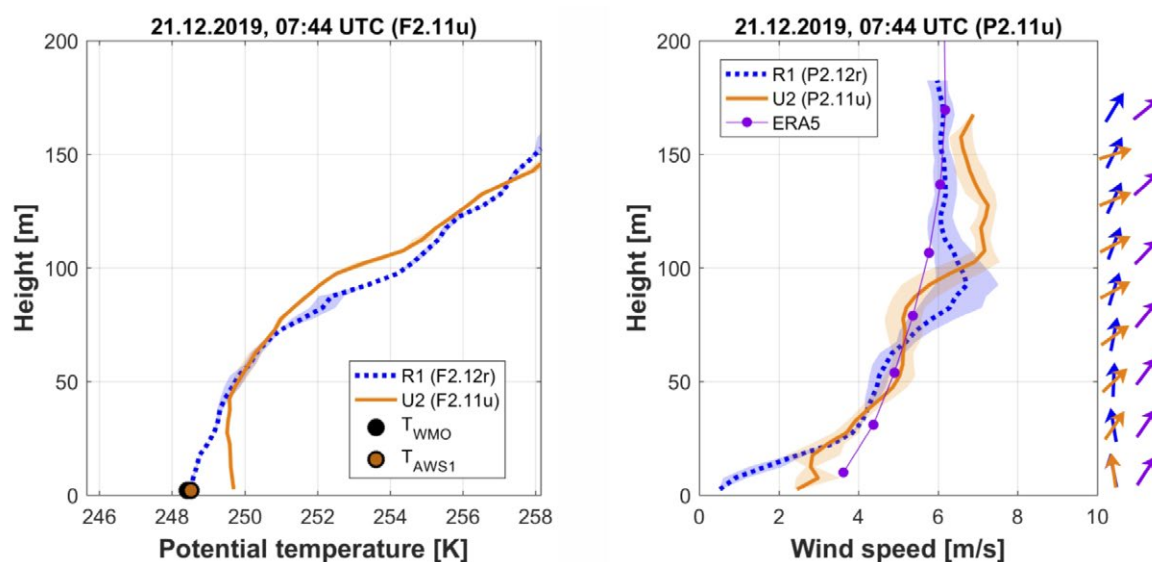
## RESULTS

Significant SUHI are established for the pan-Arctic towns. Figure 2 shows diurnal and seasonal cycles of temperature anomalies in these towns. In wintertime, somewhat more intensive SUHI are observed at night, especially in the Fennoscandian cluster. In summertime, there are no significant diurnal cycle. The reasons for such a flat diurnal cycle are given in (Stewart et al., 2021) on basis of model simulations. In part, it is related to the inadequate sampling of diurnal cycle by MODIS satellites (Aqua and Terra) with passage time scheduled at morning and evening hours. Timing is less important for high latitudes as there are polar night and day conditions apply. It could be more important that summertime conditions are usually humid in the Arctic. Even so that urban soil is dryer there are usually enough smaller permanent water bodies (pools, swamps, and lakes, see, e.g., (Fedorov et al., 2021)) to temper temperature variations. It does not exclude that some neighborhoods with high fraction of dark impervious surface (large buildings) could support intensity and variable SUHI or even shape the whole urban temperature anomalies as we find in Nadym. Generally, however, the pan-Arctic SUHI are more persistent in time and exhibit stronger links to the atmospheric stability than to physiographic factors. We came to similar conclusions in our earlier study of exogenous SUHI factors (Esau and Miles, 2018).





**Figure 1.** Diurnal and seasonal cycles of SUHI in pan-Arctic towns: Fennoscandian cluster of 57 cities; Siberian cluster of 28 cities; and 33 scattered towns. Data are from MODIS LST MOD/MYD version 6.0 products.



**Figure 2.** Vertical profiles of potential temperature and wind speed obtained from drones at the rural (R1) and urban (U2) sites during UHIARC experiment in Nadym, Russia, in December 2019. The solid lines indicate instant profiles measured at the given time moment, and the dotted lines indicates the profiles averaged for two adjacent time moments. Courtesy: M. Varentsov.

The ABL perspective identifies the atmospheric stability and the ABL depth as the leading SUHI and UHI factors in the pan-Arctic towns. The atmospheric temperature inversion strongly limits the ABL growth (Zilitinkevich et al., 2007). Weak dependence between the ABL depth and the imposed stability parameter results in blending height that reach the ABL top. Hence, the rural and urban ABLs have the same height but qualitatively different internal turbulent and stability structure. The imposed stability parameter has become known as the Zilitinkevich number,  $Z_i = N/f$  (Esau, 2004; Liu et al., 2021), where  $N$  is the Brunt-Vaisala frequency and  $f$  is the Coriolis parameter (frequency). Figure 2 shows this qualitative distinction with the urban ABL is being slightly convective and the rural ABL is being strongly stably stratified. Such an inversion and a shallow urban ABL (not deeper than 50 m) were observed during the UHIARC experiment in Nadym. Analysis of UHIARC observations in five Arctic towns showed robust dependence between the air temperature, weather index, and the UHI intensity (Konstantinov et al., 2018). The UHI intensity strongly increases in calm cold weather conditions when one may expect a weak turbulent exchange and the shallow ABL. Statistical dependence between the surface air temperature and the ABL depth is presented in (Esau et al., 2012).

## CONCLUSIONS

Surface energy deficit in high latitudes makes such shallow weakly mixed boundary layers much more common in this region than elsewhere. It results in intensive SUHI (and likely UHI as well) even in smaller pan-Arctic towns. Although SUHI in low- and mid-latitude cities are considered less important for urban climate studies in the context urban heat problems (Stewart et al., 2021), SUHI in the pan-Arctic cities are of

primary importance due to their markable influence on ground stability, hydrological cycle, and ecosystem services (Hjort et al., 2022). So far, our knowledge about SUHI, UHI and other aspects of urban climates in high latitudes was fragmented and incomplete. Many knowledge gaps have been identified (Laruelle et al., 2019); more concrete, there were no understanding of physical mechanisms that relate localized surface and atmospheric heat anomalies.

This study proposes a more complete perspective on physics of the urban climate. We develop climatic implication of the stably stratified ABL and apply this understanding to the analysis of the urban ABL structure. This study demonstrates significantly warmer surface temperatures in the urban Arctic areas (i.e., SUHI) in both winter and summer seasons. It is found that urban SUHI and UHI in the pan-Arctic towns are tightly coupled with the urban ABL less stable (even slightly convective).

#### REFERENCES:

1. Brozovsky, J., Gaitani, N., Gustavsen, A., 2021. A systematic review of urban climate research in cold and polar climate regions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 138, 110551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110551>
2. Chakraborty, T., Lee, X., 2019. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 74, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>
3. Davy, R., 2018. The climatology of the atmospheric boundary layer in contemporary global climate models. *J. Clim.* 31, 9151–9173. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0498.1>
4. Davy, R., Esau, I., 2016. Differences in the efficacy of climate forcings explained by variations in atmospheric boundary layer depth. *Nat. Commun.* 7, 11690. <https://doi.org/10.1038/ncomms11690>
5. Davy, R., Esau, I., Chernokulsky, A., Outten, S., Zilitinkevich, S., 2017. Diurnal asymmetry to the observed global warming. *Int. J. Climatol.* 37, 79–93. <https://doi.org/10.1002/joc.4688>
6. Devasthale, A., Willén, U., Karlsson, K.G., Jones, C.G., 2010. Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 5565–5572. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5565-2010>
7. Esau, I., Davy, R., Outten, S., 2012. Complementary explanation of temperature response in the lower atmosphere. *Environ. Res. Lett.* 7, 044026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044026>
8. Esau, I., Miles, V., 2018. Exogenous drivers of surface urban heat islands in northern west Siberia. *Geogr. Environ. Sustain.* 11. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-3-83-99>
9. Esau, I., Miles, V., Soromotin, A., Sizov, O., Varentsov, M., Konstantinov, P., 2021. Urban heat islands in the Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote-sensing estimations. *Adv. Sci. Res.* 18, 51–57. <https://doi.org/10.5194/asr-18-51-2021>
10. Esau, I., Miles, V., Varentsov, M., Konstantinov, P., Melnikov, V., 2019. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate. *Theor. Appl. Climatol.* 137, 2513–2528. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02754-z>
11. Esau, I.N., 2004. Parameterization of a surface drag coefficient in conventionally neutral planetary boundary layer. *Ann. Geophys.* 22. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-3353-2004>
12. Fan, Y., Wang, Q., Ge, J., Li, Y., 2020. Conditions for transition from a plume to a dome above a heated horizontal area. *Int. J. Heat Mass Transf.* 156, 119868. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119868>
13. Fedorov, R., Kuklina, V., Sizov, O., Soromotin, A., Prihodko, N., Pechkin, A., Krasnenko, A., Lobanov, A., Esau, I., 2021. Zooming in on Arctic urban nature: Green and blue space in Nadya, Siberia. *Environ. Res. Lett.* 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0fa3>
14. Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K., Luoto, M., 2022. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nat. Rev. Earth Environ.* 3, 24–38. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8>
15. Konstantinov, P., Varentsov, M., Esau, I., 2018. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic. *Environ. Res. Lett.* 13, 075007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84>
16. Konstantinov, P.I., Varentsov, M.I., Grishchenko, M.Y., Samsonov, T.E., Shartova, N.V., 2021. Thermal stress assessment for an Arctic city in summer. *Arct. Ecol. Econ.* 11, 219–231. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-219-231>
17. Laruelle, M., Esau, I., Miles, M., Miles, V., Kurchatova, A.N., Petrov, S.A., Soromotin, A., Varentsov, M., Konstantinov, P., 2019. Arctic cities as an anthropogenic object: a preliminary approach through urban heat islands. *Polar J.* 9, 402–423. <https://doi.org/10.1080/2154896X.2019.1685171>
18. Liu, L., Gadde, S.N., Stevens, R.J.A.M., 2021. Geostrophic drag law for conventionally neutral atmospheric boundary layers revisited. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 147, 847–857. <https://doi.org/10.1002/qj.3949>

19. Mahrt, L., 2000. *Surface Heterogeneity and Vertical Structure of the Boundary Layer*. *Boundary-Layer Meteorol.* 96, 33–62. <https://doi.org/10.1023/A:1002482332477>
20. Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T.W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G.G., Bou-Zeid, E., 2019. *Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population*. *Nature* 573, 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
21. Mayer, M., Tietsche, S., Haimberger, L., Tsubouchi, T., Mayer, J., Zuo, H., 2019. *An Improved Estimate of the Coupled Arctic Energy Budget*. *J. Clim.* 32, 7915–7934. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0233.1>
22. Miles, V., Esau, I., 2020. *Surface urban heat islands in 57 cities across different climates in northern Fennoscandia*. *Urban Clim.* 31, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100575>
23. Stewart, I.D., Krayenhoff, E.S., Voogt, J.A., Lachapelle, J.A., Allen, M.A., Broadbent, A.M., 2021. *Time Evolution of the Surface Urban Heat Island*. *Earth's Futur.* 9. <https://doi.org/10.1029/2021EF002178>
24. Varentsov, M., Konstantinov, P., Baklanov, A., Esau, I., Miles, V., Davy, R., 2018. *Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city*. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 17573–17587. <https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018>
25. Zilitinkevich, S., Esau, I., Baklanov, A., 2007. *Further comments on the equilibrium height of neutral and stable planetary boundary layers*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 133, 265–271. <https://doi.org/10.1002/qj.27>

## Numerical simulation of severe weather phenomena on the territory of Western Siberia

Zolotov S.Yu., Loginov A.S.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [sergey-zo@yandex.ru](mailto:sergey-zo@yandex.ru)

Recently, researchers are increasingly using physical and mathematical numerical models to solve problems in meteorology and climatology. The special value of using these models is given by the ability to recreate a variety of situations with severe weather phenomena (hurricanes, heavy showers, severe frost, etc.).

The Weather Research and Forecasting (WRF) predictive model is used in this research. The WRF model is a mesoscale numerical weather prediction system designed for both atmospheric research and operational forecasting applications. The model serves a wide range of meteorological applications across scales from tens of meters to thousands of kilometers. This model is also suitable for calculating the likelihood of occurrence of extreme events in the study area.

The region of Western Siberia was chosen as the study area with coordinates 47°–63°N and 65°–105°E. A rare meteorological network on such a vast territory does not make it possible to study and predict factors leading to severe weather phenomena. Modeling is used to eliminate this problem. This paper examines two cases in this region with severe weather events over 2019–2020.

The first case is a situation with the occurrence of a large temperature gradient in the lower atmosphere on April 30, 2019, during the development of abnormally early thunderstorms and squalls. Since April 28, 2019, significant spatio-temporal changes in many meteorological and geophysical parameters have taken place on the territory of Western Siberia, due to the displacement of the polar main front far to the north and the short-term invasion of the tropical air mass, as well as the subsequent passage of the cold front and the onset of the Arctic air mass.

The second case is a situation with the emergence of a large area of anomalous cold wave on the territory of Western Siberia on December 25–27, 2020. Since December 22, the formation of an anticyclone with a value of 1035 hPa with a center near the Severnaya Zemlya archipelago has been recorded. By December 24, its center increased to 1050 hPa. As the Arctic front moved to the southeast, the formation of a high pressure ridge was noted, which was directed to the south of Western Siberia. During this period, cloudiness cleared over most of Western Siberia, as well as high values of atmospheric pressure (1030–1040 hPa) and a sharp drop in air temperature with an average daily air temperature below the climatic norm by 9 °C and more to -40 °C and below.

To check the simulation results, observational data from 211 meteorological stations were used. An analysis of the comparison of the simulation results with the observed values of the fields of meteorological parameters gives a satisfactory assessment of the reproduction of these fields. The WRF model has shown that it adequately reproduces the occurrence of convective systems and correctly calculates the conditions for the occurrence of factors (for example, a sharp increase in the pressure field, advection of cold air, radiation cooling) leading to severe weather phenomena.

# Численное моделирование опасных погодных явлений на территории Западной Сибири

Золотов С.Ю., Логинов А.С.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: sergey-zo@yandex.ru

Для решения задач в метеорологии и климатологии часто используются физико-математические численные модели. В настоящий момент использование таких моделей в научных исследованиях применяется благодаря возможности выбора различных схем параметризации с опцией постоянного увеличения пространственного разрешения. Особую ценность применения этих моделей придает возможность воссоздания разнообразных ситуаций с опасными явлениями погоды (ураганы, сильные ливни, сильный мороз и т.п.).

В данной работе использована прогностическая модель Weather Research and Forecasting (WRF). Модель WRF – это мезомасштабная прогностическая модель и система ассимиляции данных современного поколения. Модель разработана для исследования атмосферных процессов и явлений мелкого (1–10 км) и среднего (порядка сотни километров) пространственного масштаба, в частности, и для расчета вероятности возникновения экстремальных явлений в исследуемой области.

Последние версии модели WRF включают в себя передовые технологии численного моделирования и ассимиляции данных, возможности расчета на вложенных сетках и усовершенствованные методы параметризации различных физических процессов. С помощью модели WRF предоставляются возможности проведения экспериментов для разнообразных случаев, включающие в себя моделирование реальных и идеализированных данных, выбор для них различных граничных условий, обширный набор параметризаций физических процессов, негидростатическое и гидростатическое приближение (на выбор), проведение расчетов во вложенных областях с односторонним и двусторонним влиянием.

Модель основана на численном решении системы уравнений гидротермодинамики атмосферы с учетом процессов в верхнем слое суши или воды. Процессы подсеточного масштаба учитываются с помощью параметризаций. В модели WRF используется большое количество схем параметризаций физических процессов, которые можно комбинировать.

В качестве исследуемой была выбрана область Западной Сибири с координатами 47°–63° с.ш. и 65°–105° в.д. В центре данной области находится город Томск. В данной работе рассматриваются два случая в этом регионе с опасными явлениями погоды за 2019–2020 гг.

Первый случай представляет собой ситуацию с возникновением большого температурного градиента в нижнем слое атмосферы в период развития аномально ранних гроз и шквалов. При моделировании события пространственно-временной изменчивости температуры воздуха, произошедшее 29–30 апреля 2019 г., наблюдаются аномально ранние для Западной Сибири явления грозы и шквалы. Начиная с 25 апреля, на территории Западной Сибири происходили значительные пространственно-временные изменения многих метеорологических и геофизических величин, обусловленные смещением далеко на север полярного основного фронта и кратковременным вторжением тропической воздушной массы, а также последующим прохождением холодного фронта и наступлением арктической воздушной массы.

В частности, поле температуры воздуха на высоте 2 м в 8:00 (UTC+07) 30 апреля 2019 года над исследуемой территорией было очень контрастным. Температура воздуха изменялась в диапазоне от -32 °C на северо-западе до +18 °C в центре региона (вблизи г. Томска). Градиент температуры воздуха составлял порядка 45 °C в диапазоне 10 градусов широты. При этом ярко прослеживается область, вытянутая с юго-запада на северо-восток, обусловленная адвекцией тепла. Положению данной области соответствуют очаги сильной неустойчивости, хорошо проявляющиеся в полях изменения приземного давления и вертикальной компоненте ветра.

В этот же день отмечалась наименьшее значение приземного атмосферного давления 981 гПа, которое за последующие двое суток (до 3 мая) резко возросло до 1011 гПа (15 гПа/сутки). На контрастном холодном фронте рассматриваемой территории отмечалась активная грозовая деятельность со шквалистым усилением ветра до 23 м/с. На стадии максимального развития циклона холодные фронты арктической и полярной систем сблизилась друг к другу на расстояние до 500 км с дальнейшим смещением на восток.

Второй случай представляет собой ситуацию с возникновением большой области аномального холода на территории Западной Сибири 25–27 декабря 2020 года. С 22 декабря зафиксировано образование антициклона со значением 1035 гПа с центром у архипелага Северная Земля. К 24 декабря произошло усиление его центра до 1050 гПа. По мере смещения арктического фронта к юго-востоку отмечалось образование гребня высокого давления, который был направлен на юг Западной Сибири.

В этот период отмечалось прояснение облачности над большей частью Западной Сибири, а также



высокие значения атмосферного давления (1030-1040 гПа) и резкое падение температуры воздуха (со среднесуточной температурой воздуха ниже климатической нормы на 9°C и более до -40°C и ниже). В частности, 25 декабря с 15:00 до 18:00 (UTC+07) граница области холода ниже -40°C сместилась на юг сразу на 5 градусов широты.

25-26 декабря центральная часть рассматриваемой территории находилась на восточной периферии гребня высокого давления. При этом происходит быстрое падение температуры в связи с сильной адвекцией холодного воздуха со стороны полуострова Таймыра. Облачность полностью рассеялась. Арктический антициклон с центром над Карским морем и его южный гребень образовали огромную протяженную зону очень высокого давления (1045 гПа и выше), простирающуюся от 50° до 80° с.ш.

При моделировании обоих случаев выбирались следующие схемы параметризации:

1) Физика подстилающей поверхности реализуется схемой Unified Noah land-surface model. Данная схема моделирует влажность почвы (как жидкую, так и мерзлую), температуру почвы, температуру поверхности земли, глубину снежного покрова (с учетом его водного эквивалента и плотности), содержание воды в растительном покрове, а также параметры потока энергии и потока воды с учетом их баланса на поверхности почвы.

2) Модель WRF включает в себя параметризацию поверхностного слоя с учетом процессов обмена теплом и влагой между атмосферой и подстилающей поверхностью, вязкого слоя, уровня шероховатости и слоя постоянных турбулентных потоков.

3) Параметризация радиационных процессов разделяет длинноволновую и коротковолновую солнечную радиацию. Длинноволновая радиация определяется излучением от подстилающей поверхности, которое зависит от категории типа поверхности, а также ее температуры. Коротковолновое излучение представляет диапазон видимых длин волн, входящие в спектр солнечного света. Схема атмосферного излучения рассчитывает поглощение, отражение и рассеяние солнечной радиации в атмосфере с учетом распределения компонент, участвующих в этих процессах: поглощение излучения водяным паром, углекислым газом, озоном, оксидом азота, метаном, двуокиси углерода, а также облака со случайным перекрытием. В данной работе проводился выбор между тремя такими схемами: Rapid Radiative Transfer Model, Goddard и Fu-Liou-Gu.

4) Для параметризации планетарного пограничного слоя схемы учитывают турбулентность в пограничном слое и в свободной атмосфере, рассчитывают вертикальные градиенты температуры воздуха и ветра, высоту пограничного слоя, процессы облакообразования. Для модельных расчетов проводился выбор среди схем Quasi-Normal Scale Elimination - Eddy-Diffusivity Mass-Flux, Mellor-Yamada-Janjic, Yonsei University, Mellor-Yamada Nakanishi and Niino, Asymmetric Convective Model, Bougeault-Lacarrere, Bretherton and Park, Total Energy - Mass Flux, Shin-Hong, Grenier-Bretherton-McCaa.

5) Микрофизика (с учетом состояний воды) реализуется схемами, позволяющими осуществлять переходы между категориями: водяной пар, дождь, снег, снежная крупа, лед и облачность. Вместе с осадением облачного льда ряд схем микрофизики показывают взаимодействие между количеством облаков, поверхностных осадков и крупномасштабной средней температуры за счет представления обратной связи со льдом в облаках и радиацией. В данном моделировании участвовали схемы WRF-Single/Double-Moment-Microphysics 6/7-class, Kessler, Purdue Lin, Ferrier Eta, Goddard 4-ice, Thompson, Milbrandt-Yau Double-Moment 7-class, Morrison double-moment, Stony Brook University (Y. Lin), Hebrew University of Jerusalem (Israel) spectral bin, Morrison and Milbrandt, Jensen ISHMAEL, National Taiwan University.

6) Параметризация облачности позволяет учитывать процессы перемешивания воздуха в облаках и в окружающей среде, рассчитывать свойства восходящих/нисходящих потоков у основания и вершины облачности, а также оценивать процессы развития как сплошной облачности, так и отдельных облаков. В данном исследовании были задействованы схемы Tiedtke, Kain-Fritsch, Betts-Miller-Janjic, Grell-Freitas, Simplified Arakawa-Schubert, Zhang-McFarlane, Grell-Devenyi ensemble.

Для проверки результатов моделирования были задействованы данные наблюдений 211 метеостанций, расположенных в исследуемой области. Совместный анализ результатов моделирования и данных наблюдений в обоих случаях представлен в таблице 1. Анализ сравнения результатов моделирования с наблюдаемыми значениями полей метеовеличин дает удовлетворительную оценку воспроизведения этих полей. Модель WRF показала, что она адекватно воспроизводит возникновение конвективных систем и корректно рассчитывает условия возникновения факторов (например, резкое возрастание поля давления, адвекции холодного воздуха, радиационное выхолаживание), приводящих к опасным явлениям погоды.

**Таблица 1.**

Среднее значение ряда модуля отклонений между моделируемой величиной в точке нахождения метеостанций и данными наблюдений.

Дата	Температура воздуха на 2 м, °С	Давление воздуха на поверхности земли, гПа	Скорость ветра на 10 м, м/с	Количество осадков за 12 часов, мм
Первый случай				
28.04.2019	2.02±1.65	1.13±1.31	2.43±1.84	0.91±2.00
29.04.2019	2.23±1.84	0.90±1.03	2.43±1.77	1.57±2.60
30.04.2019	2.41±1.87	0.79±0.68	2.14±1.60	1.43±2.38
1.05.2019	2.28±1.89	1.06±1.09	2.06±1.62	1.01±1.95
2.05.2019	2.10±1.83	0.67±0.59	1.69±1.29	0.32±1.25
Второй случай				
23.12.2020	3.36±2.58	0.91±0.73	2.68±1.95	0.91±1.28
24.12.2020	4.00±2.81	1.03±0.77	2.66±2.03	1.03±1.49
25.12.2020	6.03±3.55	1.40±1.21	1.98±1.65	0.79±1.23
26.12.2020	4.78±3.25	1.07±0.78	1.82±1.42	0.15±0.39
27.12.2020	3.66±2.81	1.02±1.88	2.51±1.80	0.13±0.54

Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300154-1.

## Numerical modeling of Arctic river heat influence on the sea ice state

**Gradova M., Golubeva E.**

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia  
E-mail: tarkhanova@sscc.ru

In this study, we analyze the contribution of thermal runoff of Siberian Rivers to the reduction of sea ice in the Arctic basin in 2000-2020 based on numerical modeling. The three-dimensional numerical model SibCIOM developed at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS was used for the experiments [7-8]. Sea ice was described using the CICE-3 model of the Los Alamos National Laboratory, USA [9]. For the formation of fluxes at the atmosphere-ocean and atmosphere-ice boundaries, NCEP/NCAR atmospheric reanalysis data were used [10]. The modeling domain included the Arctic Ocean and the Atlantic Ocean bounded by 20°S.

Numerical experiments were performed for the time interval 2000-2020. To set the river runoff, monthly averaged discharge values of major Arctic rivers (Lena, Yenisei, Ob, Pur, Kolyma, Yana, Indigirka, Olenek, Northern Dvina, Pechora, Mackenzie) from the ArcticGRO data set [11] from early 2000 to June 2020 were used. The values of mean monthly river water temperature for the control experiment E-R, obtained from the Arctic River Discharge and Temperature (ARDAT) data set [3], were taken into account for the four largest rivers (Lena, Yenisei, Ob, Mackenzie). In the numerical experiment E-0, unlike the control experiment E-R, the river water temperature was not taken into account. It was assumed that the temperature of river water entering the sea is equal to the sea temperature. The deviations of the mean annual ice volume fields in experiment E-0 relative to the control E-R were analyzed, as well as the fraction of these deviations relative to the mean annual E-R volume values.

The E-R and E-0 results comparison shows that cutting off the account of river heat influx has the most significant effect on the areas adjacent to the river mouth (ice reduction ranges from 26 to 46% in some years) and the shallowest parts of the shelf. Still, the effect is much more than that. The report identifies areas in the deepest parts of the Arctic Ocean that are the most sensitive to river heat influx. Such areas are found in regions of the Arctic basin, located directly behind the shelf of the Barents, Laptev and East Siberian Seas.

*This work was supported by RFBR grant 20-05-00536 A.*

# Численное моделирование влияния тепла арктических рек на состояние морского льда

Градова М.А., Голубева Е.Н.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: tarkhanova@sscc.ru

С тех пор, как в конце 1970-х годов начались спутниковые измерения, площадь арктического морского льда уменьшалась во все месяцы и практически во всех регионах. Согласно данным наблюдений [1] за период с 1979 г. по 2020 г. среднемесячная протяженность морского льда в Арктике каждое десятилетие снижалась на 13% по отношению к среднему показателю за 1981–2010 гг. При анализе тепла, влияющего на сезонное отступление морского льда и нагревание шельфовых вод, одним из основных источников тепла для шельфового региона выделяется речной сток [2]. Тепловой поток, связанный с арктическими реками, эквивалентен 44% оцениваемого океанического теплового потока Берингова пролива, но во время весеннего ледохода может быть примерно в 10 раз больше [3]. Влияние речного теплового потока на весеннее отступление морского льда описано во многих работах [например, 4]. Однако есть основания полагать, что его влияние не ограничивается сезонными изменениями в шельфовых морях. В работе [5] показано, что вынужденное разрушение шельфового морского льда в сезон таяния приводит к дополнительному поглощению океаном коротковолнового излучения, связанного с обратной связью "лед-альbedo". В результате больше тепла удерживается в неглубоких верхних слоях, что задерживает образование льда осенью [6]. В последнее десятилетие увеличенное поступление тепла от рек привело к нагреву обширных районов арктического шельфа, что способствовало усилению теплообмена между океаном и атмосферой и уменьшению толщины зимнего морского льда по сравнению с 1980-ми гг. [5].

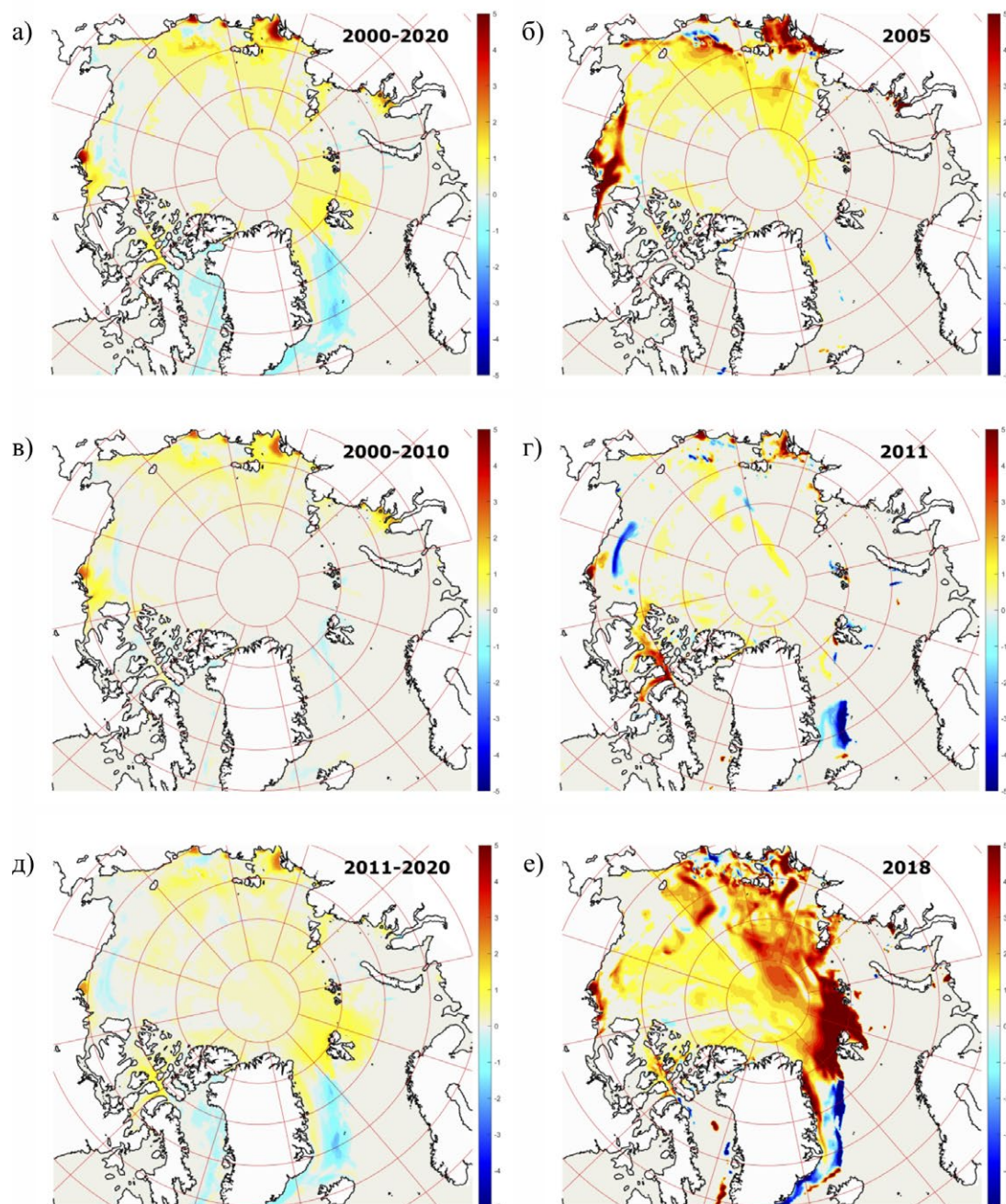
В данном исследовании на основе численного моделирования проводится анализ вклада теплового стока сибирских рек в процесс сокращения морского льда в арктическом бассейне в 2000–2020 гг. Для проведения экспериментов использовалась трехмерная численная модель SibCIOM, разработанная в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН [7–8]. Морской лед описан с помощью модели CICE-3 Лос-Аламосской национальной лаборатории США [9]. Для формирования потоков на границах атмосфера-океан и атмосфера-лед использовались данные реанализа атмосферы NCEP/NCAR [10]. Область моделирования включала в себя Северный Ледовитый океан и Атлантический океан, ограниченный 20° ю. ш. Для проведения численного моделирования использовалась численная трехполярная сетка, включающая 0.5-градусное разрешение к югу от 65° с. ш. и обеспечивающая в среднем шаг в 18 км в полярном регионе.

Численные эксперименты проводились для временного интервала 2000–2020 гг. Для задания речного стока в обоих экспериментах использовались усредненные по месяцам значения расхода крупнейших арктических рек (Лена, Енисей, Обь, Пур, Колыма, Яна, Индигирка, Оленек, Северная Двина, Печора, Маккензи) из набора данных ArcticGRO [11] за период с начала 2000 по июнь 2020 года. Значения среднемесячной температуры речной воды для контрольного эксперимента E-R, взятые из набора данных Arctic River Discharge and Temperature (ARDAT) [3], учитывались для четырех наиболее крупных рек (Лена, Енисей, Обь, Маккензи). В численном эксперименте E-0 в отличие от контрольного E-R не учитывалась температура речных вод. Предполагалось, что температура поступающей в море речной воды равняется температуре моря. Анализировались отклонения среднегодовых полей объема льда в эксперименте E-0 относительно контрольного E-R, а также доля этих отклонений по отношению к среднегодовым значениям объема E-R.

Сравнение результатов E-R и E-0 показывает, что отклонение учета теплового стока рек больше всего влияет на области, прилегающие к устью реки (сокращение льда составляет от 26 до 46% в отдельные годы), и наиболее мелководные части шельфа, однако этим влияние не ограничивается. В некоторых регионах за пределами шельфовой зоны также отмечается сокращение морского льда, вызванное притоком тепла речных вод. На средних среднегодовых долях изменения толщины льда за 2000–2020 гг. (Рис. 1, а) такие регионы выделяются в восточной и юго-западной частях Евразийского бассейна (за пределами шельфа моря Лаптевых и Баренцева моря), а также в бассейне Макарова, к северу от Восточно-Сибирского моря. При этом вокруг Гренландии выделяются области, в которых наоборот лед был тоньше при отсутствии притока речного тепла.

Постоянного накопительного эффекта не отмечается, несмотря на то, что во втором десятилетии XXI века влияние речного тепла на таяние льда было более выраженным, чем в первом десятилетии. В отдельные периоды, когда присутствует некоторое накопление, наблюдается постепенный сдвиг зоны влияния от мелководных шельфовых зон на север, в сторону глубоководных бассейнов, например в 2000–2005 гг. и 2015–2020 гг. На Рис. 1 (б и в) показаны изменения среднегодовых значений объема ледового покрова относительно среднегодовых значений в результирующие годы этих периодов. При этом в последние 6 лет эксперимента проявляются самые интенсивные изменения ледового покрова в Евразийском бассейне. Так же в отдельные годы воздействие теплового стока практически не наблюдается за пределами областей, непосредственно прилегающих к речным устьям (например, в 2011 г., Рис. 1, г).





**Рис. 1.**

Оценка сокращения среднегодового объема льда, вызванного поступлением тепла речного стока. Оценка проводится на основе расчета разности объемов льда между двумя экспериментами E-R и E-0 относительно среднегодового объема льда в эксперименте E-R. Слева представлены осреднения по указанным на рисунках временным периодам, справа – в отдельные годы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-05-00536 А.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Perovich D., Meier W., et al. 2020. Sea Ice. NOAA Arctic Report Card 2020, 44-53. DOI:10.25923/n170-9h57.
2. Janout M., Hölemann J., Juhs B., Krumpen T., Rabe B., Bauch D., Wegner C., Kassens H., Timokhov L. 2016. Episodic warming of near-bottom waters under the Arctic sea ice on the central Laptev Sea shelf. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 264–272. DOI:10.1002/2015GL066565.
3. Whitefield J., Winsor P., McClelland J., Menemenlis D. 2015. A new river discharge and river temperature climatology data set for the pan-Arctic region. *Ocean Modelling*, 88, 1-15. DOI:10.1016/j.ocemod.2014.12.012.



4. Nghiem S. V., Hall D. K., Rigor I. G., Li P., Neumann G. 2014. Effects of Mackenzie River discharge and bathymetry on sea ice in the Beaufort Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 873–879. DOI:10.1002/2013GL058956.
5. Park H., Watanabe E., Kim Y., Polyakov I., Oshima K., Zhang X., Kimball J. S., Yang D. Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming. 2020. *Science Advances*, 6(45), eabc4699. DOI:10.1126/sciadv.abc4699.
6. Carmack E., Polyakov I., Padman L., Fer I., Hunke E., Hutchings J., Jackson J., Kelley D., Kwok R., Layton C., Melling H., Perovich D., Persson O., Ruddick B., Timmermans M.-L., Toole J., Ross T., Vavrus S., Winsor P. 2015. Toward Quantifying the Increasing Role of Oceanic Heat in Sea Ice Loss in the New Arctic. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2079–2105. DOI:10.1175/BAMS-D-13-00177.1.
7. Golubeva E. N., Platov G. A. On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean. 2007. *J. Geophys. Res.*, 112, C04S05. DOI:10.1029/2006JC003734.
8. Голубева Е. Н. Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST. 2008. *Вычислительные технологии*, 13(5), 11–24.
9. Hunke E. C., W. H. Lipscomb. 2004. CICE: the Los Alamos Sea Ice Model, Documentation and Software User's Manual. T-3 Fluid Dynamics Group, Los Alamos National Laboratory. Tech. Rep. LA-CC-98-16 v.3.1.
10. Kalnay E., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. 1996. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–470. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 14.06.2022).
11. Shiklomanov A. I., Holmes R. M., McClelland J. W., Tank S. E., Spencer R. G. M. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, Version 20210527. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arcticgreatrivers.org/discharge/> (дата обращения: 14.06.2022).

## Estimation of methane fluxes to the atmosphere from the Arctic shelf seas

**Malakhova V.V., Golubeva E.N.**

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia  
 E-mail: [malax@sscc.ru](mailto:malax@sscc.ru)

As claimed by instrumental studies, the shallow Arctic Siberian shelf is a source of methane into the atmosphere. A better understanding of the mechanisms affecting the state of Arctic carbon pools and the exchange of methane with the atmosphere is essential for assessing the feedbacks between the carbon cycle and climate in the Arctic. Earth system and ocean models require a more accurate understanding of the processes that affect gas transport at the air-sea interface.

Based on the method of mathematical modeling using a three-dimensional numerical model of the ocean and sea ice SibCIOM and atmospheric reanalysis data we simulated hydrography and ice state of the Arctic Ocean and the Arctic shelf seas. The model shows the significant reduction of the Arctic Sea ice cover in summer and the most intense sea surface temperature rise at the Siberian shelves occurred in the last years of the second decade. We analyzed the methane emission in the Arctic seas due to gas release at the ocean-bottom interface caused by the degradation of subaqueous permafrost and an increase in its permeability.

Coupled modeling the state of water masses, ice cover, and transport of dissolved methane gave us the opportunity to:

- to assess the fate of methane, which came from bottom sediments into the water column;
- estimate the amount of CH<sub>4</sub> that can reach the atmosphere;
- see the role of the ocean and sea ice in this process;
- to assess the impact of climatic changes in recent decades in this process.

Our estimates of the methane emissions from the seas of the Arctic shelves to the atmosphere are 0.7–2 Tg(CH<sub>4</sub>)/year. On average, only 7% of the dissolved methane released from the bottom sediments escapes into the atmosphere within the study area. Most of it accumulates in the water layer, is transported by currents, and is oxidized by microbes. It was found that the East Siberian and Laptev seas make the main contribution to the total methane emission in the region.

The obtained methane fluxes spatial variability into the atmosphere is primarily due to the peculiarities of the water circulation and ice conditions. The highest CH<sub>4</sub> emissions are in the autumn months. It indicates the role of convective mixing of the water column and a wind speed increase during this period.

Many factors affect sea-air gas exchange change due to ongoing climate changes. Reduction in the area of ice cover is one of them. We obtained the maximum annual methane emission into the atmosphere in 2007, which was facilitated by a sharp reduction in the area of sea ice in the autumn period. Extended periods of open water and a decrease in the compactness of the ice cover contribute to a steady increase in  $\text{CH}_4$  emissions since 2004.

## Оценка потоков метана в атмосферу из морей Арктического шельфа

Малахова В.В., Голубева Е.Н.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: malax@sccc.ru

В донных отложениях шельфа Северного Ледовитого океана (СЛО) в условиях холодного климата скрыты огромные запасы метана, которые связаны с наличием субаквальных мерзлых пород и залежей метангидратов [1, 2]. Из-за повышения температуры морского дна они подвергаются риску дегградации, что может привести к повышению уровня метана ( $\text{CH}_4$ ) в атмосфере. Океанические источники  $\text{CH}_4$  в Арктике могут быть недооценены и играть значимую роль из-за больших объемов метана, которые находятся под морским дном в слое многолетнемерзлых пород и в зоне стабильности газовых гидратов [3]. Количественная оценка выхода метана из морского дна и его дальнейшего потока в атмосферу - основные нерешенные вопросы, касающиеся морского цикла метана.

На протяжении плейстоцена ледниковые циклы приводили к периодам трансгрессий и регрессий морей Северного Ледовитого океана. В периоды регрессии моря, когда шельф становился сушей, на Арктическом шельфе происходило формирование континентальной мерзлоты [2, 4, 5]. Во время последующего повышения уровня моря такие многолетнемерзлые породы оказались под водой. Сформировавшаяся в периоды оледенений плейстоцена субаквальная мерзлота может быть распространена на значительной части Арктического шельфа с современными глубинами до 150 м, затопленного в результате последней послеледниковой трансгрессии [2, 6]. Формирование достаточно толстого слоя морской воды над многолетнемерзлыми породами приводит к увеличению температуры на их верхней границе, что способствует дегградации мерзлоты с момента ее затопления [5, 6].

Анализ эмиссии метана с шельфа морей СЛО, особенно в зимний период года, ограничен трудностью региона, а ее оценки характеризуются высокой неопределённостью [7, 8]. Ограниченный охват данных приводит к значительной неопределённости оценки вклада арктических морей в годовую эмиссию метана.

Оценки годовой эмиссии метана и зимних выбросов могут быть получены с использованием численных моделей океана [9, 10]. Такой подход позволяет оценить вклад процессов в океане и морском льду, влияющих на перенос метана из донных отложений в атмосферу, а также оценить изменчивость этих процессов по времени.

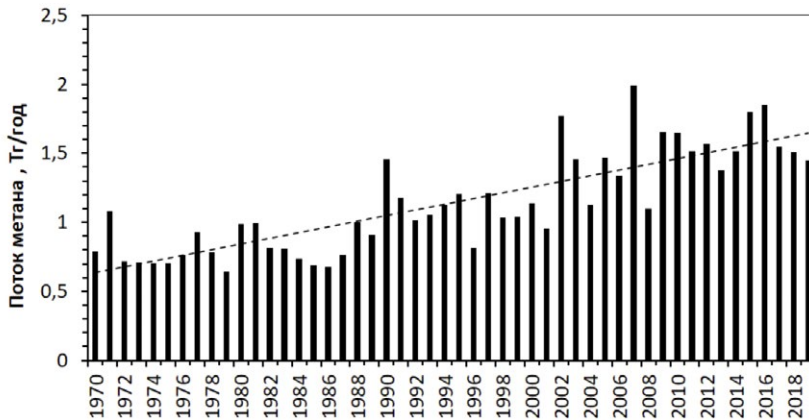
Целью исследования является получение модельной оценки эмиссии метана из морей арктического шельфа в атмосферу как следствие увеличения проницаемости мерзлых пород донных отложений на основе модели океан-лед. Эта цель включает определение количественных, пространственно-временных эмиссий метана и понимание их связи с происходящими изменениями океана и льда.

Представленное исследование основано на результатах численного моделирования переноса растворенного метана в морях Арктики. Модель переноса растворенного метана непосредственно включена в базовую модель океана и морского льда SibCIOM, разработанную в ИВМиМГ СО РАН [11]. Модель основана на системе полных нелинейных уравнений гидротермодинамики океана, выписанных в криволинейных ортогональных координатах с использованием традиционных приближений гидростатики и Буссинеска. В качестве ледового блока модели используется модель CICE 3.14, являющаяся модификацией стандартной вязкопластической модели динамики льда.

В модельном расчете на нижней границе океана при наличии многолетнемерзлого слоя в донных отложениях шельфа [2] задан диффузионный поток метана,  $30 \text{ мг}/(\text{м}^2 \text{сут})$ , соответствующий средним значениям, полученным на основе данных измерений [7] и связанный с дегградацией мерзлоты. Средние скорости выхода метана ( $3\text{-}30 \text{ мг} (\text{CH}_4)/(\text{м}^2 \text{сут})$ ), определяются метаногенезом в сочетании с частичным высвобождением предварительно образованного газа из реликтовых гидратов, сохранившихся в мерзлоте. На верхней границе океанической области рассчитывается поток метана в атмосферу. Расчет потока метана на границе вода-атмосфера проводится по методике [12], основанной на экспериментально установленных параметризациях для океана.

Расчет потока метана в атмосферу с учетом концентрации льда дал возможность оценить эмиссию газа в течение периода, покрытого льдом. Выбросы в этот период связаны с участками открытой воды в ледяном покрове - трещинами и полыньями. Концентрация  $\text{CH}_4$  подо льдом в поверхностном слое воды в наших экспериментах может достигать порядка 5000 нмоль/л [10]. В результате получены значительные выбросы в течение периода, покрытого льдом, из областей полыней. Однако величина таких выбросов ограничена площадью открытой воды.

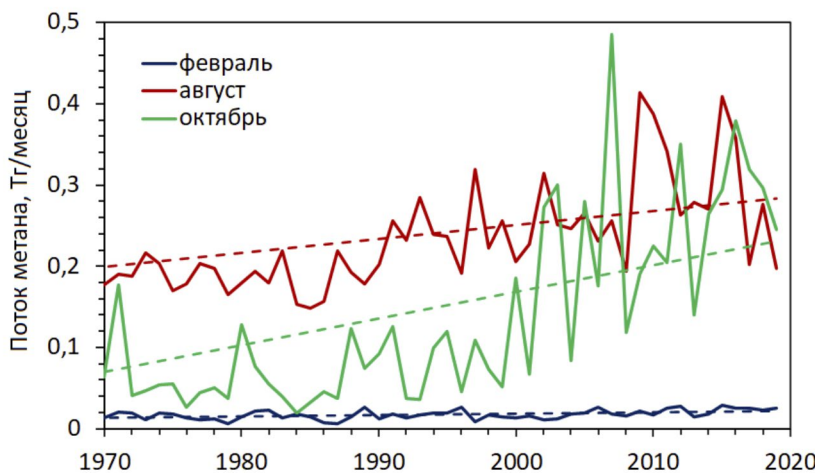
Оценки годовой эмиссии метана от морей Арктического шельфа в атмосферу по результатам численного исследования составили 0,7–2 Тг( $\text{CH}_4$ )/год, рис.1. Наши оценки суммарного выброса метана в атмосферу согласуются с существующими оценками [8].



**Рис. 1.** Поток метана в атмосферу, полученный в численном эксперименте, в Тг( $\text{CH}_4$ ) в год.

В среднем только 7% растворенного метана, поступившего из донных отложений, переносится в атмосферу. Большая часть этого газа накапливается в водном слое, переносится течениями и окисляется. Получено, что моря Восточно-Сибирского шельфа вносят наибольший вклад в общую эмиссию метана в регионе. Пространственная изменчивость потока метана в атмосферу обусловлена, прежде всего, особенностями циркуляции морей и ледовыми условиями. Максимальные потоки  $\text{CH}_4$  характерны для осенних месяцев. Это указывает на значимую роль конвективного перемешивания и увеличения скорости ветра в этот период (рис.2).

В результате происходящих изменений климата многие факторы, влияющие на газообмен между воздухом и морем, меняются. Одним из них является сокращение площади ледового покрова. Так, обратная связь возникает из-за уменьшения количества морского льда, который больше не препятствует переносу газа, что увеличивает поток метана в атмосферу. Более длительные периоды открытой воды и уменьшение концентрации ледового покрова способствуют устойчивому росту эмиссии метана, начиная с 2004 года (см. рис.1, рис.2). Результаты спутникового зондирования [13] подтверждают полученные результаты.



**Рис. 2.** Поток метана в атмосферу, полученный в численном эксперименте для февраля, августа и октября, в Тг( $\text{CH}_4$ ) в месяц.

В контексте происходящего и прогнозируемого потепления климата, в ближайшие годы рост потока метана на акватории арктических морей будет определяться не только потоками газа из донных отложений, но и процессом изменения ледяного покрова Арктики.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 20-05-00241. Численная модель разработана в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0251-2021-0003).*

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Ruppel C. Permafrost-associated gas hydrate: Is it really approximately 1 % of the global system? // *J. Chem. Eng. Data*. 2015. V. 60(2). P. 429–436. doi:10.1021/je500770m
2. Malakhova, V.V. The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 606. 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012035>
3. James R. H., Bousquet P., Bussmann I., Kipfer R., Haeckel M., Leifer I., Niemann H., Ostrovsky I., Piskozub J., Rehder G., Treude T., Vielstädte L., and Greinert J. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: A review // *Limnology and Oceanography*. 2016. V. 61 (S1). P. S283–S299.
4. Gavrilov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // *Geosciences*. 2020. V. 10 (12). P. 484. DOI: 10.3390/geosciences10120484
5. Малахова В.В., Елисеев А.В. Влияние диффузии солей на состояние и распространение многолетнемерзлых пород и зоны стабильности метан-гидратов шельфа моря Лаптевых // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60(4). С. 533-546. <https://doi.org/10.31857/S2076673420040058>
6. Overduin P. P., Schneider von Deimling T., Miesner F., Grigoriev M. N., Ruppel C. D., Vasiliev A., Lantuit H., Juhls B., Westermann S. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124(6). P. 3490–3507. <https://doi.org/10.1029/2018JC014675>
7. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., and Gustafsson O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. V. 373 (2052). 20140451.
8. Thornton B.F., Prytherch J., Andersson K., Brooks I.M., Salisbury D., Tjernström M., Crill P.M. Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic sea emissions // *Science Advances*. 2020. V. 6 (5). eaay7934. DOI: 10.1126/sciadv.aay7934
9. Wählström I., Meier H. E. M. A model sensitivity study for the sea-air exchange of methane in the Laptev Sea, Arctic Ocean // *Tellus Series B-Chem. Phys. Meteorol.* 2014. V. 66.
10. Malakhova V., Golubeva E. Model Study of the Effects of Climate Change on the Methane Emissions on the Arctic Shelve // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 274. <https://doi.org/10.3390/atmos13020274>
11. Голубева Е.Н., Платов Г.А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948 – 2007 гг. // *Известия РАН. ФАО*. 2009. Т. 45. №1. С. 145-160.
12. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited, // *Limnol. Oceanogr. Meth.* 2014. V. 12. P. 351–362. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
13. Юрганов Л.Н. Связь между переносом метана в атмосферу и разрушением ледяного покрова Карского моря: спутниковые данные за 2003–2019 гг. // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60(3). С. 423-430. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030049>

## Simulation results using the new INMCM-SibCIOM climate model

**Gradov V.S.<sup>1</sup>, Platov G.A.<sup>1</sup>, Volodin E.M.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: gradov.v.s@gmail.com

Climate models describe interactions between main climate components such as ocean, atmosphere, cryosphere, land, biomes, etc. Creating such models from scratch is a very complicated and time-consuming process. Therefore, constructing climate models using existing climate component models is a relatively more straightforward task. Moreover, such a construction principle is more flexible because it allows us to combine different models of climate components to solve the problem we are interested in.

This study aims to construct a new climate model using existing models INMCM48 [Volodin, Mortikov et al., 2018] and SibCIOM [Golubeva, Platov, 2007; Golubeva, 2008]. We will also present some preliminary modeling results with the INMCM-SibCIOM and compare these results with those of the INMCM48 model.



SibCIOM is coupled sea ice and ocean model developed in ICMMG SB RAS (Novosibirsk, Russia). It has four independent blocks: ocean, ice, atmosphere and land, coupled with each other by an auxiliary block called a “coupler”. The “coupler” receives information from each block, processes it and sends necessary information back to some blocks. Sea ice and ocean blocks are interactive, i.e. they are compute in real-time, while the atmosphere and land blocks send only reanalysis data to “coupler” without any computations.

INMCM48 is a climate model developed in INM RAS (Moscow, Russia). It has two blocks: the atmospheric general circulation block and the ocean general circulation block that are independent. Exchanges between blocks are performed directly without the involvement of additional programs. Atmospheric general circulation block calculates atmospheric and land states. Ocean general circulation block calculates sea ice and ocean states.

Both INMCM48 and SibCIOM models are designed on the block principle. It makes it easy to disconnect and connect blocks in different configurations. In addition, the advantage of the SibCIOM model is that it was created and configured to simulate the Arctic region. The advantage of the INMCM48 model is that it has a detailed atmospheric block. And it would be good to use the benefits of these two models.

The INMCM-SibCIOM model is based on SibCIOM model design. To build it, it is enough to uncouple the atmospheric and land blocks of the SibCIOM model and replace them with an atmospheric general circulation block of the INMCM48 model.

As a preliminary test, numerical experiments were carried out on the INMCM-SibCIOM and INMCM48 models with 20 years of duration. The atmospheric, ocean and sea ice states typical of the pre-industrial period were taken as the initial data. The purpose of these experiments is to check the correctness of the results obtained by the new model.

The experiment showed that in the last year, the new model adequately reproduces the atmospheric fields in the Arctic but gives higher temperatures in this region, for example. Thus it indicates that the model requires further adjustment of the parameters to obtain better results.

*This work was performed as part of the Horizon 2020 program under the CRiceS project with the financial support of the Russian Federation represented by the Russian Ministry of Education and Science, Agreement No. 075-15-2021-947*

## Результаты моделирования с помощью новой климатической модели INMCM-SibCIOM

Градов В.С.<sup>1</sup>, Платов Г.А.<sup>1</sup>, Володин Е.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: gradov.v.s@gmail.com

Численное моделирование является основным инструментом изучения климата и прогнозирования его изменений. На данный момент в мире существует множество различных численных моделей, воспроизводящих отдельные компоненты климатической системы, основные из которых атмосфера, океан, криосфера, суша и биота. Так же существуют численные модели, которые описывают совместную работу и взаимодействие основных компонент климатической системы – климатические модели. Их число значительно ниже, так как создание каждой новой климатической модели требует огромное количество ресурсов и времени. Гораздо проще вместо создания новой модели с нуля взять уже готовые модели климатических компонент и настроить взаимодействие между ними. В зависимости от поставленной задачи компоненты можно подобрать так, чтобы подробно описать необходимые процессы и отбросить или понизить точность описания процессов незначительных для рассматриваемой задачи.

В данной работе описывается построение новой климатической модели на основе двух существующих моделей SibCIOM и INMCM48 и приводятся результаты численных экспериментов, проведенных с помощью новой модели.

Модель SibCIOM – совместная численная модель океана и морского льда, разработанная в ИВ-МиМГ СО РАН [1, 2]. В основе океанической части модели лежат законы сохранения тепла, соли и импульса в приближениях Буссинеска, гидростатики и твердой крышки с замыкающим систему уравнением состояния для плотности. В качестве ледовой части модели используется модель динамики морского льда SIC3 [3]. Состояния атмосферы и суши в данной модели не рассчитываются интерактивно. Вместо этого используются данные реанализа.

Достоинства данной модели заключаются в том, что она создавалась для задач, связанных с исследованием Арктического региона. Наиболее значимые для данного региона процессы описаны более

детально. Также каждая из четырех описанных выше климатических компонент представляет собой независимый блок. Взаимодействие между блоками осуществляется с помощью вспомогательной программы каплер (coupler), которая получает от каждого блока необходимые данные, обрабатывает их и отправляет расчетным блокам результирующие данные, требующиеся для продолжения их счета. На рисунке 1а описана схема взаимодействия между компонентами модели. Наличие двух стрелок показывает, что блок как получает от каплера данные, так и отправляет новые данные обратно, т.е. такой блок является интерактивным. Одна стрелка говорит о том, что блок только отправляет данные каплеру и не является расчетным. Блочность данной модели позволяет достаточно просто отсоединять блоки модели и устанавливать вместо них другие блоки, настраивая обмен необходимыми данными с каплером.

Модель INMCM48 – глобальная климатическая модель, разработанная в ИВМ РАН [4]. В её основе лежат блоки общей циркуляции атмосферы и общей циркуляции океана. Блок общей циркуляции атмосферы дополнительно рассчитывает некоторые процессы, происходящие на суше, а блок общей циркуляции океана включает собственную ледовую модель. В рамках атмосферной модели разрешается система уравнений гидротермодинамики атмосферы в сферической системе координат с вертикальной  $\sigma$ -координатой [5]. В основе океанической модели лежит система примитивных уравнений в приближении гидростатики и Буссинеска с вертикальной  $\sigma$ -координатой [6]. Замыкает систему уравнение состояния для плотности. Данная модель способна воспроизводить динамику атмосферы, океана, морского льда, растительности и почв с учетом уровня парниковых газов.

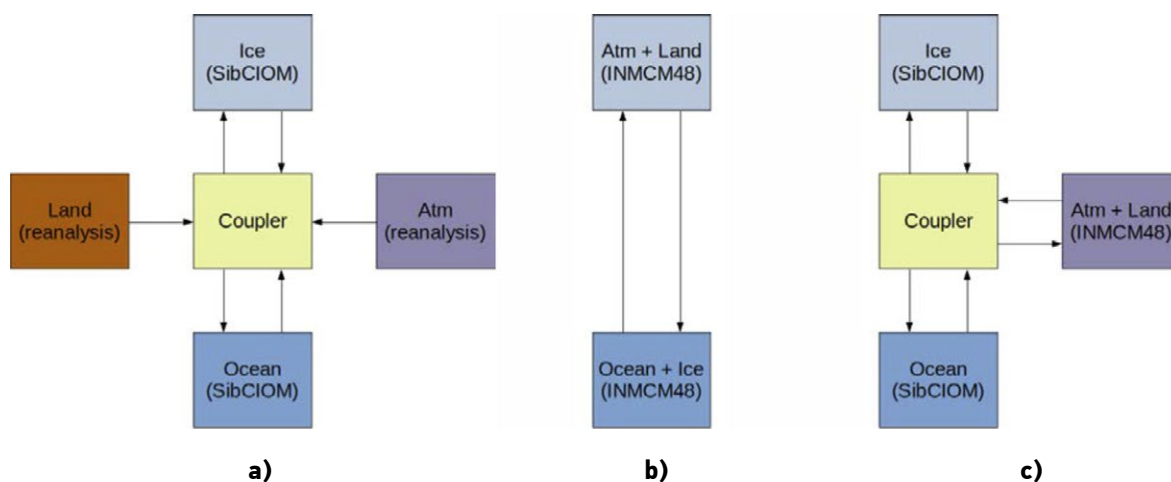


Рис. 1. Схема взаимодействия компонент модели: а) SibCIOM, б) INMCM48, в) INMCM-SibCIOM.

Блок общей циркуляции атмосферы является детально проработанным, что является достоинством данной модели. Данная модель не имеет вспомогательного блока, аналогичного каплеру модели SibCIOM. При этом блоки являются независимыми, и взаимодействие между ними осуществляется непосредственно (рис 1б).

В качестве основы новой модели INMCM-SibCIOM используется модель SibCIOM. В ней вместо блоков, передающих данные атмосферы и суши, подключается блок общей циркуляции атмосферы модели INMCM48 путем настройки двухсторонней передачи данных с каплером. Схема взаимодействия представлена на рисунке 1с. Так как атмосферный блок INMCM48 рассчитывает необходимые поля на суше, то нет необходимости в блоке суши модели SibCIOM.

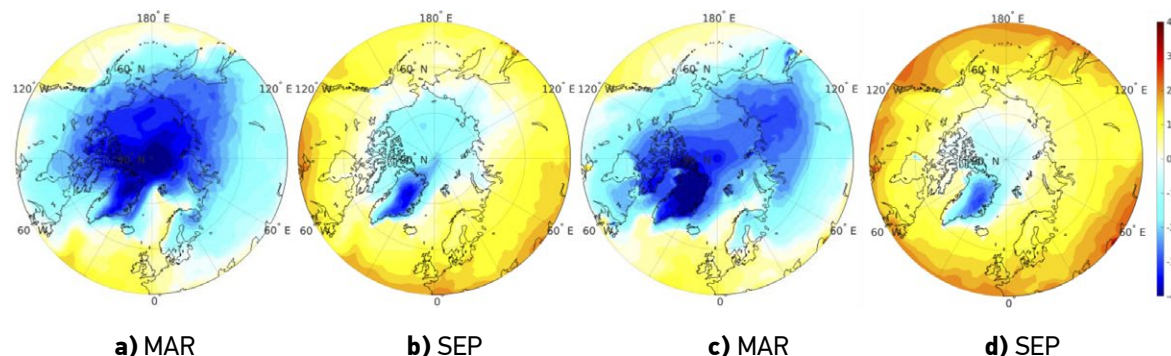


Рис. 2. Среднемесячная температура воздуха у поверхности Земли в Арктике в 20-й год эксперимента для моделей INMCM48 (а, б) и INMCM-SibCIOM (с, д).

В качестве предварительного тестирования были проведены численные эксперименты на моделях INMCM-SibCIOM и INMCM48 продолжительностью 20 лет. В качестве начальных данных бралось усредненное состояние атмосферы, океана и морского льда, характерное для доиндустриального периода. Целью данных экспериментов является проверка корректности получаемых моделью результатов.

На рис. 2 представлена среднемесячная температура воздуха у поверхности Земли в Арктике в последний год эксперимента за март и сентябрь, полученная с помощью моделей INMCM48 (рис. 2а, 2б) и INMCM-SibCIOM (рис. 2с, 2д). Из рисунка видно, что распределение поля температуры в данном регионе в обеих моделях схоже, но в модели INMCM-SibCIOM температура в рассматриваемом регионе выше. Это говорит о совершенно ином отклике атмосферного блока модели INMCM48 на информацию, получаемую от океанического и ледового блоков модели SibCIOM. При этом сохранение распределения говорит об адекватности предварительных результатов. Так же для улучшения результатов, получаемых с помощью данной модели, необходима дополнительная настройка ее параметров.

*Работа выполнена в рамках программы «Горизонт 2020» по проекту CRiceS при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2021-947.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Golubeva E. N., Platov G. A. (2007) On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 112, C04S05. DOI:10.1029/2006JC003734.
2. Голубева Е. Н. Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST. 2008. *Вычислительные технологии*, 13(5), 11-24.
3. Hunke E. C., W. H. Lipscomb. 2004. *CICE: the Los Alamos Sea Ice Model, Documentation and Software User's Manual*. T-3 Fluid Dynamics Group, Los Alamos National Laboratory. Tech. Rep. LA-CC-98-16 v.3.1.
4. Volodin, E., Mortikov, E., Kostrykin, S., Galin, V., Lykossov, V., Gritsun, A., Diansky, N., Gusev, A., Iakovlev, N., Shestakova, A. and Emelina, S. (2018) Simulation of the modern climate using the INMCM48 climate model. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, Vol. 33 (Issue 6), pp. 367-374. <https://doi.org/10.1515/rnam-2018-0032>
5. Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. *Математическое моделирование Земной системы / Под ред. Яковлева Н.Г.* — М.: МАКС Пресс, 2016. — 328 с.
6. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. *М. Физматлит*, 2013. 272 с.

## Numerical study of the Arctic Oscillation index influence on the characteristics of atmospheric blockings

**Borovko I.V., Gradov V.S., Krupchatnikov V.N.**

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia

Atmospheric blocking is a situation when the western transport of air masses is disrupted due to an anticyclonic vortex located over one territory for several days. Atmospheric blocking is one of the most significant weather phenomena that occur in the middle latitudes. It can affect the weather in a significant part of these regions, including both temperature and precipitation patterns. Long-term changes in the frequency or nature of blockages can mean important changes in average temperature or precipitation, as well as in the frequency of extreme events.

The Arctic Oscillation (AO) is the principal mode of variability of the Northern Hemisphere. The negative phase corresponds to a lower average velocity of the zonal flow, which contributes to a longer stay of the vortex over one territory.

In this work, the dependence of atmospheric blocking characteristics on global atmospheric circulation indices is studied with use of numerical modeling.

The probability of atmospheric blockings and their duration are related to the characteristics of the global circulation of the atmosphere. The presence of blocking anticyclones contributes to the variability of the global circulation. The duration of the anticyclone's stay over the territory under consideration and the probability of blocking development depend on the phase of the Arctic Oscillation.

The observed climate changes have a significant negative projection on the principal mode. Therefore, in the future, it is likely to increase the duration of atmospheric blockings in regions where the number of blockings with a negative index of the principal mode is greater than with a positive one.

# Численное исследование влияния индекса Арктической Осцилляции на характеристики атмосферных блокирований

Боровко И.В., Градов В.С., Крупчатников В.Н.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Атмосферным блокированием называется ситуация, когда западный перенос воздушных масс нарушается вследствие антициклонического вихря, находящегося над одной территорией в течение нескольких дней. Атмосферное блокирование является одним из наиболее значимых погодных явлений, повторяющихся в средних широтах. Оно может повлиять на погоду на значительной части этих регионов, меняя как температуру, так и характер осадков. Долгосрочные изменения частоты или характера блокирований могут означать важные изменения в средней температуре или осадках, а также в частоте экстремальных явлений.

Арктическая осцилляция (АО) является главной модой изменчивости Северного полушария. Влияние фазы АО на характеристики блокирования было исследовано, например, в [1]. Отрицательной фазе соответствует меньшая средняя скорость зонального потока, что способствует более длительному нахождению вихря над одной территорией. Влиянию изменений климата на блокирование и стационарные волны Россби посвящено много исследований, например, в [2] исследована зависимость количества блокирований в различных регионах от количества морского льда в Арктике.

В данной работе с помощью модельных данных исследуется, при каких состояниях глобальной циркуляции атмосферы возникают длительные блокирующие условия в зимний период.

Для проведения экспериментов использовалась совместная модель динамики климатической системы INMCM48[12]. Данная модель способна воспроизводить динамику атмосферы, океана, морского льда, растительности и почв с учетом уровня парниковых газов.

Океанический блок данной модели имеет разрешение  $1^\circ \times 0.5^\circ$  по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Разрешение атмосферного блока  $2^\circ \times 1.5^\circ$  и 21 уровень по вертикали.

Для основного эксперимента модель сначала рассчитывалась до выхода на стационарный режим (60 лет). После рассчитывались 40 лет.

Метод диагностики блокирования был предложен в работе [4]:

Для каждой точки с координатами  $(\lambda_0, \varphi_0)$  определялись индексы

$$GHGS(\lambda_0, \varphi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \varphi_0) - Z_{500}(\lambda_0, \varphi_S)}{\varphi_0 - \varphi_S}, \quad GHGN(\lambda_0, \varphi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \varphi_N) - Z_{500}(\lambda_0, \varphi_0)}{\varphi_N - \varphi_0},$$

где  $Z_{500}$  – высота поверхности уровня давления 500 мбар,  $\varphi_S = \varphi_0 - 15^\circ$ ,  $\varphi_N = \varphi_0 + 15^\circ$ .

Условия  $GHGS(\lambda_0, \varphi_0) > 0$ ,  $GHGN < -10\text{м/ (градус широты)}$  выполнены, если над регионом находится локальный максимум высоты геопотенциала. Блокированием считается ситуация, когда эти условия выполняются в течение пяти суток.

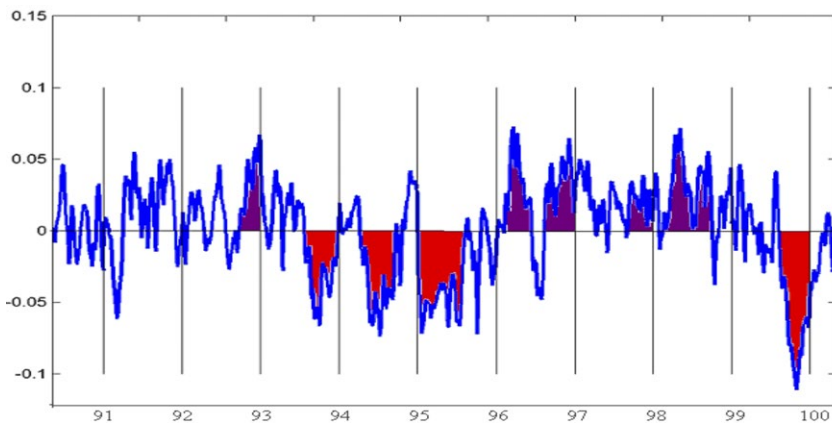
Были посчитаны естественные ортогональные функции (ЕОФ) для ежедневных данных за зимний сезон (с декабря по февраль). Рассматривалась область, лежащая севернее двадцати градусов северной широты. Были взяты данные за период с декабря по февраль. В используемой модели данные записаны на сетке, сгущающейся к полюсу, поэтому ЕОФ строились для аномалий давления, умноженных на площадь конечного элемента, соответствующего широте.

В базовом эксперименте при высоком положительном индексе главной моды происходит блокирование в Европе и Западной Сибири. В эксперименте с измененным альбедо главная мода изменчивости имеет более меридиональный характер над Евразией, т.е. при измененном альбедо ниже изменчивость градиента высоты геопотенциала в регионе, и, соответственно, меньше частота блокирований, что подтверждается диагностикой с помощью критерия Тибальди-Молтени.

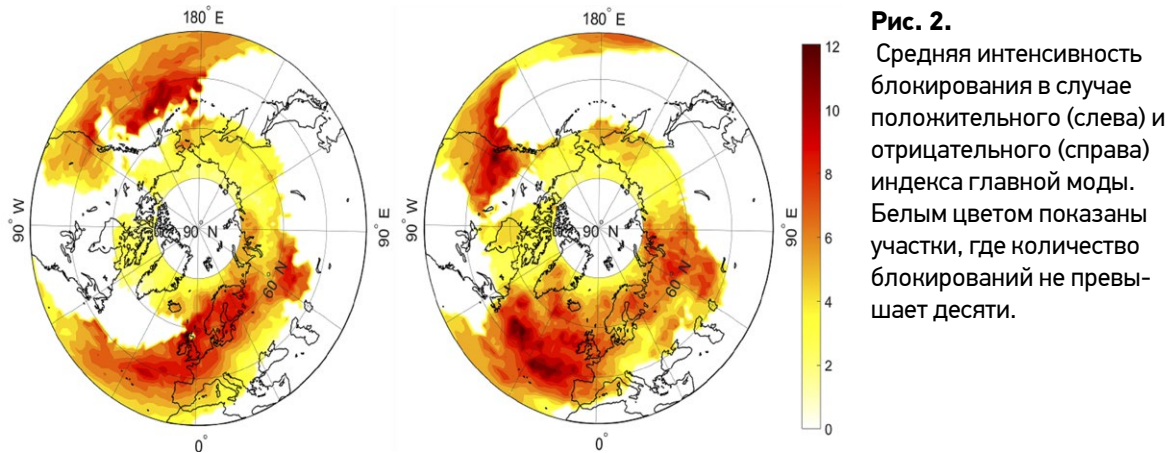
На рис. 1 представлена нормированная проекция аномалии высоты геопотенциала на главную моду. Выделяются периоды постоянного знака индекса продолжительностью около одного месяца. Периоды с отрицательным индексом характеризуются блокированием в районе Западной Америки. В частности, в сотом модельном году антициклон находился в этом районе с 3 по 20 февраля. В периоды, когда индекс главной моды имел положительное значение, антициклон находился над Европой.

Сравнивалось количество моментальных блокирующих ситуаций при положительном индексе главной моды и при отрицательном. При положительном индексе значительно увеличивается число блокирований в субтропических широтах Тихого океана и в районе Гренландии, при отрицательном - в субтропических широтах Атлантики и в районе Чукотки и Аляски.





**Рис. 1.** Индекс главной моды в базовом эксперименте в зависимости от времени. Области, ограниченные вертикальными линиями, соответствуют одной зиме.



**Рис. 2.** Средняя интенсивность блокирования в случае положительного (слева) и отрицательного (справа) индекса главной моды. Белым цветом показаны участки, где количество блокирований не превышает десяти.

Была посчитана длительность блокирований для базового эксперимента и для эксперимента с измененным альбедо. Выяснено, что в большинстве областей средняя продолжительность блокирующей ситуации не превышает трех суток. Области, в которых выполнение условий Молтени-Тибальди, скорее всего, приведет к длительному блокированию - это субтропические районы Северной Америки и Юго-Восточная Азия.

В следующем эксперименте была оценена зависимость длительности блокирующей ситуации от индекса глобальной циркуляции. Рассматривались только зимние данные. Индекс главной моды (см. рис 1) учитывался для первой записи с блокированием.

На рис. 2 показана средняя интенсивность блокирований при положительном и отрицательном индексе главной моды.

При отрицательном индексе главной моды наблюдается увеличение длительности блокирований в Атлантике и на севере Сибири. Интенсивность блокирований увеличивается при отрицательном индексе в Атлантике, при положительном — в северной Европе и Тихом океане

С помощью численного моделирования показана зависимость характеристик атмосферного блокирования от глобальных индексов атмосферной циркуляции.

Вероятность атмосферных блокирований и их длительность связаны с характеристиками глобальной циркуляции атмосферы. Наличие блокирующих антициклонов вносит вклад в изменчивость глобальной циркуляции. Продолжительность нахождения антициклона над рассматриваемой территорией и вероятность развития блокирования зависят от фазы Арктической осцилляции.

Наблюдаемые климатические изменения имеют существенную отрицательную проекцию на главную моду. Поэтому в будущем вероятно увеличение длительности атмосферных блокирований в регионах, где количество блокирований при отрицательном индексе главной моды больше, чем при положительном.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВМуМГ СО РАН (проект НИР №0251-2021-0003)

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования *Метеорология и гидрология*. 2010. № 11. С. 5-18.
2. Platov G., Krupchatnikov V., Gradov V., Borovko I., Volodin E. Analysis of the Northern hemisphere atmospheric circulation response to Arctic ice reduction based on simulation results. / *Geosciences (Switzerland)*. 2021. Т. 11. № 9 DOI: 10.3390/geosciences11090373

3. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. *Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2018. V. 33. №6. P. 367–374.*
4. Tibaldi, S.; Molteni, F. *On the Operational Predictability of Blocking. / Tellus, 1990}, 42A, 343--365. doi:10.3402/tellusa.v42i3.1188*

## A modeling study of the variability of the Siberian Arctic seas state in the 21 century

**Golubeva E., Kraineva M.**

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: [elen@ommfao.sccc.ru](mailto:elen@ommfao.sccc.ru)

The results of numerical modeling and analysis of observational data show that the second decade of the 21st century turned out to be extreme for the Siberian Arctic seas in terms of the state of the ice cover and the assessment of sea surface temperature.

Numerical modeling of hydrological and ice fields, water circulation in the period from 2000 to 2020 was carried out. Atmospheric reanalysis data (NCEP/NCAR I) are used to determine atmosphere-to-ice and atmosphere-to-ocean surface fluxes. The results of the numerical experiment simulate the main processes corresponding to climatic changes known from the analysis of observational data. The most pronounced among them is a significant reduction of the arctic ice extent in summer. The numerical model shows an increase in the duration of ice-free period and an increase in velocity of currents in the surface layers of the sea, caused by the action of the wind. An increase in the temperature of the surface waters of the Arctic shelf seas is associated with an intensive reduction of ice extent. An analysis of the average monthly surface temperature in the shallow part of the sea showed that, starting from 2005, the temperature of the surface layer of the shelf seas has been increasing. According to the results of model experiments, an increase in the temperature of the bottom layer begins in September, and the maximum temperature, as a rule, occurs in October. The positive temperature values that have arisen in the near-bottom layer of the sea as a result of the previous abnormally warm summer can persist there for several months. This leads to a gradual warming of the bottom layer of the sea.

The near-bottom layer temperature of the Siberian shelf has been analyzed for two decades since the beginning of the 21st century. According to the numerical results, the areas were identified where an increase in the temperature of the sea bottom layer was obtained. In the Kara Sea, the areas bordering the mouths of the Ob and Yenisei, and its eastern part, are distinguished. In the Laptev Sea this area includes the western part near the Taimyr Peninsula and the deep part of the sea. In the shelf area, an increase in temperature is noticeable near the Lena River Delta and in the southeastern part of the sea. Time series of average monthly temperatures of the surface and bottom layers show that the amplitude of seasonal fluctuations has increased in the past decade, and the temperature rise is noticeable not only in the autumn, but also in the winter months. The least pronounced changes during the calculation period occurred in the bottom layer of the East Siberian Sea.

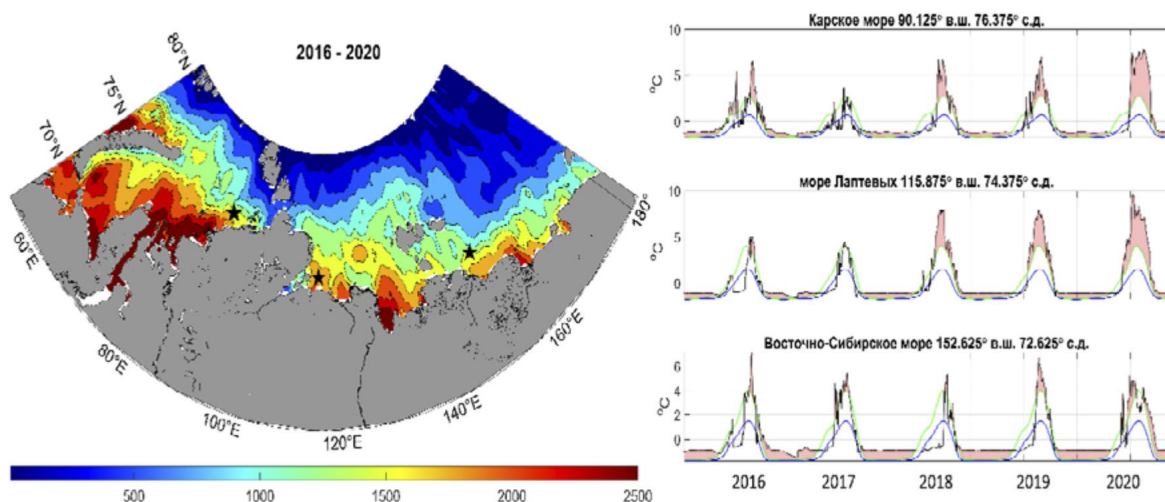
## Исследование изменчивости состояния морей сибирского сектора Арктики в 21 столетии на основе численного моделирования

**Голубева Е.Н., Крайнева М.В.**

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: [elen@ommfao.sccc.ru](mailto:elen@ommfao.sccc.ru)

Второе десятилетие 21 столетия для Северного Ледовитого океана характеризуется экстремальным состоянием ледяного покрова и температуры морской поверхности [1]. Результаты анализа данных наблюдений [2] показывают, что наибольшие изменения происходили в сибирских арктических морях, где повышение температуры поверхностного слоя (рис.1) можно оценивать как морские волны тепла [3,4].



**Рис. 1.**

Индекс накопления тепла [4] (градус·день) в поверхностном слое в 2016-2020 гг. относительно климатического периода (1979-2010), посчитанный по данным наблюдений [2] на основе методики выделения морских волн тепла [3]. В выделенных звездочками точках в сибирских арктических морях показано изменение температуры на поверхности (черная линия), климатическое среднее (голубая линия), пороговое значение, ниже которого находятся 90% всех значений в этой точке (зеленая линия). Область, закрашенная розовым, означает, что полученные значения можно рассматривать как аномально теплые.

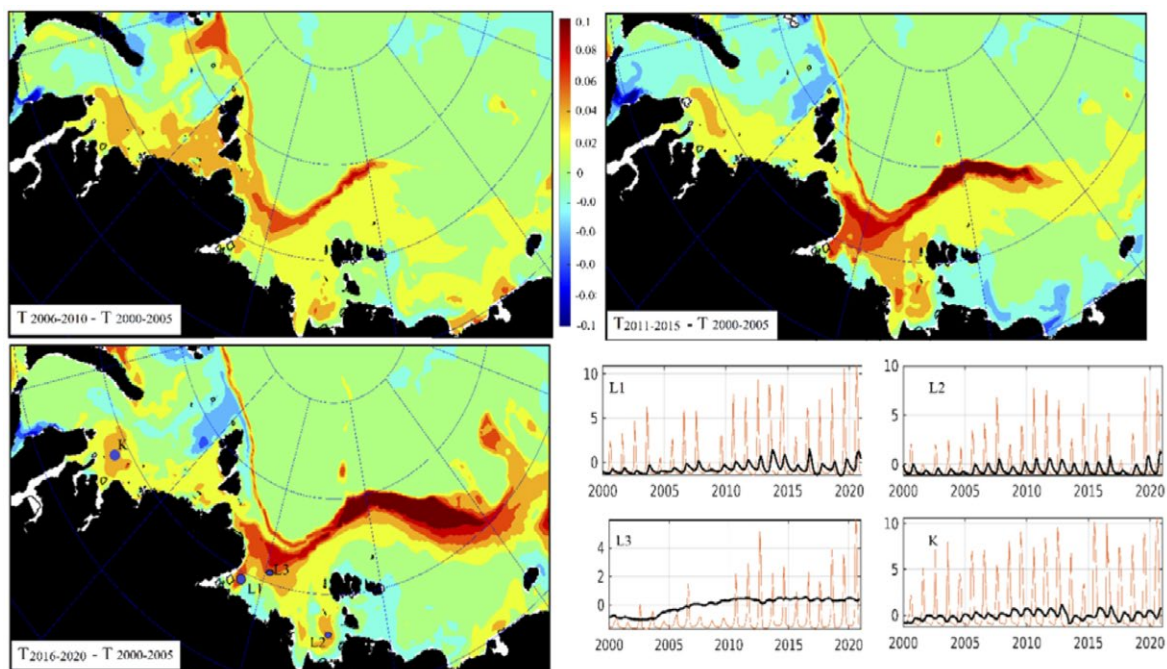
Результаты численного моделирования для 2000-2020 гг. получены на основе трехмерной численной модели океана и морского льда SibCIOM (Siberian coupled ice-ocean model), включающей океаническую модель ИВМиМГ СО РАН [5,6], модель морского льда CICE-3 Лос-Аламосской национальной лаборатории США [7], блок обмена данных и формирования потоков на границах атмосфера-океан и атмосфера-лед (Coupler) с использованием данных реанализа атмосферы NCEP/NCAR [8]. Область моделирования включает Атлантический океан выше 20 ю.ш. и Северный Ледовитый океан, ограниченный на широте Берингова пролива. Эти границы, а также устья рек считаются «жидкими», на которых задается информация о климатических значениях температуры, солёности и расходе течения. Используемая численная трехполярная сетка, включала 0.5-градусное разрешение к югу от 65° с. ш. и обеспечивала в среднем шаг в 18 км в полярном регионе. В качестве начальных полей использовались значения океанических и ледовых характеристик, полученные в предыдущих численных экспериментах

В численном эксперименте моделируются основные процессы, соответствующие климатическим изменениям, известным на основе анализа данных наблюдений. Наиболее ярко выраженное среди них – значительное сокращение площади ледового покрова в летний период. Численная модель показывает увеличение продолжительности периода открытой воды для арктических морей и повышение скорости течений в поверхностных слоях моря, вызванное действием ветра. С интенсивным сокращением площади ледового покрова связано повышение температуры поверхностных вод арктических шельфовых морей, начавшееся после 2005 года.

В отличие от поверхностного слоя, где максимальные значения поверхностной температуры достигаются в августе, в придонном слое в этот месяц не отмечается значительного потепления. В морях Лаптевых и Восточно-Сибирском значения осредненной по региону температуры в августе не достигают положительных значений. Анализ атмосферных полей, используемых в качестве модельного форсинга, и полученных полей температуры, солёности и циркуляции вод показывает, что продолжительным аномально высоким значениям приземной температуры в летний период над акваторией арктических морей соответствует динамическое состояние атмосферы, способствующее выносу в северном направлении поверхностных прогретых прибрежных вод. При этом в придонном слое моря формируется поток, направленный из северных районов в шельфовую зону. Присутствие пресных речных вод препятствует интенсивному перемешиванию, в результате чего глубже поверхностного слоя температура остается низкой. В отличие от этих морей, в Карском море средняя температура на мелководном шельфе может достигать 2 С° в августе благодаря интенсивному перемешиванию и контакту с баренцевоморской ветвью атлантических вод.

По результатам модельных экспериментов повышение температуры придонного слоя начинается в сентябре, максимум температуры приходится, как правило, на октябрь за счет осеннего охлаждения поверхностных вод и интенсивного конвективного перемешивания, способствующего поступлению тепла в глубокие слои. Положительные значения температуры, возникшие в придонных водах как ре-





**Рис.2.**

Изменение температуры придонного слоя сибирских арктических морей в период 2000–2020 гг. по результатам численного моделирования. Представлены поля разности среднегодовой температуры, осредненной за пятилетний период, и начальный период шести лет расчета 2000–2006 гг. В выделенных точках морей Лаптевых (L1, L2, L3) и Карского (К) показан сезонный ход температуры в поверхностном (красный) и придонном (черный) слоях.

зультат предшествующего аномально теплого лета, могут сохраняться в течение нескольких месяцев. Это приводит к постепенному прогреву придонного слоя моря.

На основе проведенного численного моделирования проанализировано изменение температуры придонных вод Сибирского шельфа в течение двух десятилетий с начала 21 столетия, выделены области, в которых получено повышение температуры придонного слоя моря (рис.2). В Карском море выделяется область, граничащая с устьями Оби и Енисея, и его восточная часть. В море Лаптевых – западная часть около п-ва Таймыр и глубоководная часть моря. В шельфовой области заметно повышение температуры около дельты р. Лены и в юго-восточной части моря. Графики среднемесячных значений температуры поверхностного и придонного слоев в отдельных точках (рис.2) показывают, что в прошедшем десятилетии увеличилась амплитуда сезонных колебаний, заметно повышение температуры не только в осенние, но и в зимние месяцы. Наименьшие изменения за период расчета произошли в придонном слое Восточно-Сибирского моря.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №20-11-20112.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Collins, M.; Sutherland, M.; Bouwer, L.; Cheong, S.-M.; Frölicher, T.; Jacot Des Combes, H.; Koll Roxy, M.; Losada, I.; McInnes, K.; Ratter, B. et al. in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer, Eds. Intergovernmental Panel on Climate Change 2019. <https://www.ipcc.ch/report/srocc/>
2. Reynolds, R.W.; Smith, T.M.; Liu, C.; Chelton D.B.; Casey, K.S.; Schlax, M.G. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. Climate* 2007, 20, 5473–5496. doi: 10.1175/2007JCLI1824.1
3. Hobday, A.J.; Alexander, L.V.; Perkins, S.E.; Smale, D.A.; Straub, S.C.; Oliver, E.C.J.; Benthuisen, J.A.; Burrows, M.T.; Donat, M.G.; Feng, M. et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography* 2016, 141, 227–238. doi:10.1016/j.pocean.2015.12.014
4. E. Golubeva, M. Kraineva, G. Platov, D. Iakshina, and M. Tarkhanova *Marine Heatwaves in Siberian Arctic Seas and Adjacent Region., Remote Sensing.* 2021, 13(21), 4436; <https://doi.org/10.3390/rs13214436>
5. Golubeva E. N., Platov G. A. On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean. 2007. *J. Geophys. Res.*, 112, C04S05. DOI: 10.1029/2006JC003734.



6. Голубева Е. Н. Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST. 2008. *Вычислительные технологии*, 13(5), 11-24.
7. Hunke E. C., W. H. Lipscomb. 2004. *CICE: the Los Alamos Sea Ice Model, Documentation and Software User's Manual*. T-3 Fluid Dynamics Group, Los Alamos National Laboratory. Tech. Rep. LA-CC-98-16 v.3.1.
8. Kalnay E., et al. *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. 1996. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 14.01.2022).

## Generation of a bipolar rectangular grid for simulating equatorial dynamics with a low resolution ocean model

Onoprienko V.A.<sup>1,2</sup>, Blagodatskikh D.V.<sup>1,2</sup>, Mortikov E.V.<sup>3,1,2</sup>, Yakovlev N.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Nuclear Safety Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Research and Computing Center of Lomonosov Moscow State University, Russia

E-mail: [vonopr@yandex.ru](mailto:vonopr@yandex.ru)

We provide an algorithm of generating a bipolar rectangular grid for investigation of equatorial dynamics of aquaplanet ocean model. The possibility of using coarse grids with a step up to 2 - 4 degrees is being considered. The experiments are performed on Murray's grid [1] and Madec and Imbard's grid [2]. The evolution of an initially horizontally homogeneous ocean under wind forcing and the dynamics of equatorial gravitational waves are investigated.

In some cases we need to reduce the simulation time of numerical experiments at the cost of special resolution of the model. When studying the paleoclimate, it is important to use a grid with a coarse resolution, since the typical calculations are lengthy; the duration of several thousand model years is possible.

Our aim is to determine the largest horizontal grid step that will allow the model to reproduce the characteristic features of equatorial dynamics. We plan to use this result in our following research to find a global rectangular grid of optimal size. For each experiment case, we will carry out reference calculations with high resolution. Then we will increase the grid step until the difference between the coarse grid solution and the reference calculation becomes too large.

The Madec and Imbard grid is symmetrical about the equator at low latitudes. In the Southern Hemisphere, it coincides with the latitude-longitudinal grid, and in low latitudes of the Northern Hemisphere it is very close to it. We expect that the symmetry of the position of the coordinate lines relative to the geographic equator allows calculations with a coarser resolution.

To determine the coordinates of Madec and Imbard's grid nodes, it is necessary to numerically integrate the analytical expression along the segment. We have improved the algorithm for calculating the coordinates of the Madec and Imbard grid points and metric coefficients. Instead of integrating along meridian-like coordinate lines and using interpolation to determine the coordinates of the grid nodes we integrate an analytical expression along the only one ray. The interpolation is no longer needed and metric coefficients are calculated directly without difference approximation used by Madec and Imbard. Numerical integration is carried out with high-precision arithmetic Arb library [3].

*The study was supported by Russian Science Foundation, grant No. 21-71-30023.*

### REFERENCES:

1. Murray R. J. *Explicit generation of orthogonal grids for ocean models* // *Journal of Computational Physics*. – 1996. – T. 126. – №. 2. – С. 251-273.
2. Madec G., Imbard M. *A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity* // *Climate Dynamics*. – 1996. – T. 12. – №. 6. – С. 381-388.
3. F. Johansson. "Arb: efficient arbitrary-precision midpoint-radius interval arithmetic", *IEEE Transactions on Computers*, 66(8):1281-1292, 2017. DOI: 10.1109/TC.2017.2690633.

# Построение двуполярной прямоугольной сетки для воспроизведения экваториальной динамики океана в модели невысокого пространственного разрешения

Оноприенко В.А.<sup>1,2</sup>, Благодатских Д.В.<sup>1,2</sup>, Мортиков Е.В.<sup>3,1,2</sup>, Яковлев Н.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-Исследовательский Вычислительный Центр Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: vonopr@yandex.ru

В данной работе описывается алгоритм построения двуполярной прямоугольной сетки, предназначенной для исследования экваториальной динамики численной модели океана на Акваланте. Рассматривается возможность использования грубых сеток с шагом до 2 – 4 градусов. Эксперименты выполняются на сетке Мюррея [1] и сетке Мадека и Имбара [2]. Расчетная область представляет собой экваториальный канал. Исследуется эволюция изначально горизонтально однородного океана под действием ветра и динамика экваториальных гравитационных волн.

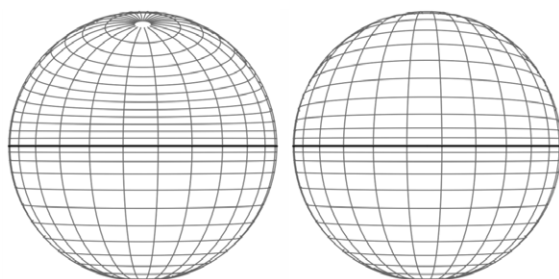
Существуют классы расчетов, для которых уменьшение времени их выполнения важнее точности решения. При исследовании палеоклимата обычно используют сетку с грубым разрешением, так как продолжительность расчетов составляет несколько тысяч модельных лет. Размер сетки может быть важен для некоторых задач, связанных с ансамблевыми расчетами, когда размер ансамбля важнее высокого разрешения его элементов.

Мы хотим определить, наибольший шаг горизонтальной сетки, позволяющий воспроизводить характерные черты экваториальной динамики. Эту оценку планируем использовать в последующих работах, чтобы подобрать глобальную прямоугольную сетку оптимального размера.

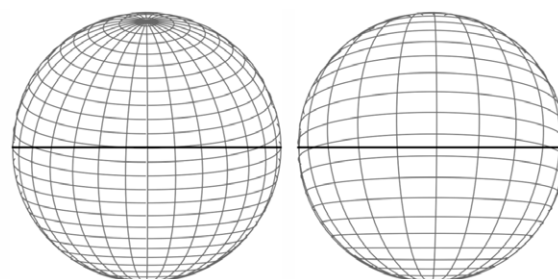
При движении от экватора к полюсам масштаб синоптических вихрей уменьшается. В высоких широтах к шагу сетки предъявляются более строгие требования, чем на экваторе. Сетка должна позволять модели воспроизводить синоптическую динамику океана, при этом шаг на экваторе должен быть как можно больше и уменьшаться с ростом широты.

Для нашего исследования мы выделили характерные случаи экваториальной динамики: приспособление течений к геострофическому равновесию в горизонтально однородном экваториальном канале под действием трения ветра и динамику экваториальных гравитационных волн. Для каждого случая проведем эталонные расчеты с высоким разрешением. Затем будем увеличивать шаг сетки, пока разница между решением на грубой сетке и эталонным расчетом не станет слишком большой.

Прямоугольные сетки позволяют организовать более быстрый доступ к памяти при расчетах по сравнению с неструктурированными сетками, поэтому в этой работе мы рассматриваем только прямоугольные сетки. В численных экспериментах мы планируем использовать сетки со смещенными полюсами: сетку Мюррея [1] и сетку Мадека и Имбара [2]. Координатные линии сеток изображены на рисунках 1 и 2.



**Рис. 1.** Координатные линии сетки стеки Мадека и Имбара Восточном полушарии (слева) и Западном (справа). Географический экватор отмечен жирной линией.



**Рис. 2.** Координатные линии сетки стеки Мюррея в Восточном полушарии (слева) и Западном (справа). Географический экватор отмечен жирной линией.

Обычную широтно-долготную сетку мы не рассматриваем, так как ее нельзя применить в дальнейшем для глобального расчета динамики океана. Это связано с тем, что полюса глобальной сетки лучше располагать на суше, чтобы не решать проблему связанной с ними сингулярности. Северный полюс широтно-долготной сетки не находится на суше. Проблему нельзя решить поворотом сетки, так как на суше Земле нет подходящих участков-антиподов [1].

Сетка Мадека и Имбара симметрична относительно экватора в низких широтах. В Южном полушарии она совпадает с широтно-долготной сеткой, а в низких широтах Северного Полушария близка к ней. Мы ожидаем, что симметричность положения координатных линий относительно географического экватора позволяет проводить расчеты с более грубым разрешением.

Координаты узлов сетки Мюррея записываются аналитически в явном виде. Координаты узлов сетки Мадека и Имбара определяются в результате численного интегрирования.

Мы улучшили алгоритм расчета координат узлов сетки Мадека и Имбара и метрических коэффициентов. В оригинальной работе авторы предлагали рассчитывать положение координатных линий интегрированием методом Рунге-Кутты вдоль каждого луча, а затем с помощью интерполяции определять координаты узлов сетки. Для определения метрических коэффициентов производные аппроксимировали разностными выражениями.

Интегрирование вдоль координатных линий можно заменить интегрированием функции одного переменного вдоль одного луча. Дальнейшая интерполяция при этом не требуется, для определения метрических коэффициентов не нужны разностные выражения. В случае сетки размера  $m \times n$ , требовалось интегрировать вдоль  $n$  лучей и выполнить  $m$  интерполяций. При использовании предлагаемого алгоритма нужно вычислить  $m$  интегралов вдоль отрезков одного луча.

Интегрирование одномерной функции реализовано с помощью библиотеки арифметики произвольной точности Arb [3]. Используемый алгоритм вычисляет не только значения интеграла, но и границы интервала погрешности внутри которого находится точное значение интеграла.

*Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант №21-71-30023.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Murray R. J. *Explicit generation of orthogonal grids for ocean models* // *Journal of Computational Physics*. – 1996. – Т. 126. – №. 2. – С. 251-273.
2. Madec G., Imbard M. *A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity* // *Climate Dynamics*. – 1996. – Т. 12. – №. 6. – С. 381-388.
3. F. Johansson. “Arb: efficient arbitrary-precision midpoint-radius interval arithmetic”, *IEEE Transactions on Computers*, 66(8):1281-1292, 2017. DOI: 10.1109/TC.2017.2690633.

## Polar lows evaluation based on the COSMO-CLM Russian Arctic hindcast

**Platonov V., Akhtamyarov R.**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
 E-mail: [vplatonov86@gmail.com](mailto:vplatonov86@gmail.com)

The rapid climate change in the Arctic has a significant impact on the plans for the socio-economic development of the Arctic region, maritime shipping, the development of oil and gas shelf areas. Freeing the surface of the Arctic Ocean from ice contributes to an increase in the recurrence of extreme winds and polar lows [Laffineur et al., 2014; Moore, Renfrew, 2005]. Polar lows are severe mesoscale weather events forming within Nordic Seas with surface wind speed exceeding 15 m/s leading to storms and heavy snowfalls. Polar lows research required high spatial resolution, however there are too few relevant datasets for Arctic region. The novel COSMO-CLM Russian Arctic hindcast covering the 1980–2016 period with a spatial resolution of ~12 km [Platonov, Varentsov, 2021] used in this study to estimate capability to reproduce polar lows and its climatology according to different databases and calendars.

Three polar lows datasets sorted out in this study for evaluation included [Kolstad, 2011], [Smirnova et al., 2015; Golubkin et al., 2021] and [Rojo et al., 2019] based on the PANGAEA source, which covered the most long-lasting period. Kolstad calendar covers 1999–2009 period and includes 63 cases; Golubkin calendar covers 2015–2017 period and includes 131 cases; Rojo calendar covers 1999–2019 period and includes 263 cases. These calendars were checked for getting inside the COSMO-CLM hindcast domain and for cases intersections between different data sources. Finally, the common polar lows database has been compiled and included occasional information about polar lows trajectories, dates, scales and the minimal pressure at the center. Some polar lows examples analysis has shown the hindcast reproduced the overall scale and intensity of polar low, however often failed with its location. Further studies would focus on the reasons for these results.

Future investigations based on the created common polar lows calendar will include more quantitative evaluation of more polar low cases including its three-dimensional structure, physical and dynamical parameters for its identification and tracking, polar lows climatology research, etc.



# Оценка воспроизведения полярных мезоциклонов на основе модельного архива COSMO-CLM Russian Arctic hindcast

Платонов В.С., Ахтамьянов Р.А.

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: [vpatonov86@gmail.com](mailto:vpatonov86@gmail.com)

**Введение и актуальность.** Исследование изменений климата в Арктике является одной из наиболее актуальных задач современной климатологии. В среднем потепление в Арктике происходит в два – четыре раза быстрее, чем во всем земном шаре [IPCC, 2021], при этом его региональные проявления весьма разнообразны. Одним из наиболее ярких проявлений потепления в Арктике связано с резким уменьшением площади морского льда в последние десятилетия [Brennan et al., 2020; Walsh et al., 2017]. В свою очередь, освобождение поверхности Северного Ледовитого океана ото льда благоприятствует увеличению повторяемости экстремальных ветров, что проявляется в увеличении повторяемости опасных явлений погоды, в частности, и полярных мезоциклонов (polar lows, PL) [Laffineur et al., 2014; Moore, Renfrew, 2005].

Полярные мезомасштабные циклоны представляют собой интенсивные атмосферные вихри, которые формируются над океаном в высоких широтах и характеризуются размерами 200–1000 км и средним временем жизни 6–36 часов [Rasmussen, Turner, 2003]. Они характеризуются скоростью приземного ветра >15 м/с и вносят значительный вклад в процессы энергообмена открытого океана с атмосферой [Condran, Renfrew, 2013] в регионах их наиболее частого возникновения (моря Лабрадор, Гренландское, Норвежское и Баренцево). Имеющихся данных наблюдений и высокоразрешающего моделирования в высоких широтах недостаточно для получения релевантных физических и климатологических оценок PL [Smirnova et al., 2016]. Для данных современных глобальных реанализов показано значимое занижение ими как количества PL, так и скоростей ветра в приземном слое [Smirnova et al., 2016; Verezhemskaya et al., 2017].

В данной работе для оценки климатологии PL и исследования их структуры был использован новый детализированный модельный архив COSMO-CLM Russian Arctic hindcast, охватывающий территорию большей части Российской Арктики и прилегающих к западу акваторий и временной период с 1980 по 2016 гг. с горизонтальным шагом сетки ~12 км и временным разрешением 1 час [Platonov, Varentsov, 2021, 2018, 2019]. Ранее оценки этого модельного архива продемонстрировали неплохое воспроизведение им климатологии приземной скорости ветра, в том числе над акваториями морей [Platonov, Varentsov, 2021], а шага его сетки достаточно для того, чтобы успешно воспроизводить явления со скоростями ветра более 10 и частично 15 м/с. Это позволяет предварительно рассчитывать на то, что PL как циркуляции мезо-β масштаба будут воспроизводиться адекватно, хотя важной для этого является и трёхмерная структура полей. С учётом растущего числа опасных гидрометеорологических явлений, и перспектив по освоению арктического побережья и Северного морского пути, оценка качества воспроизведения PL по данным модельного архива COSMO-CLM и дальнейшее исследование физических механизмов их формирования и климатологии на его основе является важной задачей.

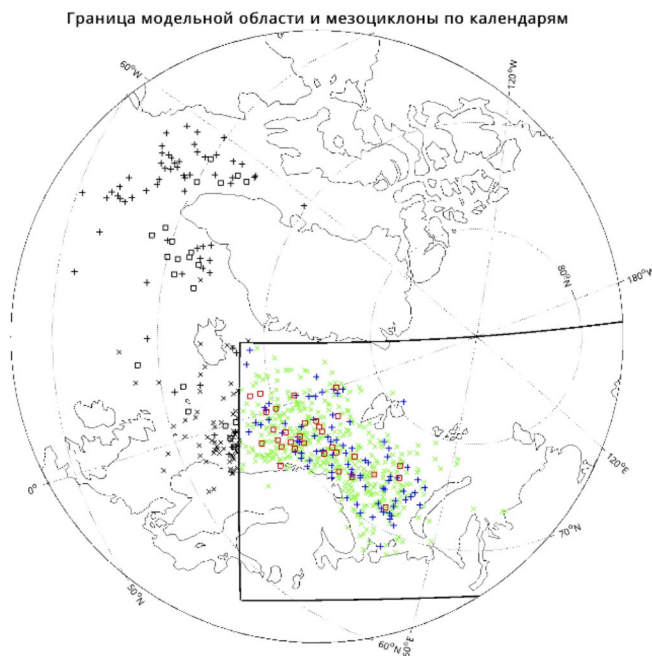
**Материалы исследования.** COSMO-CLM Russian Arctic hindcast – это модельный архив, созданный с помощью региональной модели атмосферы COSMO-CLM для территории Российской Арктики, включающей в себя полярные районы, моря Баренцево, Карское и Лаптевых, а также акваторию Северной Атлантики. В окончательной конфигурации модели, определенной на основе тестовых экспериментов, в качестве начальных и граничных условий использован реанализ ERA-Interim, со схемой дополнительного ежемесячного усвоения из него данных о состоянии почвы. Данные исследуемого модельного архива открыты для общего доступа, и расположены на репозитории figshare [[https://figshare.com/collections/Arctic\\_COSMO-CLM\\_reanalysis\\_all\\_years/5186714](https://figshare.com/collections/Arctic_COSMO-CLM_reanalysis_all_years/5186714)]. В настоящее время для использования доступны следующие приземные поля: температура, осадки, компоненты скорости ветра и давление почти за весь охватываемый период: с 1980 по 2008 и с 2010 по 2016 (36 лет). В настоящей работе для проведения первичного анализа были использованы данные о зональной и меридиональной компонентах скорости ветра и приземном давлении.

В настоящее время существует большое разнообразие баз данных по PL, представленных в основном в виде календарей событий, основанных на наблюдениях и идентификации облачных сигнатур в различных спектральных диапазонах [Kolstad et al., 2011; Smirnova et al., 2015; Golubkin et al., 2021; Noer et al., 2011]. Важной проблемой является затруднение трекинга их траекторий в модельных данных по чётко определённым критериям в силу их значительного разнообразия [Moreno-Ibanez et al., 2021; Stoll et al., 2018; Rojo et al., 2015]. Для дальнейшего исследования в данной работе рассматривались календа-



ри PL, охватывающие наибольший промежуток времени, в том числе как можно более ранние, пересекающиеся с регионом исследования, с наиболее полным описанием и количественной информацией о координатах положения PL. В результате, в данной работе рассматриваются три календаря PL: [Kolstad et al., 2011], [Smirnova et al., 2015; Golubkin et al., 2021] и [Rojo et al., 2019] – на ресурсе Pangaea. Архив Kolstad охватывает наиболее ранний период (1999–2009), включает 63 случая, но в нём отсутствует информация о траектории PL, а имеется лишь одна точка для каждого случая. В архивах Golubkin (2015–2017, 131 случай) и особенно Pangaea (1999–2019, 263 случая) информация более полная, включая траектории PL с координатами, их размеры, морфологические характеристики и стадии развития. Кроме того, в качестве вспомогательного материала использовалась база данных PL STARS-DATv3 (<http://polarlow.met.no/stars-dat/>, Noer et al., 2011), где для каждого случая приведены спутниковые снимки AVHRR и поля основных метеорологических величин по различным источникам.

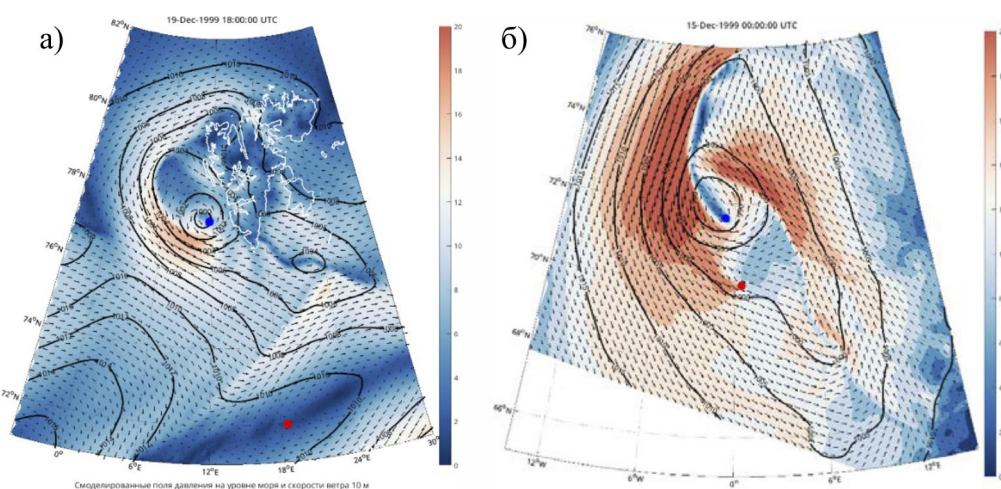
**Результаты.** Для упомянутых выше трёх календарей PL была проведена большая методическая работа по сравнению пересекающихся периодов на предмет совпадающих дат и траекторий, а также проводилось определение попадания или непопадания случаев PL внутрь исследуемой модельной области. Последняя операция требовала определённой методической подготовки, связанной с возможными траекториями PL на краях модельной области, их входом или выходом из неё, в том числе на стадии затухания или, напротив, лишь начального развития. В результате было решено в качестве основного критерия использовать попадание центральной точки траектории в пределы модельной области при условии, что большая часть траектории также попадает внутрь неё. Результатом этой работы стало формирование сводного календаря по всем трём источникам, картографически представленный на рис. 1.



**Рис. 1.** Карта точек с координатами PL по данным трёх календарей – Pangaea (крестики), Golubkin (плюсы), Kolstad (квадраты). Чёрным контуром обозначена область модельного архива COSMO-CLM Russian Arctic hindcast. PL, попадающие внутрь этой области, обозначены цветными значками (Pangaea – зеленым, Golubkin плюсы – синим, Kolstad – красным).

Для дальнейшего анализа на предварительном этапе были выбраны несколько случаев, для которых проводилось построение полей приземного давления и ветра по модельному архиву для оценки идентификации PL и возможности дальнейшего их более детального исследования. Для сравнения координат PL по календарю с модельным архивом определялся минимум приземного давления по модельному архиву в области, попадающей в окрестность нескольких градусов широты и долготы относительно истинного положения PL. На рис. 2 показаны два случая из календаря Kolstad для 1999 года в полях приземного давления и ветра по данным модельного архива. В первом случае 19.12.1999 PL по модели хорошо проявляется и по масштабам, и по скоростям ветра выше 15 м/с, к западу от арх. Шпицберген, с давлением в центре чуть ниже 1000 гПа. Однако, местоположение PL по календарю модели воспроизвести не удалось. Причина может заключаться в том, что в календаре Kolstad отсутствуют данные о траектории PL, и модель могла воспроизвести PL несколько смещенным во времени, а впоследствии он сместился южнее и ближе к реально наблюдавшемуся положению. Этот вопрос требует дальнейшего исследования. Второй случай 15.12.1999 демонстрирует мощный PL больших масштабов, в Норвежском море, на некотором удалении от побережья, с обширными областями скоростей ветра около 20 м/с. В данной ситуации положение центра PL воспроизведено модельным архивом лучше, а дополнительное исследование показало, что спустя 4–5 часов PL в модели сместился к своему истинному положению.

**Заключение.** На основе календарей полярных мезоциклонов по Kolstad, Golubkin и Rojo (Pangaea) составлена сводная база данных случаев PL, попадающих в область модельного архива COSMO-CLM Russian Arctic hindcast. На основе этой базы данных проведен предварительный анализ воспроизведе-



**Рис. 2.**

Примеры случаев PL, воспроизведенных модельным архивом COSMO-CLM Russian Arctic hindcast, по календарю Kolstad: 19.12.1999 18 UTC (а) и 15.12.1999 00 UTC (б). Чёрные изолинии – приземное давление, гПа; стрелочки – направление ветра; цветом – скорость ветра на 10 м, м/с; красная точка – центр PL по календарю, синяя точка – центр PL (минимум давления) по модельному архиву.

ния моделью нескольких случаев PL по полям приземного давления и ветра. Получено, что для этих случаев модельный архив воспроизводит масштаб явления и скорости ветра, близкие к наблюдаемым, однако местоположение PL не всегда удовлетворительно ухватывается моделью.

Полученные результаты носят предварительный характер, в перспективе предполагается провести количественную оценку воспроизведения климатологии PL и их характеристик, включая анализ трёхмерной пространственной структуры PL с использованием ряда динамических характеристик, применяемых в литературе для их идентификации и трекинга: завихренность на различных уровнях, перепады температуры между поверхностью океана и средней тропосферой, влагосодержание и другие.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Brennan M.K., Hakim G.J., Blanchard-Wrigglesworth E. Arctic Sea-Ice Variability During the Instrumental Era. *GRL*, 2020, 47, 7.
2. Condron A., Renfrew I.A. The impact of polar mesoscale storms on northeast Atlantic Ocean circulation. *Nature Geoscience*. 2013. № 1 (6). С. 34–37.
3. Data from the COSMO-CLM Russian Arctic Hindcast archive, figshare repository. Available online: [https://figshare.com/collections/Arctic\\_COSMO-CLM\\_reanalysis\\_all\\_years/5186714](https://figshare.com/collections/Arctic_COSMO-CLM_reanalysis_all_years/5186714) (accessed on 13 June 2022). <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5186714>
4. Golubkin P., Smirnova J., Bobylev L. Satellite-Derived Spatio-Temporal Distribution and Parameters of North Atlantic Polar Lows for 2015–2017. *Atmosphere* 2021, 12, 224.
5. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte et al (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
6. Kolstad E. W. A global climatology of favourable conditions for polar lows. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011, 137, 1749–1761.
7. Laffineur T., C. Claud, J.-P. Chaboureaud, G. Noer. Polar lows over the Nordic seas: Improved representation in ERA-Interim compared to ERA-40 and the impact on downscaled simulations, *Mon. Weather Rev.*, 2014, 142, 2271–2289.
8. Moore G.W.K., Renfrew I.A. Tip jets and barrier winds: A QuikSCAT climatology of high wind speed events around Greenland. *J. of Clim.* 2005, 18.18, 3713–3725.
9. M. Moreno-Ibáñez, R. Laprise, P. Gachon. Recent advances in polar low research: current knowledge, challenges and future perspectives. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, 73:1, 1–31.
10. Noer G., Saetra Ø., Lien T., Gusdal, Y. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas. 2011, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 1762–1772.
11. Platonov V., Varentsov M. Creation of the long-term high-resolution hydrometeorological archive for Russian Arctic: methodology and first results. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 386(012), 2019.

12. Platonov V., Varentsov M. *A new detailed long-term hydrometeorological dataset: first results of extreme characteristics estimations for the Russian Arctic seas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 611(012044), 2020.
13. Platonov V., Varentsov M. *Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation. Atmosphere*, 12(3):350, 2021.
14. *Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*. Ed. by E.A. Rasmussen, J. Turner, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
15. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E., Noer G., Carleton A.M., Vicomte M. *Polar low tracks over the Nordic Seas: a 14-winter climatic analysis, Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2015, 67, 1.
16. Rojo M., Noer G., Claud C. *Polar Low tracks in the Norwegian Sea and the Barents Sea from 1999 until 2019. 2019. PANGAEA*
17. Smirnova J.E., P.A. Golubkin, L.P. Bobylev, E.V. Zabolotskikh, B. Chapron. *Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data. GRL*, 2015, 42, 5603–5609.
18. Smirnova J.E., Zabolotskikh E.V., Bobylev L.P. et al. *Statistical characteristics of polar lows over the Nordic Seas based on satellite passive microwave data. Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016, 52, 1128–1136.
19. Stoll P.J., Graverson R.G., Noer G., Hodges K. *An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data. Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2018; 144: 2099–2117.
20. Verzemskaya P., Tilinina N., Gulev S., Renfrew I. A., Lazzara M. *Southern Ocean mesocyclones and polar lows from manually tracked satellite mosaics. GRL*, 2017, 44, 7985–7993.
21. Walsh J.E., Fetterer F., Scott Stewart J., Chapman W.L. *A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850. Geogr. Rev.*, 2017, 107, 1, 89-107.

## Influence of ocean initial data on the quality of the INM RAS climate model seasonal hindcasts

Tarasevich M.A.<sup>1,2,3,4</sup>, Volodin E.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Hydrometeorological Centre of Russia, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnii, Russia

E-mail: mashatarasevich@gmail.com

In this work, we study the influence of ocean initial data on the quality of the INM RAS climate model (INMCM5) [1] seasonal hindcasts. To perform this work, the initial states preparation system for the INMCM5 was modified and automated. As a result, the ERA5 reanalysis [8] is now being used to construct the initial states of the atmosphere and land surface. It has also become possible to use mean monthly data from both SODA3.4.2 [4], [5] and ORAS5 [9] reanalyses to construct the ocean initial states. Two series of hindcasts for the winter seasons (November–February) of the years 1993/1994–2009/2010 were computed starting with the initial states prepared by the automated system. The series differ by data used to create the ocean initial states: in the first is using SODA3.4.2 and the second uses ORAS5. For both series the same ensemble size of 10 members is used.

The spatial distribution and globally averaged temporal anomaly correlation coefficient for surface air temperature and sea level pressure are used to verify the results of two series of the INM RAS climate model hindcasts. ERA5 reanalysis data are used as observations. The correlation coefficients are calculated using December–February averaged values for each season of the years 1993/1994–2009/2010. Before calculating the correlation coefficients, the INMCM5 and ERA5 reanalysis data are interpolated onto a regular latitude-longitude grid with 2.5°×2.5° resolution, which is common for long-range forecast verification. Comparison is done against data from the WMO multi-model ensemble of 12 forecast systems.

The most significant differences in the INM RAS climate model results are observed for Eurasia: a series of hindcasts using SODA3.4.2 data outperform those using ORAS5. The WMO multi-model ensemble predicts surface air temperature and sea level pressure anomalies in Eurasia better than either series of the INMCM5 results. Comparing globally averaged values of the coefficient of temporal correlation of anomalies it worth noting, INMCM5 performs better in forecasting surface air temperature anomalies than it does for sea level pressure anomalies. In general, the INM RAS climate model produces poorer winter hindcasts than the WMO multi-model ensemble.





The North Atlantic Oscillation is the main mode of winter weather and climate variability in the Northern Hemisphere, so the forecast quality of the NAO index is an important component of overall forecast quality. The correlation coefficient of the index time series between the data of the INMCM5 and the ERA5 reanalysis shows that the series in which the ORAS5 reanalysis was used to construct the ocean initial states provides slightly higher predictability of the NAO index.

We have investigated that using different data (SODA3.4.2 and ORAS5) to construct the ocean initial states has no significant effect on the quality of the forecast in all regions except Eurasia. In Eurasia, SODA3.4.2 provides slightly better predictability than ORAS5, although the results of both series of the INM RAS climate model hindcasts are significantly inferior to those of the WMO multimodel ensemble, which, however, are also far from good. The best predictability of the NAO index is provided by using ORAS5 reanalysis data to construct ocean initial states, but because of the small ensemble size, this conclusion is not fully reliable.

*The research was carried out at the Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences and was supported by the Russian Science Foundation (project No. 20 17 00190) and the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-05-00673). Calculation of two series of retrospective seasonal forecasts of the INM RAS climate model was performed on 1440 cores of the Cray XC40 HPC system at the Roshydromet Main Computer Center.*

## Влияние начальных данных океана на качество ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН

Тарасевич М.А.<sup>1,2,3,4</sup>, Володин Е.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>3</sup>Гидрометцентр России, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный, Россия

E-mail: [mashatarasevich@gmail.com](mailto:mashatarasevich@gmail.com)

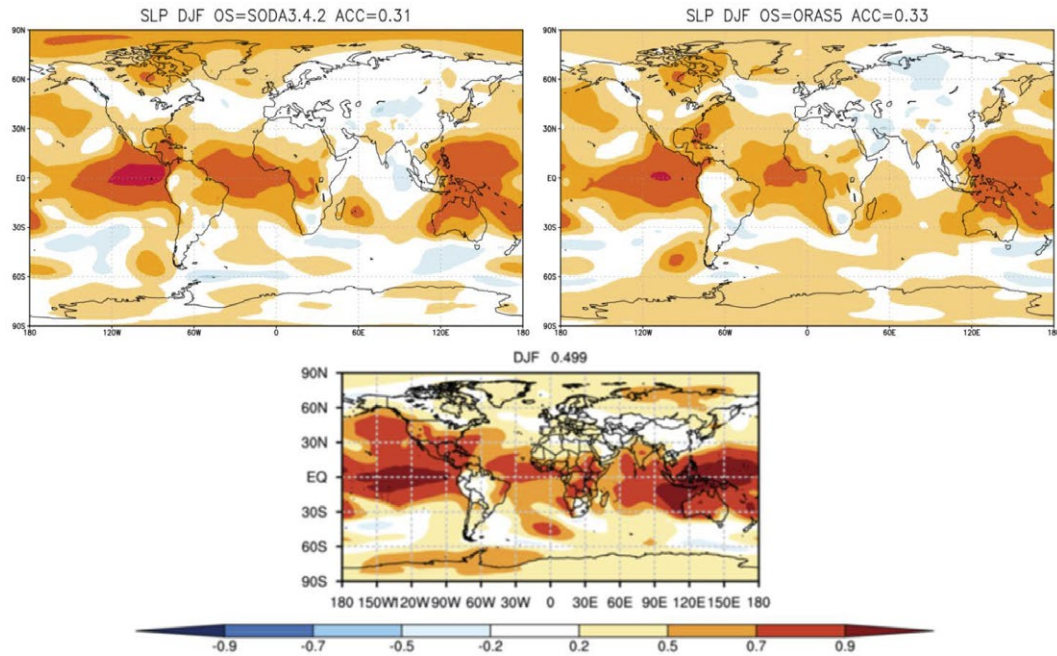
Изначально разработанная для моделирования климата на несколько десятков или сотен лет модель общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН (INMCM5) [1] недавно была применена для ретроспективных сезонных прогнозов. Для проведения экспериментов на сезонном временном масштабе была разработана [2] схема подготовки начальных состояний для INMCM5, заключающаяся в устранении смещения модельного климата по отношению к реальному. Для построения начальных состояний атмосферы и деятельного слоя суши использовались данные реанализа ERA-Interim [3], океана — SODA3.4.2 [4], [5]. С подготовленными таким образом начальными данными был посчитан [2] ансамбль ретроспективных прогнозов на зимние сезоны 1980/1981–2014/2015 годов. В работе [2] проведены интегральные оценки качества сделанных прогнозов. В [6] и [7] показано, что климатическая модель ИВМ РАН демонстрирует хорошую предсказуемость индексов северо-атлантического колебания (NAO) и тихоокеанско-североамериканского (PNA).

В рамках настоящей работы исследуется влияние начальных данных океана на качество ретроспективных сезонных прогнозов INMCM5. Для выполнения настоящей работы система подготовки начальных состояний для климатической модели ИВМ РАН была доработана и автоматизирована, в результате чего для построения начальных состояний атмосферы и деятельного слоя суши используется реанализ ERA5 [8]. Также для построения начальных состояний океана стало возможным использовать среднемесячные данные как реанализа SODA3.4.2, так и ORAS5 [9]. С подготовленных автоматизированной системой начальных данных выполнено две серии ретроспективных прогнозов на зимние сезоны (ноябрь–февраль) 1993/1994–2009/2010 гг. Серии отличаются используемыми для построения начальных состояний океана данными: в одной – SODA3.4.2, в другой – ORAS5. Размер ансамбля для обеих серий одинаков и составляет 10 членов.

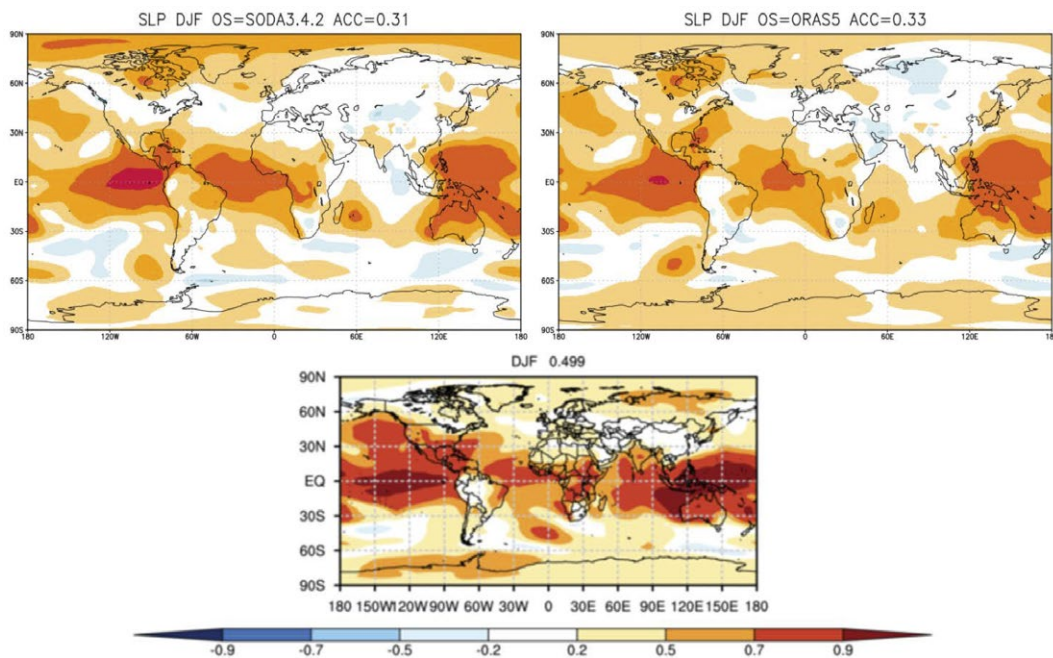
Для верификации результатов двух серий ретроспективных прогнозов INMCM5 используется пространственное распределение и глобально осреднённое значение коэффициента временной корреляции аномалий для приземной температуры воздуха и давления на уровне моря. В качестве наблюдений используются данные реанализа ERA5. Коэффициенты корреляции вычисляются по средним за декабрь–февраль 1993/1994–2009/2010 гг значениям. Перед вычислением коэффициентов корреляции данные климатической модели ИВМ РАН и реанализа ERA5 интерполируются на регулярную широтно-долготную сетку 2.5°×2.5°, общепринятой для верификации долгосрочных прогнозов. Для сравнения используются данные мультимодельного ансамбля WMO, состоящего из 12 прогностических систем.



На Рис. 1 и Рис. 2 представлены пространственное распределение и глобально осреднённое значение коэффициента временной корреляции аномалий приземной температуры воздуха и давления на уровне моря соответственно по данным двух серий ретроспективных прогнозов INMCM5 и мультимодельного ансамбля WMO. Во всех случаях наилучшее качество прогноза наблюдается в тропиках, и в целом области хорошей предсказуемости в обеих сериях ретроспективных прогнозов климатической модели ИВМ РАН хорошо согласуются с таковыми в мультимодельном ансамбле WMO.



**Рис. 1.** Коэффициент временной корреляции аномалий приземной температуры воздуха для декабря–февраля 1993/1994–2009/2010 гг. по данным INMCM5 (слева ретроспективные прогнозы выполнены с использованием SODA3.4.2 для конструирования начального состояния океана, справа — с использованием ORAS5) и мультимодельного ансамбля WMO (в центре).



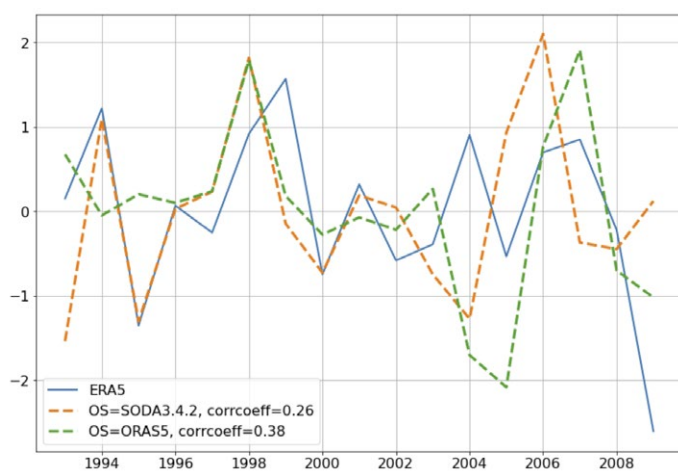
**Рис. 2.** Коэффициент временной корреляции аномалий давления на уровне моря для декабря–февраля 1993/1994–2009/2010 гг. по данным INMCM5 (слева ретроспективные прогнозы выполнены с использованием SODA3.4.2 для конструирования начального состояния океана, справа — с использованием ORAS5) и мультимодельного ансамбля WMO (в центре).



Наиболее существенные отличия в результатах INMCM5 наблюдаются на территории Евразии: серия ретроспективных прогнозов с использованием данных SODA3.4.2 для построения начальных состояний океана оказывается несколько лучше таковой с использованием данных ORAS5. При этом обе серии результатов климатической модели ИВМ РАН прогнозируют аномалии приземной температуры воздуха и давления на уровне моря в Евразии хуже мультимодельного ансамбля WMO.

Сравнение глобально осреднённых значений коэффициента временной корреляции аномалий показывает, что INMCM5 справляется с прогнозом аномалий приземной температуры воздуха лучше, чем с таковым для аномалий давления на уровне моря. В целом, качество ретроспективных прогнозов климатической модели ИВМ РАН хуже, чем у мультимодельного ансамбля WMO.

Северо-атлантическое колебание является главной модой изменчивости погоды и климата зимой в северном полушарии, поэтому качество прогноза индекса NAO является важной составляющей качества прогнозов в целом. На Рис. 3 представлены значения индекса северо-атлантического колебания для декабря–февраля 1993/1994–2009/2010 гг по данным двух серий ретроспективных прогнозов INMCM5 и реанализа ERA5. Коэффициент корреляции временных рядов индекса между данными климатической модели ИВМ РАН и реанализа ERA5 показывает, что серия, в которой для построения начальных состояний океана использовался реанализ ORAS5, обеспечивает более высокую предсказуемость индекса NAO. При этом временные ряды индекса северо-атлантического колебания по данным обеих серий ретроспективных прогнозов INMCM5 хуже коррелируют с данными реанализа по сравнению с работой [6], что вызвано, вероятно, недостаточным размером ансамбля (10 членов) для прогноза индекса NAO.



**Рис. 3.**

Временные ряды для индекса NAO по декабрю–февралю 1993/1994–2009/2010 гг. Осреднённый по ансамблю INMCM5 индекс NAO показан пунктирными линиями оранжевого (ретроспективные прогнозы с использованием SODA3.4.2 для конструирования начального состояния океана) и зелёного (ретроспективные прогнозы с использованием ORAS5 для конструирования начального состояния океана) цвета соответственно. Индекс NAO по данным реанализа ERA5 показан сплошной линией голубого цвета.

Таким образом, в ходе исследования установлено, что использование различных данных (SODA3.4.2 и ORAS5) для построения начального состояния океана не оказывает существенного влияния на качество прогноза во всех регионах, кроме Евразии. В Евразии SODA3.4.2 обеспечивает несколько большую предсказуемость, чем ORAS5, хотя и результаты обеих серий ретроспективных прогнозов климатической модели ИВМ РАН значительно уступают таковым для мультимодельного ансамбля WMO, которые, впрочем, тоже далеки от хороших. Наилучшую предсказуемость индекса NAO обеспечивает использование данных реанализа ORAS5 для построения начальных данных океана, однако ввиду небольшого размера ансамбля этот вывод не является в полной мере надёжным.

*Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской Академии Наук при поддержке Российского научного фонда (грант РФФ № 20-17-00190) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-05-00673). Расчёт двух серий ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН выполнен на 1440 ядрах вычислительной системы Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Гидрометцентра России.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Володин Е. М., Мортиков Е. В., Кострыкин С. В., Галин В. Я., Лыкозов В. Н., Грицун А. С., Дианский Н. А., Гусев А. В., Яковлев Н. Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2017, Т. 53, № 2, С. 164–178.
2. В. В. Воробьева, Е. М. Володин Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН, *Матем. Моделирование*, 2020, Т. 32, № 11, С. 47–58.
3. Dee, D. P., et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. Journal. Roy. Meteorol. Soc.*, 2011, V. 137, pp. 553–597.

4. Carton, J. A., Chepurin, G. A., Chen, L. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis, *Journal of Climate*, 2018, V. 31, N. 17, pp. 6967–6983.
5. Carton, J. A., Penny, S. G., Kalnay, E. Temperature and Salinity Variability in the SODA3, EC-CO4r3, and ORAS5 Ocean Reanalyses, 1993–2015, *Journal of Climate*, 2019, V. 32, N. 8, pp. 2277–2293.
6. Vasilisa Vorobyeva, Evgeny Volodin Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, V. 73, N. 1, pp. 1–12.
7. Vorobyeva, V. V., Volodin, E. M. Analysis of the predictability of stratospheric variability and climate indices based on seasonal retrospective forecasts of the INM RAS climate model, *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2021, V. 36, N. 2, pp. 117–126.
8. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al.: The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, V. 146, N. 730, pp. 1999–2049.
9. Zuo, H., Balmaseda, M., Tietsche, S., et al. The ECMWF operational ensemble reanalysis–analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment, *Ocean Science*, 2019, V. 15, pp. 779–808.

## Evaluation of the INM RAS climate model skill in decadal predictions for up to 5 years

Vorobyeva V.V.<sup>1,2</sup>, Volodin E.M.<sup>2</sup>, Gritsun A.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Russia

<sup>2</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: [VVorobyeva@yandex.ru](mailto:VVorobyeva@yandex.ru)

Due to the increasing public concern about the problem of climate change and its impact on the quality of life, in recent years there is, therefore, a growing need for increase in accuracy of climate anomalies predictions based on coupled models of the atmosphere and ocean for a decade ahead [1, 2]. Estimation of the current predictive skill of the model on a multiannual time scale and its improvement remain an urgent task. In this paper, we will analyze the quality of decadal retrospective forecasts of the INM-CM5-0 climate model.

There is a family of the INM RAS [3] coupled climate models of atmosphere and ocean general circulation. This study is based on the experiments carried out with the model version INM-CM5-0 with atmospheric resolution  $2^\circ \times 1.5^\circ$  in longitude and latitude, 73 vertical levels with a model top at 0.2 hPa and oceanic resolution  $0.5^\circ \times 0.25^\circ$  with 40 vertical levels.

The initial data for decadal forecasts were compiled using a method similar to that used for winter seasonal forecasts in [4]. The INMCM-5-0 decadal 5-year re-forecast consists of 15 ensemble members initialized on the November 1 for each year over the 1980–2020 period.

North Atlantic Oscillation (NAO) index was computed as the winter months average projection coefficient of ensemble mean monthly model sea level pressure anomalies to the first EOF of monthly reanalysis sea level pressure anomalies over the Atlantic sector  $20^\circ\text{N}–80^\circ\text{N}$ ,  $90^\circ\text{W}–40^\circ\text{E}$ . The anomaly correlation coefficient of the winter NAO index according to the decadal re-forecasts of the INM-CM5-0 model with seasonal lead time and ERA5 reanalysis data is 0.41, according to the decadal forecasts of the INM-CM5-0 model with a lead time of 1 year and ERA5 reanalysis data is -0.17.

The quality of the El Niño-Southern Oscillation reproduction by the INM-CM5-0 climate model was assessed using the Oceanic Niño index (ONI), which is the 3 month running mean of SST anomalies in the Niño 3.4 region ( $5^\circ\text{N}–5^\circ\text{S}$ ,  $120^\circ\text{W}–170^\circ\text{W}$ ). In order to remove the warming trend in Niño 3.4 region, we use a new CPC NOAA (Climate Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration) strategy to update the base period for anomaly calculation. According to the calculated values of the anomaly correlation coefficients in the time series of the ONI index of the INM RAS climate model decadal forecasts with different lead times and the CPC NOAA observations for 1980–2020, the presence of the spring predictability barrier of the ONI index was shown.

The quality of the quasi-biennial oscillation reproduction in the decadal re-forecasts of the INM RAS climate model was also assessed based on the data of the zonal anomaly of the wind speed at the equator at a height of 30 hPa (anomaly was calculated relative to the model climatology for 1980–2014). The anomaly correlation coefficients of this field for the model and CDAS reanalysis data (NCEP/NCAR Reanalysis Project) for seasonal lead time forecasts is 0.82, for one year lead time forecasts it is 0.69, for two year lead time forecasts it is 0.60, for three year lead time forecasts it is 0.55, for four year lead time it is 0.54.





The anomaly correlation coefficients of the total Arctic sea ice area based on the decadal re-forecasts of the INM RAS climate model and Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1 satellite data for 2000–2013 show decrease in the predictability of the Arctic sea ice area in spring, but its increase in summer-autumn.

*This study was performed at Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences and supported by Russian Science Foundation (project № 22-17-00247).*

#### REFERENCES:

1. Kushnir, Y. et al. *Towards operational predictions of the near-term climate. // Nat. Clim. Change. - 2019. - Vol. 9. - P. 94–101.*
2. Xu, Y., Ramanathan, V. & Victor, D. G. *Global warming will happen faster than we think. // Nature. - 2018. - Vol. 564. - P. 30–32.*
3. Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin, S. V., Galin, V. Y., Lykossov, V. N. and co-authors. *Simulation of the present day climate with the climate model INMCM5. // Clim. Dyn. - 2017. - Vol. 49. - P. 3715–3734.*
4. Vorobyeva V. V., Volodin E. M. *Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale //Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. - 2021. - Vol. 73, no. 1. - P. 1-12.*

## Исследование качества декадных прогнозов климатической модели ИВМ РАН на срок до 5 лет

Воробьева В.В.<sup>1,2</sup>, Володин Е.М.<sup>2</sup>, Грицун А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: [VVorobyeva@yandex.ru](mailto:VVorobyeva@yandex.ru)

В связи с увеличением обеспокоенности общества проблемой климатических изменений и их влияния на качество жизни, в последние годы растет потребность в увеличении точности прогнозов аномалий климата на основе гидродинамических моделей атмосферы и океана на десятилетие вперед [1, 2]. Предсказуемость, согласно обзорной статье, посвященной современным декадным прогнозам, может быть обусловлена как информацией о начальном состоянии, так и изменением внешних воздействий на климатическую систему, прежде всего концентраций парниковых газов и аэрозолей [3]. При этом, например в [5], на основе результатов проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) сделан вывод, что большая часть предсказуемости на временном масштабе нескольких лет происходит от вариации внешних воздействий. Учет реального начального состояния может привести даже к уменьшению корреляции данных прогнозов и наблюдений в отдельных регионах. Несмотря на это известно, что в ретроспективных прогнозах декадный прогноз приземной температуры обладает высокой степенью достоверности, однако точность прогноза осадков и характеристик атмосферной циркуляции остается довольно низкой [1, 3, 4]. Оценка текущей прогностической способности модели на временном масштабе нескольких лет и его улучшение остается актуальной задачей. В данной работе будет произведен анализ качества декадных ретроспективных прогнозов климатической модели INM-CM5-0 Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (ИВМ РАН).

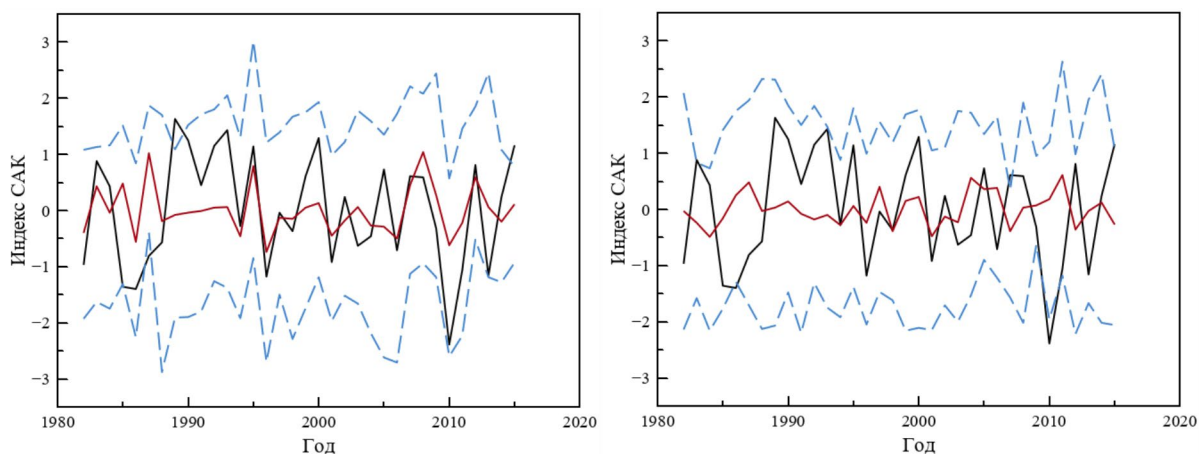
Климатическая модель INM-CM5-0 [18] относится к семейству климатических моделей ИВМ РАН и состоит из трех основных блоков: блока динамики атмосферы, аэрозольного блока и блока динамики океана. Разрешение модели в атмосфере составляет 2х1.5 градуса, 73 уровня до 60 км по вертикали, в океане - 0.5х0.25 градуса, 40 уровней по вертикали.

Начальные данные в терминах аномалий для декадных ретроспективных прогнозов составлялись аналогично тому, как это было сделано для ранее посчитанных зимних сезонных экспериментов климатической модели INM-CM5-0 [6, 7]. Далее на основе составленного набора начальных данных представлен декадный ансамблевый ретроспективный прогноз для климатической модели ИВМ РАН. Проведены серии из 15 модельных экспериментов с каждого года из диапазона 1980-2020гг. Каждый эксперимент начинался 1 ноября и имел продолжительность 5 лет.

Североатлантическое колебание (САК) является крупномасштабной модой, отвечающей за изменчивость широкомасштабных океанических и атмосферных метеополей Северного полушария. Многочисленные исследования указывают, что на индекс Североатлантического колебания потенциально могут оказывать влияние аномалии температуры поверхности океана на севере Тихого океана [8], анома-



лии снегозапаса на территории Евразии в предшествующий осенний сезон [9], аномалии морского льда в Арктике (в Баренцевом и Карском морях) в ноябре [10], квазидвухлетнее колебание в экваториальной стратосфере [11], аномалии состояния Атлантического океана в тропических и умеренных широтах [12], зимний индекс Тихоокеанско-Североамериканского колебания [13], колебание Маддена-Джулиана [14], явление Эль-Ниньо-Южное колебание [15]. В первых четырех случаях воздействие происходит в основном благодаря возбуждению аномалий в стратосфере и их нисходящему распространению. Также предсказуемость экстратропических климатических индексов может быть связана с хорошей предсказуемостью изменчивости осадков в тропических широтах и ее взаимосвязью с экстратропиками посредством распространения волн Россби из тропиков [16]. При этом ожидается также [17], что более точное воспроизведение драйверов Североатлантического колебания в моделях будет способствовать его успешным прогнозам и на многолетних временных масштабах, однако до сих пор хорошее качество прогноза индекса САК на многолетнем временном масштабе получено не было [17]. В связи с этим интересной задачей является оценка качества воспроизведения индекса САК в декадных прогнозах климатической модели ИВМ РАН. В нашей работе индекс САК вычисляется как среднее по ансамблю и за зимний сезон значение коэффициента проекции среднемесячных модельных аномалий давления на уровне моря (аномалии рассматриваются по отношению к климатологии модели за 1980-2014 гг.) на предварительно вычисленную первую ЭОФ среднемесячных аномалий давления на уровне моря реанализа в Атлантическом секторе (20° с.ш.-80° с.ш., 90° з.д.-40° в.д.). При этом исходные данные обработаны так, чтобы среднее значение индекса САК за все рассматриваемое время равнялось нулю, среднеквадратичное отклонение равнялось единице, и положительный индекс САК соответствовал низкому значению давления в Арктике. Коэффициент корреляции временных рядов 1981/82-2014/15 гг. зимнего индекса САК (рис. 1) по данным декадных прогнозов модели ИВМ с сезонной заблаговременностью и данным реанализа ERA5 составляет 0.41, по данным декадных прогнозов модели ИВМ с заблаговременностью 1 год и данным реанализа ERA5 составляет -0.17.



**Рис. 1.** Временные ряды 1981/82-2014/15 гг. зимнего индекса САК по данным декадных прогнозов модели ИВМ РАН (красная линия - среднее по ансамблю значение, голубой штрих - диапазон значений в ансамбле) с сезонной заблаговременностью (слева) и заблаговременностью 1 год (справа), а также реанализа ERA5 (черная линия).

Оценка качества воспроизведения явления Эль-Ниньо-Южного колебания моделью INM-CM5-0 была выполнена на основе океанического индекса Ниньо (ОНИ) – среднего за 3 подряд идущих месяца значения аномалии температуры поверхности океана (ТПО) в регионе Niño 3.4 (5° с.ш.-5° ю.ш., 120° з.д.-170° з.д.). Если аномалия в течение 5 подряд идущих перекрывающихся трехмесячных периода положительная и не менее 0.5 К, то явление признается явлением Эль-Ниньо, если же отрицательная и не менее 0.5 К по модулю, то явлением Ла-Нинья. При этом базовый период, относительно которого вычисляется аномалия ТПО, выбирается по новой стратегии CPC NOAA (Climate Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration) с целью устранения тренда потепления климата в регионе Niño 3.4. Из табл.1, где приведены значения коэффициентов корреляции аномалий временных рядов индексов ОНИ по данным декадных прогнозов климатической модели ИВМ РАН с различной заблаговременностью и данным наблюдений CPC NOAA за 1980-2020 гг., видно наличие весеннего порога предсказуемости индекса ОНИ.

**Табл.1**

Коэффициенты корреляции аномалий временных рядов индексов ОНИ по данным декадных прогнозов климатической модели ИВМ РАН с различной заблаговременностью и данным наблюдений CPC NOAA за 1980-2020гг. для троек подряд идущих месяцев.

	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
Сезон	0.88	0.83	0.73	0.62	0.47	0.36	0.31	0.27	0.15	0.10	0.12	0.14
Через год	0.19	0.18	0.15	0.12	0.07	0.13	0.14	0.11	0.05	0.06	0.09	0.09
Через 2 года	0.11	0.09	0.05	-0.003	-0.01	0.07	0.14	0.19	0.20	0.15	0.08	-0.02
Через 3 года	-0.10	-0.17	-0.18	-0.15	-0.10	-0.07	-0.08	-0.04	-0.05	-0.10	-0.14	-0.16
Через 4 года	-0.11	-0.13	-0.19	-0.29	-0.29	-0.18	-0.08	-0.01	0.06	0.06	0.02	-0.04

Также была выполнена оценка качества воспроизведения квазидвухлетнего колебания в декадных прогнозах модели ИВМ РАН по данным зональной аномалии (относительно климатологии модели за 1980-2014гг. скорости ветра на экваторе на высоте 30 гПа). Коэффициенты корреляции аномалий данного поля модели с данными реанализа CDAS (NCEP/NCAR Reanalysis Project) для прогнозов сезонной заблаговременности составляет 0.82, для прогнозов заблаговременности в один год равен 0.69, для прогнозов заблаговременности в два года составляет 0.60, для прогнозов заблаговременности в три года равен 0.55, для прогнозов заблаговременности в четыре года составляет 0.54.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции аномалий суммарной площади арктического льда по данным декадных прогнозов модели ИВМ РАН и спутниковых данных Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1 за 2000-2013 гг. Видно понижение предсказуемости площади арктического льда весной, но ее повышение летом-осенью.

**Табл.2**

Коэффициенты корреляции аномалий суммарной площади арктического льда по данным декадных прогнозов модели ИВМ РАН и спутниковых данных Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1 за 2000-2013гг. для троек подряд идущих месяцев.

	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
Сезон	0,69	0,50	0,41	0,33	0,19	0,19	0,33	0,42	0,46	0,48	0,40	0,27
Через год	-0,04	-0,17	-0,16	-0,09	-0,01	0,01	0,00	0,08	0,05	-0,01	-0,20	-0,35

Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 22-17-00247).

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Kushnir, Y. et al. Towards operational predictions of the near-term climate. // *Nat. Clim. Change.* - 2019. - Vol. 9. - P. 94–101.
2. Xu, Y., Ramanathan, V. & Victor, D. G. Global warming will happen faster than we think. // *Nature.* - 2018. - Vol. 564. - P. 30–32.
3. Robust skill of decadal climate predictions / D. M. Smith, R. Eade, A. A. Scaife et al. // *npj Climate and Atmospheric Science.* — 2019. — Vol. 2.—P. 1–10.
4. Boer, G. J. et al. The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6. .. *Geosci. Model Dev.* - 2016. - Vol. 9. - P. 3751–3777.
5. Goddard, L. et al. A verification framework for interannual-to-decadal predictions experiments. // *Clim. Dyn.* - 2013. - Vol. 40. - P. 245–272.
6. Vorobyeva V. V., Volodin E. M. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* - 2021. - Vol. 73, no. 1. - P. 1-12.
7. V. V. Vorobyeva and E. M. Volodin Analysis of the predictability of stratospheric variability and climate indices based on seasonal retrospective forecasts of the INM RAS climate model // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* - 2021. - Vol. 36, no.2. - P. 117–126.
8. Кровнин А. С. Сопряженность климатических колебаний между северными частями Атлантического и Тихого океанов // *Труды ВНИРО.*-2020.-Т.180.-С. 23-43.

9. Wu Qigang, Hu Haibo, Zhang Lujun Observed influences of autumn–early winter Eurasian snow cover anomalies on the hemispheric PNA-like variability in winter // *J. Climate*. - 2011. - Vol. 24. - P. 2017-2023.
10. García-Serrano, J.R., Frankignoul, C.J., Gastineau, G., & Cámara, A.D. On the Predictability of the Winter Euro-Atlantic Climate: Lagged Influence of Autumn Arctic Sea Ice. // *Journal of Climate*. - 2015. - Vol. 28. - P. 5195-5216.
11. Maruyama, F. The Relation among the Solar Activity, the Total Ozone, QBO, NAO, and ENSO by Wavelet-Based Multifractal Analysis. // *Journal of Applied Mathematics and Physics*. - 2018. - Vol. 6. - P. 1301-1314.
12. Robertson, A.W., Mechoso, C.R., & Kim, Y. The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic oscillation. // *Journal of Climate*. - 2000. - Vol. 13. - P. 122-138.
13. Pinto, J.G., Reyers, M., & Ulbrich, U. The variable link between PNA and NAO in observations and in multi-century CGCM simulations. // *Climate Dynamics*. - 2010. - Vol. 36 - P. 337-354.
14. Barnes, E.A., Samarasinghe, S.M., Ebert-Uphoff, I., & Furtado, J.C. Tropospheric and Stratospheric Causal Pathways Between the MJO and NAO. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. - 2019. - Vol. 124 - P. 9356-9371.
15. Нестеров Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. - М. : Триада, 2013. - 144 с.
16. Scaife, A.A., Arribas, A., Blockley, E.W., Brookshaw, A.M., Clark, R.T., Dunstone, N., Eade, R., Fereday, D.R., Folland, C.K., Gordon, M., Hermanson, L., Knight, J.R., Lea, D.J., MacLachlan, C., Maidens, A.V., Martin, M.J., Peterson, A.K., Smith, D.M., Vellinga, M., Wallace, E., Waters, J., & Williams, A.I. Skillful long-range prediction of European and North American winters. // *Geophysical Research Letters*. - 2014. - Vol. 41 - P. 2514 - 2519.
17. Smith, D.M., Scaife, A.A., Eade, R., & Knight, J.R. Seasonal to decadal prediction of the winter North Atlantic Oscillation: emerging capability and future prospects. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. - 2016. - Vol. 142.
18. Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin, S. V., Galin, V. Y., Lykossov, V. N. and co-authors. Simulation of the present day climate with the climate model INMCM5. // *Clim. Dyn.* - 2017. - Vol. 49. - P. 3715–3734.

## Влияние концентрации ядер конденсации на прогноз радиационных потоков в моделях COSMO-Ru и ICON-Ru

Хлестова Ю.О.<sup>1</sup>, Чубарова Н.Е.<sup>2,1</sup>, Шатунова М.В.<sup>1,2</sup>, Ривин Г.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: khlestova2013@ya.ru

В данной работе рассмотрено влияние облачных ядер конденсации на суммарную радиацию по данным экспериментов моделей COSMO-Ru and ICON-Ru. Микрофизика облаков COSMO и ICON основана на работе (Seifert and Beheng, 2006). Процесс нуклеации облачных капель базируется на схеме Сигала-Хаина (Segal and Khain, 2006). В COSMO используется дельта-двухпоточковая схема радиационного переноса со схемой облачно-радиационного взаимодействия CLOUDRAD (Muskatel et al., 2021). В экспериментах с ICON-Ru была использована схема RRTM.

Для анализа численных экспериментов мы использовали спутниковые измерения MODIS за характеристиками облаков и CERES за суммарной радиацией у з.п. (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>; <https://search.earthdata.nasa.gov>). Мы отобрали 4 дня (22.04.2018, 02.05.2019, 08.05.2020, 22.05.2020) с однородной жидкокапельной сплошной облачностью над Москвой без эмиссий дымового аэрозоля, осадков и высоких скоростей ветра в пограничном слое, пытаюсь таким образом снизить влияние кристаллической облачности в экспериментах. Были проведены численные эксперименты с двухмоментной микрофизикой при шаге сетки 1.1 км. В COSMO-Ru мы задали НЯК 200, 500 и 1700 см<sup>-3</sup>, что соответствует морской слоистообразной, переходной и континентальной облачности соответственно. В экспериментах с ICON-Ru была задана НЯК 1700 см<sup>-3</sup>. Основываясь на спутниковых данных, мы также восстановили концентрации облачных капель, чтобы сравнить эксперименты с реальными условиями.

По результатам численных экспериментов было обнаружено занижение моделями водосодержания облаков. Рост концентрации ядер конденсации на 1 см<sup>-3</sup> приводит к увеличению водосодержания на 4 г/м<sup>2</sup>. Смоделированное ICON-Ru водосодержание наиболее приближено к данным измерений. Мы

также рассмотрели влияние схем гетерогенной и гомогенной нуклеации кристаллов на прогноз водосодержания. В результате занижения водосодержания в модели COSMO-Ru прогнозируемая суммарная радиация оказалась в среднем завышена на  $31 \pm 18$  Вт/м<sup>2</sup>, а в модели ICON-Ru – на  $7 \pm 16$  Вт/м<sup>2</sup> ниже наблюдений CERES. Однако при успешном прогнозе водосодержания для модели COSMO-Ru прослеживается тенденция занижения суммарной радиации, что связано с радиационной схемой модели. В то же время для ICON-Ru снижение ошибки прогноза водосодержания способствует успешному прогнозу суммарной радиации.

*Исследование схемы радиационного переноса модели ICON-Ru выполнено при поддержке исследовательского проекта Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Исследование эффектов облачных ядер конденсации на физические характеристики облачности и радиационные потоки проведено при поддержке Правительства РФ (грант 075-15-2021-574).*

#### REFERENCES:

1. Muskatel H., Blahak U., Khain P., Levi Y., Fu Q. Parametrizations of Liquid and Ice Clouds' Optical Properties in Operational Numerical Weather Prediction Models // *Atmosphere*. – 2021. – V. 12. – №. 1. – P. 89.
2. Segal Y., Khain A. Dependence of droplet concentration on aerosol conditions in different cloud types: Application to droplet concentration parameterization of aerosol conditions // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2006. – V. 111. – №. D15.
3. Seifert A., Beheng K. D. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description // *Meteor. and Atm. Phys.* – 2006. – V. 92. – №. 1. – P. 45-66.

## The impact of cloud condensation nuclei number concentration on the numerical prediction of radiative fluxes in the COSMO-Ru and ICON-Ru models

**Khlestova Yu.O.<sup>1</sup>, Chubarova N.E.<sup>2,1</sup>, Shatunova M.V.<sup>1,2</sup>, Rivin G.S.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: [khlestova2013@ya.ru](mailto:khlestova2013@ya.ru)

We consider the influence of cloud condensation nuclei on the simulated global irradiance in the COSMO-Ru and ICON-Ru models. Cloud microphysics in the COSMO and ICON models is based on (Seifert and Beheng, 2006). The process of cloud droplets nucleation is described by the Segal-Khain scheme (Segal and Khain, 2006). According to the scheme, the number concentration of cloud droplets (Nd) depends on the cloud condensation nuclei number concentration (NCCN), vertical velocity at the cloud base, the width of CCN size distribution and the mean (effective) particles radius. The listed parameters were obtained from the experiments of the 2000-bin spectral microphysics cloud parcel model and presented in numerical weather prediction models (NWP) as look-up table. The COSMO radiative scheme is the delta two-stream approximation of radiative transfer (Ritter and Geleyn, 1992) with the CLOUDRAD scheme of cloud-radiation interaction (Muskatel et al., 2021). The Rapid Radiative Transfer Model was used for the ICON experiments (Mlawer et al., 1997).

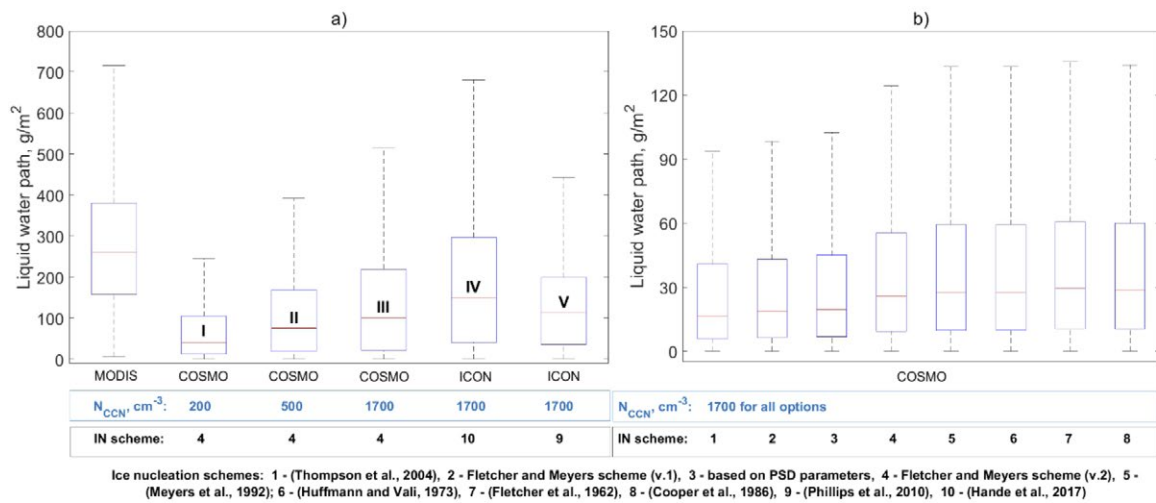
Satellite measurements of the MODIS spectroradiometer with 1 km grid step and the CERES system with 10 km grid step were used to evaluate the simulation results (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>; <https://search.earthdata.nasa.gov>). We selected four days for the case study (22/04/2018, 02/05/2019, 08/05/2020, 22/05/2020) with homogeneous liquid overcast clouds over Moscow without smoke emissions and high wind speed in the planetary boundary layer. Hereby we tried to reduce the impact of ice clouds in experiments and to ensure a better Nd - NCCN agreement. We did not consider precipitation cases to avoid changing of cloud particles size distribution during the rain droplets formation. Numerical experiments were carried out with a 1.1 km grid step and two-moment microphysics. We set NCCN of 200, 500 and 1700 cm<sup>-3</sup> in COSMO-Ru, that represent maritime stratiform, intermediate and continental clouds respectively. We set NCCN of 1700 cm<sup>-3</sup> for the ICON-Ru experiments. We also retrieved cloud droplets number concentrations based on satellite data using methods and guidelines of (Quaas et al., 2020) to compare numerical experiments with real conditions.

Figure 1.a shows boxplots of liquid water path according to MODIS observations, COSMO-Ru and ICON-Ru experiments. The experiments are numbered from I to V. The blue bottom captions show the prescribed CCN, and the black captions show the used schemes of ice nucleation with references. There is an un-



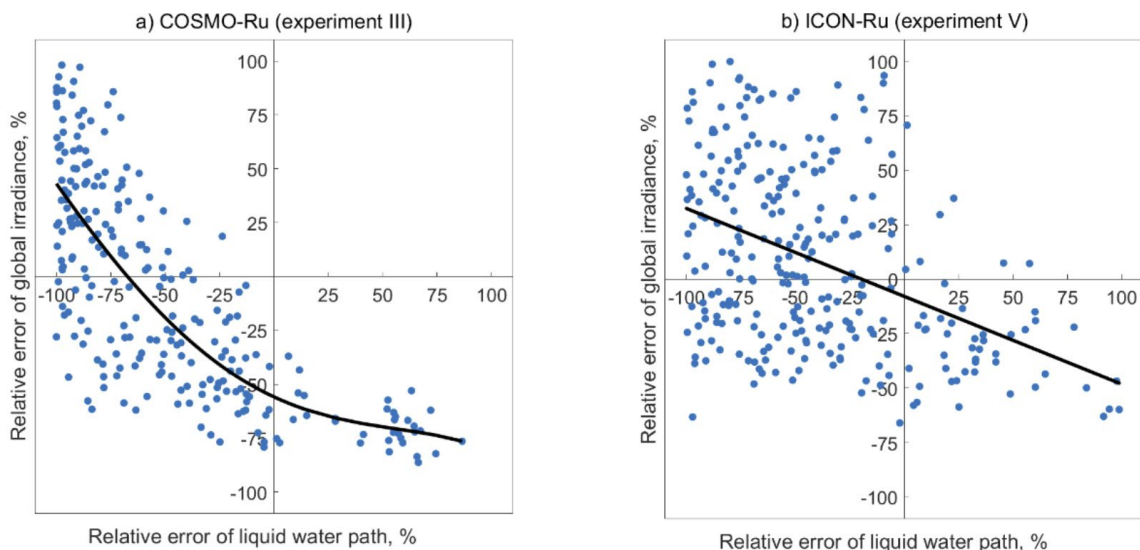
derestimation of liquid water path for all experiments. The average observed liquid water path is  $292 \pm 1 \text{ g/m}^2$ , while COSMO-Ru simulated LWP is  $76 \pm 1 \text{ g/m}^2$  with  $\text{NCCN} = 200 \text{ cm}^{-3}$  and  $135 \pm 1 \text{ g/m}^2$  with  $\text{NCCN} = 1700 \text{ cm}^{-3}$ . The CCN increase by  $100 \text{ cm}^{-3}$  leads to the average LWP increase by  $4 \text{ g/m}^2$ . The ICON-Ru simulated liquid water path in the experiment IV has best agreement with observations (LWP is  $196 \pm 1 \text{ g/m}^2$ ).

The ice in clouds affect the liquid water droplets formation and the autoconversion process, since the saturation pressure over ice is lower than over water. Additionally, we investigated the effect of ice nucleation scheme on simulated liquid water path. There is a noticeable growth of ICON-Ru simulated liquid water path with ice nucleation scheme 10 in compared to scheme 9 (fig.1a). The main cause is the more active nucleation of ice particles in scheme 9, which considers three aerosol species (dust, soot and organics) for the heterogeneous ice formation. For the COSMO-Ru investigation, we chose the case of the most underestimation of liquid water path (22 April of 2018) and carried out eight additional experiments with various ice nucleation schemes (fig.1b) and  $\text{NCCN} = 1700 \text{ cm}^{-3}$ . There is no significant increase of liquid water path, relative to the scheme 4. Perhaps, because of the fact that schemes 1-8 generally are based on the similar approaches and meteorological parameters.



**Figure 1.**

Boxplots of liquid water path by MODIS observations and COSMO-Ru and ICON-Ru experiments (I-V): a) with various cloud condensation nuclei number concentrations (all days, 162699 pixels), b) at cloud nuclei number concentration  $1700 \text{ cm}^{-3}$  and various ice nucleation schemes (only 22/04/2018, 32108 pixels).



**Figure 2.**

The relative error of simulated global irradiance at ground as a function of relative error of simulated liquid water path: a) COSMO-Ru (experiment III), 238 pixels b) ICON-Ru (experiment V), 274 pixels. The black lines are the tendencies of global irradiance errors.

The liquid water path is one of the main parameters that determine the cloud optical thickness and radiative fluxes at ground. There are more cloudless conditions in simulations when the liquid water path is underestimated. As a result, the COSMO-Ru simulated global irradiance (exp. III) is overestimated by an average of

$31 \pm 18 \text{ W/m}^2$ . The ICON-Ru simulated global irradiance (exp. IV) is  $7 \pm 16 \text{ W/m}^2$  lower of CERES observations. An increase of CCN contributes to a decrease the error of simulated global irradiance – about  $3.5 \text{ W/m}^2$  to every  $100 \text{ cm}^{-3}$  on average. It should be noted that this error is not only issue of liquid water path correctness, but it also depends on the used radiative transfer scheme. Figure 2 shows relative errors of simulated global irradiance at the ground (simulations minus observations, normalized to observations) as a function of the relative error of simulated liquid water path. Only experiments III and V are shown because of the closest liquid water path values. The black lines are the trend approximations of global irradiance relative errors. There is a tendency to reduce the prediction error of global irradiance with a successful forecast of liquid water path using ICON-Ru (fig.2b). At the same time, the COSMO-Ru global irradiance is underestimated with the accurate LWP prediction (fig.2a). Similar results were obtained in (Chubarova et al., 2018) for the operational version of COSMO-Ru with one-moment microphysics compared with ground-based observations.

Thus, the simulated liquid water path is underestimated compared to satellite observations under conditions of homogeneous liquid clouds. An increase of CCN significantly reduces the error of COSMO-Ru simulated global irradiance. The ICON-Ru simulated liquid water path and global irradiance are closer to the observations than the COSMO-Ru results. The main causes are the scheme of radiative transfer and additional modification of microphysical scheme, in particular, heterogeneous ice nucleation process.

*The research of ICON-Ru radiative transfer scheme is supported by the Roshydromet Research Work number AAAA-A20-120021490079-3. The research of cloud condensation nuclei effects on the cloud characteristics and radiative fluxes is supported by the Russian Government (grant 075-15-2021-574).*

#### REFERENCES:

1. Chubarova N., Khlestova J., Shatunova M., Platonov V., Rivin G., Görsdorf U., Becker R. *Cloud characteristics and cloud radiative effects according to COSMO mesoscale model and measurements //24th Intern. Symp. on Atm. and Ocean Optics: Atm. Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – V. 10833. – P. 108331N.*
2. Mlawer E. J. et al. *Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1997. – V. 102. – №. D14. – P. 16663-16682.*
3. Muskatel H., Blahak U., Khain P., Levi Y., Fu Q. *Parametrizations of Liquid and Ice Clouds' Optical Properties in Operational Numerical Weather Prediction Models //Atmosphere. – 2021. – V. 12. – №. 1. – P. 89.*
4. Ritter B., Geleyn J. F. *A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations //Monthly weather review. – 1992. – V. 120. – №. 2. – P. 303-325.*
5. Segal Y., Khain A. *Dependence of droplet concentration on aerosol conditions in different cloud types: Application to droplet concentration parameterization of aerosol conditions //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2006. – V. 111. – №. D15.*
6. Seifert A., Beheng K. D. *A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description //Meteor. and Atm. Phys. – 2006. – V. 92. – №. 1. – P. 45-66.*
7. Quaas J. et al. *Constraining the Twomey effect from satellite observations: issues and perspectives // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2020. – V. 20. – №. 23. – P. 15079-15099.*

## Ensemble medium-range weather forecast system based on the SLAV model

Mizyuk V.<sup>1</sup>, Tolstykh M.<sup>1,2</sup>, Alipova K.A.<sup>1,2</sup>, Rogutov V.S.<sup>1</sup>, Goiman G.S.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Centre of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: vmizyuk@gmail.com

The modern way of the modeling "chaotic" behavior of the atmosphere is the use of the ensemble weather forecasting. An ensemble of forecasts makes it possible to estimate the change in the predicted values, take into account the uncertainty in the initial data, and also to estimate the probability of occurrence of events characterizing the atmospheric state.

The ensemble prediction system of medium-range weather forecast was developed by Russian Hydrometeorological Research Center in collaboration with INM RAS. This system is based on the global semi-Lagrangian atmospheric model SLAV2018 [1] and a data assimilation system based on the local Kalman filter algorithm with transition to en-

semble space (LETKF) [2, 3]. The version of the SLAV2018 model has 96 vertical hybrid levels (up to the level of 0.04 hPa), the longitude resolution is 0.9 degrees, and the latitude resolution is 0.72 degrees. Accounting for the uncertainty (error) of the model is implemented using a stochastic perturbation of individual parameters in the block for describing nonadiabatic processes (SPP) and a stochastic perturbation of the right-hand sides of the equations of temperature and the vertical component of absolute vorticity (SPPT). This approach made it possible to significantly improve the probabilistic forecast scores [4].

The initial data ensemble is prepared by the data assimilation component based on the LETKF algorithm that is not able to assimilate some important satellite observation, such as AMSU. Therefore the centering onto the Russian Hydrometcenter operational analysis is performed. It means that the ensemble mean is replaced with operational analysis, which contains the important satellite observation assimilation results, and deviation of each ensemble member is provided by the LETKF.

Verification of the results is performed according to procedures applied at the Lead Centre on Verification of Ensemble Prediction System procedures. Probabilistic ensemble scores were calculated, such as the relative operating characteristic ROC, the integral characteristic ROC area, Brier score and Continuous Ranked Probability Score (CRPS). During the testing period, the scores of described here ensemble prediction system was compared with scores of ensemble system based the global spectral model of the Hydrometeorological Center T169L31, as well as with ensemble forecasts from foreign meteorological centers (English UKMO, American (NCEP)).

According to the results of operational tests, quite high reliability of the presented ensemble forecast technology is noted. A significantly higher predictive skill is noted for the fields of geopotential, temperature, pressure at sea level, calculated by the system based on the SLAV2018 model, for all lead times, levels, for all territories, for all metrics of deterministic and probabilistic estimates (with rare exceptions) compared to an ensemble prediction system based on the T169L31 spectral model. The success of probabilistic forecasts based on the created technology of ensemble forecasts based on the SLAV2018 model for the extratropical part of the Northern and Southern Hemispheres for a number of forecast lead times (for individual regions and estimated variables) is comparable to the success of probabilistic forecasts using the UKMO model according to the ROCA criterion, but is inferior to UKMO forecasts for other lead times and significantly inferior to them in the tropics.

In June 2022, the presented system was recommended by the Central Methodical Commission for Hydro-meteorological and Heliogeophysical Forecasts of Roshydromet, for operational use.

## Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ

Мизяк В.Г.<sup>1</sup>, Толстых М.А.<sup>2,1</sup>, Алипова К.А.<sup>2,1</sup>, Рогутов В.С.<sup>1</sup>, Гойман Г.С.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Гидрометцентр России, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: [vmizyak@gmail.com](mailto:vmizyak@gmail.com)

### ВВЕДЕНИЕ

Особенностью ансамблевого прогноза погоды является моделирование «хаотического» поведения атмосферы. Использование ансамбля прогнозов вместо одного позволяет произвести учёт неопределённости в определении значений параметров атмосферы в начальный момент, а также оценить вероятность наступления событий, характеризующих метеорологическую обстановку.

В Гидрометцентре России и ИВМ РАН была разработана система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды, построенная на базе глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ2018 [1] и системы усвоения данных на основе алгоритма локального фильтра Калмана с переходом в пространство ансамбля (далее – LETKF) [2, 3]. Применяемая версия модели ПЛАВ2018 имеет 96 гибридных уровней по вертикали (до уровня 0,04 гПа), разрешение по долготе составляет 0,9 градуса, по широте – 0,72 градуса. Учёт неопределённости (ошибки) модели, реализован с помощью стохастического возмущения отдельных параметров в блоке описания неадиабатических процессов (SPP) и стохастическим возмущением правых частей уравнений притока тепла и вертикального компонента абсолютной завихренности (SPPT). Такой подход позволил существенно улучшить вероятностные оценки прогноза [4].

В качестве начальных данных при расчете прогнозов по модели ПЛАВ2018 используется система усвоения данных на основе алгоритма LETKF. Основные вычисления в этом алгоритме выполняются в пространстве ансамбля, которое имеет размерность в несколько десятков, что существенно меньше полной размерности задачи. Система усвоения данных использует данные метеонаблюдений с радио-

зондов, самолетов, приземные и буйковые наблюдения, а также спутниковые наблюдения ветра. Существенным недостатком компонента усвоения является невозможность усваивать спутниковые наблюдения, которые не могут быть вертикально локализованы в пространстве (например, AMSU).

Для повышения точности прогнозов в сформированный ансамбль начальных данных модифицируется путем замены полей среднего по ансамблю анализа на соответствующие поля оперативного анализа Гидрометцентра России, которые содержат результаты спутниковых наблюдений и производятся независимо от описываемой системы [5]. При этом отклонения каждого участника ансамбля от среднего остаются неизменными.

Также используются: результаты объективного анализа температуры и относительной влажности на уровне 2 м, а также температуры и влагосодержания глубинного слоя почвы в почве, собственной разработки; результаты объективного анализа NCEP высоты снежного покрова, температуры поверхности океана.

## ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Для оценки успешности прогнозов полей геопотенциала, температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра на стандартных изобарических высотах, а также успешности прогноза поля давления на уровне моря рассчитывались вероятностные ошибки прогноза. Оценки проводились по полям оперативного объективного анализа Гидрометцентра России (на сетке  $1.5 \times 1.5^\circ$ ). В том числе, рассчитывались относительная операционная характеристика ROC и интегральная характеристика ROCA; оценка Брайера и показатель упорядоченной непрерывной вероятности (ПУНВ; в английском варианте CRPS) и его сравнение с абсолютной ошибкой прогноза.

Оценки рассчитывались для аномалий давления на уровне моря, высоты поверхности 500 гПа и температуры на поверхности 850 гПа, с амплитудой в  $\pm 1$ ,  $\pm 1,5$  и  $\pm 2$  стандартного отклонения по отношению к климатическим данным.

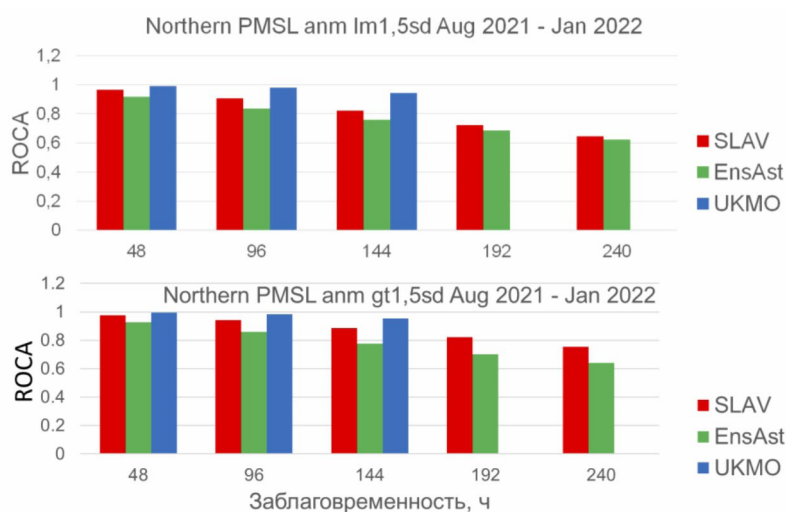
Также рассчитывались оценки среднего по ансамблю прогноза по стандартным регионам для давления на уровне моря, геопотенциала, температуры, ветра (зональная и меридиональная составляющие) на стандартных уровнях 850, 500, 250 гПа.

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых прогнозов по модели ПЛАВ2018 с успешностью ансамблевых прогнозов по глобальной спектральной модели Гидрометцентра T169L31, а также с прогнозами зарубежных метеоцентров (английского UKMO), американского (NCEP)).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ

Оценка технологии ансамблевого прогнозирования на основе модели ПЛАВ2018 с 60 участниками ансамбля была произведена для прогнозов за период с августа 2021 года по январь 2022 года по исходным данным за срок 00 час. ВСВ. Максимальная заблаговременность прогноза составляла 10 суток.

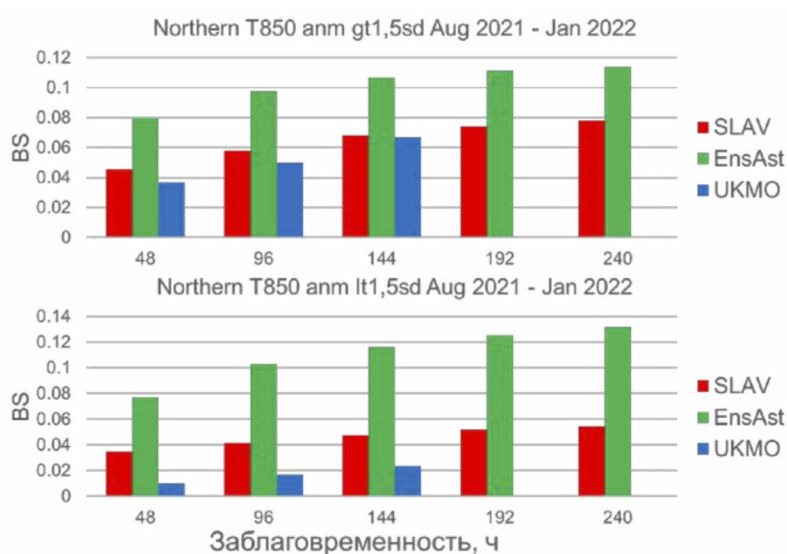
Система работает на высокопроизводительном вычислительном комплексе (ВБК) Cray XC40. Время расчета сеанса 00 часов (включает прогноз на 240 часов) составляет менее 60 минут на 2000 процессорных ядрах. На представленных ниже рисунках показано сравнение вероятностных оценок систем ансамблевого прогноза: SLAV – описываемая система, EnsAst – предыдущая система ансамблевого прогноза Гидрометцентра на основе спектральной модели T169L31, UKMO – система метеослужбы Великобритании.



**Рис. 1.**

Площадь под кривой ROC для аномалии давления на уровне моря более +1,5 ст. откл. (внизу), менее -1,5 ст. откл. (вверху). Период: август 2021 - январь 2022 гг. Регион:  $20^\circ$ - $90^\circ$  с.ш.





**Рис. 2.** Оценка Брайера для температуры на уровне 850 гПа более +1,5 ст. откл. (вверху), менее -1,5 ст. откл. (внизу). Период: август 2021 - январь 2022 гг. Регион: 20°-90° с.ш.

По результатам оперативных испытаний отмечена достаточно высокая надежность функционирования созданной технологии ансамблевых прогнозов. Была отмечена существенно более высокая успешность прогноза для полей геопотенциала, температуры, давления на уровне моря, рассчитываемых системой на основе модели ПЛАВ2018, для всех заблаговременностей, уровней, для всех территорий, для всех метрик детерминистических и вероятностных оценок (за редкими исключениями) по сравнению с системой ансамблевого прогнозирования на базе спектральной модели T169L31. Успешность вероятностных прогнозов по созданной технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ2018 для внетропической части Северного и Южного полушарий для ряда заблаговременностей прогноза (для отдельных регионов и оцениваемых переменных) сопоставима с успешностью вероятностных прогнозов по модели UKMO по критерию ROCA, но уступает прогнозам UKMO для других заблаговременностей и существенно уступает им в тропиках.

В июне 2022 г. на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам Росгидромета созданная система была рекомендована к оперативному использованию в Гидрометцентре России и ГВЦ Росгидромета.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. Рецензент д.ф-м.н. А.В.Старченко. М.: Триада лтд., 166стр. ISBN 978-5-9908623-3-3.
2. B. R. Hunt, E. J. Kostelich, and I. Szunyogh. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1-2):112–126, June 2007.
3. A.V. Shlyaeva, M.A. Tolstykh, V.G. Mizyak, V.S. Rogutov. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model. *Russ. J. Num. An. & Math. Mod.* 2013 V 28 N 4 P 419-441.
4. Алипова К.А., Толстых М.А., Мизяк В.Г., Гойман Г.С., Рогутов В.С. Стохастическое возмущение тенденций и параметров параметризаций в глобальной системе ансамблевого прогноза погоды на основе модели ПЛАВ, сдано в *Russian J. Num. Analysis and Math. Modelling*, 2022.
5. Рогутов В.С., Толстых М.А., Мизяк В.Г. Система ансамблевого прогноза на основе локального ансамблевого фильтра Калмана. *Труды Гидрометцентра России*, 2017, вып. 364, с. 5-19.

# Short-range forecast of the risk level of hazardous convective weather events in the Ural region with publication on the online web map service

Shikhov A.N., Abdullin R.K., Tarasov A.V., Perminov S.I.

Perm State University, Perm, Russia  
E-mail: and3131@inbox.ru

**H**azardous convective weather events (HCWE), such as squalls, tornadoes, heavy convective rainfall and large hail are hard to predict and cause substantial economic damage and loss of life each year. Russia is characterized by a relatively weak development of web-GIS services that provide any information (observations or forecasts) about these events. In this study, we consider the web-GIS developed to publish the forecasts of risk levels of the HCWE occurrence based on free-available data from global numerical weather prediction (NWP) models. At the first stage, the service was developed for the territory of the Ural region. It provides the automated forecasts of risk levels for the occurrence of HCWE with a daily lead time and available via a temporary URL (<http://ogs.psu.ru:5002/>). The risk of occurrence of HCWE is estimated on a 4-point scale.

The initial data for the risk assessment are daily forecasts according to the ICON (Germany) and GFS (USA) NWP models. For this, a system of automated data downloading, processing and storage has been developed. The criteria for calculating the risk levels for the occurrence of HCWE were calculated according to ingredient-based approach, widely used to analyze the environments for the occurrence of these phenomena and their short-term forecast (Taszarek et al., 2017, 2020; Kalinin et al., 2021).

Convective variables and risk levels are calculated automatically based on the data of the ICON and GFS NWP models twice a day, with a lead time of 27 h and 3 h time step. When calculating risk levels, threshold values of the 4 most informative variables are used. These indices characterize convective instability (surface-based convective available potential energy (SB CAPE) and the same for the most unstable layer (MU CAPE)); 0-6 km wind shear (DLS) and the WMAXSHEAR parameter – a linear combination of SB CAPE and DLS. WMAXSHEAR is the most informative for the diagnosis and forecast of severe convective storms with squalls, tornadoes, and large hail (Taszarek et al., 2020). To assess the risk of tornadoes, the LLS (0-1 km wind shear) and MLS (0-3 km wind shear) are additionally involved.

We used the database of convective variables for squall and tornado events in the Perm region for the period 1984-2020 (Shikhov et al., 2021) to determine the threshold values to estimate the risk levels. The risk levels of HCWE are calculated according to percentile-based criteria. Then, the resulting areas with different risk degrees are converted to vector polygons. Then, they are published on the web map service.

Open source programs and development tools became the basis for the development of a web map service. The user interface allows to display areas with different risk levels on a cartographic basis (OpenStreetMap data). Areas with different risk levels are displayed on the map window as polygons, and the risk gradations themselves are presented in the legend. At the bottom of the view window, a list of available forecasts relative to the user's current time is automatically generated. User settings include NWP model selection (GFS or ICON), etc.

*The study was funded by the RSF Project No 18-77-10076, online web map service has been developed with the support of RF President grant number MK-313.2020.5/*

## REFERENCES:

1. Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. *Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020 // Atmosphere. 2021. V. 12(11). Art. No. 1407.*
2. Taszarek M., Allen J.T., Púčik T., Hoogewind K.A., Brooks H.E. *Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // J. Climate, 2020, V. 33(24), P. 10263–10286.*
3. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. *Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe // Mon. Wea. Rev. 2017. Vol. 145. P. 1511–1528.*

# Краткосрочный прогноз уровней риска возникновения конвективных опасных явлений погоды на Урале с публикацией на картографическом веб-сервисе

Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Тарасов А.В., Перминов С.И.

Пермский государственный университет, Пермь, Россия  
E-mail: and3131@inbox.ru

Опасные явления погоды конвективного характера (КОЯП), такие, как шквалы, смерчи, сильные ливни и крупный град, ежегодно наносят значительный экономический ущерб и приводят к гибели людей, а также отличаются сложной предсказуемостью. Особое значение для снижения вызываемого ими ущерба имеет краткосрочный прогноз и наукастинг, а также эффективное доведение информации до пользователей с применением веб-ГИС-технологий. Для России характерно сравнительно слабое развитие картографических веб-сервисов, обеспечивающих доступ пользователей к информации об этих явлениях. С целью решения данной проблемы был разработан картографический веб-сервис для публикации уровней риска возникновения КОЯП на основе открытых данных глобальных моделей численного прогноза погоды (ЧПП). На первом этапе работа выполнена для территории Уральского региона. Сервис обеспечивает публикацию автоматизированных прогнозов уровней риска возникновения КОЯП с применением 4-х балльной шкалы (допустимый, незначительный, повышенный и высокий риск) с суточной заблаговременностью, и доступен по временной ссылке (<http://ogs.psu.ru:5002/>).

Отметим, что существующие картографические сервисы визуализации прогнозов погоды (<https://www.ventusky.com/>, <https://www.windy.com>, <https://yandex.ru/pogoda>) не имеют аналогичных функциональных возможностей. Сервисы с похожей функциональностью реализованы для территории зарубежной Европы в рамках проекта European Storm Forecast Experiment (ESTOFEX), а также Национальным Центром прогнозирования штормов (Storm Prediction Center) в США (<https://www.spc.noaa.gov/misc/about.html>). При этом в прогнозах ESTOFEX для территории Европы используется градация по трем уровням риска (<https://www.estofex.org/>), а в США риск возникновения КОЯП оценивается по пятибалльной шкале, причем прогнозы составляются на 3 сут.

Исходными данными для расчета риска возникновения КОЯП для территории Урала были ежедневные численные прогнозы погоды (ЧПП) по моделям ICON (Германия) и GFS (США). Для этого была создана система автоматизированной загрузки, обработки и хранения данных. Сами данные доступны по ссылкам <http://84.201.155.104/icon-ural/> (ICON) и <http://84.201.155.104/gfs-ural/> (GFS).

Критерии для расчета уровней риска возникновения конвективных ОЯ рассчитаны на основе ингредиентного подхода, который давно и успешно применяется для анализа условий возникновения этих явлений и их краткосрочного прогноза (Taszarek et al., 2017, 2020; Калинин и др., 2021). В рамках данного подхода развитие глубокой конвекции в атмосфере рассматривается как функция нескольких предикторов (ингредиентов). Как правило, выделяют четыре ингредиента: аномально теплый и влажный воздух в приземном слое, восходящие движения у поверхности, связанные с фронтальным разделом или орографией, неустойчивая стратификация (плаваемость) и вертикальный сдвиг ветра (Rasmussen, Blanchard, 1998; Brooks et al., 2019). Для оценки ингредиентов вычисляется ряд диагностических переменных (индексов). Индексы характеризуют отдельные ингредиенты или их сочетания. В рамках настоящей работы они рассчитываются по прогностическим данным моделей ЧПП ICON и GFS.

Расчеты индексов и уровней риска производятся автоматически на основе данных моделей ЧПП ICON и GFS два раза в сутки, с заблаговременностью 27 ч и с трехчасовым шагом по времени. Учитывая особенности поставки данных, по данным модели GFS рассчитывается больше индексов, чем по модели ICON. При прогнозе КОЯП рассматриваются три типа явлений: шквалы ( $\geq 25$  м/с), смерчи и крупный град.

При расчете уровней риска используются пороговые значения 4-х наиболее информативных индексов. Эти индексы характеризуют конвективную неустойчивость (доступная потенциальная энергия неустойчивости, рассчитанная от земли (SB CAPE) и для наиболее неустойчивого слоя (MU CAPE)); сдвиг ветра в слое 0-6 км (DLS) и параметр WMAXSHEAR, представляющий собой линейную комбинацию SB CAPE и DLS. Последний параметр наиболее информативен для диагноза и прогноза мощных конвективных штормов со шквалами, смерчами и крупным градом (Taszarek et al., 2020). Для оценки риска возникновения смерчей дополнительно привлекаются параметры LLS (сдвиг ветра в слое 0-1 км) и MLS (сдвиг ветра в слое 0-3 км). Как показано в работах для территории России (Калинин и др., 2021), для Европы и Северной Америки (Taszarek et al., 2017, 2020), именно высокие значения LLS и MLS, наряду с низким уровнем конденсации (LCL), имеют основное значение для возникновения смерчей. Уровень конденсации для расчета риска возникновения смерчей в 2021 г. не использовался.

При определении пороговых значений для оценки уровня риска использовалась база данных значений индексов в случаях со шквалами и смерчами на территории Пермского края за период с 1984 по 2020 гг. (Shikhov et al., 2021). Уровни риска КОЯП рассчитываются на основе перечисленных критериев (табл. 1), после чего полученные области с разными градациями риска конвертируются в векторный формат (полигоны). Далее производится их публикация на сервисе.

**Таблица 1.**

Пороговые значения для оценки риска конвективных ОЯ на территории Урала по данным моделей ЧПП.

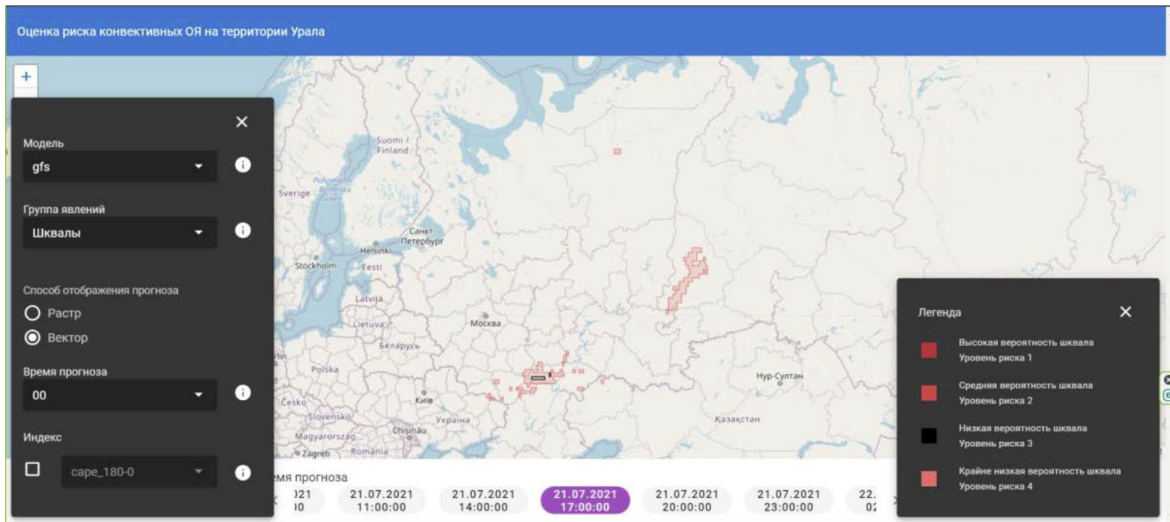
Уровень риска	Пороговые значения индексов (сочетание условий)	Обоснование порога
Оценка риска для шквалов и крупного града		
Высокий	(SB CAPE > 1500) & (MU CAPE) > 2000 & (DLS > 26) & (SB WMAXSHEAR > 1100)	Сочетание сильной неустойчивости (верхние 33% от зафиксированных случаев ОЯ), сильного сдвига ветра (верхние 25% от зафиксированных случаев ОЯ), значения параметра WMAXSHEAR в пределах верхних 25% от зафиксированных случаев ОЯ
Повышенный	(SB CAPE > 1000) & (MU CAPE) > 1500 & (DLS > 21) & (SB WMAXSHEAR > 850)	Сочетание умеренной неустойчивости (верхние 50% от зафиксированных случаев ОЯ), умеренного сдвига ветра (верхние 60% от зафиксированных случаев ОЯ), значения параметра WMAXSHEAR в пределах верхних 50% от зафиксированных случаев ОЯ
Незначительный	(SB CAPE > 600) & (MU CAPE) > 1000 & (DLS > 18) & (SB WMAXSHEAR > 600)	Сочетание умеренной неустойчивости (верхние 75% от зафиксированных случаев ОЯ), умеренного сдвига ветра (верхние 75% от зафиксированных случаев ОЯ), значения параметра WMAXSHEAR в пределах верхних 70% от зафиксированных случаев ОЯ
	(SB CAPE > 1500) & (MU CAPE) > 2000 & (DLS > 15) & (SB WMAXSHEAR > 500)	Сочетание сильной неустойчивости (верхние 33% от зафиксированных случаев ОЯ), относительно слабого сдвига ветра (верхние 85% от зафиксированных случаев ОЯ), значения параметра WMAXSHEAR в пределах верхних 80% от зафиксированных случаев ОЯ
Допустимый	(SB CAPE > 400) & (MU CAPE) > 700 & (DLS > 15) & (SB WMAXSHEAR > 500)	Умеренная неустойчивость при умеренном сдвиге ветра
	(SB CAPE > 1500) & (MU CAPE) > 2000 &	Сильная неустойчивость при слабом сдвиге ветра или его отсутствии
	(SB CAPE > 200) & (MU CAPE) > 400 & (DLS > 21) &	Слабая неустойчивость при умеренном сдвиге ветра
Оценка риска для смерчей		
Значительный	SB CAPE > 600) & (MU CAPE) > 1000 & (DLS > 26) & (MLS > 19) & (LLS > 12)	Сочетание умеренной конвективной неустойчивости, сильного сдвига ветра в слое 0-6 км (верхние 25% от зафиксированных случаев ОЯ), а также в слое 0-3 км (верхние 35% от зафиксированных случаев ОЯ) и 0,1 км (верхние 30% от зафиксированных случаев ОЯ)
Незначительный	SB CAPE > 250) & (MU CAPE) > 500 & (DLS > 25) & (MLS > 15) & (LLS > 10)	Сочетание слабой или умеренной конвективной неустойчивости и сильного сдвига ветра в слоях 0-6 км, 0-3 км и 0-1 км.

**Интерфейс и функциональные возможности картографического веб-сервиса**

Основой разработки картографического веб-сервиса стали программы и средства разработки с открытым исходным кодом. В качестве серверной части использовался фреймворк Flask, а для периодических задач – Celery, средствами которых выполняется загрузка, обработка и конвертация данных. Формат взаимодействия с сервисом реализован с помощью архитектуры REST и соответствует стандартам OpenAPI. В качестве клиента создан картографический веб-сервис на базе технологии Vue и Leaflet.

Интерфейс пользователя позволяет отображать области с различным уровнем риска возникновения ОЯ на картографической основе, в качестве которой используются данные OpenStreetMap. Области с различным уровнем риска отображаются в окне карты в виде полигонов, сами градации риска отражены в легенде. В нижней части окна просмотра автоматически формируется список доступных прогнозов относительно текущего времени пользователя. Пользовательские настройки включают выбор модели, на которой основан прогноз (GFS или ICON), способ представления прогноза и др.





**Рис. 1.** Общий вид картографического веб-приложения.

Исследование выполнено при поддержке РФФ (проект № 18-77-10076), разработка веб-сервиса – при поддержке гранта Президента РФ № МК-313.2020.5

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала // *Метеорология и гидрология*. 2021. №2. С. 35–49.
2. Оценка риска конвективных ОЯ на территории Урала. URL: <http://ogs.psu.ru:5002/>.
3. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // *Wea. Forecasting*. 1998. V. 13, P. 1148–1164.
4. Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020 // *Atmosphere*. 2021. V. 12(11). Art. No. 1407.
5. Taszarek M., Allen J.T., Púcič T., Hoogewind K.A., Brooks H.E. Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // *J. Climate*, 2020, V. 33(24), P. 10263–10286.
6. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe // *Mon. Wea. Rev.* 2017. Vol. 145. P. 1511–1528.

## Numerical modeling of extreme ice loads on the example of freezing rain in Vladivostok

Leonov I.I.<sup>1,2</sup>, Cheresnyuk S.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Research and Development Centre at Federal Grid Company of Unified Energy System, Moscow, Russia

E-mail: [leonov@geogr.msu.ru](mailto:leonov@geogr.msu.ru)

Severe weather events have a significant impact on the condition of overhead power lines, which often leads to failures in the energy supply to consumers and causes economic losses. Ice accretion can lead to dangerous sagging of wires, wire breakage and even damage to elements of electric towers [1].

There is a need to improve the quality of awareness about the expected severe weather events. This will allow electric grid companies to reduce losses from dangerous weather events and optimize production processes.

In this paper, using the example of a cyclone that took place in November 2020 in Primorsky Krai and caused numerous accidents in electrical networks, the possibility of forecasting dangerous icing phenomena and early notification of operating organizations about expected excess loads on overhead lines is shown.

According to meteorological data, on November 19, the diameter of the glaze accretion reached the criterion of a dangerous phenomenon and continued to increase due to incessant precipitation. At the same time, an additional factor was a strong wind with a speed of up to 20 m/s.

The resulting ice accretion have led to numerous technological disruptions on overhead power lines. Many settlements were left without power supply. The size of the ice accretion recorded on the wires of overhead lines strongly depended on the terrain. The thickness of the ice measured on samples of glaze ice in various areas varied from 27 to 55 mm.

For a more detailed study of synoptic conditions and the vertical structure of the atmosphere, experiments were carried out using the WRF-ARW 4.1.2 [2] mesoscale atmospheric model.

The model reproduced well the band of freezing precipitation on the territory of Primorsky Krai, which is in good agreement with the data of observations at meteorological stations equipped with ice machines. The high spatial resolution of the model allowed us to reproduce the process of high-intensity ice formation on Russky Island. The results of modeling icy loads showed that on some overhead power lines, excessive icy loads were achieved, for which the damaged structures were not designed.

It is expected that this technique of using mesoscale numerical models of the atmosphere will allow obtaining the most operational meteorological information for certain regions and power grid facilities, making reasonable decisions on responding to predicted and occurring severe weather phenomena with the calculation of probabilistic geographical locations of emergency outages.

#### REFERENCES:

1. Farzahan M. *Atmospheric Icing of Power Networks*. // Springer Science+Business Media B.V. 2008
2. Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu. (2019). *A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 (No. NCAR/TN-556+STR)*.

## Численное моделирование сверхнормативных гололедных нагрузок на примере замерзающего дождя во Владивостоке

Леонов И.И.<sup>1,2</sup>, Черешнюк С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, Москва, Россия

E-mail: [leonov@geogr.msu.ru](mailto:leonov@geogr.msu.ru)

Неблагоприятные и опасные явления погоды оказывают значительное влияние на состояние воздушных линии электропередачи, что часто приводит к сбоям в энергоснабжении потребителей и наносит материальный ущерб как самим электросетевым компаниям, так и предприятиям других отраслей промышленности [2].

Гололедно-изморозевые отложения могут привести к опасному провисанию проводов, обрыву проводов и, даже к повреждению элементов опор. При разрушении гололедно-изморозевых отложений происходит их одновременный сброс с проводов, сопровождающийся подскоком проводов с возможными короткими замыканиями.

Вышесказанное обуславливает необходимость повышения качества информированности об ожидаемых опасных явлениях погоды. Это позволит электросетевым компаниям уменьшить убытки от неблагоприятных и опасных явлений погоды и оптимизировать производственные процессы.

В настоящей работе на примере циклона, прошедшего в ноябре 2020 года в Приморье и вызвавшего многочисленные аварии в электрических сетях, показана возможность прогноза опасных гололедных явлений и заблаговременного оповещения эксплуатирующих организаций об ожидаемых сверхнормативных нагрузках на воздушные линии.

В середине ноября 2020 года Приморский край находился в зоне действия мощного Южного циклона, зародившегося на территории Китая 17 ноября. Ночью 19 ноября циклон продвинулся на восток. В 3 часа ночи по местному времени во Владивостоке были зафиксированы первые отложения льда величиной 1 мм. С приближением теплого фронта, теплый и влажный тропический воздух стал надвигаться на холодный умеренный континентальный воздух. В ходе вынужденной конвекции на юге Приморья усилился процесс осадкообразования. В районе Владивостока наблюдались осадки в виде крупы, ливневого снега, ледяного и замерзающего дождя. Согласно справкам ФГБУ «Приморское УГМС» в 10:57 19 ноября диаметр гололедно-изморозевого отложения достиг критерия опасного явления и продолжал увеличиваться из-за непрекращающихся осадков. При этом, сопутствующим, неблагоприятным фактором являлся сильный ветер со скоростью до 20 м/с.

Возникшие гололедно-изморозевые отложения привели к многочисленным технологическим нарушениям на воздушных линиях электропередачи магистральных и распределительных сетей. Множество населенных пунктов остались без энергоснабжения.

Размер гололедно-изморозевых отложений, зафиксированных на проводах воздушных линий, сильно зависел от рельефа местности. Толщина стенки гололеда, измеренная на образцах гололедно-изморозевых отложений в различных районах, варьировалась от 27 до 55 мм.

Для более детального изучения синоптических условий и вертикальной структуры атмосферы были проведены эксперименты с использованием мезомасштабной модели атмосферы WRF-ARW 4.1.2 [5]. Модель запускалась на 36 часов, первые 12 из которых отводились на усвоение данных и в дальнейшем отбрасывались, из оставшихся суточных периодов создавался единый модельный прогон длиной в четыре суток, охватывающий период формирования и выпадения замерзающего дождя на территории Приморского края. В качестве начальных и граничных условий использовались данные реанализа ERA5 [3]. Область интегрирования включала в себя четыре вложенные сетки с шагами по пространству 18, 6, 2 и 0.67 км с количеством узлов 142x121 для каждой вложенной сетки. Результаты записывались с дискретностью в один час. Важной особенностью проведенных экспериментов был тщательный выбор используемой схемы описания микрофизических процессов. Была выбрана двухмоментная схема NSSL [4], включающая в себя расчет семи типов гидрометеоров: в виде водяной пара, облачные капли, дождь, снега, леда, крупа и града. Также эта схема позволяет получить данные о концентрации облачных капель и ядер конденсации облаков.

В настоящей работе замерзающими считались осадки, во время образования которых отношение гидрометеоров жидкой фазы к общему числу гидрометеоров превышало 80% и температура воздуха на высоте 2 метров принимала отрицательные значения.

Модель хорошо воспроизвела полосу выпадения замерзающих осадков на территории Приморского края, которая хорошо согласуется с данными наблюдений на метеорологических станциях, оборудованных гололедными станками. Высокое пространственное разрешение модели позволило воспроизвести процесс гололедообразования высокой интенсивности на о. Русский [1].

Далее данные моделирования, полученные с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW подвергались постпроцессингу, во время которого проводился расчет вероятности превышения прогнозируемых атмосферных нагрузок над климатическими нагрузками принятыми при проектировании, индивидуально для каждого объекта энергетической сети, находящегося в зоне воздействия опасного явления гололедообразования в том числе: превышение нормативной толщины стенки гололеда.

Данные о расположении электросетевых объектов, для которых были рассчитаны нагрузки были получены из баз данных ГИС-систем, разработанных в АО «НТЦ ФСК ЕЭС». Для каждого рассматриваемого объекта также уточнялись данные о их высоте, марке и диаметре используемых проводов, и климатическом районе, выбранном при проектировании.

Результаты моделирования гололедных нагрузок показали, что на некоторых воздушных линиях электропередачи были достигнуты сверхнормативные гололедные нагрузки, на которые не были рассчитаны поврежденные конструкции.

Ожидается, что данная методика использования мезомасштабных численных моделей атмосферы позволит получать максимально оперативную метеорологическую информацию по определенным регионам и ключевым электросетевым объектам, обоснованно принимать решения по вопросам реагирования на прогнозируемые и наступившие опасные явления погоды с вычислением вероятностных географических мест аварийных отключений.

Определение характера и продолжительности опасных погодных явлений позволит решать вопросы требуемого количества работников и техники (грузовых машин, подъемных кранов, инструментов, проводов, опор и т. д.) необходимого для ликвидации аварийных ситуаций в кратчайшие сроки. В результате это обеспечит повышение качества и надежности энергоснабжения потребителей и сокращение времени на восстановительные работы по ликвидации последствий воздействия природных катаклизмов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Леонов, И. И. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года / И. И. Леонов, Н. Н. Соколикшина // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 4(382). – С. 69-83. – DOI 10.37162/2618-9631-2021-4-69-83*
2. *Farzahan M. Atmospheric Icing of Power Networks. // Springer Science+Business Media B.V. 2008*
3. *Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. The ERA5 global reanalysis. Q J R Meteorol Soc. 2020; 146: 1999– 2049.*
4. *Mansell, E.R., C.L. Ziegler, and E.C. Bruning, 2010: Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. J. Atmos. Sci., 67, 171–194. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JAS2965.1>*
5. *Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu. (2019). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 (No. NCAR/TN-556+STR).*

# Influence of Novaya Zemlya bora on processes in the ocean and heat exchange with the atmosphere: results of ocean-atmosphere-sea-waves coupled modeling

**Shestakova A.A.**

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: [shestakova.aa.92@gmail.com](mailto:shestakova.aa.92@gmail.com)

This study considers the influence of the Novaya Zemlya bora (strong downslope windstorm in the east of the Barents Sea) on the turbulent heat exchange between the atmosphere and the ocean and on processes in the ocean, as well as the sensitivity of turbulent fluxes during bora to various methods of taking into account the interaction between the atmosphere and the ocean. For this aim, a high-resolution numerical simulation of one winter bora episode was carried out using the COAWST (Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport) modeling system, which includes the atmospheric (WRF-ARW model), oceanic (ROMS model), and sea waves (SWAN model) components. As shown by the simulation results, in the fully coupled experiment, turbulent heat exchange is enhanced in comparison with the uncoupled experiment (by 3% on average over the region). This is due to the interaction of atmosphere with sea waves, and the results are highly sensitive to the choice of roughness parameterization. The influence of the interaction of the atmospheric and oceanic components on turbulent fluxes in this episode is small on average. Bora has a significant impact on the processes in the ocean directly near the coast, forming a strong coastal current and making a decisive contribution to the formation of dense waters. In the open sea, the bora, or rather, the redistribution of the wind and temperature fields caused by the orography of Novaya Zemlya, leads to a weakening of ocean mixing and to a lesser ocean heat content losses due to a decrease in turbulent heat exchange in comparison with the experiment with flat topography.

## Влияние новоземельской боры на процессы в океане и теплообмен с атмосферой: результаты совместного моделирования океана, атмосферы и морского волнения

**Шестакова А.А.**

Институт физики атмосферы им. Обухова РАН, Москва, Россия  
E-mail: [shestakova.aa.92@gmail.com](mailto:shestakova.aa.92@gmail.com)

Основная цель данной работы - оценка влияния новоземельской боры на турбулентные потоки тепла и на процессы в океане на основе совместного моделирования атмосферы, океана и морского волнения. Западный сектор российской Арктики, особенно Баренцево море, является энергоактивной зоной, эффект которой может быть ощутим не только на региональном масштабе. Сюда из Северной Атлантики распространяется теплая вода, что становится причиной увеличения турбулентного теплообмена морской поверхности с атмосферой. Особенно ярко этот процесс проявляется во время сильных ветров, повторяемость которых над акваторией Баренцева морей весьма велика. Этой проблеме уделяется много внимания, однако вопрос о влиянии мезомасштабных циркуляций, в частности орографических ветров, на энергообмен морской поверхности с атмосферой изучен пока достаточно слабо. Совместное моделирование атмосферы и океана с высоким разрешением в отсутствие данных наблюдений позволяет получить наиболее точные оценки турбулентного теплообмена. Следующие три задачи были рассмотрены в рамках этой работы: 1) Влияние учета совместного моделирования атмосферы, океана и волнения на результаты моделирования турбулентных потоков в условиях боры; 2) Влияние боры на турбулентный теплообмен океана с атмосферой и теплосодержание океана; 3) Влияние боры на перемешивание и циркуляцию океана.

Новоземельская бора – очень сильная и часто наблюдающаяся подветренная буря (Брызгин и Дементьев 1996, Shestakova et al. 2020). По данным метеостанции Малые Кармакулы, бора на западном побережье Новой Земли наблюдается в среднем 138 дней в году, при этом в 25 % случаев скорость ветра превышает 20 м/с (Shestakova et al. 2020). В данной работе представлены результаты моделирования одного эпизода боры со скоростью ветра до 34 м/с и порывами до 45 м/с, наблюдавшегося в декабре (когда бора уже становится сильной и довольно продолжительной, но западное побережье Новой Земли еще не полностью сковано льдом).



Все численные эксперименты проводились использованием модели COAWST (Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport) версии 3.6 (Warner et al. 2010). Эта система связывает модели атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting), модель океана ROMS (Regional Ocean Modeling System) и морского волнения SWAN (Simulating Waves Nearshore) и с помощью блока программ MCT (Model Coupling Toolkit) модели обмениваются данными друг с другом в онлайн режиме.

Модель океана получает от атмосферной модели потоки тепла, импульса, влаги, давления и солнечную радиацию (т.е. верхние граничные условия), а от волновой модели - параметры волнения для расчета перемешивания за счет волн. Атмосферная модель получает от океанской модели только температуру поверхности океана, а от волновой - параметры волнения для расчета параметра шероховатости. На настоящий момент в модели COAWST предусмотрено 3 различных параметризации шероховатости морского волнения. В параметризации (Taylor and Yelland 2001) коэффициент шероховатости зависит от крутизны волн, в (Oost et al. 2002) - от обратного возраста и длины волн, в (Drennan et al. 2003) - от обратного возраста и высоты волн. Наконец, волновая модель получает от атмосферной модели ветер, а от океанской – данные о течениях и уровне моря. Существует несколько параметризаций ветровой накачки в модели SWAN, в настоящей работе было протестировано две из них: Komen et al. (1984) и Janssen (1989,1991).

Для работы с моделью COAWST в Арктике было внесено несколько модификаций в исходный код. Так, в океанскую модель был добавлен блок морского льда (Budgell 2005), взятый из оригинальной версии модели ROMS и приспособленный для расчетов в рамках COAWST. Также в параметризацию пограничного слоя атмосферы QNSE (Quasi-normal Scale Elimination), которая показывала наилучшие результаты среди других параметризаций при моделировании подветренных бурь в Арктике (Shestakova 2021), была добавлена возможность расчета коэффициента шероховатости морской поверхности в зависимости от параметров морского волнения. Наконец, землепользование и коэффициент шероховатости для тундры на Новой Земле были уточнены согласно работе (Shestakova 2021) для более точного расчета скорости ветра на суше.

Численные эксперименты проводились с горизонтальным шагом сетки 3 км. Всего было проведено 8 экспериментов. Сравнение контрольного эксперимента с моделью WRF (“A”) и экспериментов с учетом обмена атмосферной и океанской моделей (“AO”), атмосферной и волновой моделями (“AW”), а также всех трех моделей (“AWO”) позволило оценить влияние различных подходов к связыванию моделей и необходимость учета волнения и океана при изучении турбулентных потоков в условиях боры. Еще одна серия экспериментов была направлена на оценку чувствительности результатов моделирования к параметризациям шероховатости (эксперименты “Taylor\_Yelland” и “Oost”) и ветровой накачки (эксперимент “Janssen”) (в других экспериментах использовалась параметризация шероховатости (Drennan et al. 2003) и ветровой накачки (Komen et al. 1984)). Наконец, для выявления влияния самой новоземельской боры проводилось сравнение эксперимента “AWO” с экспериментом “AWO flat”, в котором задавался плоский рельеф (т.е. бора и все орографические эффекты отсутствовали).

**Таблица 1.**

Средняя разность турбулентных потоков явного (H), скрытого (LE) и суммарного (H+LE) тепла (Вт/м<sup>2</sup>), потока импульса τ (Н/м<sup>2</sup>) и скорости ветра U10 (м/с) между экспериментами в районе Новой Земли. В скобках указана относительная разность, округленная до целых (в %).

	H	LE	H+LE	τ	U10
«AO» - «A»	1(0%)	1(1%)	1(0%)	0.00(0%)	0(0%)
«AW» - «A»	2(2%)	4(4%)	6(2%)	-0.01(-4%)	0.4 (3%)
«AWO» - «A»	3(2%)	4(4%)	7(3%)	-0.01(-4%)	0.3 (3%)
«Janssen» - «A»	3(2%)	5(4%)	8(3%)	-0.01(-3%)	0.3(3%)
«Taylor_Yelland» - «A»	5(3%)	4(4%)	9(3%)	0.00(1%)	0.0(0%)
«Oost» - «A»	8(5%)	8(8%)	16(6%)	0.02(7%)	-0.4(-3%)
«AWO» - «AWO_flat»	-27(-28%)	0(0%)	-28(-18%)	0.02(7%)	0.2(2%)

Эксперименты показали, что в среднем по области влияние учета взаимодействия океана и атмосферы на турбулентные потоки при боре близко к нулю (Табл.1). При учете взаимодействия атмосферы и волнения турбулентный теплообмен при боре усиливается (в среднем по области на 3%) (Табл.1) за счет увеличения коэффициента шероховатости при молодых волнах на расстоянии до 150 км от берега. Еще большее увеличение турбулентных потоков отмечается при использовании параметризации шероховатости Oost et al. (2002), в среднем на 6-7% по сравнению с контрольным экспериментом. Влияние параметризации ветровой накачки оказалось мало (Табл.1). Таким образом, в условиях новоземельской боры для оценки турбулентного теплообмена важно использовать совместное моделирование атмосферы и морского волнения, в то время как взаимодействием атмосферной и океанской моделей можно



пренебречь. Этот вывод должен быть уточнен за счет моделирования большего количества случаев для различных сезонов года.

Однако совместное моделирование атмосферы и океана при боре необходимо для адекватного воспроизведения процессов в океане. Во-первых, результаты моделирования показали, что бора приводит к усилению южного берегового течения (со скоростью до 0.9 м/с на поверхности) вдоль западного побережья Новой Земли в среднем по всей тоще на 0.1-0.3 м/с (по сравнению с экспериментом с плоским рельефом). Во-вторых, бора приводит к усилению перемешиванию вод у берега и существенному ослаблению перемешивания на отдалении от берега, где за счет эффектов орографии формируется зона затишья. Наконец, бора вносит определяющий вклад в формирование плотной воды у берегов Новой Земли. Это происходит за счет увеличения солёности воды при интенсивном испарении и формировании нового льда, а также в меньшей степени за счет охлаждения воды. Известно, что плотные воды, формирующиеся в полыньях на шельфе Новой Земли, стекают вниз по склону и становятся источником арктических водных масс (Martin and Cavalieri, 1989). Только в эксперименте с учетом боры солёность у берега достигала типичных значений для арктической промежуточной воды.

Бора способствует сохранению тепла в океане. Суммарный турбулентный теплообмен в эксперименте с учетом боры оказывается на 18% меньше (Табл.1), чем в плоском эксперименте, который симулирует условия холодного вторжения без орографических эффектов. Усиление ветра и турбулентных потоков при боре происходит только в прибрежной зоне, в то время как на большей части моделируемой области ветер (и турбулентных потоки) при наличии орографии оказывается слабее (за счет ветровой тени), чем в плоском эксперименте. Кроме того, небольшой адиабатический нагрев воздуха, особенно напротив северного острова архипелага, приводит к дополнительному ослаблению потока явного тепла при боре. В итоге среднее теплосодержание толщи океана при учете орографии оказывается выше (в среднем на 0.5%), чем в плоском эксперименте.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Брызгин, Н. Н., Дементьев, А. А. *Опасные метеорологические явления в Российской Арктике*. СПб.: Гидрометеоиздат, 1996
2. Budgell, W. *Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents sea region*. *Ocean Dynam.*, 2005, 55, 370–387.
3. Drennan, W., Graber, H., Hauser, D., and Quentin, C. *On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas*. *J. Geophys. Res.-Oceans*, 2003, 108, 8062
4. Janssen, P. A. *Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves*. *J. Phys. Oceanogr.*, 1989, 19(6), 745-754.
5. Janssen, P. A. *Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting*. *J. Phys. Oceanogr.*, 1991, 21(11), 1631-1642.
6. Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann *On the existence of a fully developed wind-sea spectrum*, *J. Phys. Oceanogr.*, 1984, 14, 1271-1285
7. Martin, S., Cavalieri, D. J. *Contributions of the Siberian shelf polynyas to the Arctic Ocean intermediate and deep water*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1989, 94(C9), 12725-12738.
8. Oost, W. A., Komen, G. J., Jacobs, C. M. J., and Van Oort, C. *New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE*. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 2002, 103, 409–438
9. Shestakova, A. A. (2021). *Impact of land surface roughness on downslope windstorm modelling in the Arctic*. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 95, 101244.
10. Shestakova, A. A., Toropov, P. A., Matveeva, T. A. *Climatology of extreme downslope windstorms in the Russian Arctic*. *Weather and Climate Extremes*, 2020, 28, 100256.
11. Taylor, P. K. and Yelland, M. J. *The Dependence of Sea Surface Roughness on the Height and Steepness of the Waves*, *J. Phys. Ocean.*, 2001, 31, 572–590
12. Warner, J.C., Armstrong, B., He, R., and Zambon, J.B., 2010, *Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system*: *Ocean Modeling*, v. 35, no. 3, p. 230-244.

# Prediction of habitat suitability for *Gentianopsis barbata* (Froel.) Ma in the Southern Urals under climate change

Kutueva A.G., Fedorov N.I., Muldashev A.A.

Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre RAS, Ufa, Russia  
E-mail: [aliacutueva@mail.ru](mailto:aliacutueva@mail.ru)

**G**entianopsis barbata is a rare species of the Pleistocene complex. In the Southern Urals, the species grows on the margins of wetlands, edges of wetland forests, lake shores, wet and solonchic meadows, and meadow depressions in the steppe. The impact of climatic changes on the habitat suitability in 23 localities of this species in the Southern Urals under moderate (RCP4.5) and extreme (RCP8.5) climate change scenarios [1] was simulated using the maximum entropy method (MaxEnt). We used an ensemble of four climate change models to predict the future distribution of the species: CCSM4 [2], NorESM1-M [3], MIROC-ESM [4], and INMCM4 [5]. Climate variables of CHELSA BIOCLIM [6], as well as characteristics of digital relief model [7] were used as predictors in modeling.

It has been established that in case of moderate climate change by 2050 in the known localities medium- and low-suitability habitat conditions will be preserved only in the mountain-forest zone, where by 2070 medium-suitability habitat conditions will be preserved only in 3 localities. With extreme climate change by 2050, the species is projected to persist only in localities in the mountain-forest zone, and habitat conditions will deteriorate to low-suitability. By 2070, habitat suitability in all known localities of this species is predicted to disappear. In the case of a moderate climate change scenario, it may be necessary to reintroduce some populations of *G. barbata* from the Pre-Urals to the mountain-forest zone. In the extreme climate change scenario, these measures will not be sufficient and introduction of the species into areas with artificial maintenance of the humidification regime will be necessary.

## REFERENCES:

1. Moss R.H., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J. A. ... & Zurek M. Towards new scenarios for the analysis of emissions: Climate change, impacts and response strategies //Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat (IPCC). 2008. 132 p.
2. Gent P. R., Danabasoglu G., Donner L.J., Holland M.M., Hunke E.C., Jayne S.R., Lawrence D.M. ... & Zhang M. The community climate system model version 4 //Journal of Climate – 2011. 24(19). P. 4973–4991.
3. Bentsen M., Bethke I., Debernard J.B., Iversen T., Kirkevåg A., Seland Ø., Drange H., Roelandt C. ... & Kristjansson J. E. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M–Part 1: description and basic evaluation of the physical climate //Geoscientific Model Development. 2013. 6(3). P. 687–720.
4. Watanabe S., Hajima K., Sudo T., Nagashima T., Takemura H., Okajima T... & Kawamiya M. MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. //Geosci Model Dev Discuss. 2011. 4(2). P. 1063–10128.
5. Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V. Simulating present-day climate with the INMCM4. 0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2010. 46(4). P. 414–31.
6. Karger D.N., Conrad O., Böhrner J. Climatologies at high resolution for the Earth's land surface areas //Scientific Data. 2017. V. 4. P. 170122.
7. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) //US Department of the Interior; US Geological Survey. 2011. P. 26.

# Прогноз влияния климатических изменений на пригодность условий местообитания *Gentianopsis barbata* (Froel.) Ma на Южном Урале

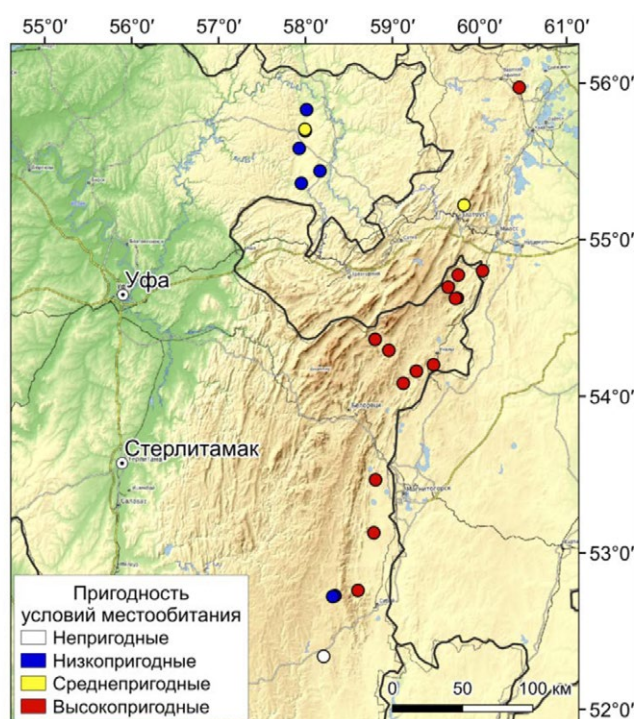
Кутуева А.Г., Федоров Н.И., Мулдашев А.А.

Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия  
E-mail: [aliacutueva@mail.ru](mailto:aliacutueva@mail.ru)

**G***entianopsis barbata* (горечавник бородатый) – редкий вид плейстоценового комплекса, произрастающий на Южном Урале по окраинам болот, опушкам заболоченных лесов, берегам озер, по заболоченным и солонцеватым лугам и луговым понижениям в степи [1, 2]. Вид внесен в Красные книги Республики Башкортостан [2], Челябинской [3] и Омской [4] областей. С использованием метода максимальной энтропии (MaxEnt) проведено моделирование влияния климатических изменений на пригодность условий местообитания в 23 локалитетах этого вида на Южном Урале. В качестве предикторов для построения модели использовались климатические переменные CHELSA BIOCLIM [5,6] и характеристики цифровой модели рельефа (GMTED2010) [7]. Для оценки предполагаемых изменений пригодности условий произрастания в середине (2040–2060 гг., далее – 2050 г.) и второй половине (2061–2080 гг., далее – 2070 г.) XXI века, были использованы два сценария – RCP4.5 и RCP8.5, соответствующие умеренному и сильному изменению климата [8]. Расчет проводился с использованием ансамбля четырех моделей изменения климата: CCSM4 [9], NorESM1-M [10], MIROC-ESM [11], INMCM4 [12]. Нижняя граница пригодности местообитания вида рассчитывалась по критерию «Maximum test sensitivity plus specificity».

Для статистической оценки модели использовался показатель AUC, который для построенной модели составил 0,95, что соответствует очень хорошему качеству модели [13]. Результаты оценки пригодности условий местообитания *G. barbata* в известных геопривязанных локалитетах на Южном Урале представлены на рисунке 1. Пригодность условий местообитания подразделена на четыре градации: непригодные (0–0,25), низкопригодные (0,26–0,50), среднепригодные (0,51–0,75) и высокопригодные (0,76–1,00). Из 23 известных локалитетов *G. barbata* 14 имели высокопригодные условия произрастания, 2 – среднепригодные, 6 – низкопригодные, а также 1 локалитет – непригодные условия местообитания. Последний локалитет находится на склоне берега реки Большой Бузавлык на южной границе распространения вида на Южном Урале (рис. 1).

Несмотря на то, что по литературным данным вид обладает толерантностью к периодической сухости экотопов [14], уже при умеренном изменении климата к 2050 г. прогнозируется исчезновение высокопригодных условий местообитания в локалитетах *G. barbata* (рис. 2А). К 2070 г. при умеренном изменении климата среднепригодные условия произрастания сохранятся только в 3 локалитетах в горно-лесной зоне (рис. 2Б). При сильном изменении климата уже к 2050 г. исчезнут все высоко- и среднепригодные условия местообитания во всех известных локалитетах (рис. 2В). Низкопригодные условия местообитания сохранятся только в локалитетах, находящихся в горно-лесной зоне и горно-лесостепной зоне на восточном макросклоне Южного Урала. К 2070 г. на территории Южного Урала прогнозируется исчезновение локалитетов с пригодными условиями местообитания (рис. 2Г). В случае длительного влияния сценария сильного изменения климата отдельные растения *G. barbata* могут сохраниться за счет своих особенностей жизненного цикла – его

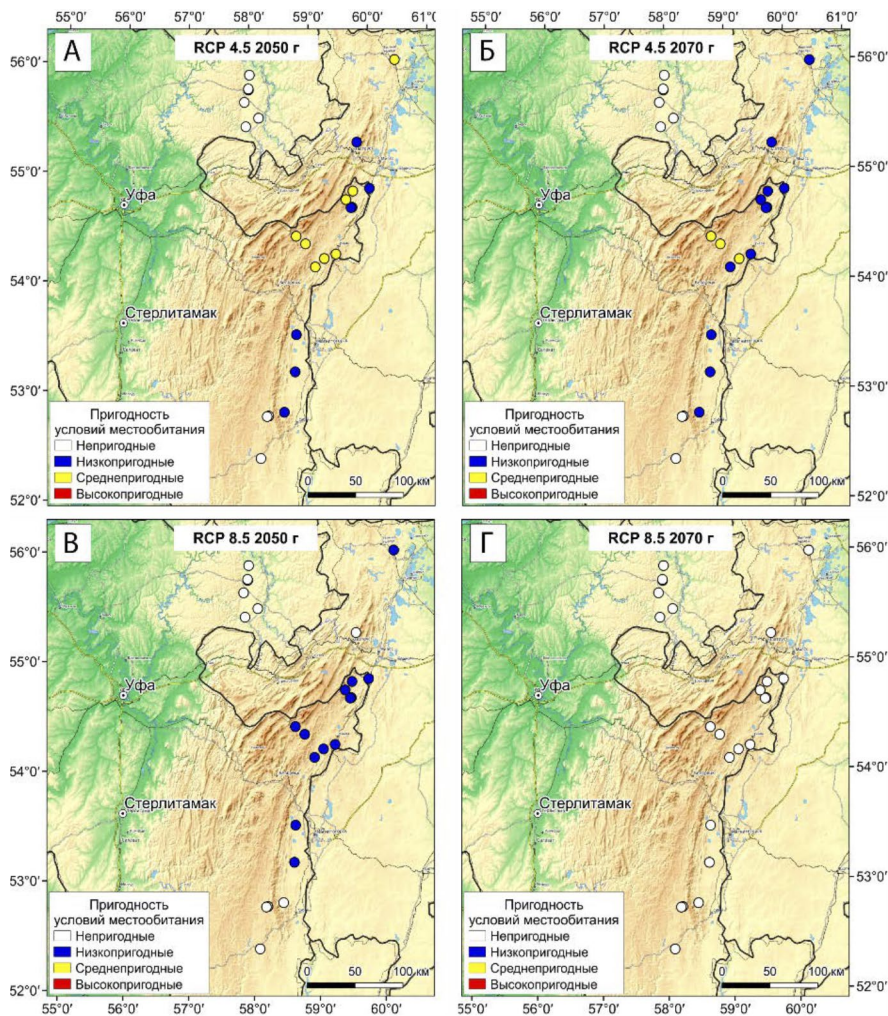


нени климата среднепригодные условия произрастания сохранятся только в 3 локалитетах в горно-лесной зоне (рис. 2Б). При сильном изменении климата уже к 2050 г. исчезнут все высоко- и среднепригодные условия местообитания во всех известных локалитетах (рис. 2В). Низкопригодные условия местообитания сохранятся только в локалитетах, находящихся в горно-лесной зоне и горно-лесостепной зоне на восточном макросклоне Южного Урала. К 2070 г. на территории Южного Урала прогнозируется исчезновение локалитетов с пригодными условиями местообитания (рис. 2Г). В случае длительного влияния сценария сильного изменения климата отдельные растения *G. barbata* могут сохраниться за счет своих особенностей жизненного цикла – его

**Рис. 1.**

Пригодность условий местообитания в известных локалитетах *Gentianopsis barbata* на Южном Урале в настоящее время.





**Рис. 2.** Прогноз пригодности условий местообитания в локалитетах *Gentianopsis barbata* на Южном Урале при умеренном (RCP4.5) (А, Б) и сильном (RCP8.5) (В, Г) изменении климата в середине (2050 г.) и во второй половине (2070 г.) XXI века. Кружками обозначены известные местонахождения вида.

прохождения в течение одного-двух вегетационных сезонов, что позволяет виду в локальных благоприятных условиях дойти до плодоношения. В этих условиях сохранение вида будет зависеть от сохранности и способности к проращению семян в более влажные годы.

В случае сценария умеренного изменения климата может возникнуть необходимость реинтродукции некоторых популяций *G. barbata* из Предуралья в горно-лесную зону. При сценарии сильного изменения климата этих мер будет недостаточно и будет необходима интродукция вида на территории с искусственным поддержанием режима увлажнения.

*Благодарности.* Основной материал для исследования собран в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме № АААА-А18-118022190060-6. Обработка и написание статьи выполнены при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки Республики Башкортостан НОЦ-РМГ-2021 «Создание методологических основ оценки баланса парниковых газов и определении потенциала депонирования углерода в экосистемах».

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Ивченко Т.Г., Знаменский С.Р. Экологическая структура растительных сообществ ключевых болот горно-таежного пояса Южного Урала //Экология. 2016. № 5. С. 346-352.
2. Мулдашев А.А., Галеева А.Х. Горечавочник бородатый //Красная книга Республики Башкортостан: Т. 1: Растения и грибы /под ред. В.Б. Мартыненко. Москва: Студия онлайн, 2021. С. 119.
3. Красная книга Челябинской области. Животные. Растения. Грибы /Отв. ред. А.В. Лагунов. М.: ООО "Реарт", 2017. 504 с.
4. Красная книга Омской области /Отв. ред. Сидоров Г.Н., Пликина Н.В. – Омск: Изд-во ОмГПУ, 2015. 636 с.
5. Booth T.H., Nix H.A., Busby J.R., Hutchinson M.F. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies // Diversity and Distributions. 2014. V. 20 (1). P. 1-9.
6. Karger D.N., Conrad O., Böhner J. Climatologies at high resolution for the Earth's land surface areas //Scientific Data. 2017. V. 4. P. 170122.

7. Danielson J.J., Gesch D.B. *Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010)* //US Department of the Interior; US Geological Survey. 2011. P. 26.
8. Moss R.H., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J. A., ... & Zurek M. *Towards new scenarios for the analysis of emissions: Climate change, impacts and response strategies* //Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat (IPCC). 2008. 132 p.
9. Gent P. R., Danabasoglu G., Donner L.J., Holland M.M., Hunke E.C., Jayne S.R., Lawrence D.M. ... & Zhang M. *The community climate system model version 4* //Journal of Climate – 2011. 24(19). P. 4973–4991.
10. Bentsen M., Bethke I., Debernard J.B., Iversen T., Kirkevåg A., Seland Ø., Drange H., Roelandt C. ... & Kristjansson J. E. *The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M–Part 1: description and basic evaluation of the physical climate.* //Geoscientific Model Development. 2013. 6(3). P. 687–720.
11. Watanabe S., Hajima K., Sudo T., Nagashima T., Takemura H., Okajima T... & Kawamiya M. *MI-ROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments.* //Geosci Model Dev Discuss. 2011. 4(2). P. 1063–10128.
12. Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V. *Simulating present-day climate with the INMCM4. 0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations.* //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2010. 46(4). P. 414–31.
13. Swets, J.A. *Measuring the accuracy of diagnostic systems.* Science. 1988. 240. P. 1285–1293.
14. Ермаков Н.Б. *Анализ состава ценофлор континентальных гемибореальных лесов Северной Азии* //Turczaninowia. 2006. Т. 9. № 4. С. 5–92.

## Verification of the simplified snow cover model on the surface of a mountain glacier during the accumulation season

Drozdov E.D.<sup>1</sup>, Toropov P.A.<sup>2,1</sup>, Turkov D.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

E-mail: drozdov.jeka@yandex.ru

Mountain glaciers are extremely sensitive to climatic changes and are characterized by significant degradation rates [3,4]. Therefore, an important task is to reproduce the glaciers and mountain snow cover dynamics in numerical models of the Earth system.

A wide range of effects that determine the dynamics of snow cover is reflected in a variety of numerical models of snow cover [5]. However, most of them are aimed either at lowland hydrology or at avalanche forecasts. When describing the snow cover on the surface of a mountain glacier, processes such as snowdrift transport and sublimation, as well as the thermal effect of moraines and rocks, which affect the distribution, formation, and melting of snow cover, come to the fore.

Therefore, was decided to start creating a specialized model of snow cover on the surface of a mountain glacier, in which the processes in high-mountain conditions are significant, while the costs of computer resources turn out to be low for climatic time scale modelling. In the future, the parameterizations used in this model, if successful, can be implemented in more developed and popular domestic snow cover models like SPONSOR, SWAP or INM RAS.

In created snow cover model, the process processes such as penetration of solar radiation and diffusion of water vapor deep into the snow cover are not considered. Calculation of coefficients of thermal conductivity and heat capacity of snow is carried out according to the empirical formulas proposed by Yen in [7]. At the same time, the main feature of this version of the model is the numerical algorithm based on [2] to take into account in surface heat balance heat losses for sublimation of ice crystals during blizzards. That's why the intensity of snowdrift transport was used as one of input parameters of the model.

Also, unique meteorological and snow cover measurements were carried out in the ablation zone of the Garabashi glacier on the southern slope of Mount Elbrus from January 27 to February 24, 2022. Modern automatic equipment (AMS HOBO and Campbell) was used, but the particular note was the ISAW FlowCapt FC4 7 acoustic snowdrift sensor to obtain the intensity of snowdrift transport in a near-surface 1 meter layer. In addition, iButton sensors were used to measure the thermal regime of snow at depths up to 30 cm.

Verification of the developed model was based on observational data of the thermal regime of snow in comparison with the snow cover block of the SPONSOR hydrological model [1]. It was shown that both models reproduce the snow surface temperature with high accuracy. The correlation coefficients are 0.87 and 0.92, and the

standard errors are 3.3 and 3.1°C for SPONSOR and the presented model, respectively. At the same time, both models predominantly overestimate the surface temperature in the daytime and underestimate it at night.

However, at all depths in snow, the presented model systematically underestimates the values of snow temperature and, at the same time, overestimates the amplitude of fluctuations. The maximum discrepancy between the calculated and measured values is observed at depth about 10 cm, where the temperature is underestimated by an average of 4.5°C, and the root-mean-square error is 3.6°C. At the same time, the SPONSOR intermediate level model shows a more accurate correspondence to the measured temperature values: the root-mean-square error at all levels does not exceed 1.5°C. However, it is worth noting that the final values after 20 days of calculations at all presented depths are close to the measured values and are almost identical to the results of the SPONSOR model, which indicates the stability of the model. This suggests that on climatic day time scales, the thermal regime of snow will remain close to the real one. So, the presented snow cover model requires further development (particularly, by adding calculations of snow mass balance) and verification on a multi-year time scale.

*The study is supported by RFBR grant 20-05-00176.*

## Верификация упрощенной модели снежного покрова на поверхности горного ледника в сезон аккумуляции

Дроздов Е.Д.<sup>1</sup>, Торопов П.А.<sup>2,1</sup>, Турков Д.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

E-mail: drozdov.jeka@yandex.ru

Одним из наиболее ярких проявлений отклика геосистем на глобальные изменения климата является деградация горного оледенения, которая в последние десятилетия характеризуется существенными темпами [3]. Согласно наиболее жестким сценариям IPCC к началу следующего столетия оледенения в большинстве горно-ледниковых регионов планеты исчезнет полностью [4]. Поскольку талые ледниковые воды являются важной составляющей речного стока, они вносят ощутимый вклад в рост уровня Мирового океана, а в некоторых регионах являются стратегически важным ресурсом пресной воды [6], учет горного оледенения в моделях Земной системы является актуальной задачей.

Для полноценного моделирования динамики горного оледенения необходим детальный учет снежного покрова на поверхности ледников. При описании снежного покрова на поверхности горного ледника на первый план выходят такие процессы, как метелевый перенос и сублимация во время сильных метелей, а также тепловое воздействие морен и скал, которые через механизм турбулентного теплообмена оказывают существенное влияние на формирование и таяние снежного покрова в горных районах. Существует достаточно много развитых моделей снежного покрова [5], направленных на задачи равнинной гидрологии или прогноза лавин, однако их чрезмерная физическая полнота и технические сложности, связанные с объединением модели ледника, вынуждают создать относительно простой и вычислительно эффективный модуль снежного покрова, в первую очередь учитывающий физические процессы, характерные для высокогорных условий. В перспективе параметризации «горных эффектов», успешно реализованные и использованные в данной модели, могут быть реализованы в более развитых и популярных отечественных моделях снежного покрова (SPONSOR, SWAP, ИВМ-РАН).

### ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Представленная модель снежного покрова может быть отнесена к классу упрощенных схем промежуточной сложности. Одномерное уравнение теплопроводности решается с использованием неявной конечно-разностной схемы. Такие процессы, как проникновение солнечной радиации и диффузия водяного пара вглубь снежного покрова, в данной версии модели не рассматриваются. Расчет коэффициентов теплопроводности и теплоемкости снега производится по эмпирическим формулам Йена, предложенным в [7].

В то же время особое внимание в модели уделяется бюджету потоков тепла на поверхности. Основной отличительной особенностью данной версии модели является использование численного алгоритма на основе [2] для учета затрат тепла на сублимацию ледяных кристаллов при метелях. В его основе лежит оценка скорости изменения массы сублимирующей частицы с использованием распределения метелевых частиц по размерам и интенсивности метелевого переноса. Плотности турбулентных потоков явного и скрытого тепла восстанавливаются с использованием теории подобия Монина-Обухова.



В качестве граничных условий на поверхности задаются основные метеорологические параметры, нисходящая коротковолновая и длинноволновая радиация, а также суммарный метелевый перенос снега и стандартное отклонение скорости приземного ветра. Для начального момента определяются вертикальные профили температуры и плотности снежного покрова. В рамках данной работы шаги сетки по пространству и времени были выбраны 10 см и 1 час соответственно.

## РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЙ И ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для верификации разработанной модели и использования достоверных граничных условий были проведены комплексные метеорологические и снегомерные наблюдения в области абляции ледника Гарабаши на южном склоне горы Эльбрус с 27 января по 24 февраля 2022 года. При этом использовалось современное автоматическое оборудование (АМС НОВО и Campbell), позволившее получить данные об основных метеорологических параметрах и потоках солнечной радиации с дискретностью 1 минута. Особого внимания заслуживает применение акустического метелемера ISAW FlowCapt FC4 7 для получения мгновенной и средней интенсивности потока ледяных кристаллов в приповерхностном слое толщиной 1 метр. Кроме того, с помощью датчиков iButton были проведены измерения термического режима снега на глубинах 10, 20 и 30 см. Вертикальное распределение плотности снежного покрова было получено по результатам шурфирования.

## ВЕРИФИКАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Верификация разработанной модели проводилась на основе данных наблюдений за термическим режимом снега в сравнении с более развитым блоком снежного покрова гидрологической модели SPONSOR [1]. Уникальная измерительная кампания позволила провести численные эксперименты с обеими моделями для 20-дневного периода (с 5 по 24 февраля 2022 года), что превышает масштаб синоптической изменчивости.

Качество воспроизведения теплового баланса поверхности снежного покрова может быть оценено на основе сравнения наблюдаемой и рассчитанной температур поверхности снега. Заметно, что обе модели с высокой точностью воспроизводят временную изменчивость температуры поверхности снега (Рис. 1). Коэффициенты корреляции составляют 0.87 и 0.92, а среднеквадратические ошибки 3.3 и 3.1 °С для SPONSOR и представленной модели соответственно. При этом обе модели преимущественно завышают значения температуры поверхности в дневное время и занижают в ночное.

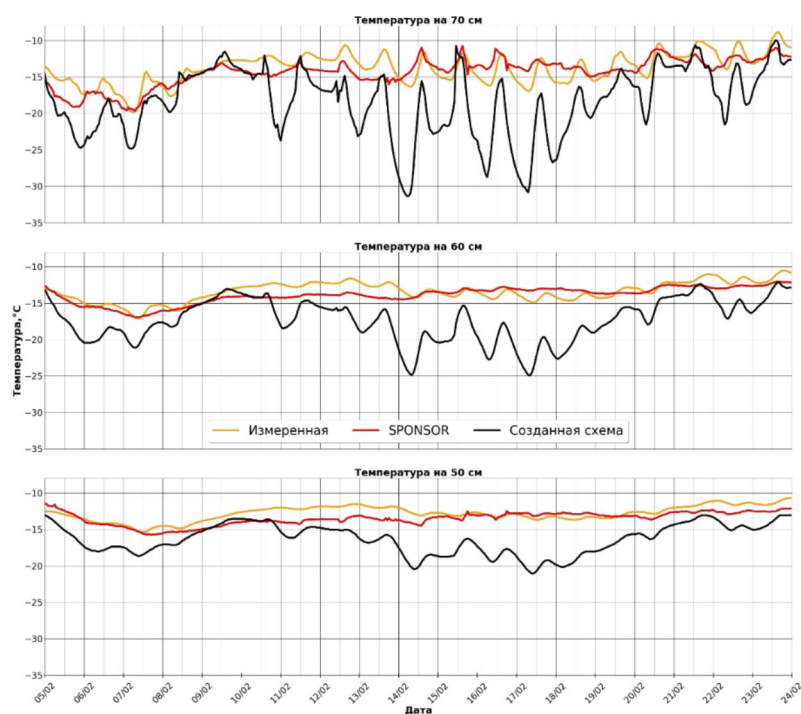


Рис. 1.

График временной изменчивости температуры поверхности снега по данным наблюдений и результатам моделирования.

Однако результаты при воспроизведении пространственно-временной изменчивости температуры толщи снега на глубинах до 30 см (Рис. 2) оказываются не столь удачными. Так, на всех глубинах представленная модель систематически занижает значения температуры снега на глубинах и при этом завышает амплитуду колебаний. Максимальное несоответствие наблюдается на уровне 70 см, где температура занижается в среднем на 4.5 °С, а среднеквадратическая ошибка составляет 3.6 °С. В то же время модель SPONSOR показывает более точное соответствие измеренным значениям температуры: среднеквадратическая ошибка на всех уровнях не превышает 1.5 °С при среднем занижении температуры снега не более чем на 1 °С. Однако, стоит отметить, что итоговые значения после 20 дней расчетов на всех представленных глубинах оказываются близкими к измеренным и практически идентичны результатам модели SPONSOR, что говорит об устойчивости нашей модели. Это позволяет предположить, что при решении задач прогноза климатического масштаба термический режим снега будет оставаться близким к реальному.





**Рис. 2.** График временной изменчивости температуры снега на различных глубинах по данным наблюдений и результатам моделирования.

Таким образом, представленная модель показала высокое качество воспроизведения температуры поверхности снежного покрова в том числе в сравнении с моделью SPONSOR. В то же время схема расчета температурного режима снежной толщи требует дальнейшего развития, а полученные результаты могут быть признаны лишь удовлетворительными. Значительные расхождения между предложенной моделью, данными наблюдений и SPONSOR скорее всего связаны с отсутствием в данной версии модели уравнения переноса жидкой воды в толще снежного покрова, и, прежде всего, ее фазовых переходов. Также необходимо добавление в схему разработанной модели расчета компонент баланса массы снега с последующей верификацией на многолетнем и декадном временном масштабе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-05-00176.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // *Криосфера Земли*. - 2009. - Т. XIII. №4. - С.69-79.
2. Bintanja R. Snowdrift Sublimation in a Katabatic Wind Region of the Antarctic Ice Sheet // *J. Appl. Meteorol.* - 2001. - Vol. 40. - p. 1952-1966.
3. Hock R., Rasul G., [et al.]. "High Mountain Areas," in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019)* - 2019.
4. Krinner G., Derksen C., [et al.]. *ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks* // *Geosci. Model Dev.* - 2018. - 11. - p. 5027-5049.
5. Marzeion B., Jarosch A.H., Gregory J.M. *Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change.* // *Cryosphere*. - 2014. - 8. - p. 59-71.
6. Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. *Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia).* // *Nature Climate Change*. - 2012. - 2(10). - 725-731.
7. Yen Y.-C. *Review of thermal properties of snow, ice and sea ice* // *CRREL Rep. 81-10, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, 1981.* - 27 p.

## СЕКЦИЯ 4

Структура  
и динамика  
геофизических  
пограничных слоёв

## SESSION 4

Structure  
and dynamics  
of geophysical  
boundary layers

## The influence of suspended snow particles on the friction velocity in large-eddy simulation model

**Bychkova V.I.**<sup>1,3,4</sup>, **Mortikov E.V.**<sup>1,2,4</sup>,  
**Debolskiy A.V.**<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

E-mail: [Er-riad@mail.ru](mailto:Er-riad@mail.ru)

**A**s snow transport is a nonlinear function of the wind velocity, accuracy of transport models strongly depends on wind data. This shows the importance of microscale wind field modeling where a high temporal and spatial resolution is preferable. Large Eddy Simulation (LES) is a promising modeling technique for turbulent flows and drifting snow particles [4, 5].

This study focuses on the influence of drifting and blowing snow on the on the turbulent regime in the atmospheric surface layer. To solve this problem, a LES model developed at the Research Computing Center and the Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS was used [6-8]. To keep a snow particle in suspension at a certain average height above the surface, the residual upward turbulent stress exerted on the particle must balance the downward force of gravitation. This requires expenditure of the surface-layer turbulence, which is manifested by decreases in turbulence-intensity and turbulent-length scales [1, 10]. This mechanism is conceptually similar to a thermally stable turbulent surface layer in which negative buoyancy destroys turbulence.

In order to test the effect of increasing stability, several series of experiments with different concentrations of snow particles were calculated. The main parameters of the model launch corresponded to the GABLES-1 experiment [2]: the geostrophic wind speed was 18 m/s, cooling is absent. The blowing snow particles are spheres (with radius  $8.86 \cdot 10^{-6}$ ) with the density of ice ( $900 \text{ kg/m}^3$ ), since snow crystal structures formed during precipitation are quickly reduced by mechanical abrasion. Influence of drifting and blowing snow on the on the turbulent regime was taken into account by recalculating the Monin-Obukhov length according to [10]. With an increase in the average particle concentration for the lower level of the LES model, stability increases, the friction velocity decreases (с 0.6 при  $S=0$  до 0.1 при  $S=15 \cdot 10^{-6}$ ). Such a change is in well agreement with the theory. Concentration values decrease sharply if particle

concentrations are calculated as a function of wind speed [3, 9]. So, to include the description of snow particles in the LES model, it is necessary to find another way to calculate the concentration at the level of saltation, more resistant to velocity changes.

*Development of a numerical description suspended snow particles was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 21-71-30003, large-eddy simulation model development and numerical experiments calculation was supported by Russian Ministry of Science and Higher Education (agreement No. 075-15-2019-1621).*

#### REFERENCES:

1. Adams, G. E. and G. L. Weatherly, 1981. Some effects of suspended sediment stratification on an oceanic bottom boundary layer. *J Geoph. Res.*, 86.
2. Cuxart, J., et al., Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 118(2):273–303.
3. Déry, S. J. and Yau, M. K. 'A BULK blowing snow model'. *Boundary-Layer Meteorology* 93: 237–251, 1999.
4. C. D. Groot Zwaafstink, M. Diebold, S. Horender, J. Overney ·G. Lieberherr ·M. B. Parlange, M. Lehnin, *Modelling Small-Scale Drifting Snow with a Lagrangian Stochastic Model Based on Large-Eddy Simulations. Boundary-Layer Meteorol (2014) 153:117-139.*
5. Gian Lieberherr. *Modeling snow drift in the turbulent boundary layer*, 2010
6. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2021. V. 147. № 737. P. 2233–2243.
7. Mortikov E.V. Численное моделирование движения ледяного кля в стратифицированной жидкости // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2016. Т. 52. № 1. С. 120–128.
8. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russ. J. Numer. Analysis Math. Model.* 2019. V. 34. № 2. P. 119–132.
9. Pomeroy, J. W.: 1988, *Wind Transport of Snow, Ph.D. Thesis, Division of Hydrology, Saskatoon, University of Saskatchewan, Canada, 226 pp.*
10. Wamser C., Lykosov V.N. *On the friction velocity during blowing snow. Beitr. Phys. Atmosph., 1995.*

## Влияние взвешенных снежных частиц на расчет скорости трения в вихреразрешающей модели

Бычкова В.И.<sup>1,3,4</sup>, Мортиков Е.В.<sup>1,2,4</sup>, Дебольский А.В.<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

E-mail: Er-riad@mail.ru

Наличие в воздухе взвешенных частиц может существенно изменить его свойства. Как только снежные частицы оторвались от поверхности в воздушный поток добавляется твердая снежная фаза. Наличие поднятых снежинок изменяет плотность воздуха, его термодинамические и оптические свойства, увеличивает стратификацию воздуха. Ветровое перераспределение снега приводит накоплению его с подветренной стороны хребтов, топографических впадин и более высокой растительности, дорожных насыпей. Бэнголд [6] выделил три способа передвижения частиц: влечение, сальтацию и суспензию. С середины прошлого века активно стала развиваться теория двухфазных потоков с твердой фазой. Теория движения взвешенных частиц в турбулентном потоке была развита в работах Г.И. Баренблатта [1]. Важным результатом Г.И. Баренблатта было доказательство уменьшения пульсаций двухфазного потока при увеличении концентрации твердой фазы. Большой вклад в понимание процессов сальтации и суспензии снежных и песчаных частиц внесли А.К. Дюнин, Э.К. Бютнер, 1978 [2,3]. С конца прошлого века создаются и развиваются математические модели переноса снега. Назовем 4 наиболее известных модели метели – ПЕКТУК [10], WINDBLAST [17], SNOWSTORM [7], BSM. [19]. Это одномерные по вертикали модели предполагают, что движение частиц определено турбулентной диффузией и силой тяжести. Снежинки представлены сферами с плотностью льда, горизонтальная их скорость равна скорости потока, взаимодействием между частицами пренебрегают. Указанные модели описывают процесс суспензии частиц, описание процесса сальтации сводится к заданию граничного

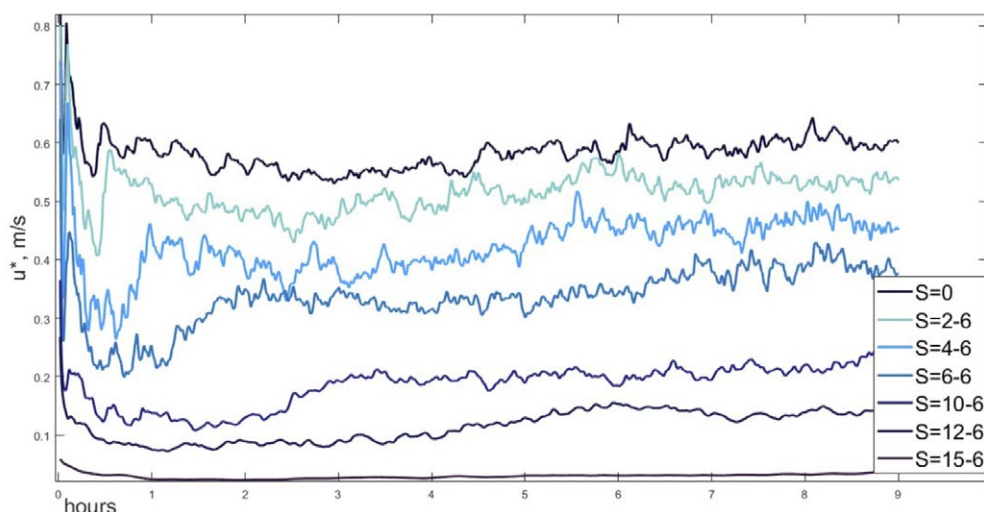
условия на нижней границе. Большое количество трудов, посвящённых зависимостям скорости ветра и концентрации взвешенных частиц опубликовано Помероем и соавторами [18, 19,20].

Поскольку перенос снега является нелинейной функцией скорости ветра, точность моделей переноса сильно зависит от данных о ветре. Это показывает важность микромасштабного моделирования ветрового поля, где предпочтительно высокое временное и пространственное разрешение. Последние 20 лет активно развивается моделирование снежных заносов вокруг зданий, основанное, как правило, на RANS моделях [21]. Наиболее перспективный метод описания динамики взвешенных частиц в турбулентном потоке – вихреразрешающее (LES large-eddy simulation) моделирование. Результаты расчетов концентрации снежных частиц с использованием LES моделей приведены в [11, 12].

В настоящей работе предпринята попытка описать и оценить влияние снежных частиц на характеристики турбулентности приземного слоя атмосферы с использованием LES модели атмосферного пограничного слоя, разрабатываемая в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН на основе единого гидродинамического кода, объединяющего как LES-, так и DNS- и RANS- подходы для расчета геофизических турбулентных течений при высоком пространственном и временном разрешении [13, 15, 16, 22]. В численной модели используются консервативные конечно-разностные схемы [14] второго порядка точности для аппроксимации по пространству на прямоугольных сетках. Метод дробных шагов [8] применяется для интегрирования уравнений движения и неразрывности по времени при явной аппроксимации схемой Адамса-Башфорта третьего порядка операторов переноса импульса и тепла.

Чтобы удержать снежную частицу во взвешенном состоянии на определенной средней высоте над поверхностью, остаточное восходящее турбулентное напряжение, оказываемое на частицу, должно уравновешивать нисходящую силу гравитации. Это требует уменьшения турбулентности в поверхностном слое, что проявляется в уменьшении интенсивности турбулентности и масштабов турбулентной длины [4]. Поскольку содержание снежных частиц постепенно уменьшается с высотой, поверхностный слой устойчиво расслаивается и турбулентность уменьшается [23]. Этот механизм, по сути, аналогичен термически стабильному турбулентному поверхностному слою, в котором отрицательная плавучесть разрушает турбулентность. Что бы проверить эффект увеличения стабильности было проведено несколько серий экспериментов с разной концентрацией снежных частиц. Основные параметры запуска модели соответствовали эксперименту GABLS-1 [9]: скорость геострафического ветра 18 м/с, охлаждение отсутствовало. Частицы снега описываются как сферы радиусом  $8.86 \cdot 10^{-6}$  с плотностью 900 кг/м<sup>3</sup>. Влияние концентрации частиц на турбулентность описывалось путем пересчета длины Монино-Обухова согласно [23].

На рис. 1. приведены графики изменения  $u^*$  со временем в зависимости от средней для нижнего уровня модели концентрации частиц в воздухе в начальный момент (S).



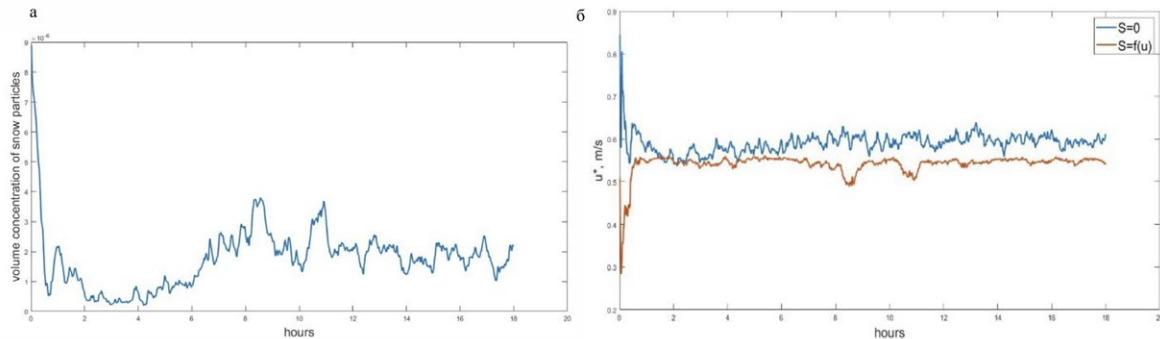
**Рис. 1.** Зависимость  $u^*$  от концентрации снежных частиц S.

При увеличении средней для нижнего уровня LES модели концентрации частиц с  $2 \cdot 10^{-6}$  до  $15 \cdot 10^{-6}$  устойчивость увеличивается, скорость трения падает, что хорошо согласуется с теорией. В описанных экспериментах, для определения обратного влияния частиц, их концентрация задавалась фиксированная. Однако, концентрация частиц, покидающих уровень сальтации ( $S_{salt}$ ), зависит от скорости воздуха. Есть несколько способов определения концентрации частиц на уровне сальтации [7, 10, 18]. Все они зависят от превышения скорости некоего критического значения, зависящего от типа снега. В данном случае был выбран  $S_{salt}$  определили как:



$$S_{salt} = a * \left(1 - \frac{U_t}{U_{10}}\right)^b,$$

где  $a=5$ ,  $b=2.59$ ,  $U_{10}$  – скорость ветра на 10 метрах,  $U_t$  – критическое значение скорости ветра [20].



**Рис.2.** Изменение средней концентрации частиц (а) и  $u^*$  (б).

По графикам видно, что в начале расчета значения концентрации частиц падают. При таких низких концентрациях обратное влияние частиц на стратификацию не значительно – отличие в  $u^*$  между экспериментом без частиц ( $S=0$ ) практически отсутствует. Наличие частиц увеличивает степень устойчивости атмосферы, уменьшается  $U_{10}$ , что, в свою очередь, ведет к уменьшению концентрации частиц при расчете на следующем шаге. После семи часов работы модели концентрация начинает увеличиваться – увеличивается и отклик скорости трения. Возможно, такой расчет концентрации частиц не совсем соответствует действительности из-за быстрого падения значений. И при включении описания снежных частиц в LES модель необходим поиск другого способа расчета концентрации на уровне сальтации, более устойчивого к изменению скорости.

*Разработка численного описания взвешенных снежных частиц выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант No. 21-71-30003), разработка вихререшающей модели и проведение численных экспериментов выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2019-1621)*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Баренблатт Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 44 с.
2. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 158 с.
3. Дюнин А.К. Механика Метелей, Издательство Сибирского отделения АН СССР, Новосибирск, 1963, 377 с.
4. Adams, G. E. and G. L. Weatherly, 1981. Some effects of suspended sediment stratification on an oceanic bottom boundary layer. *J Geoph. Res.*, 86.
5. Bagnold R.A. The transport of Sand by Wind. *Geographical Journal*. V. 89, 1937, №5.
6. Bintanja, R.: 2000a, 'Snowdrift Suspension and Atmospheric Turbulence. Part I: Theoretical Background and Model Description', *Boundary-Layer Meteorol.* 95, 343–368.
7. Bintanja, R.: 2000b, 'Snowdrift Suspension and Atmospheric Turbulence. Part II: Results of Model Simulations', *Boundary-Layer Meteorol.* 95, 369–395.
8. Brown D.L., Cortez R., Minion M.L. Accurate projection methods for the incompressible Navier-Stokes equations // *J. Comp. Phys.* 2001. V. 168. P. 464–499
9. Cuxart, J., et al., Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 118(2):273–303.
10. Déry, S. J. and Yau, M. K. 'A BULK blowing snow model'. *Boundary-Layer Meteorology* 93: 237–251, 1999.
11. C. D. Groot Zwaafink, M. Diebold, S. Horender, J. Overney ·G. Lieberherr ·M. B. Parlange, M. Lehnin, Modelling Small-Scale Drifting Snow with a Lagrangian Stochastic Model Based on Large-Eddy Simulations. *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 153:117-139.
12. Gian Lieberherr. Modeling snow drift in the turbulent boundary layer, 2010
13. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2021. V. 147. № 737. P. 2233–2243.
14. Morinishi Y., Lund T.S., Vasilyev O.V., Moin P. Fully conservative higher order finite difference schemes for incompressible flows // *J. Comp. Phys.* 1998. V. 143. P. 90–124.
15. Mortikov E.V. Численное моделирование движения ледяного кля в стратифицированной жидкости // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2016. Т. 52. № 1. С. 120–128.

16. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russ. J. Numer. Analysis Math. Model.* 2019. V. 34. № 2. P. 119–132.
17. Mann, G. W.: 1998, *Surface Heat and Water Vapour Budgets over Antarctica*, Ph.D. Thesis, The Environment Center, The University of Leeds, U.K., 279 pp.
18. Pomeroy, J. W.: 1988, *Wind Transport of Snow*, Ph.D. Thesis, Division of Hydrology, Saskatoon, University of Saskatchewan, Canada, 226 pp.
19. Pomeroy, J. W., Gray, D. M., and Landine, P. G.: 1993, 'The Prairie Blowing Snow Model: Characteristics, Validation, Operation', *J. Hydrol.* 144, 165–192.
20. Pomeroy J. W., Li L. *Prairie and arctic areal snow cover mass balance using a blowing snow model, Journal of geophysical research*, vol. 105, pp. 619-634, 2000.
21. Tominaga Y., *Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives, Cold Regions Science and Technology, Volume 150, June 2018, Pages 2-14*
22. Tkachenko, E. V., Debolskiy, A. V., and Mortikov, E. V., *Intercomparison of Subgrid Scale Models in Large-Eddy Simulation of Sunset Atmospheric Boundary Layer Turbulence: Computational Aspects. Lobachevskii Journal of Mathematics (2021), 42(7) pp1580-1595*
23. Wamser C., Lykosov V.N. *On the friction velocity during blowing snow. Beitr. Phys. Atmosph., 1995.*

## Improvements of PBL scheme in INMCM5 climate model

Debolskiy A.V.<sup>1,3</sup>, Mortikov E.V.<sup>1,2</sup>, Glazunov A.V.<sup>2,1</sup>, Volodin E.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: [evgeny.mortikov@gmail.com](mailto:evgeny.mortikov@gmail.com)

Using the local one-dimensional atmospheric boundary layer (ABL) model of vertical turbulent diffusion, we performed simulations of the moderately stable and strongly stable atmospheric boundary layer using scenarios previously used for numerical experiments with eddy-resolving turbulence models (Beare et al., 2006; Glazunov et al., 2016; van der Linden et al., 2019). We tested a locally one-dimensional ABL models with first-order turbulent closures while substituting various stability functions proposed in the literature and used in climate and weather prediction models. Based on these tests, it has been shown that the best fit with eddy-resolving simulation data is given by models with stability functions that allow for turbulence maintenance at large Richardson gradient numbers (Zilitinkevich et al., 2013; Esau and Byrkjedal 2007) and calibrated on eddy-resolving and direct numerical simulation data (Mortikov et al., 2019; Zilitinkevich et al., 2019).

It is shown that these turbulent diffusion models are significantly superior to the parameterization based on (Louis 1979) and currently used in the INMCM5 climate model. The turbulent diffusion models that have performed best in independent tests have been selected for testing within the climate system model.

The parameterizations of vertical mixing in the ABL selected on the basis of the described independent tests were included in the INMCM5 model. Test simulations with the climate model were carried out to investigate the influence of the new parameterization on the reproduction of the modern climate. The basic version of the INMCM5 model was used. In order to obtain climatic averages and to be able to compare with ERA-Interim reanalysis data (Dee et al. 2009), simulations were carried out from 1996 to 2014. For both the annual and seasonal averages, the largest changes in the model-reproduced climate were found in the polar regions in surface temperature and sensible heat flux. This is consistent with occurrence and lifetime of stable boundary layers in high latitudes.

The improvement of the parameterization of the stable atmospheric boundary layer reduced the average error in the model reproduction of the surface temperature from  $-0.45^{\circ}\text{C}$  to  $-0.25^{\circ}\text{C}$ , and the root-mean-square error by 8% compared to the reanalysis. These improvements are mainly due to the reproduction of a warmer Arctic and colder Antarctic continent compared to those observed in simulations with the baseline version of INMCM5 (Volodin et al. 2017), similar improvements are observed in other meteorological parameters.

*Authors want to acknowledge partial funding by Russian Foundation for Basic Research (RFBR project No 20-05-00776) for the LES experiments, sensitivity analysis and closure development were performed with support of Russian Science Foundation (RSF No 20-17-00190).*

## REFERENCES:

1. Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., Golaz J.C., Jimenez M.A. et al. An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer // *Bound.-Layer Meteorol.* 2006. V. 118, N 2. P. 247-272.
2. Esau, I. N., & Byrkjedal, Ø. (2007). Application of a large-eddy simulation database to optimisation of first-order closures for neutral and stably stratified boundary layers // *Boundary-layer meteorology*, 125(2), 207-225.
3. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.
4. Louis, J. F. (1979). A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere // *Boundary-Layer Meteorology*, 17(2), 187-202.
5. Van der Linden S.J.A., Edwards J.M., van Heerwaarden C.C., Vignon E., Genthon C., Petenko I., Baas P., Jonker H.J.J., van de Wiel B.J.H. Large-Eddy Simulations of the Steady Wintertime Antarctic Boundary Layer // *Bound.-Layer Meteorol.* 2019. V. 173. P. 165-192.
6. Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin, S. V., Galin, V. Y., Lykosov, V. N., Gritsun, A. S., ... and Iakovlev, N. G. (2017). Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate dynamics*, 49(11), 3715-3734.
7. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I., Esau I. A hierarchy of energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably stratified geophysical flows // *Bound.-Layer Meteorol.* 2013. V. 146. P. 341-373.
8. Zilitinkevich, S., Druzhinin, O., Glazunov, A., Kadantsev, E., Mortikov, E., Repina, I., & Troitskaya, Y. (2019). Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stably stratified sheared flows. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(4), 2489-2496.
9. Mortikov, E. V., Glazunov, A. V., & Lykosov, V. N. (2019). Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 34(2), 119-132.

## Улучшения в параметризации турбулентного перемешивания в модели INMCM5

Дебольский А.В.<sup>1,3</sup>, Мортиков Е.В.<sup>1,2</sup>, Глазунов А.В.<sup>2,1</sup>, Володин Е.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия  
<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: [evgeny.mortikov@gmail.com](mailto:evgeny.mortikov@gmail.com)

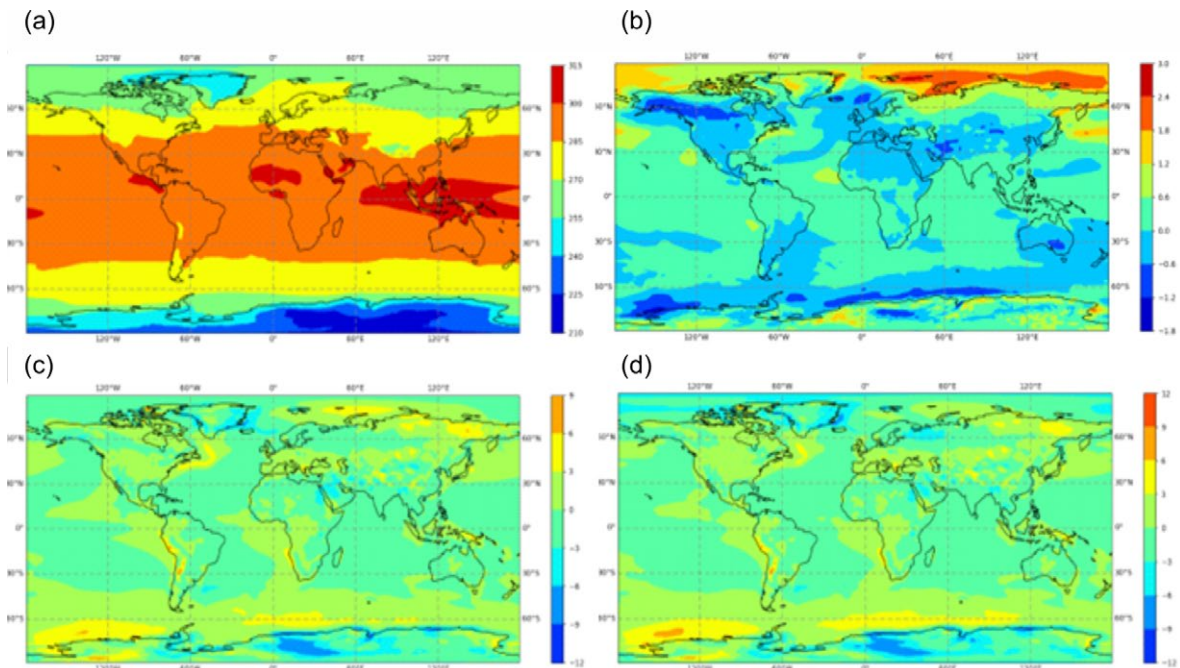
При помощи локально-одномерной модели атмосферного пограничного слоя (АПС) проведены расчеты умеренно-устойчивого и сильно-устойчивого пограничного слоя атмосферы по сценариям, использовавшимся ранее для численных экспериментов с вихререзающими моделями турбулентности (Beare et al., 2006; Glazunov et al., 2016; van der Linden et al., 2019)). Тестировалась локально-одномерная модель АПС с замыканием первого порядка при подстановке в нее различных функций устойчивости, предлагаемых в литературе и используемых в моделях климата и прогноза погоды. На основе этих тестов было показано, что наилучшее совпадение с данными вихререзающего моделирования дают модели с функциями устойчивости, допускающими поддержание турбулентности при больших градиентных числах Ричардсона (Zilitinkevich et al., 2013; Esau and Byrkjedal 2007) и откалиброванных на данных вихререзающего и прямого численного моделирования (Mortikov et al., 2019; Zilitinkevich et al., 2019).

Показано, что эти модели турбулентной диффузии значительно превосходят по качеству параметризацию, построенную на основе работы (Louis 1979), и используемую на настоящий момент в климатической модели INMCM5. Модели турбулентной диффузии наилучшим образом зарекомендовавшие себя в независимых тестах были отобраны для тестирования в рамках модели климатической системы.

Помимо тестирования параметризаций диффузии, таким же образом, проверялась точность различных схем расчета потоков с поверхности. По результатам этих тестов наиболее точные результаты показала модель, построенная на основе универсальных функций (Zilitinkevich et al., 2013), откалиброванных на данных прямого численного моделирования в работе (Zilitinkevich et al., 2019). Эта модель допускает



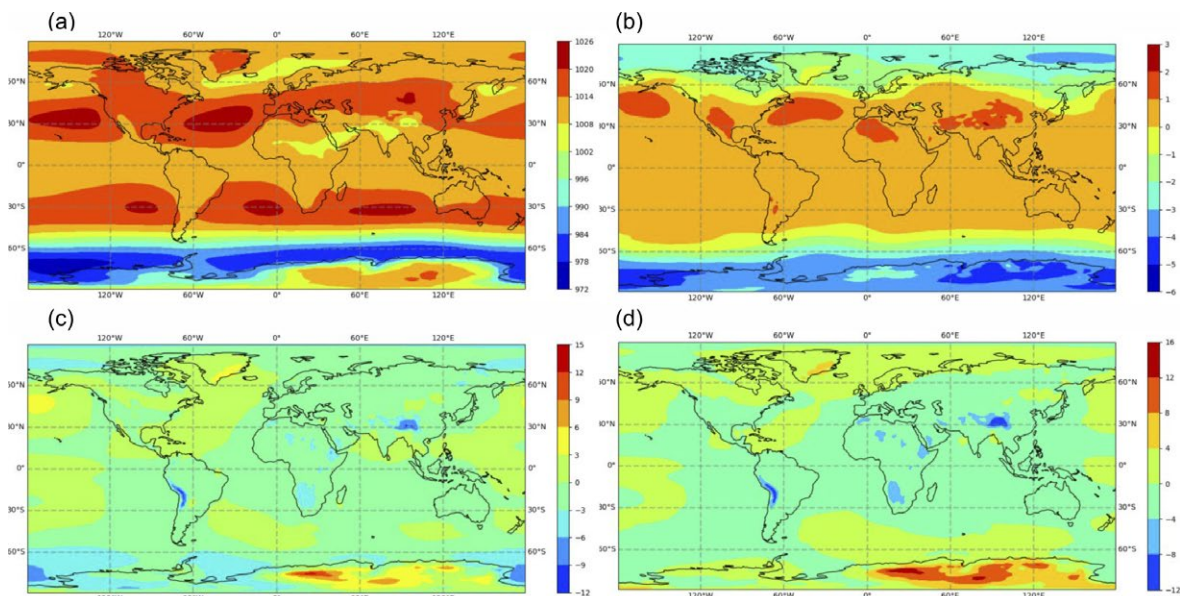
поддержание турбулентности при больших значениях числа Ричардсона, вычисленного по разнице температур между атмосферой и подстилающей поверхностью. Включение в схему расчета поверхностных потоков этой параметризации, а также моделей, допускающих зависимость термического параметра шероховатости от числа Ричардсона и обеспечивающих сходный эффект поддержания турбулентности в режимах сильной устойчивости, намечено в дальнейшей работе по улучшению модели.



**Рис. 1.**

(a) - Воспроизведение поля приземной температуры воздуха в версии модели с новой параметризацией пограничного слоя (используются функции устойчивости из (Esau Vjyrkedal 2007)). (b) - разница в средней многолетней приземной температуре между новой и базовой версией модели INMCM5 (c) средняя ошибка приземной температуры в новой версии модели (d) тоже, но в базовой версии.

Выбранные на основе описанных независимых тестов параметризации вертикального перемешивания в АПС включены в модель Земной системы ИВМ РАН. Проведены тестовые расчеты с климатической моделью с целью исследования влияния новой параметризации на воспроизведение современ-



**Рис. 2.**

(a) - Воспроизведение поля приземного давления воздуха в версии модели с новой параметризацией пограничного слоя (используются функции устойчивости из (Esau Vjyrkedal 2007)). (b) - разница в среднем многолетнем приземном давлении между новой и базовой версией модели INMCM5 (c) средняя ошибка приземного давления в новой версии модели (d) тоже, но в базовой версии.



ного климата. Была использована базовая версия модели INMCM5. Для получения климатических средних и для возможности сравнения с данными реанализа ERA-Interim (Dee et al. 2009), расчеты проводились с 1996-го по 2014 год. Как в случае среднегодовых значений, так и для среднесезонных наибольшие изменения в воспроизводимом моделью климате обнаружены в полярных областях в полях приземной и поверхностной температуры и явного потока тепла. Это согласуется с высокой частотой и временем жизни устойчивых пограничных слоев в этих районах. Так разница между двумя версиями модели в Арктике достигает 3°C и –1.8°C в Антарктиде в поле среднегодовой температуры. Амплитуда этих различий увеличивается в осенний и зимний сезон летнего полушария. Стоит отметить, что в полях приземной скорости ветра, наибольшие изменения обнаружены в районе циркумполярного течения в Южном полушарии, где наблюдается усиление ветра в новой версии модели.

Замена параметризации устойчивого пограничного слоя атмосферы позволила уменьшить среднюю ошибку в воспроизведении моделью приземной температуры, по сравнению с реанализом почти в 2 раза с –0.45°C до –0.25°C, и среднеквадратичную ошибку на 8%. Данные улучшения в основном связаны с воспроизведением более теплой Арктики и более холодного Антарктического континента по сравнению с наблюдаемыми в расчетах с базовой версией INMCM5 (Volodin et al. 2017), похожие улучшения наблюдаются и в других метеовеличинах (например, средняя ошибка в приземном давлении уменьшилась с –19гПа до –9гПа). Сравнение результатов моделирования с данными ERA-Interim и сравнение старой и новой версий модели между собой приведены на рис. 1 (приземная температура) и рис.2 (приземное давление).

*Работа по верификации одномерных моделей и вихререзрешающему моделированию поддержана грантом РФФИ №20-05-00776. Тестирование параметризаций в климатической модели поддержано в рамках гранта РФФ № 20-17-00190.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., Golaz J.C., Jimenez M.A. et al. An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer // *Bound.-Layer Meteorol.* 2006. V. 118, N 2. P. 247-272.
2. Esau, I. N., & Byrkjedal, Ø. (2007). Application of a large-eddy simulation database to optimisation of first-order closures for neutral and stably stratified boundary layers // *Boundary-layer meteorology*, 125(2), 207-225.
3. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.
4. Louis, J. F. (1979). A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere // *Boundary-Layer Meteorology*, 17(2), 187-202.
5. Van der Linden S.J.A., Edwards J.M., van Heerwaarden C.C., Vignon E., Genthon C., Petenko I., Baas P., Jonker H.J.J., van de Wiel B.J.H. Large-Eddy Simulations of the Steady Wintertime Antarctic Boundary Layer // *Bound.-Layer Meteorol.* 2019. V. 173. P. 165-192.
6. Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin, S. V., Galin, V. Y., Lykossov, V. N., Gritsun, A. S., ... and Iakovlev, N. G. (2017). Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate dynamics*, 49(11), 3715-3734.
7. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleerorin N., Rogachevskii I., Esau I. A hierarchy of energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably stratified geophysical flows // *Bound.-Layer Meteorol.* 2013. V. 146. P. 341-373.
8. Zilitinkevich, S., Druzhinin, O., Glazunov, A., Kadantsev, E., Mortikov, E., Repina, I., & Troitskaya, Y. (2019). Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stably stratified sheared flows. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(4), 2489-2496.
9. Mortikov, E. V., Glazunov, A. V., & Lykosov, V. N. (2019). Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure–strain correlations. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 34(2), 119-132.



# A simple description of turbulent transport in a stably stratified fluid and its application to modeling the thermohydrodynamics and biogeochemistry of inland waters

Gladskikh D.S.<sup>1,2,3</sup>, Mortikov E.V.<sup>2,3,4</sup>, Soustova I.A.<sup>1</sup>, Troitskaya Yu.I.<sup>1</sup>, Ostrovsky L.A.<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>5</sup>University of Colorado Boulder, USA

E-mail: [daria.gladskikh@gmail.com](mailto:daria.gladskikh@gmail.com)

In this study, we consider the problem of correctly describing turbulence in a stratified fluid and propose a modified model of turbulent transport constructed on the basis of  $k$ - $\varepsilon$ -closure using models that take into account the two-way transformation of the kinetic and potential energy of turbulent fluctuations.

Using a model of unsteady turbulent flows in a stably stratified fluid (Ostrovsky and Troitskaya, 1987), a parameterization of the turbulent Prandtl number is obtained in the form of a functional dependence on the gradient Richardson number. The parameterization made it possible to modify the  $k$ - $\varepsilon$ -scheme in order to take into account the contribution of the velocity shear and density stratification to turbulence and remove the restriction on the description of turbulence at large values of the gradient Richardson number.

To assess the influence of the proposed parameterization on the description of mixing processes in inland waters, a three-dimensional numerical model of thermohydrodynamics was used, which is based on the Reynolds-averaged system of equations in the Boussinesq approximation and hydrostatics (Mortikov, 2016; Mortikov et al., 2019; Gladskikh et al., 2021), where the  $k$ - $\varepsilon$ -closure is used to calculate the vertical turbulent exchange coefficients. Two model configurations were considered: an idealized setting (a reservoir with a rectangular cross section, constant wind speed and direction, neglecting the effects of shortwave radiation) and a model configuration for the Finnish lake Kuivajärvi. In both cases, the results obtained using the standard closure (where the turbulent Prandtl number was set constant) and the modified one (where the obtained dependence was used) were compared.

The results of calculations using the modified model show the sensitivity of mixing description to parameterization. In the case of using the standard model, turbulence below the thermocline was suppressed by buoyancy forces, and molecular diffusion was insufficient to transport through the thermocline. At the same time, for the modernized model, which takes into account the increase in the Prandtl number due to the increase in the turbulent transfer coefficient at large values of  $Ri$ , there was energy transfer through the thermocline. It is important to emphasize that taking into account the parameterization to a smoothing of all sharp changes in the vertical distributions of the turbulent kinetic energy, the temperature gradient, and the thickness of the transition layer.

*The work was supported by the RFBR (20-05-00776).*

## REFERENCES:

1. Ostrovsky L.A., Troitskaya Yu.I. (1987) Model of turbulent transfer and the dynamics of turbulence in a stratified shear flux. *Izv Akad Nauk SSSR, Fiz Atmos Okeana*. 3:101–104.
2. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. V. 52. P. 108–115.
3. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2019. V. 34, № 2. P.1–14
4. Gladskikh D.S., Stepanenko V.M., Mortikov E.V. (2021) The Effect of the Horizontal Dimensions of Inland 397 Water Bodies on the Thickness of the Upper Mixed Layer. *Water Resour* 48:226–234

# Простое описание турбулентного переноса в устойчиво стратифицированной жидкости и его применение к моделированию термогидродинамики и биогеохимии внутренних водоемов

Гладских Д.С.<sup>1,2,3</sup>, Мортиков Е.В.<sup>2,3,4</sup>, Соустова И.А.<sup>1</sup>, Троицкая Ю.И.<sup>1</sup>, Островский Л.А.<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Научно-Исследовательский Вычислительный Центр Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>University of Colorado Boulder, USA

E-mail: [daria.gladskikh@gmail.com](mailto:daria.gladskikh@gmail.com)

Важнейшим аспектом в численном моделировании геофизических пограничных слоев является корректное описание процессов турбулентного перемешивания. При исследовании взаимодействия атмосферы и водоемов суши следует учитывать, что обрушение и сдвиговая неустойчивость крупномасштабных течений, поверхностных и внутренних волн приводят к генерации мелкомасштабной турбулентности, а турбулентное перемешивание может приводить к формированию тонкой структуры с областями резких градиентов гидрофизических величин.

В настоящем исследовании рассматривается задача корректного описания турбулентности в стратифицированной жидкости, и предложена модифицированная модель турбулентного переноса, сконструированная на основе  $k$ - $\varepsilon$ -замыкания с привлечением моделей, учитывающих двустороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергии турбулентных пульсаций. В качестве таких моделей рассмотрены: модель нестационарных турбулентных течений в стратифицированной жидкости Л.А. Островского и Ю.И. Троицкой (Островский и Троицкая, 1987), построенная на решении уравнения для функции распределения вероятности значений гидрофизических полей, и эквивалентная ей модель С.С. Зилитинкевича (Zilitinkevich et al. 2007; Zilitinkevich et al. 2013), в основе которой лежат балансные уравнения для энергий и потоков. Эти модели позволяют снять ограничения на существование турбулентности при больших числах Ричардсона, при этом зависимости  $Pr_T(Ri)$  в EFB-closure С.С. Зилитинкевича и в работе Л.А. Островского и Ю.И. Троицкой эквивалентны.

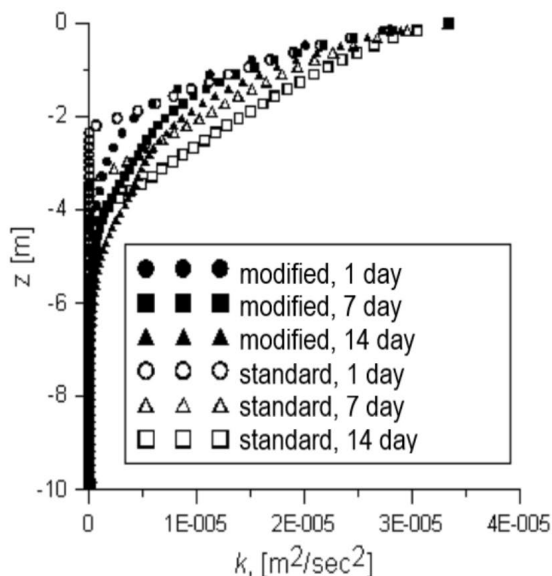
С использованием модели нестационарных турбулентных течений в устойчиво стратифицированной жидкости получена параметризация турбулентного числа Прандтля в виде функциональной зависимости от градиентного числа Ричардсона:

$$Pr_T(Ri) = \frac{(4 - 3R) Ri + 1 + \left( ((4 - 3R) Ri + 1)^2 - 4Ri \right)^{\frac{1}{2}}}{2}$$

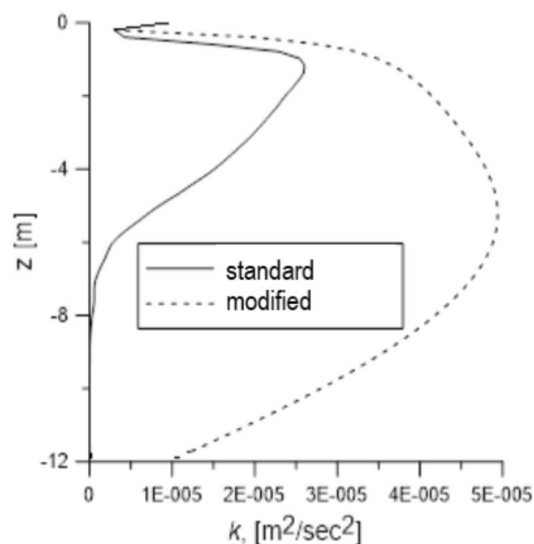
Полученная зависимость позволила модифицировать  $k$ - $\varepsilon$ -схему с целью учета вклада сдвига скорости и плотностной стратификации в турбулентность и снять ограничение на описание турбулентности при больших значениях градиентного числа Ричардсона.

Для оценки влияния предложенной параметризации на описание процессов перемешивания во внутренних водоемах использовалась трехмерная численная модель термогидродинамики, основой которой является осредненная по Рейнольдсу система уравнений в приближении Буссинеска и гидростатики (Mortikov, 2016; Mortikov et al., 2019; Гладских и др., 2021), где для расчета коэффициентов вертикального турбулентного обмена используется  $k$ - $\varepsilon$ -замыкание. Были рассмотрены две конфигурации модели: идеализированная постановка (водоем с прямоугольным сечением, постоянной скоростью и направлением ветра, пренебрежение эффектами коротковолновой радиации) и конфигурация модели для финского озера Куйвяярви. В обоих случаях сравнивались результаты, полученные при использовании стандартного замыкания (где турбулентное число Прандтля было задано постоянным) и модифицированного (где использовалось приведенное выше выражение). На рис. 1 показаны профили кинетической энергии турбулентности в различные дни расчета в идеализированной постановке, а на рис. 2 – в постановке с привлечением натуральных данных озера Куйвяярви (через 1 расчетные сутки после начала численного эксперимента).

Результаты расчетов с применением модифицированной модели показывают чувствительность перемешивания к параметризации  $Pr_T(Ri)$ . В процессе численного эксперимента число Ричардсона значительно меняется в диапазоне от  $\sim 0.001$  до  $\sim 100-1000$ , достигая больших значений уже на небольшой глубине. В случае использования стандартной модели турбулентность ниже термоклина подавлялась силами плавучести, а молекулярной диффузии было недостаточно для переноса через термоклин. В то



**Рис. 1.** Вертикальное распределение кинетической энергии турбулентности в разные дни расчета с помощью стандартной и модифицированной схем перемешивания в численном эксперименте с идеализированной постановкой.



**Рис. 2.** Вертикальное распределение кинетической энергии турбулентности в зависимости от схемы перемешивания в численном эксперименте с привлечением натуральных данных озера Куйваярви.

же время для модернизированной модели, учитывающей рост числа Прандтля за счет роста коэффициента турбулентного переноса при больших значениях  $Ri$ , перенос энергии через термоклин существовал. Важно подчеркнуть, что учет параметризации приводит к сглаживанию всех резких изменений в вертикальных распределениях турбулентной кинетической энергии и градиента температуры, а также к увеличению толщины слоя скачка. Полученные результаты связаны с особенностями данной параметризации, из которой следует существование турбулентности при значениях  $Ri \gg 1$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (20-05-00776).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Островский Л.А., Троицкая Ю.И. Модель турбулентного переноса и динамика турбулентности в стратифицированном сдвиговом потоке // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. № 3. С. 1031-104.
2. Zilitinkevich, S.S., Elperin, T., Kleorin, N., and Rogachevskii, I., "Energy- and Flux-Budget (EFB) turbulence closure models for stably-stratified flows. Part I: Steady-state, homogeneous regimes," *Boundary-Layer Meteorol.*, 2007, vol. 125, pp. 167–191.
3. Zilitinkevich, S.S., Elperin, T., Kleorin, N., Rogachevskii, I., and Esau, I., "A hierarchy of Energy and Flux-Budget (EFB) turbulence closure models for stably-stratified flows," *Boundary-Layer Meteorol.*, 2007, vol. 125, pp. 167–191.
4. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. V. 52. P. 108-115.
5. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. V. 52. P. 108-115.
6. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* 2019. V. 34, № 2. P.1-14
7. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.М. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. // *Водные ресурсы.* 2021. Т. 48. № 2. С. 155-163.



# Submesoscale structures in the boundary layer of the atmosphere: dynamics and influence on dust emission from the underlying surface of arid zones in the south of Russia

Vazaeva N.<sup>1,2</sup>, Chkhetiani O.<sup>1</sup>, Kramar V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: ifanataly@gmail.com

The study of submesoscale eddy structures, with a spatial scale from tens to hundreds of meters and a time scale from tens of seconds to minutes, is of great interest, since such eddy structures constantly exist in the atmospheric boundary layer (ABL), where there is always a significant vertical wind shear. In a section parallel to the surface, these structures, also called streaks, appear as alternating low and high velocity bands stretching in the direction of the average wind velocity. Their generation is associated with the development of non-modal perturbations in the stratified Ekman layer, which experience intense algebraic growth over finite time intervals.

The existence of streaks leads to an intensification of dust emission from the underlying surface, as evidenced by the measurement data of aerosol concentrations in the near-surface layer and the concentration profiles obtained during expeditions organized by IAP RAS in the arid territories of southern Russia. The increase in dust removal is associated with an increase in the vertical components of the velocity, as well as in the pressure gradient, leading to the “loosening” of the particles of the upper layer of the underlying surface, partial turbulence of the surface layer, and detachment of a larger amount of aerosol. In the results of numerical simulation, this conclusion is well visualized by an increase in the mass concentration of dust particles in the calculation area when modeling taking into account the action of coherent vortex structures: such structures must be taken into account in the ABL parameterization schemes. Accordingly, data on their scales and dynamic characteristics are of great interest.

Confident and detailed remote sensing of streaks in the surface layer, where acoustic sounding was previously limited by the technical capabilities of sodars, became possible due to a high-resolution Doppler mini-sodar (HRMS) with high reliability and good data accuracy. In the HRMS measurement data, after averaging, submesoscale coherent structures are clearly identified. The main large time scale is well fixed 5-7 minutes for 2017, 6-8 minutes for 2018, 7-10 minutes for 2019, observed in all 3 components of the velocity field. A noticeable value of helicity in the ABL can be one of the identifiers for the presence of intense vortex motions. Velocity frequency spectra measured (a) with a Gill Wind Master Pro HS Part 1951-PK-020 sonic anemometer and (b) with a HRMS correlate well with each other in the scale matching region. At low frequencies, the spectrum has a slope close to  $-1$ ; as the frequency increases, the spectrum has a slope close to  $-5/3$ . The presence of such spectra is directly related to the development of streaks in the ABL [Chkhetiani et al., 2019].

Thus, the conditions and mechanisms for the generation and maintenance of submesoscale coherent structures, although still not fully elucidated, can be identified from the results of processing the experimental HRMS data. ABL modeling with coherent structures shows an intensification of dust emission from the underlying surface. Streaks make a significant contribution to the exchange processes of ABL. It is important to take them into account when developing new schemes for parameterization of subgrid processes in the “gray” zone, in particular, aerosol emission. The study of the mechanisms of exchange processes under various meteorological conditions is necessary to increase the accuracy of ABL modeling.

*This work was supported by Russian Science Foundation, project no. 20-17-00214.*

## REFERENCES:

1. Chkhetiani O.G., Vazaeva N.V., *On Algebraic Perturbations in the Atmospheric Boundary Layer Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(5), pp.432-445, 2019

# Субмезомасштабные структуры в пограничном слое атмосферы: динамика и влияние на эмиссию пыли с подстилающей поверхности аридных зон юга России

Вазаева Н.В.<sup>1,2</sup>, Чхетиани О.Г.<sup>1</sup>, Крамар В.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Пыжевский пер., 3, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул, д.5, стр. 1, Москва, Россия

E-mail: ifanataly@gmail.com

Изучение субмезомасштабных вихревых структур, с пространственным масштабом от десятков до сотен метров и временным масштабом от десятков секунд до минут, представляет большой интерес, поскольку такие вихревые структуры постоянно существуют в атмосферном пограничном слое (АПС), где всегда имеется значительный вертикальный сдвиг скорости ветра. В сечении, параллельном поверхности, эти структуры, также называемые стриками, выглядят как чередование полос низкой и высокой скорости движения, вытянутых в направлении средней скорости ветра. Их образование связывается с развитием немодальных возмущений в стратифицированном экмановском слое, испытывающих интенсивный алгебраический рост за конечные промежутки времени.

Существование стриков приводит к интенсификации эмиссии пыли с подстилающей поверхности, на что указывают данные измерений концентрации аэрозолей в приповерхностном слое и профили концентраций, полученных в ходе организованных ИФА РАН экспедиций на аридных территориях юга России. Усиление выноса пыли связано с увеличением вертикальных составляющих скорости, а также градиента давления, приводящего к «расшатыванию» частиц верхнего слоя подстилающей поверхности, частичной турбулизации приземного слоя и отрыву большого количества аэрозоля. В результатах численного моделирования этот вывод хорошо визуализируется увеличением массовой концентрации частиц пыли в области расчета при моделировании с учетом действия когерентных вихревых структур: такие структуры необходимо учитывать в схемах параметризаций АПС. Соответственно, данные об их масштабах и динамических характеристиках представляют большой интерес.

На наличие стриков указывают также данные о флуктуациях скорости и температуры в АПС, которые демонстрируют спектральные зависимости с наклоном, близким к  $k-1$  [Kader, Yaglom, 1991]. Несмотря на их давнее наблюдение в численных моделях, надежная и детальная экспериментальная регистрация таких структур в АПС была отмечена относительно недавно [Drobinski et al., 2004]. По мнению наблюдателей, именно с этими структурами связаны наблюдаемые энергетические спектры с показателем степени  $-1$ . Физические механизмы укрепления и поддержания таких структур обычно связаны со сдвиговыми неустойчивостями [Drobinski, Foster, 2003] или с их конвективной аналогией [Никитин, Чернышенко, 1997], где роль температурного поля играют турбулентные напряжения Рейнольдса. В

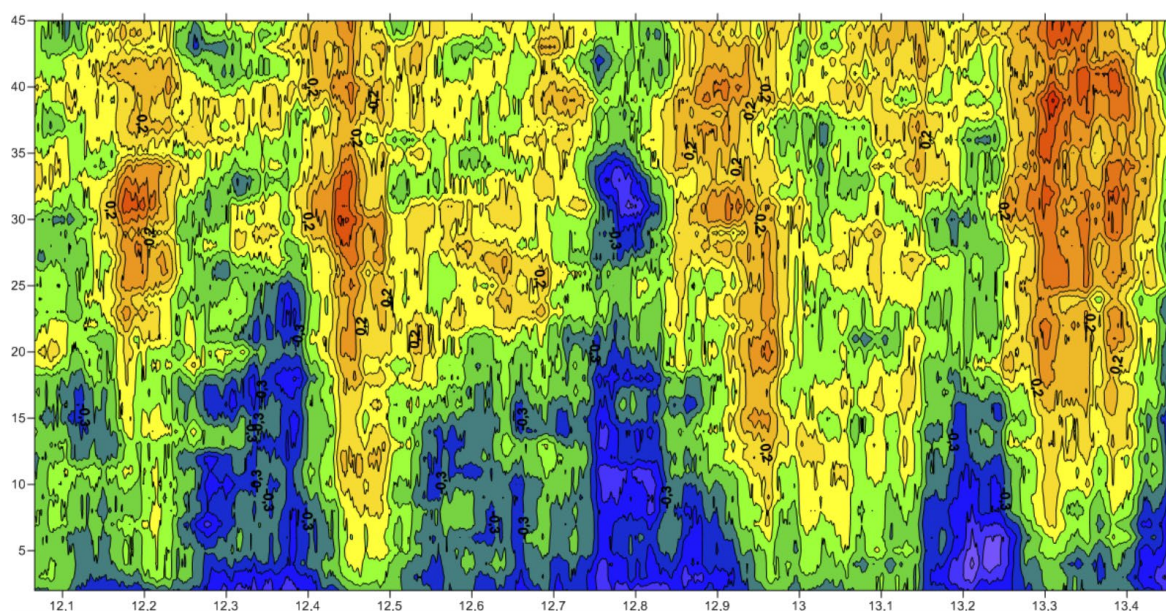


Рис. 1.

Вертикальное поле скорости для часовой записи, выполненной минисодаром приземного слоя от 26 июля 2017 года, 12.00-13.30, с 4 минутным осреднением.

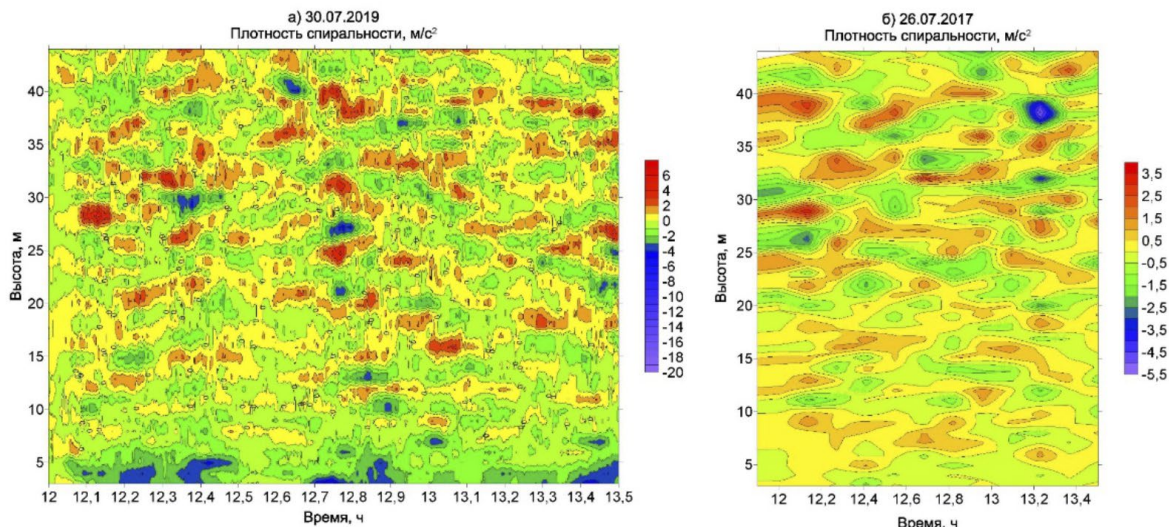


стриках происходит до 25 % турбулентной диссипации энергии. В некоторой литературе эти структуры также называются крупномасштабной турбулентностью.

Уверенная и детальная дистанционная регистрация стриков в приземном слое, где ранее акустическое зондирование ограничивалось техническими возможностями содаров, в настоящем исследовании стала возможной благодаря доплеровскому минисодару высокого разрешения (ВРМС) с высокой достоверностью и хорошей точностью данных. ВРМС использовался в летний период 2017-2019, 2021 гг. на Цимлянской научной станции, данные достоверны на высотах 2-45 м с разрешением 1 м по высоте и 1 с по времени. ВРМС фиксирует стрики с основным крупным временным масштабом 5-10 мин. и соответствующим пространственным масштабом 300-500 м, определяемым через среднюю скорость ветра, переносящего структуры. В данных измерений ВРМС после осреднения четко идентифицируются субмезомасштабные когерентные структуры. Хорошо фиксируется основной крупный временной масштаб 5-7 минут для 2017 г., 6-8 минут для 2018 г., 7-10 минут для 2019 г., наблюдаемый во всех 3-х компонентах поля скорости (вертикальное поле скорости для 2017 г. показано на Рис. 1).

Заметное значения спиральности в АПС может быть одним из идентификаторов присутствия интенсивных вихревых движений. На рис. 2 приведена рассчитанная плотность спиральности, облегчающая идентификацию и визуализацию стриков.

Частотные спектры скорости, измеренные (а) с помощью акустического анемометра Gill Wind Master Pro HS Part 1951-РК-020 и (б) с помощью содара высокого разрешения, хорошо коррелируют между собой в области совпадения масштабов. В области малых частот спектр имеет наклон, близкий к  $-1$ , при увеличении частоты спектр имеет наклон, близкий к  $-5/3$ . Присутствие таких спектров непосредственно связано с развитием стриков в АПС [Чхетиани и др., 2019].



**Рис. 2.** Плотность спиральности стриков,  $\text{м/с}^2$ . Содарные измерения, Цимлянск, а) 30 июля 2019 г., б) 26 июля 2017 г.

Параметр осреднения – 5 мин. Плотность спиральности в стриках по результатам проведенных измерений составляет  $0,5-4 \text{ м/с}^2$ .

Условия и механизмы генерации и поддержания субмезомасштабных когерентных структур, таким образом, хоть и остаются не до конца проясненными до сих пор, но могут быть идентифицированы по результатам обработки экспериментальных данных ВРМС. Моделирование АПС с учетом когерентных структур показывает интенсификацию эмиссии пыли с подстилающей поверхности. Стрики вносят значительный вклад в обменные процессы АПС. Их учет важен при разработке новых схем параметризации подсеточных процессов в «серой» зоне, в частности эмиссии аэрозоля. Исследование механизмов обменных процессов, действующих при различных метеорологических условиях, необходимо для увеличения точности моделирования АПС.

*Настоящее исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 20-17-00214).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Drobinski P., Foster R. C. On the origin of near-surface streaks in the neutrally-stratified planetary boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 2003. V.108. P. 247–256.
2. Drobinski P., Carlotti P., Newsom R.K., Banta R.M., Foster R.C., Redelsperger J. L. The Structure of the Near-Neutral Atmospheric Surface Layer // *J. Atm. Si.* 2004. V.61. P. 699-714.
3. Kader B.A., Yaglom A.M. Spectra and correlation functions of surface layer atmospheric turbulence in unstable thermal stratification. In *Turbulence and Coherent Structures*. Springer. Dordrecht. 1991. P. 387-412.

4. Никитин Н.В., Чернышенко С.М. О природе организованных структур в пристенных турбулентных течениях // *Механика жидкости и газа*. 1997. №1. С. 24-30.
5. Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2019. – Т. 55. – № 5. – С. 62–75.

## Численное моделирование и исследование переходных периодов атмосферного пограничного слоя

Ткаченко Е.В.<sup>1,2</sup>, Дебольский А.В.<sup>1,2,3</sup>, Мортиков Е.В.<sup>1,2,4</sup>, Глазунов А.В.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Научно-Исследовательский Вычислительный Центр, Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: [evtkachenko@hotmail.com](mailto:evtkachenko@hotmail.com)

Одной из важных составляющих численного моделирования атмосферного пограничного слоя (АПС) является корректное воспроизведение суточного хода, который выражается в чередовании дневного конвективного (КПС) и ночного устойчивого (УПС) пограничных слоёв. Смена данных режимов происходит через переходные периоды - утренний переход от УПС к КПС, и вечерний от КПС к УПС. Поскольку существующие модели прогноза погоды и климата разрабатывались для воспроизведения стационарных и квазистационарных режимов, таких как УПС и КПС, и не учитывают нестационарную динамику, имеющую место в переходных периодах, правильное воспроизведение последних продолжает оставаться открытой задачей.

В данном исследовании изучаются процессы турбулентного обмена во время переходных периодов, с целью последующего уточнения RANS параметризаций (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Для исследования динамики используется вихререзающее моделирование (Large-Eddy Simulation) с высоким пространственным разрешением; также рассматривается влияние сдвига скорости, аэродинамической шероховатости и других внешних факторов. Выявляются особенности динамики переходных периодов. Особое внимание уделяется динамике изменения кинетической энергии турбулентности; рассматривается баланс энергии, вклад вихревых структур различных масштабов, распределение энергии по компонентам скорости.

Полученные результаты затем сравниваются с численными экспериментами в моделях RANS. На основании полученных результатов будут рассмотрены возможные подходы для улучшения параметризаций RANS, которые позволяют учитывать нестационарные процессы в динамике суточного хода.

*Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант №20-05-00776; разработка LES модели поддержана Российским научным фондом, грант №21-71-30003.*

## Numerical modeling of the transitional periods in atmospheric boundary layer

Tkachenko E.V.<sup>1,2</sup>, Debolskiy A.V.<sup>1,2,3</sup>, Mortikov E.V.<sup>1,2,4</sup>, Glazunov A.V.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: [evtkachenko@hotmail.com](mailto:evtkachenko@hotmail.com)

One of the defining features of the atmospheric boundary layer (ABL) is the presence of turbulence, the dynamics of which are dependent, among other processes, on the heat exchange with the surface of the planet. The heat exchange itself is governed by the diurnal cycle, which constitutes in the change between the daytime convective boundary layer (CBL) and the nighttime stably stratified boundary layer (SBL). The alternation between the CBL and the SBL happens through transitional periods.

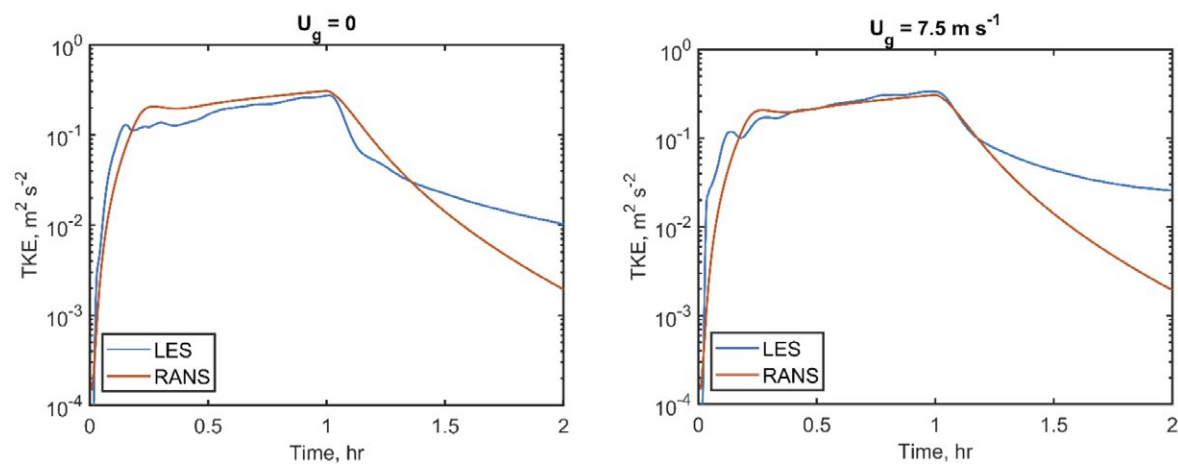


There are several existing approaches to modeling the atmospheric turbulence. Resolving large, energy-containing, turbulent eddies explicitly through the modeling method known as Large-Eddy Simulation (LES), while being computationally expensive, results in highly accurate results that can be studied in order to better understand the underlying processes in the modelled environment. Another approach is RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) parametrization of turbulent exchange processes, which holds the possibility of inaccurately reproducing certain dynamics, but allows for faster modeling. Thus, the LES approach is mainly used in research, while RANS models are commonly found in large-scale weather and climate models.

The existing RANS closures reproduce horizontally homogeneous stratified boundary layers close to a statistically stationary state with a high enough accuracy [1,2]. At the same time, because such closures were developed without taking non-stationary dynamics, there is a noticeable difference in how transitional periods are reproduced using LES and RANS modeling [3]. This poses an issue when it comes to modeling processes that are influenced by the diurnal cycle in RANS models. Therefore, the importance of correctly reproducing the diurnal cycle cannot be underestimated.

The main focus of this study is on singling out processes that govern transitional periods of the ABL and comparing how their reproduction in RANS models deviates from LES models. Both morning and evening transition are modeled as independent processes, using idealized setups. The effects of aerodynamic roughness, wind shear in a form of geostrophic wind velocity, and other external factors are also explored. The LES model used in the experiments is based on the dynamic Smagorinsky closure; its description can be found in e.g. [4,5]. The RANS model utilizes  $k-\varepsilon$  closure which includes equations for turbulent kinetic energy (TKE) and dissipation rate.

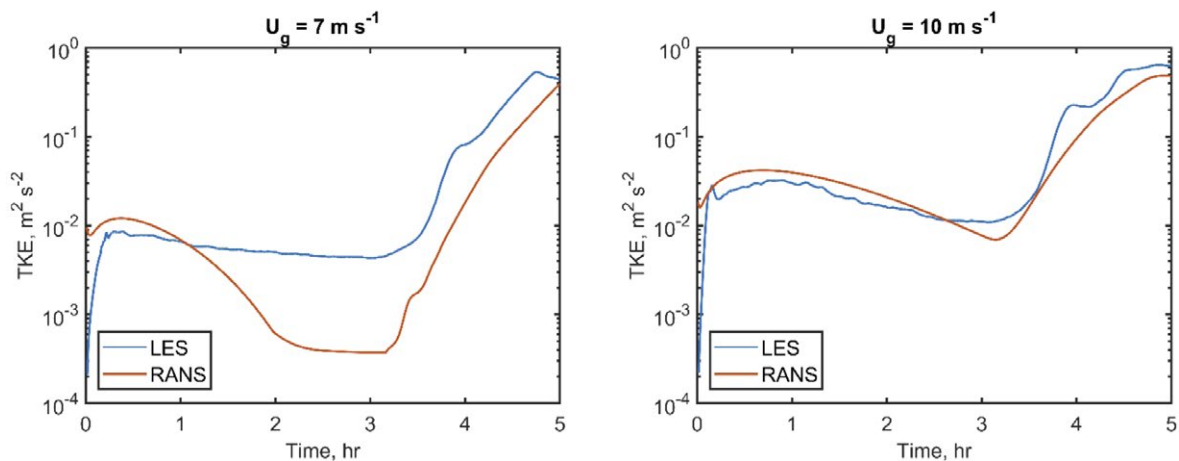
The evening transition was modeled by setting up the surface kinematic heat flux to be positive at the beginning of the experiment, in order to form a CBL; after 1 hour, the heat flux is changed to zero to simulate the neutral state of the ABL and facilitate the evening transition process, after which the experiment would continue for 1 more hour. Fig. 1 shows the comparison of the absolute average TKE levels between LES and RANS models on the log scale within the evening transition experiment, for cases with and without wind shear. It can be observed that while the TKE levels are reproduced in the RANS model relatively closely to LES for the beginning of the experiment, where the CBL is being formed, however there are differences in the TKE dynamics during the evening transition.



**Fig. 1.** Formation of CBL (hour 0-1) and evening transition (hour 1-2), turbulent kinetic energy.

Significant attention is paid to the TKE dynamics. It has been shown that the RANS model reproduces the dynamics of small-scale eddies more closely than the dynamics of the TKE as a whole. The inspection of the TKE balance shows that in the beginning of the transition, the buoyancy majorly contributes to the TKE decay for a relatively brief period of time, after which its impact ceases and the dissipation becomes much more significant. Those are just a couple of factors that have a significance in TKE dynamics and will have to be introduced in RANS closures. A more thorough exploration of the evening transition dynamics can be found in [6].

The morning transition experiment is based on the formation of the SBL for the first 3 hours in presence of a negative surface heat flux. Then, the heat flux is increased gradually until it reaches the set maximum level, and then it gets decreased again, thus roughly simulating the change in solar radiation effect over the course of the day. The morning transition itself, therefore, takes place within hours 3 and 5 of the experiment. Fig. 2 shows how the TKE changes during this experiment, with stronger and weaker wind shear. The most noticeable difference can be seen in the strong decrease of TKE during the latter hour of the SBL formation in the experiment with the weaker wind shear; meanwhile the morning transition itself, at least on the absolute scale, is relatively similar to the one observed in LES.



**Fig. 2.** Formation of SBL (hour 0-3) and morning transition (hour 3-5), turbulent kinetic energy.

The evening transition has been explored very thoroughly through numerical modeling both in previous works and within this study. The morning transition was mainly explored through field experiments, and there is only a handful of studies that examine it through numerical modeling, therefore further research on the governing processes itself is still necessary. However, the work on parameterization of non-stationary processes is far from complete for both transitional periods. While the possible approach to evening transition parameterization is suggested in [6], it is yet to be generalized. Hence, the improvement of RANS models still requires further study on processes governing the transitional periods.

*This study was performed with partial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no.20-05-00776), the development of the LES model was supported by the Russian Scientific Foundation (grant no.21-71-30003).*

#### REFERENCES:

1. *Debolskiy A., Mortikov E., Glazunov A., Lüpkes C. Evaluation of surface layer stability functions and their extension to first order turbulent closures for weakly and strongly stratified stable boundary layer // Boundary Layer Meteorology. 2022. In review.*
2. *Mortikov E. V., Glazunov A. V., Debolskiy A. V., Lykosov V. N., Zilitinkevich S. S. Modeling of the dissipation rate of turbulent kinetic energy // Doklady Earth Sciences 2019. V. 489. № 4. P. 414–418.*
3. *Holtlag A.A.M., Svensson G., Baas P., Basu S., Beare B., Beljaars A.C.M., Bosveld F.C., Cuxart J., Lindvall J., Steeneveld G.J., Tjernstrom M., Van De Wiel B.J.H. Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: Challenges for weather and climate models // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2013. V. 94. № 11. P. 1691–1706.*
4. *Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2021. V. 147. P. 2233–2243.*
5. *Tkachenko E., Debolskiy A., Mortikov E. Intercomparison of subgrid scale models in large-eddy simulation of sunset atmospheric boundary layer turbulence: computational aspects // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. V. 42. № 7. P. 1580–1595.*
6. *Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V., Glazunov A.V. Large-Eddy Simulation and Parameterization of Decaying Turbulence in the Evening Transition of the Atmospheric Boundary Layer // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. №3. P. 219–236.*

# Experimental study of atmospheric boundary layer vertical structure with contact and remote measurements

Artamonov A.<sup>1</sup>, Repina I.<sup>1,2</sup>, Gavrikov A.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

E-mail: [sailer@ifaran.ru](mailto:sailer@ifaran.ru)

Information about the vertical distribution (profile) of meteorological parameters in the troposphere is important for a variety of tasks, ranging from the safety of aviation flights to the forecast of dangerous meteorological phenomena and the development of theories of atmospheric boundary layer dynamics. It is critical in aviation meteorology and wind energy. In addition, the profile of wind speed and temperature is taken into account in engineering problems associated with the construction of high-rise buildings. At the same time, vertical profiles within the atmospheric boundary layer depend on a number of parameters, including the nature of the terrain, surface roughness, atmospheric stratification, averaging time, etc. The characteristics of the profiles are highly variable in time when squalls, atmospheric fronts, and intense circulations pass through the observation point in mesoscale convective systems. The most common way to measure meteorological parameters profiles in the atmosphere is radio sounding using pilot balloons. The disadvantage of this method is the high cost and low temporal resolution: at most aerological stations, sounding is performed at best 2 times a day. Taking into account the fact that, for example, the wind field can change dramatically in a few minutes, such efficiency is clearly insufficient for predicting dangerous wind phenomena. The most commonly used method of profile monitoring is multilevel contact measurements on meteorological masts of various heights. The information obtained with the help of gradient meteorological measurements on the mast can be used to solve a number of problems of a scientific and applied nature.

The report provides examples of the use of high-rise masts for monitoring the dynamics of the atmospheric boundary layer. The data obtained on the masts in Tiksi (polar tundra), at the Tsimlyansk scientific station (homogeneous surface) and at the MSU observatory (urban development) are analyzed. The masts of Moscow State University and Tiksi operate in the monitoring mode; seasonal measurements are carried out at the mast in Tsimlyansk.

The principles of mounting and intercalibration of measuring equipment, systems of primary processing, analysis and storage of the received information are considered. The influence of the relief and atmospheric stratification on the profiles of meteorological parameters in the surface layer of the atmosphere is shown on the basis of the measurements carried out. Relief inhomogeneities, including urban development, introduce distortions into surface profiles - and universal functions cease to be applicable. Using the example of measurements in Tiksi, the influence of atmospheric stratification on the profiles of meteorological parameters is shown. In winter, long-lived stable boundary layers are observed there; in summer, a convective boundary layer may exist for several days. On the example of data on the Tsimlyansk mast, the formation of jet streams over a flat surface at night, as well as the influence of wind direction on the structure of the stream, is noted.

The most promising solution to the problem of monitoring the vertical structure of the atmosphere is remote sensing, which makes it possible to determine the profiles of meteorological parameters up to high altitudes with high spatial and temporal resolution.

The report presents the results of a study of the temperature structure of the atmosphere under various background conditions: in coastal zones over uneven mountainous terrain, under conditions of cold intrusions, under conditions of stable stratification and night cooling of the surface. The conditions for the formation of atmospheric inversions, their dynamics and vertical development are studied. The presented results show the importance of experimental studies of the atmospheric boundary layer and demonstrate methodological approaches to such measurements. Based on a set of experimental data, the dependence of the ABL structure on the relief and atmospheric conditions is shown.

*The experimental work was partially supported by the RFBR grant No. 20-05-00834, the experimental technique was developed with the support of the Russian Science Foundation grant No. 21-17-000249 Also, with the support of a grant from the Russian Science Foundation, measurements were carried out at the observatory of Moscow State University.*

# Экспериментальные исследования вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя с использованием контактных и дистанционных измерений

Артамонов А.Ю.<sup>1</sup>, Репина И.А.<sup>1,2</sup>, Гавриков А.В.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

E-mail: sailer@ifaran.ru

Информация о вертикальном распределении (профиле) метеопараметров в тропосфере важна для самых различных задач, начиная от безопасности авиационных полетов до прогноза опасных метеорологических явлений и разработки теорий динамики атмосферного пограничного слоя. Она является критически важной в авиационной метеорологии и ветроэнергетике. Кроме того, профиль скорости ветра и температуры учитывается в инженерных задачах, связанных со строительством высотных зданий. При этом вертикальные профили в пределах атмосферного пограничного слоя зависят от целого ряда параметров, включая характер местности, шероховатость поверхности, стратификацию атмосферы, время усреднения и т. д. Характеристики профилей сильно изменчивы по времени при прохождении через точку наблюдений шквалов, атмосферных фронтов, интенсивных циркуляций в мезомасштабных конвективных системах. Самый распространенный способ измерения профилей метеопараметров в атмосфере радиозондирование с использованием шаров-пилотов (Иванов и др., 2004). Недостатком этого метода является дороговизна и низкое временное разрешение: на большинстве аэрологических станций зондирование производится в лучшем случае 2 раза в сутки. С учетом того, что, например, ветровое поле может изменяться кардинально за несколько минут, для прогноза опасных ветровых явлений такая оперативность является явно недостаточной. Наиболее часто используемый способ мониторинга профилей – многоуровневые контактные измерения на метеорологических мачтах различной высоты (Высотная метеорологическая мачта., 2020, Реѝа et al., 2016). Информация, получаемая с помощью градиентных метеорологических измерений на мачте, может быть использована для решения целого ряда задач научного и прикладного характера:

- уточнение локального прогноза погоды (осадки, адвекция, туманы, гололед, низкая облачность, сдвиги ветра, фронтальные зоны);
- контроль и прогноз загрязнения атмосферного воздуха, экологический мониторинг; распространение радиоволн, оптического и лазерного излучения;
- задачи ветроэнергетики.

Но эти измерения имеют дискретный характер и охватывают лишь приземный слой высотой максимум несколько сотен метров. Кроме того, необходима точная взаимная калибровка используемых датчиков.

В докладе приводятся примеры использования высотных мачт для мониторинга динамики атмосферного пограничного слоя. Анализируются данные, полученные на мачтах в Тикси (полярная тундра), на Цимлянкой научной станции (однородные условия) и в обсерватории МГУ (городская застройка). Мачты МГУ и Тикси работают в режиме мониторинга, на мачте в Цимлянске проводятся сезонные измерения. На Рис. 1 приведены фото используемых мачт и пример расположения аппаратуры на мачте в МГУ. В таблице 1 представлены уровни расположения аппаратуры в Тикси.

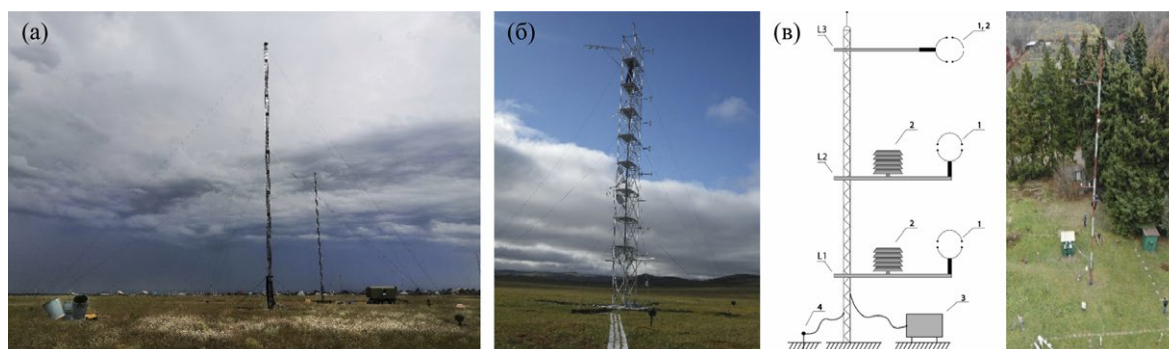


Рис. 1.

Мачты для измерения структуры приземного слоя атмосферы: (а) Цимлянск, высота 30 м., (б) Тикси – высота 20 м., (в) МГУ – высота 22 м.



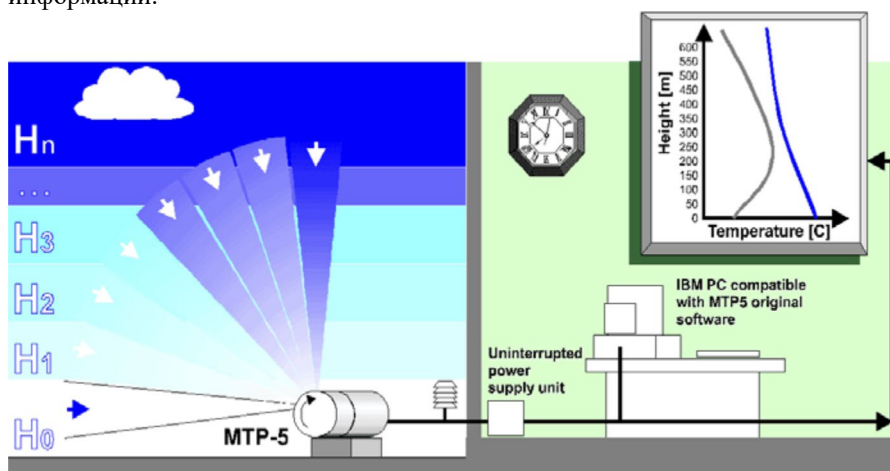
Рассматриваются принципы монтажа и интеркалибровки измерительной аппаратуры, системы первичной обработки, анализа и хранения получаемой информации. На примере проводимых измерений показано влияние рельефа и атмосферной стратификации на профили метеопараметров в приземном слое атмосферы. Неоднородности рельефа, в том числе городская застройка, вносят искажения в приземные профили – и универсальные функции перестают быть применимы. На примере измерений в Тикси показано влияние стратификации атмосферы на профили метеопараметров. В зимний период там наблюдаются долгоживущие устойчивые пограничные слои, летом возможно существование конвективного пограничного слоя в течение нескольких дней. На примере данных по цимлянской мачте отмечено формирование струйных течений над плоской поверхностью в ночные часы, а также влияние направления ветра на структуру потока.

**Таблица 1.**  
Измерительная аппаратура, установленная на мачте в Тикси.

Уровень (м)	Температура (TDMS)	Влажность, Температура (HMP-155)	Ветер (RM Young)	АТИ акустические анемометры	LiCor-7500	Снеж. покров SR50	ИК Радиометр
0-2		1.80 м					
2-4	3.80 м		3.70 м	3.30 м		3.30 м	3.30 м
4-6		5.80 м					
6-8	5.80 м						
8-10		9.80 м	9.20 м	9.50 м	9.30 м		
10-12	11.80 м						
12-14	13.80 м						
14-16	15.80 м		15.50 м	15.50 м			
16-18							
18-20	19.90 м		21 м				

Самым перспективным решением задачи мониторинга вертикальной структуры атмосферы представляется дистанционное измерение, которое позволяет определять профили метеопараметров до больших высот с высоким пространственным и временным разрешением.

Для регистрации профилей температуры в АПС используется метеорологический температурный профилемер. Уникальность метеорологического температурного профилемера МТП-5 заключается в том, что он является полностью пассивным приемником и позволяет вести непрерывное зондирование температурной структуры АПС с точностью 0,5° до высоты 1000 метров практически в любых погодных условиях (Kadygrov et al., 1998). Измерение температурных профилей основано на измерении теплового излучения атмосферы на различных зенитных углах в одной азимутальной плоскости на частоте 60 ГГц. Внешний температурный датчик окружающего воздуха служит при этом, как опорный. (Рис. 2) Программное обеспечение осуществляет хранение, обработку полученных данных и визуализацию информации.



**Рис. 2.**  
Метеорологический температурный профилемер. Принцип работы.

В докладе представлены результаты исследования температурной структуры атмосферы в различных фоновых условиях: в прибрежных зонах над неоднородным горным рельефом, в условиях холодных вторжений, в условиях устойчивой стратификации и ночного выхолаживания поверхности. Исследуются условия формирования атмосферных инверсий, их динамика и вертикальное развитие.

Представленные результаты показывают важность экспериментальных исследований пограничного слоя атмосферы и демонстрируют методические подходы к проведению подобных измерений. На основе комплекса экспериментальных данных показана зависимость структуры АПС от рельефа и атмосферных условий.

*Экспериментальные работы частично выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00834, методика эксперимента разработана при поддержке гранта РФФИ №21-17-000249. Также при поддержке гранта РФФИ проведены измерения в обсерватории МГУ.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Высотная метеорологическая мачта. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Научно-производственное объединение «Тайфун». [Электронный ресурс]. 2020. URL: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html>*
2. *Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы // 2004, Екатеринбург, 596 с.*
3. *Kadyrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular scanning single channel microwave radiometer and some comparison with in situ observations // Meteorol. App. 1998. V. 5. P. 393–404.*
4. *Peña A., Floors R., Sathe A., Gryning S.E., Wagner R., Courtney M.S., Larsén X.G., Hahmann A.N., Hasager C.B. Ten years of boundary-layer and wind-power meteorology at Høvsøre, Denmark // Boundary-Layer Meteorology. 2016. V. 158(1). P. 1-26.*

## Modelling of the atmospheric boundary layer over sea ice in the presence of leads

Chechin D.G.<sup>1</sup>, Lüpkes C.<sup>2</sup>, Debolskiy A.V.<sup>1,3</sup>, Makhotina I.A.<sup>4</sup>, Shestakova A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Alfred-Wegener-Institute Helmholtz-Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany

<sup>3</sup>Research Computing Center Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: [chechin@ifaran.ru](mailto:chechin@ifaran.ru)

Arctic sea ice is an example of a natural surface with sharp inhomogeneities represented by leads and polynyas. Even when covered with thin ice the surface temperature in leads strongly exceeds the one of the adjacent ice. Even though leads occupy just a small fraction of the Central Arctic area, the major part of the ocean-atmosphere heat exchange occurs through leads [1]. However, the quantification of the effect of leads on the thermal regime in the Central Arctic still has large uncertainties due to the lack of observational data. Also, the existing parameterizations of heat exchange over leads used in numerical models are based on a very limited observational datasets [2].

The first goal of the current study is was to investigate the effect of leads on the characteristics of the atmospheric boundary layer (ABL) and of the thermal regime over sea ice. The second goal of the study was to reveal the drawbacks of current parameterizations of turbulent exchange over the heterogeneous sea ice surface. To that aim, an hierarchy of models was used: 1) a simple analytical heat-balance model of the ABL coupled to sea ice [3]; 2) a single-column model; 3) the RCC MSU LES model. For the verification of model solutions the observations from the drifting stations “North Pole – 35,37,39” and SHEBA were used [4].

Using the energy balance model it was shown that even a small increase in the leads area fraction results in a strong warming of the ABL. The warming effect of leads was shown to have a nonmonotonic dependency on wind speed. This is due to the effect of wind speed on stratifications over sea ice. Namely, a weak-wind and a strong-wind regimes were identified. The former is characterized by strong stability and large temperature difference between air and surface, i.e. surface is thermally decoupled from the ABL. The latter – by weak stability and small temperature difference between air and surface. The model solutions are in a good agreement with the single-column model results and the observations at the drifting stations.

The LES simulations show the formation of a convective plume over lead and of a stably stratified internal boundary layer downwind from the lead. Over some distance downwind of a lead, the influence of the turbulence generated over a lead on the characteristics of a stable boundary layer over sea ice can be seen. The LES results reveal the complex structure of the ABL turbulence over an inhomogeneous sea ice surface and point to the weakness of a simple mosaic approach used in weather and climate models to take into account the effect of inhomogeneities.

**REFERENCES:**

1. *Maykut, G.: Large-Scale Heat Exchange and Ice Production in the Central Arctic, J. Geophys. Res., 87, 7971–7984, 1982.*
2. *Andreas, E. and Cash, B.: Convective heat transfer over wintertime leads and polynyas, J. Geophys. Res., 104, 25721–25734, 1999.*
3. *Chechin, D. G., Makhotina, I. A., Lüpkas, C., and Makshtas, A. P. (2019). Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night, Journal of the Atmospheric Sciences, 76(8), 2481-2503.*
4. *Tkachenko, E. V., Debolskiy, A. V., and Mortikov, E. V. (2021). Intercomparison of Subgrid Scale Models in Large-Eddy Simulation of Sunset Atmospheric Boundary Layer Turbulence: Computational Aspects. Lobachevskii Journal of Mathematics, 42(7), 1580-1595.*

## Моделирование атмосферного пограничного слоя над морским льдом при наличии разводий

Чечин Д.Г.<sup>1</sup>, Люпкес К.<sup>2</sup>, Дебольский А.В.<sup>1,3</sup>, Махотина И.А.<sup>4</sup>, Шестакова А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт им. Альфреда Вегенера Гельмгольц-Центр полярных и морских исследований, Бремерхафен, Германия

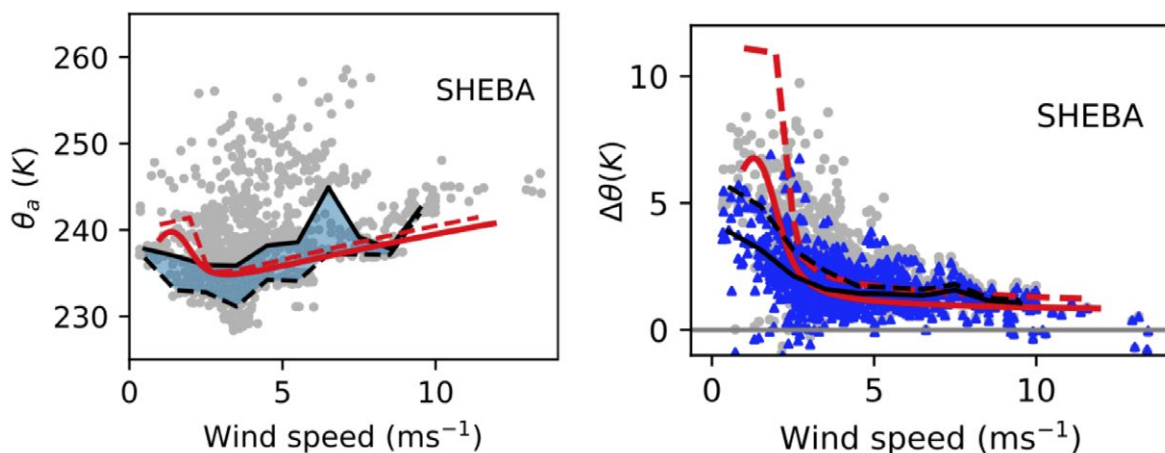
<sup>3</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: [chechin@ifaran.ru](mailto:chechin@ifaran.ru)

Поля морского льда в Арктике характеризуются наличием неоднородностей, а именно разводий и полыней. Даже если разводья заполнены тонким молодым льдом, температура их поверхности зимой существенно превышает температуру поверхности окружающего более толстого льда [1]. Таким образом, разводья являются участками интенсивного энергообмена между океаном и атмосферой [2-3]. Однако недостаток данных наблюдений в Арктике приводит к большой неопределенности оценок влияния разводий на энергообмен в системе «океан-лед-атмосфера».

Очевидно, что в численных моделях атмосферы должно учитываться наличие разводий, а поток тепла над ними должен быть адекватно описан. Трудность этой задачи заключается в том, что характерный поперечный размер разводий не превышает 1 км, что меньше шага сетки, используемого в моделях прогноза погоды и климатической системы. Более того, именно узкие разводья шириной до нескольких десятков метров встречаются наиболее часто [2,4]. Таким образом, процессы над разводьями не могут быть описаны в этих моделях явно и должны быть параметризованы. Предложенные ранее параметризации турбулентного обмена над разводьями [5-6] основаны на крайне скудном наборе данных наблюдений. Более того, применимость используемого в моделях с грубой сеткой «мозаичного подхода» к агрегированию турбулентных потоков над неоднородной поверхностью требует обоснования, а сам мозаичный подход – доработки.



**Рис. 1.**

Зависимость температуры воздуха от скорости ветра (слева) и разности температуры воздуха и поверхности льда (справа) по данным наблюдений на станции SHEBA (серые кружки, заливкой показана область между 10-м и 50-м перцентилем), согласно решениям аналитической модели (красная сплошная) и одномерной модели (красная прямая); более полная версия Рисунка приводится в [7].

В настоящем исследовании решалась задача оценки влияния разводий на характеристики термического режима и атмосферного пограничного слоя над морским льдом во время выхолаживания при ясном небе. Для решения этой задачи использовалась иерархия моделей: 1) аналитическая энергобалансовая модель атмосферного пограничного слоя и морского льда, наглядно выявляющая зависимость турбулентного режима от внешних параметров [7]; 2) одномерная RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)-модель пограничного слоя и льда, представляющая собой упрощенный аналог моделей с грубой сеткой; и 3) трехмерная вихререшающая модель НИВЦ МГУ [8]. Для верификации численных решений используются данные наблюдений дрейфующих станций «Северный Полюс-35, 37, 39», а также станции SHEBA.

С помощью аналитических решений энергобалансовой модели показано, что даже малое увеличение доли площади, занимаемой разводьями, приводит к существенному увеличению температуры воздуха над льдом. При этом величина отепляющего эффекта разводий немонотонно зависит от скорости ветра. Такая зависимость объясняется влиянием скорости ветра на стратификацию над льдом. В частности, при слабом ветре над льдом формируется сильно устойчивая стратификация и турбулентный обмен ослабевает, а разность температуры воздуха и поверхности возрастает. При большой скорости ветра стратификация слабо-устойчивая, а температура воздуха лишь немного превышает температуру льда. Результаты аналитической модели находятся в хорошем согласии с результатами одномерной RANS-модели, а также подтверждаются данными наблюдений (Рис. 1).

Согласно аналитическим и численным решениям одномерной модели наличие разводий приводит к увеличению устойчивости над морским льдом за счет увеличения над ним температуры воздуха. Однако известно, что конвекция над разводьями приводит напротив к генерации турбулентности, адвекция которой может приводить к разрушению устойчивой стратификации. Для исследования этого процесса были проведены численные эксперименты с вихререшающей моделью НИВЦ МГУ.

За основу экспериментов с вихререшающей моделью был взят эксперимент GABLS-1 [9], в котором воспроизводился устойчиво-стратифицированный пограничный слой над морским льдом. На нижней границе расчетной области в поле однородного льда задавалось разводье различной ширины. Результаты экспериментов демонстрируют рост конвективного плюма над разводьем и его адвекцию вниз по потоку, а также формирование низкого внутреннего пограничного слоя над льдом с наветренной стороны разводья. Первичный анализ результатов экспериментов показывает, что в достаточно большой области турбулентность сгенерированная над разводьем влияет на характеристики устойчивого пограничного слоя над льдом, а именно является нелокальным источником кинетической энергии турбулентности. Кроме того, даже на расстоянии порядка нескольких километров от разводья структура пограничного слоя существенно отличается от таковой при отсутствии разводий. Также результаты экспериментов указывают на недостатки простого мозаичного метода агрегирования потоков над поверхностью льда и разводий, который используется в моделях с грубой сеткой.

Полученные с помощью иерархии моделей различной сложности результаты показывают сильное влияние разводий на характеристики термического режима над льдом. В частности, наличие разводий имеет сильный отепляющий эффект, а также может приводить к увеличению устойчивости над морским льдом. Вместе с тем полученные результаты демонстрируют необходимость доработки простых методов учета разводий в численных моделях атмосферы с грубой сеткой для более адекватного воспроизведения энергообмена между атмосферой, льдом и океаном и характеристик пограничного слоя

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-77-10072-П.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Maykut, G.: *Large-Scale Heat Exchange and Ice Production in the Central Arctic*, *J. Geophys. Res.*, 87, 7971–7984, 1982.
2. Marcq, S. and Weiss, J.: *Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere*, *The Cryosphere*, 6, 143–156, <https://doi.org/10.5194/tc-6-143-2012>, 2012.
3. Andreas, E., Paulson, C., William, R., Lindsay, R., and Businger, J.: *The turbulent heat flux from Arctic leads*, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 17, 57–91, 1979.
4. Maslanik, J. and Key, J.: *On treatments of fetch and stability sensitivity in large-area estimates of sensible heat flux over sea ice*, *J. Geophys. Res.*, 100, 4573–4584, 1995.
5. Alam, A. and Curry, J.: *Determination of surface turbulent fluxes over leads in Arctic sea ice*, *J. Geophys. Res.*, 102, 3331–3343, 1997.
6. Andreas, E. and Cash, B.: *Convective heat transfer over wintertime leads and polynyas*, *J. Geophys. Res.*, 104, 25721–25734, 1999.
7. Chechin, D. G., Makhotina, I. A., Lüpkes, C., and Makshatas, A. P. (2019). *Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 76(8), 2481–2503.



8. Tkachenko, E. V., Debolskiy, A. V., and Mortikov, E. V. (2021). *Intercomparison of Subgrid Scale Models in Large-Eddy Simulation of Sunset Atmospheric Boundary Layer Turbulence: Computational Aspects*. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 42(7), 1580-1595.
9. Cuxart J, Holtslag AA, Beare RJ, Bazile E, Beljaars A, Cheng A, Conangla L, Ek M, Freedman F, Hamdi R, Kerstein H, Kitagawa G, Lenderink D, Lewellen J, Mailhot T, Mauritsen V, Perov G, Schayes GJ, Steeneveld GS, Taylor P, Weng W, Wunsch S, Xu KM (2006) *Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer*. *Boundary-Layer Meteorol* 118(2):273–303

## Parametrization of energy exchange between atmospheric boundary layer and urbanized underlying surface

Kolennikova M.A.<sup>1,2,3</sup>, Varentsov M. I.<sup>1,2,3,4</sup>, Stepanenko V.M.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>4</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: mkolennikova@mail.ru

The world's population has gone through a process of rapid urbanization since 1950. Dense high-rise buildings, concentrated industries and traffic can characterize a typical city. Under such conditions, the properties of the environment, in particular, its microclimatic features, experience significant changes. The description of urban influence on the atmosphere can be made with special urban parametrizations. They differ in degree of complexity, modeling strategy, and physical processes described. Therefore, it is important to conduct a detailed relevant today review of the main types of urban parameterizations, to highlight the approaches used to describe physical processes, as well as to compare urban parameterizations by the completeness and complexity of the description.

We considered different approaches used to parametrize physical processes inside urban canopy based on the representatives of each type of urban parametrization. We reviewed TERRA-URB parametrization [4] as a slab-model, which at the moment, together with the mesoscale atmospheric model COSMO-Ru, is successfully used in the Hydrometeorological Research Center of Russia for both research and operational tasks. The single-level TEB (Town Energy Model) [2], and the multi-level urban canopy model BEP (Building Effect Parametrization) [1], were chosen as being the first and classic parametrizations of its type. Based on these parametrizations, as well as on the DCEP (Double-Canyon Effect Parametrization) parametrization [3], the main physical processes described by various types of urban parametrizations were compared.

Based on the literature review, a generalizing table of various types of urban parametrizations was compiled, according to the completeness of the processes they take into account (surface radiation balance, surface heat and moisture balance, turbulent and anthropogenic fluxes, urban vegetation) and the complexity of their description. The single-level urban canopy model TEB seems to be the most balanced among the parametrizations considered, since, on the one hand, it describes fully the interaction of the urbanized surface with the atmosphere, on the other hand, this description can be characterized by an average level of complexity. Nevertheless, this parametrization contains a number of empirical dependencies used in the calculation of turbulent heat and moisture fluxes from the surface to the atmosphere. It is possible to check the correctness of the results obtained by these formulas using highly detailed large-eddy simulation modeling, which is planned to be done as part of the further work.

### REFERENCES

1. Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M. W. *An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models*, – *Bound.-Lay. Meteorol.*, 2002, vol. 104, pp. 261–304.
2. Masson, V. *A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models*. – *Bound.-Lay. Meteorol.*, 2000, vol. 94, pp. 357–397.
3. Schubert, S., Grossman-Clarke, Susanne Martilli, Alberto. *A Double-Canyon Radiation Scheme for Multi-Layer Urban Canopy Models*, – *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, vol. 145(3), pp.439-468.
4. Wouters H., Demuzere M., De Ridder K., van Lipzig N.P. *The impact of impervious water-storage parametrization on urban climate modeling*. – *Urban Climate*, 2015, vol. 11. pp. 24–50.



# Методы параметризации энергообмена пограничного слоя атмосферы с урбанизированной подстилающей поверхностью

Коленникова М.А.<sup>1,2,3</sup>, Варенцов М.И.<sup>1,2,3,4</sup>, Степаненко В.М.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: [mkolennikova@mail.ru](mailto:mkolennikova@mail.ru)

Более половины населения нашей планеты проживают в городах, и доля городских жителей с каждым годом растет. Плотная высотная застройка, промышленные производства и автотранспорт, сосредоточенные в большом объеме в крупных городах, приводят к значительной антропогенной нагрузке на атмосферу. Формируемые городом микроклиматические особенности непосредственно оказывают влияние на комфортность проживания городских жителей. Исследование взаимодействия городской поверхности и атмосферных потоков возможно с помощью городских параметризаций – специальных математических моделей, описывающих физические процессы внутри городского полога. Городские параметризации различаются по степени сложности, стратегии моделирования и описываемым физическим процессам. Поэтому важно провести подробный обзор основных типов городских параметризаций, который будет актуальным на сегодняшний день, выделить используемые в них подходы к описанию физических процессов, а также сравнить городские параметризации по полноте и сложности описания того или иного процесса.

Для представления урбанизированной поверхности в городских параметризациях используется концепция «городского каньона» [3]. В рамках нее сложная геометрия городской застройки описывается в виде двух зданий, стоящих друг напротив друга, и дороги между ними. Пространство между зданиями называется каньоном. Высота и ширина каньона характеризуют некоторые средние характеристики описываемой урбанизированной поверхности. Все городские параметризации можно разделить на два основных типа: 1) «slab»-модели или интегральные и 2) модели городского полога. Параметризации, относящиеся к первому типу, явным образом городской каньон не воспроизводят, представляя город в виде некоторой плоской поверхности с измененными объемными параметрами, зависящими от характеристик каньона. Модели городского полога являются более физически полными, так как описывают радиационные процессы, процессы турбулентного, влаго- и теплообмена непосредственно внутри городского каньона. Городские параметризации второго типа делятся на одноуровневые и многоуровневые модели городского полога. Основное различие заключается в количестве вертикальных уровней: в многоуровневых моделях городского полога пространство каньона от крыши до его основания разделено на несколько дополнительных уровней, на каждом из которых рассчитываются основные потоки, определяющие взаимодействие городской поверхности и атмосферы. К городским параметризациям по типу «slab»-моделей относится параметризация TERRA-URB [5], которая на данный момент совместно с мезомасштабной моделью атмосферы COSMO-Ru успешно используется в Гидрометцентре России как для исследовательских, так и для оперативных задач. Классической одноуровневой моделью городского полога является параметризация ТЕВ (Town Energy Model) [2], а многоуровневой – параметризация ВЕР (Building Effect Parametrization) [1], будучи первыми параметризациями своего типа. В данной работе, опираясь на указанные параметризации, а также на параметризацию DСЕР (Double-Canyon Effect Parametrization) [4], были сопоставлены основные физические процессы, описываемые различными типами городских параметризаций.

При описании радиационного баланса поверхности в моделях городского полога учитываются два основных эффекта: 1) затенение и 2) переотражение внутри городского каньона. Эффект затенения стеной каньона поверхности дороги или противоположной стены учитывается из геометрических соображений через зенитный угол Солнца и параметры каньона: высоту, ширину и азимут каньона. Переотражение солнечной радиации между элементами каньона может быть однократным, либо в виде приближения неограниченного числа энергетически эффективных переотражений между элементами каньона. Для того, чтобы включить поверхность крыши в радиационный обмен с другими поверхностями, на основе параметризации ВЕР была разработана параметризация двойного каньона DСЕР. Она предполагает описание города в виде расширенного каньона, в центре которого находится еще одно здание, отличающееся по высоте от зданий по бокам. Таким образом, крайнее здание может отбрасывать тень на крышу здания по середине, а отраженная с ее поверхности солнечная радиация может переотражаться на стену противоположного здания. В городских параметризациях типа «slab»-моделей влияние город-

ской поверхности на радиационные потоки учитывается через модифицированные объёмные параметры альбедо и излучательной способности. Модификация подразумевает корректировку их значений путем умножения на фактор уменьшения альбедо городским каньоном, зависящим от высоты и ширины каньона.

Теплообмен внутри городской застройки в моделях городского полога параметризуется путем решения уравнения теплового баланса для каждого элемента каньона (крыши, стены и дороги). Для более полного описания потока тепла внутри здания или дороги соответствующая поверхность разбивается на несколько слоев, каждый из которых обменивается теплом с соседними слоями. В «slab»-моделях вся городская ячейка имеет одинаковую температуру поверхности, а влияние города на тепловой баланс параметризуется через модификацию значений теплопроводности и теплосодействия. При расчете баланса влаги поверхность каньона предполагается непроницаемой, а емкость горизонтальных элементов: крыши и дороги (на которых может накапливаться влага) - конечной. Поэтому влага частично испаряется с поверхности, а излишек влаги отводится через дренажную систему канализации. В параметризации TERRA-URB помимо емкости также задается распределение резервуаров (доли поверхности, занятой влагой) по глубине для более близкого к реальности описания потоков скрытого тепла с городской поверхности.

Турбулентный обмен в моделях городского полога может описываться в соответствии с двумя различными методиками. Как правило, в одноуровневых городских параметризациях используется подход, основанный на теории подобия Монина-Обухова. Предполагается, что скорость ветра над каньоном изменяется по логарифмическому закону, а внутри – по экспоненциальному. Коэффициенты турбулентного тепло- и влагообмена в общем случае зависят от числа Ричардсона, скорости ветра в каньоне и параметров динамической и термической шероховатости. Потоки явного и скрытого тепла рассчитываются через формулы теории подобия отдельно с поверхности крыши и от пространства каньона и затем агрегируются на уровне полога или модели атмосферы. В многоуровневых моделях городского полога используется подход силы сопротивления («drag approach»). В отличие от одноуровневых моделей предполагается, что сетка мезомасштабной модели погружена внутрь городского полога, в связи с чем в уравнения атмосферной модели для импульса, тенденции температуры и турбулентной кинетической энергии добавляется слагаемое, характеризующее дополнительный вклад городской среды. Эти слагаемые в свою очередь рассчитываются на сетке городской модели, отдельно параметризуя вклад горизонтальных и вертикальных поверхностей каньона.

Антропогенное воздействие города на атмосферные потоки может задаваться различными способами. Во-первых, путем добавления дополнительных потоков тепла и влаги, связанных с автотранспортом и промышленностью. Во-вторых, заданием внутренней температуры здания, которая может быть, как постоянной в течение всего года (за счет отопления в холодный период и работе кондиционеров в жаркий), так и иметь некоторый годовой ход. Предполагается, что поток тепла, связанный с внутренними процессами здания, выделяется в атмосферу через диффузионный поток. Более полно описать человеческую деятельность внутри дома возможно с помощью специальной модели теплового баланса здания – BEM (Building Energy Model), включение которой в городские параметризации становится все более распространенным. Модель здания BEM умеет рассчитывать количество тепла и влаги, выделяемое в атмосферу, при отоплении и кондиционировании зданий, а также связанное с присутствием в комнате людей, электрических приборов и пр. В последнее время также четко прослеживается тренд на включение в городские параметризации городской растительности, которая может учитываться неявным образом как плоская поверхность с характерными значениями альбедо и листового индекса, или явным образом, непосредственно участвуя в радиационных и турбулентных взаимодействиях.

	TERRA-URB [Wouters, 2015]	TEB [Masson, 2000]	BER [Martilli, 2002]	DCEP [Schubert, 2012]
Радиационный баланс поверхности	●	●●	●●	●●●
Теплообмен в деятельном слое суши	●	●	●●	●●
Баланс влаги на поверхности	●●	●	○	○
Турбулентный обмен	●	●●	●●	●●●
Антропогенные потоки	●	●●	●	●
Городская растительность	○	●	●	○

**Полнота описания:** ○ не описано ● слабо ●● средне ●●● достаточно полно

**Сложность описания:** 1 кружочек низкая 2 кружочка средняя 3 кружочка высокая

**Рисунок 1.** Обобщающая таблица различных типов городских параметризаций по полноте учитываемых ими физических процессов и сложности их описания.

На основе проведенного литературного обзора была составлена обобщающая таблица различных типов городских параметризаций по полноте учитываемых ими физических процессов и сложности их описания (Рис. 1). Стоит отметить, что одноуровневая модель городского полога ТЕВ кажется наиболее сбалансированной среди рассмотренных параметризаций, так как, с одной стороны, в ней описываются все основные физические процессы взаимодействия урбанизированной поверхности с атмосферой, с другой стороны, это описание можно охарактеризовать средним уровнем сложности. Тем не менее, в этой параметризации содержится ряд эмпирических зависимостей, использующихся при расчете турбулентных потоков тепла и влаги с поверхности в атмосферу. Проверить корректность результатов, полученных по этим формулам, возможно с помощью высоко детального вихреразрешающего моделирования (LES моделирования), что и планируется сделать в рамках дальнейшей работы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M. W. *An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models*, – *Bound.-Lay. Meteorol.*, 2002, vol. 104, pp. 261–304.
2. Masson, V. *A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models*. – *Bound.-Lay. Meteorol.*, 2000, vol. 94, pp. 357–397.
3. Nunez M., Oke T. R. *The Energy Balance of an Urban Canyon*, – *Journal of Applied Meteorology*, 1977.
4. Schubert, S., Grossman-Clarke, Susanne Martilli, Alberto. *A Double-Canyon Radiation Scheme for Multi-Layer Urban Canopy Models*, – *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, vol. 145(3), pp. 439-468.
5. Wouters H., Demuzere M., De Ridder K., van Lipzig N.P. *The impact of impervious water-storage parametrization on urban climate modeling*. – *Urban Climate*, 2015, vol. 11. pp. 24–50.

## Experimental studies of the effect of thermal inhomogeneity on turbulence characteristics (coherent structures) in an urban canyon in summer and winter

Pashkin A.D.<sup>1</sup>, Repina I.A.<sup>1,2,4</sup>, Stepanenko V.M.<sup>2,3,4</sup>, Bogomolov V.Yu.<sup>1,2,5</sup>, Smirnov S.V.<sup>1,5</sup>, Tel'minov A.E.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: artem.ifa64@gmail.com

The information on turbulent heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer (ABL) is need for climate modeling and weather forecasting. The parametrization traditionally used in atmospheric modeling, energy-balance and biogeochemical calculations is based on the Monin-Obukhov similarity theory (MOST), which assumes an underlying surface having a uniform horizontal distribution of aerodynamic and temperature roughness and turbulent fluxes (Monin, Obukhov 1954). Over heterogeneous landscapes, the conditions of statistical homogeneity are violated, which requires specialized experiments to establish the limits of applicability of the MOST and to study both the vertical and horizontal structure of turbulence in the surface layer of the atmosphere (Stepanenko et al., 2018, Barskov et al., 2017). In the presence of horizontal and vertical gradients of turbulent transfer, the use of MOST should lead to errors, the level of which is currently not well understood. Also, the presence of spatial inhomogeneities can serve as a cause of thermal non-adjunction, a problem identified in many field experiments. Conventionally, surface heterogeneity can be divided into three groups, which can be combined with each other: a step of different height and length, which causes the wind flow to break off (the edge of the forest, the sea shore, the precipice), areas with sharply excellent roughness among the uniform terrain (forest glades, lakes surrounded by forest, city squares) and extended tunnels (river beds, mountain gorges, city canyons). Field measurements of atmospheric turbulence characteristics in such conditions are extremely rare, especially considering the spatial heterogeneity of atmospheric turbulence, and the estimates of the spatial distribution of the characteristics of turbulence mainly rely on the results of LES modeling and laboratory experiments.

In the present work the experiment, which is carried out under all-weather monitoring atmospheric turbulence structure in conditions similar to urban canyon conditions. Measurements are made on the basis of



the Geophysical Observatory of the Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Tomsk. The measurement system includes seven sonic anemometers located at different points on the ground platform and at different heights. Measurements are accompanied by recording the surface temperature, the components of the radiation balance, and the structure of the atmospheric boundary layer. Data collection is performed on a server. The location of the sensors of the ground platform allows to evaluate the members of the balance equations and, accordingly, the contribution of horizontal and vertical transport to the formation of turbulent fluxes.

This paper analyzes periods with a predominance of stable stratification and periods with a predominance of unstable stratification for a certain direction of the air flow flowing around the canyon. The difference of turbulent characteristics in the presence of pronounced thermal surface roughness in the canyon in summer and absence in winter is considered.

*The measurements were carried out with the support of the RNF grant 21-17-00249, data analysis was carried out with the support of RFBR 20-05-00834, calibration and preparation of measuring equipment was carried out with the support of project No. IX.138.2.3 (state assignment of IMCES SB RAS).*

## Экспериментальные исследования влияния термической неоднородности на характеристики турбулентности (когерентные структуры) в городском каньоне в летний и зимний период

Пашкин А.Д.<sup>1</sup>, Репина И.А.<sup>1,2,4</sup>, Степаненко В.М.<sup>2,3,4</sup>, Богомолов В.Ю.<sup>1,2,5</sup>, Смирнов С.В.<sup>1,5</sup>, Тельминов А.Е.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: artem.ifa64@gmail.com

Традиционно применяемые параметризации, используемые для численного прогноза погоды и моделирования климата, основаны на выводах теории подобия Монина – Обухова (ТПМО), которая предполагает подстилающую поверхность с однородным распределением аэродинамической и температурной шероховатости, а также стационарность турбулентных потоков по горизонтали и в приземном слое атмосферы [1]. Над неоднородными ландшафтами эти условия нарушаются [2]. В ТПМО рассматриваются связи между первыми и вторыми статистическими моментами термогидродинамических величин, в то время как в неоднородном ландшафте значительную роль в формировании турбулентного режима играют т. н. когерентные структуры, при наличии которых возникает связь между вторыми и третьими моментами [3, 4].

В данном исследовании проверяется предположение, что для однотипных неоднородных ландшафтов (например, городских каньонов) существуют универсальные формы зависимостей между статистическими моментами, в которых безразмерные константы могут быть связаны с геометрическими параметрами конкретной местности. Выявление таких зависимостей будет способствовать разработке новых методов параметризации обмена импульсом и скалярными характеристиками между неоднородной поверхностью и атмосферой.

Для случая, когда большая часть дисперсии термогидродинамических полей приходится на крупные (сопоставимые с толщиной пограничного слоя) структуры, в которых выделяются упорядоченные восходящие и нисходящие струи, в [3] предложена т. н. бимодальная модель. Крупномасштабными структурами названы конвективные ячейки при безветрии или роликовые циркуляции при сильном ветре. Наличие таких структур приводит к тому, что вертикальные потоки переносимых субстанций на некоторой высоте  $z$  могут иметь нелокальное происхождение, т. е. не определяться их средними вертикальными градиентами на данной высоте. Бимодальная модель включает адвективный и диффузионный механизмы переноса. В средней области пограничного слоя, где доминирует нелокальный перенос, предложена параметризация потока потенциальной температуры  $w'w'\theta'$  по типу конвективной адвекции. Третьи моменты  $w'^3$  и  $w'w'\theta'$  связаны с потоком потенциальной температуры  $w'\theta'$  и, соответственно, с вертикальным потоком явного тепла через соотношение:

$$\overline{w'w'\theta'} = C_w S_w (\overline{w'^2})^{1/2} \overline{w'\theta'} \quad (1)$$

где  $S_w = \frac{\overline{w'^3}}{\overline{w'^2}^{3/2}}$  – коэффициент асимметрии распределения вертикальной скорости,  $C_w$  – безразмерная константа.

Аналогичным образом связан поток дисперсии потенциальной температуры с потоком тепла:

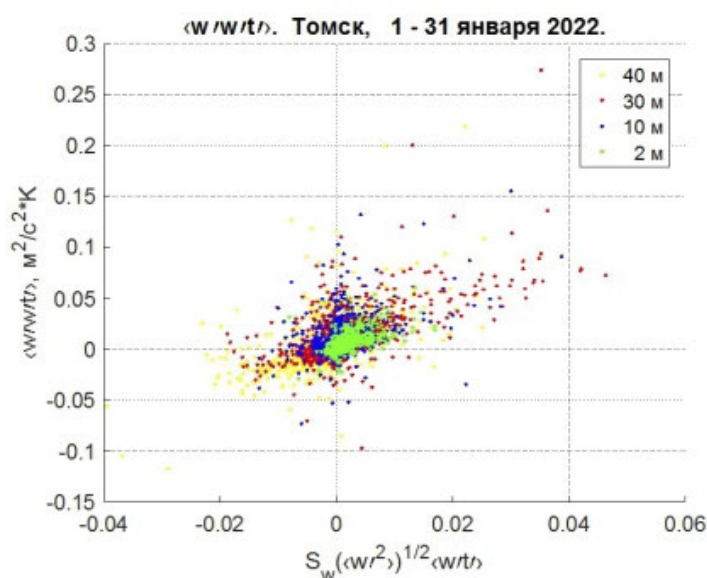
$$\overline{w'\theta'\theta'} = C_\theta S_\theta (\overline{\theta'^2})^{1/2} \overline{w'\theta'} \quad (2)$$

В параметризации [3]  $C_w$  должно быть равно 1. Границы применимости теории расширены в [4], и безразмерные коэффициенты  $C_w$  и  $C_\theta$  могут быть порядка 1. Если значения  $C_w$  и  $C_\theta$  по данным пульсационных измерений окажутся порядка 1, то это будет свидетельствовать в пользу наличия когерентных структур (крупных вихрей) и их определяющего вклада в вертикальные турбулентные потоки. В [4] было экспериментально показано, что турбулентные потоки над небольшим озером, окружённым лесом, формируются за счёт крупных структур, не описываемых теорией подобия Монина – Обухова.

Измерения проводятся на базе геофизической обсерватории (ГО) Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН, г. Томск. Измерения проводятся с помощью акустических анемометров АМК–03 совместного производства ИМКЭС СО РАН и ООО "Сибаналитприбор" (Россия). Приборы позволяют измерять пульсации трех компонент скорости ветра и акустической температуры с частотой до 80 Гц.

В докладе представлена усовершенствованная схема эксперимента, описанного в [5]. Измерительная площадка находится в условиях, подобных городскому каньону.

Осенью 2021 г. в 40 м от центра площадки ГО установлена 40-метровая мачта (вместо 28-метровой), что позволит получать более репрезентативные данные о набегающем ветровом потоке и проводить градиентные метеорологические, радиационные и газоаналитические измерения. В измерительную схему к пяти АМК-03 добавлен ещё один на уровень 40 м. Уровень 28 м заменён на уровень 30 м.



**Рис. 1.**

Диаграмма рассеяния для распределения потока потока явного тепла, рассчитанного из пульсационных измерений и рассчитанного по формуле (1) для четырёх уровней измерений.

В настоящей работе анализируются периоды с преобладанием устойчивой стратификации и периоды с преобладанием неустойчивой стратификации для определённого направления воздушного потока, обтекающего каньон. Рассматривается различие турбулентных характеристик при наличии в летний период и отсутствии в зимний период выраженной термической шероховатости поверхности в каньоне.

Измерения проводились при поддержке гранта РФФ 21-17-00249, анализ данных проведен при поддержке РФФИ 20-05-00834, калибровка и подготовка измерительной аппаратуры проведена при поддержке проекта № IX.138.2.3 (государственное задание ИМКЭС СО РАН).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды ГЕОФИАН. 1954. № 24 (151). С. 163–187.
2. Степаненко В.М., Репина И.А., Барсков К.В., Артамонов А.Ю., Богомолов В.Ю., Варенцов М.И., Гавриков А.В., Пашкин А.Д. Исследование структуры атмосферной турбулентности над неоднородным ландшафтом // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сб. тр. М.: Физматкнига, 2018. С. 81–93.

3. Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. *Third-Order Transport and Nonlocal Turbulence Closures for Convective Boundary Layers* // *J. Atm. Sci.* 1999. V. 56. pp. 3463–3477.
4. Barskov K.V., Stepanenko V.M., Repina I. A., Artamonov A.Yu., Gavrikov A.A. *Two regimes of turbulent fluxes above frozen small lake surrounded by forest* // *Bound.-Layer Meteorol.* 2019. V. 173(3). pp. 311–320.
5. Пашкин А.Д., Репина И.А., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Смирнов С.В., Тельминов А.Е. *Связь статистических характеристик турбулентности с когерентными структурами по результатам пульсационных измерений в городском каньоне* // *Процессы в геосредах.* 2021 № 1 (27). С. 1020–1027.

## The contribution of synoptic scale fluctuations to the variability of turbulent heat fluxes on the surface of the oceans in the Northern hemisphere from 1979 to 2018

Moraru E.I., Loginov S.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [MoraruEI@yandex.ru](mailto:MoraruEI@yandex.ru)

The aim of the study was to estimate the contribution of synoptic scale fluctuations to the variability of latent (LE) and sensible (SH) heat fluxes on the surface of the oceans in the Northern hemisphere from 1979 to 2018 in January.

The study was conducted on a 6-h ERA-Interim reanalysis data for the period 1979–2018 with a spatial resolution of  $1.125 \times 1.125^\circ$ .

Anomalies of turbulent heat fluxes of the synoptic time scale, were determined by filtering the initial time series. The variability of the synoptic scale (2–7 days) is usually associated with the manifestation of cyclonic and anticyclonic activity. The analysis of the variability LE and SH of the average monthly time scale is carried out for the low-frequency component of the fluxes (with a time scale larger than the synoptic time scale). The magnitude of the contribution of synoptic scale fluctuations to the variability of heat fluxes was estimated by the coefficient of determination.

It was established that in the Gulf Stream and Kuroshio currents, where the maximum monthly average values of turbulent heat fluxes are noted, intensive heat exchange is also observed on the synoptic time scale.

Comparison of the two time intervals showed that in the Atlantic and Pacific Oceans at the beginning of the XXI century in January there is an increase in the turbulent heat fluxes on the average monthly time scale and its decrease on the synoptic time scale. At the same time, the sign of anomalies changes to the opposite: in the Gulf Stream area, anomalies become predominantly negative, and in the Kuroshio area, on the contrary, mostly positive. These changes are primarily due to the dynamics of the atmospheric action centers over the oceans, which have been increasing in recent decades (Mokhov I.I., 2020).

The estimation of the contribution of synoptic scale fluctuations to the variability of turbulent heat fluxes showed that the greatest contribution is observed in the mid-latitudes of the Atlantic and Pacific Oceans (about 40–50%) with maximum values of contribution in the Pacific Ocean. At the same time at the beginning of the XXI century the number of regions with the maximum coefficient of determination decreased by half, which shifted to the east part in the Atlantic Ocean (up to 62%) and to the central part in the Pacific Ocean (up to 93%).

*The study was supported by the state budget theme № 121031300154-1.*

# Вклад флуктуаций синоптического масштаба в изменчивость турбулентных потоков тепла на поверхности океанов Северного полушария с 1979 по 2018 гг.

Морару Е.И., Логинов С.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [MoraruEl@yandex.ru](mailto:MoraruEl@yandex.ru)

Одним из факторов, влияющих на современные изменения климата, является взаимодействие океана и атмосферы, приводящее к перераспределению и трансформации энергии между двумя средами [1]. Влияние океана на атмосферу происходит, в первую очередь, через турбулентные потоки тепла и влаги, а также тепловое длинноволновое излучение, альбедо и испарение. Это влияние осуществляем как в синоптическом, так и в среднемесячном масштабе времени.

Целью исследования являлась оценка вклада флуктуаций синоптического масштаба в изменчивость потоков скрытого (LE) и явного (SH) тепла на поверхности океанов Северного полушария с 1979 по 2018 гг. в январе.

Расчеты проводились по 6-ч данным реанализа ERA-Interim за период 1979–2018 гг. с пространственным разрешением  $1,125 \times 1,125^\circ$  по широте и долготе.

Аномалии турбулентных потоков тепла синоптического временного масштаба, то есть соответствующие временному масштабу циклонов/антициклонов (2-7 дней), определялись с помощью фильтрации исходных временных рядов по [2]. Анализ изменчивости среднемесячных величин LE и SH проводился для низкочастотной компоненты потоков (с временным масштабом больше синоптических). Величина вклада флуктуаций синоптического масштаба в изменчивость потоков тепла оценивалась по коэффициенту детерминации (D), определяемому из уравнения линейной регрессии, связывающей среднемесячную изменчивость потоков тепла с изменчивостью синоптического масштаба.

На рис. 1 приведено пространственное распределение LE как в синоптическом, так и в межгодовом масштабе времени в январе, а также  $D_{LE}$ .

Установлено, что в районах течений Гольфстрим и Куроисио, где отмечаются максимальные среднемесячные значения потоков скрытого тепла (рис. 1а), также наблюдается интенсивный теплообмен на синоптическом временном масштабе (рис. 1б). Согласно [3], в районе течения Гольфстрим синоптические аномалии поверхностных турбулентных потоков являются результатом совместного воздействия циклонической деятельности и высоких градиентов температуры поверхности океана.

Сравнение двух временных интервалов показало, что как в Атлантическом, так и в Тихом океане в начале XXI в. в январе происходит увеличение величины LE на среднемесячном временном масштабе и её уменьшение на синоптическом. При этом происходит смена знака аномалий на противоположный: в районе Гольфстрим аномалии становятся преимущественно отрицательные, а в районе Куроисио, напротив, преимущественно положительные. Указанные изменения в первую очередь обусловлены динамикой центров действия атмосферы над океанами, которые усиливаются в последние десятилетия [4].

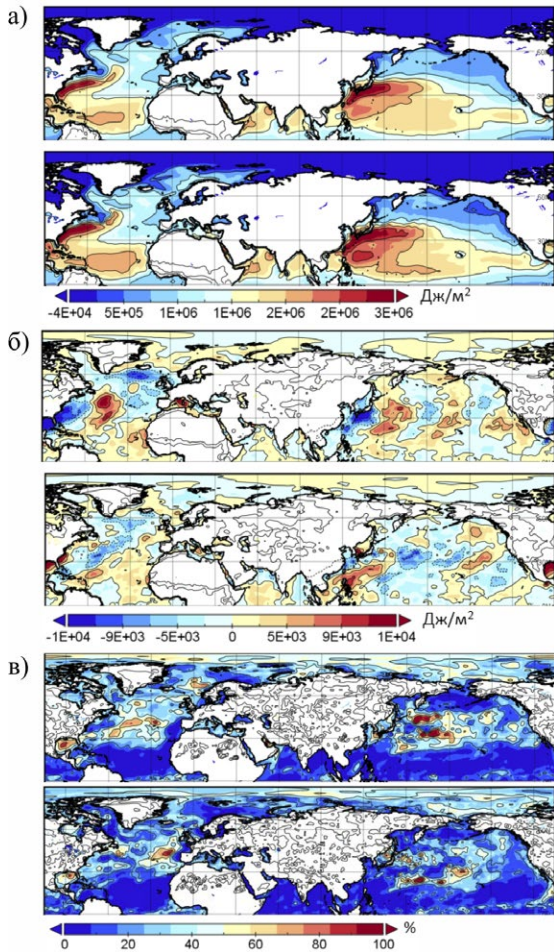
Аналогичный анализ проведён для потока явного тепла, пространственное распределение которого приведено на рис. 2.

В начале XXI в. в целом происходит уменьшение SH на синоптическом временном масштабе в океанах Северного полушария, в том числе и в западной части Северного Ледовитого океана (СЛО). Указанные изменения в арктических широтах могут быть обусловлены ускоренным потеплением, активным таянием морского льда и притоком Атлантических вод в акваторию в начале XXI в. С другой стороны, существенный вклад в изменчивость потоков вносит динамика характеристик атмосферной циркуляции, которая проявляется в усилении юго-западного переноса в начале XXI в. над Баренцевым морем.

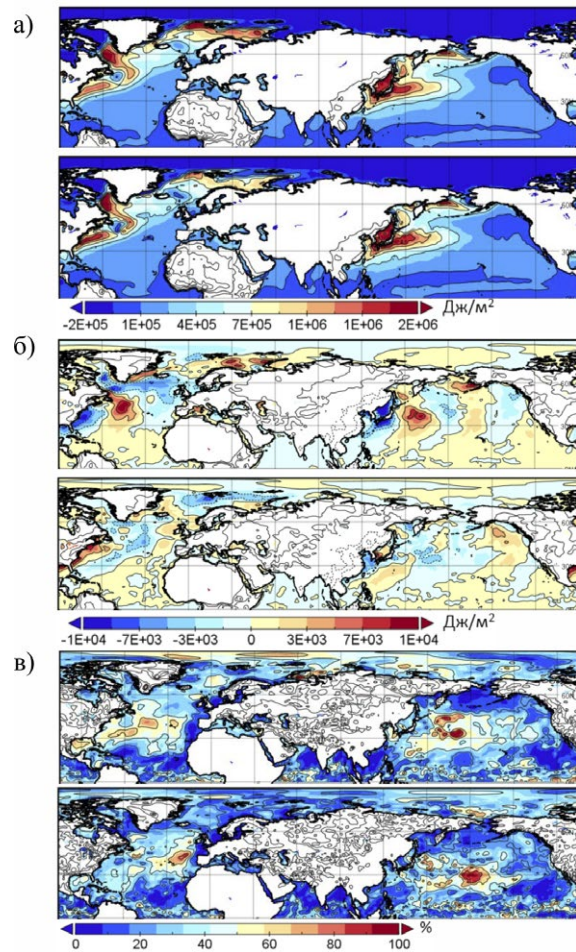
Оценка вклада флуктуаций синоптического масштаба в изменчивость турбулентных потоков тепла показала, что наибольший вклад наблюдается в средних широтах Атлантического и Тихого океанов (около 40-50%) с максимальными значениями  $D_{LE}$  и  $D_{SH}$  в Тихом океане (рис. 1в и рис. 2в). В СЛО доля вклада не превышает 30%, при этом она уменьшается в начале XXI в.

Максимальные изменения в начале XXI в. коэффициента детерминации наблюдаются в средних широтах океана, при этом широтный профиль  $D_{LE}$  наиболее существенно изменился вблизи  $40^\circ$  с.ш. в Атлантическом океане и вблизи  $30^\circ$  с.ш. в Тихом океане (рис. 3). Количество областей с максимальным вкладом флуктуаций синоптического масштаба в изменчивость потоков скрытого тепла в начале XXI в. уменьшилось до одного. При этом эти области сместились на восток в Атлантическом океане (до 62%) и в центральную часть в Тихом океане (до 93%).



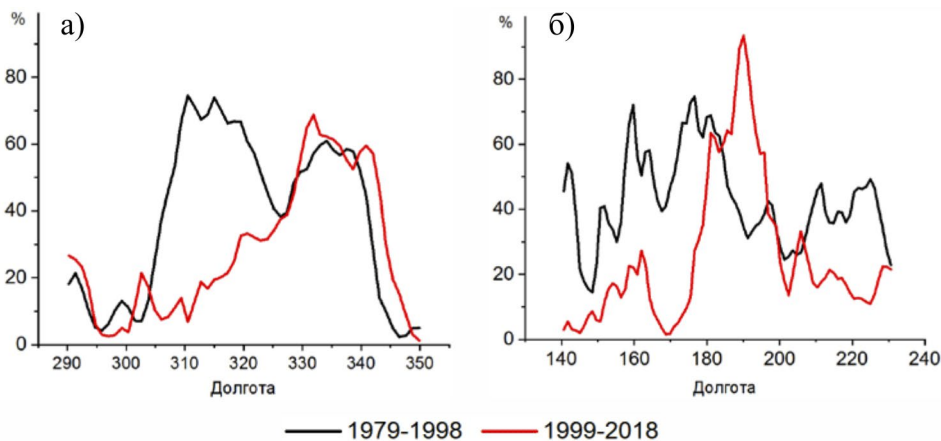


**Рис. 1.** Пространственное распределение потока скрытого тепла на поверхности океанов Северного полушария в январе за периоды 1979–1998 гг. (левая панель) и 1999–2018 гг. (правая панель): а) низкочастотная изменчивость; б) изменчивость синоптического масштаба; в)  $D_{LE}$ .



**Рис. 2.** Пространственное распределение потока явного тепла на поверхности океанов Северного полушария в январе за периоды 1979–1998 гг. (левая панель) и 1999–2018 гг. (правая панель): а) низкочастотная изменчивость; б) изменчивость синоптического масштаба; в)  $D_{SH}$ .

Атлантический океан (40°с.ш.) Тихий океан (30°с.ш.)



**Рис. 3.**  $D_{LE}$  вдоль широты 40°с.ш. в Атлантическом океане (а) и вдоль широты 30°с.ш. в Тихом океане (б) в январе.

Подобные изменения получены для потока явного тепла.

Таким образом, проведено исследование пространственно-временной изменчивости турбулентных потоков тепла на поверхности океанов Северного полушария как на синоптическом, так и на межгодо-  
СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЁВ

вом временных масштабах за период 1979–2018 гг. в январе. Сравнение периодов 1979–1998 гг. и 1999–2018 гг. показало, что как в Атлантическом, так и в Тихом океане в начале XXI в. происходит увеличение величины потоков тепла на среднемесячном временном масштабе и их уменьшение на синоптическом. Кроме того обнаружено, что в средних широтах Тихого и Атлантического океанах взаимодействие океана и атмосферы происходит преимущественно на синоптическом масштабе. При этом в начале XXI в. количество областей с максимальным вкладом флуктуаций синоптического масштаба в изменчивость турбулентных потоков уменьшилось, которые сместились на восток в Атлантическом океане (до 62%) и в центральную части в Тихом океане (до 93%).

*Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300154-1.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ланно С.С., Гулёв С.К., Рождественский А.Е. *Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан - атмосфера и энергоактивные области мирового океана* – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 336 с.
2. Podnebesnykh N.V., Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Usova (Moraru) E.I. *Vortex circulation and anomalous meteorological phenomena over the Asian territory of Russia in the context of climate change // Proc. SPIE.* – 2019. – Vol. 11208. – P. 1120883.
3. Zolina O., Gulev S.K. *Synoptic variability of ocean-atmosphere turbulent fluxes associated with atmospheric cyclones // Journal of Climate.* – 2003. – Vol. 16. – P. 2717–2734.
4. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. *Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология.* 2020. – № 11. – С. 5–23.

## СЕКЦИЯ 5

Состав атмосферы,  
перенос загрязнений  
и изменения климата

## SESSION 5

Air composition,  
Pollution Transport  
and Climate Change

### Numerical modeling of the influence of wind speed and temperature inversions on the air quality in the city

Starchenko A.V.<sup>1,2</sup>, Kizhner L.I.<sup>1</sup>,  
Danilkin E.A.<sup>1,2</sup>, Shelmina E.A.<sup>1,3</sup>,  
Prokhanov S.A.<sup>1</sup>, Odintsov S.L.<sup>2,1</sup>,  
Strebkova E.A.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russia

In cities, in the presence of a large number of low emission sources and with a high frequency of surface and low elevated inversions, dangerous conditions are created – pollutants accumulate in large quantities. In most regions of the Russian Federation, inversions are especially frequent in the surface layer at night. Prolonged and stable inversions are formed during calm. Inversions may increase due to the terrain. In low places (hollows, gorges, depressions), the cooling of the surface layer is more pronounced, the inversion may be more intense due to the temperature difference, and the effect of pollution may be enhanced.

In this paper, a developed mesoscale model of numerical weather forecasting and a chemical transport model [1,2] were used to study the relationship between weak wind, temperature inversions and atmospheric air quality in Tomsk.

The selection of episodes with weak wind and temperature inversions was carried out using the instrument base of the JUC "Atmosphere" of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS. Ultrasonic weather stations "Meteo-2" and temperature profilers MTP-5 were used.

For the selected dates for the conditions of Tomsk, calculations were performed using mesoscale models [1,2]. Comparison of calculations with observations of surface meteorological parameters and vertical temperature profiles, as well as with calculations based on the WRF model showed that the TSUNM3 model in most cases confirms the duration and the fact of "weak" wind conditions by calculations. However, in some cases, the TSUNM3 model overestimates the values of the surface wind velocity in comparison with the observational data. The application of the developed model of atmospheric air quality confirmed the relationship of the "weak" surface wind with the deterioration of air quality in the city. This is especially evident in the combination of "weak" wind with conditions of stable stratification



of the surface layer of air. Similar conclusions were obtained when using a set of WRF/CAMx models [3] for the historical dates under consideration.

The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation, grant 19-71-20042.

#### REFERENCES:

1. Starchenko, A.V., Bart, A.A., Kizhner L.I., Danilkin, E.A. Mesoscale meteorological model TSUNM3 for the study and forecast of meteorological parameters of the atmospheric surface layer over a major population center // *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2020. 66, P.35-55.
2. Starchenko A., Shelmina E., Kizhner L. Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, № 11. P. 1-15.
3. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-68CSTR. 2008. 100 p.

## Численное моделирование влияния скорости ветра и температурных инверсий на качество воздуха в городе

Старченко А.В.<sup>1,2</sup>, Кижнер Л.И.<sup>1</sup>, Данилкин Е.А.<sup>1,2</sup>, Шельмина Е.А.<sup>1,3</sup>, Проханов С.А.<sup>1</sup>,  
Одинцов С.Л.<sup>2,1</sup>, Стребкова Е.А.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Томский Национальный Исследовательский Государственный Университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева, пл. Академика Зуева, Томск, Россия

<sup>3</sup>Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, Томск, Россия

Среди задач по метеорологическим аспектам загрязнения атмосферы большое значение приобретают исследования закономерностей распространения атмосферных примесей и особенностей их пространственно-временного распределения. Они являются основой для оценки состояния и изменений загрязнения воздуха, а также разработки мероприятий по обеспечению чистоты атмосферы.

Рассеяние примесей в атмосфере, перенос и распространение концентрации связаны с турбулентной диффузией. Интенсивность турбулентного перемешивания возрастает при конвективных условиях и уменьшается при безразличном состоянии и инверсии. Таким образом, загрязнение приземного слоя воздуха зависит от метеорологических факторов.

Обычно для характеристики состояния атмосферы выделяют нормальные (не способствующие увеличению концентрации вредных примесей) и неблагоприятные метеоусловия, приводящие к увеличению загрязнения атмосферы. Нормальные условия характеризуются неустойчивым состоянием атмосферы, обуславливающим перенос примесей от источников. Распространение примеси и ее концентрация зависят от высоты источника, от изменения с высотой ветра и температуры. Важным критерием неблагоприятных метеоусловий является наличие в атмосфере инверсии. Чем ниже источник загрязнения и чем ближе к нему основание инверсии, тем больше концентрация примесей в приземном слое. С уменьшением скорости ветра концентрация увеличивается. Малые скорости ветра опасны в условиях приземных инверсий, а большие (порядка 5 м/с) – при приподнятых [1]. Концентрация вредных примесей возрастает при туманах, аккумулирующих примеси и образующих вещества повышенной токсичности.

В городах при наличии большого числа низких источников выбросов и при высокой повторяемости приземных и низких приподнятых инверсий создаются опасные условия – примеси накапливаются в большом количестве. В большинстве регионов РФ инверсии особенно часты в приземном слое ночью. Длительные и устойчивые инверсии образуются при штилях. Инверсии могут усиливаться из-за рельефа местности. В низких местах (котловинах, ущельях, впадинах) охлаждение приземного слоя выражено больше, инверсия может быть более интенсивной по перепаду температур, и эффект загрязнения может быть усилен [1,2].

В данной работе для исследования взаимосвязи слабого ветра, температурных инверсий и качества атмосферного воздуха в городе Томск использовались развиваемые мезомасштабная модель численного прогноза погоды и химическая транспортная модель [3,4]. Негидростатическая мезомасштабная модель численного прогноза погоды TSUNM3 [3] использует систему трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики, тепло- и массопереноса в тропосфере и уравнение теплопроводности в верхнем слое почвы. Мезомасштабная модель рассчитывает компоненты скорости ветра, температурно-влажностные ха-



рактеристики и турбулентные параметры над территорией 100×100 км с разрешением 1 км на ближайшие 24 часа. Фазовые превращения водяной влаги в атмосфере в данной работе моделируются с помощью известной 6-классовой схемы параметризации микрофизики влаги WSM6, разработанной Хонгом и Лимом для известной мезомасштабной метеорологической модели Weather Research and Forecasting [5]. Для пограничного слоя атмосферы используется модель турбулентности, состоящая из уравнения для кинетической энергии турбулентности, а также алгебраических соотношений для определения коэффициентов турбулентной диффузии. Также в модели рассматривается протекание следующих атмосферных процессов: радиационные факторы, обусловленные влиянием коротковолновой и длинноволновой радиации в рассматриваемом слое атмосферы с учетом рассеяния и ослабления излучения при ясном небе, поглощения излучения водяным паром, поглощения и отражения облаками; нагрев подстилающей поверхности проникающей солнечной коротковолновой радиацией и ее выхолаживание за счет длинноволнового излучения в темное время суток; турбулентный обмен импульсом, теплом, влагой с подстилающей поверхностью. Инициализация модели TSUNM3 и обеспечение ее боковыми граничными условиями проводится на основе результатов численного прогноза погоды оперативной глобальной моделью SL-AV [6] Гидрометцентра РФ или реанализа NCAR GFS 0.25 Degree Historical Archive [7].

Для расчета концентрации компонентов примеси с учетом химических реакций применяется эйлера модель турбулентной диффузии, включающая нестационарные уравнения с описанием адвекции, турбулентной диффузии и химических реакций [4]. Поступление первичных загрязнителей атмосферного воздуха рассматривается от наземных источников – автомобильного транспорта и от приподнятых источников – труб промышленных предприятий. Для приподнятых источников параметры эмиссии примеси принимались постоянными и оценивались на основании годовых выбросов загрязнителей для г. Томск. Интенсивность выбросов автотранспорта менялась в течение суток.

Выбор эпизодов со слабым ветром и температурными инверсиями осуществлялся с использованием приборной базы ЦКП «Атмосфера» Института оптики атмосферы СО РАН. Использовались ультразвуковые метеостанции «Метео-2» и температурные профиломеры МТР-5. В результате обработки непрерывных наблюдений в 2019-2021 гг. были установлены даты для моделирования, когда в сопоставимых 10-минутных интервалах времени скорость горизонтального ветра одновременно была менее 1 м/с во всех пунктах наблюдения на протяжении более шести часов. Также данные наблюдений говорят о большой длительности существования инверсий в течение всего периода. В Томске зимой больше продолжительность приподнятых инверсий, летом – приземных.

На основе обработки результатов наблюдений, можно сказать, что условия для рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере в летнее время хуже по сравнению с другими периодами. Этому способствуют наибольшая повторяемость слабых ветров и штилей, туманов, большая продолжительность солнечного сияния и большая повторяемость температурных инверсий. Благоприятными факторами очищения атмосферы являются осадки, большая часть которых выпадает летом. Зимой основным фактором загрязнения атмосферы являются температурные инверсии. Наиболее благоприятные метеорологические условия для очищения атмосферы создаются в переходные сезоны (несколько большие повторяемость ветров 6 м/с и более, и число дней с осадками).

Для выбранных дат для условий г. Томск выполнены расчеты с использованием мезомасштабных моделей [3,4]. Сравнение расчетов с наблюдениями приземных метеопараметров и вертикальных профилей температуры, а также с расчетами по модели WRF показало, что модель TSUNM3 в большинстве случаев подтверждает расчетами продолжительность и сам факт условий «слабого» ветра. Однако в ряде случаев модель TSUNM3 завышает значения скорости приземного ветра по сравнению с данными наблюдений. Применение развиваемой модели качества атмосферного воздуха подтвердило взаимосвязь «слабого» приземного ветра с ухудшением качества воздуха в городе. Особенно это проявляется в комбинации «слабого» ветра с условиями устойчивой стратификации приземного слоя воздуха. Похожие выводы были получены при применении комплекса моделей WRF/CAMx для рассматриваемых исторических дат.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-71-20042.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Безуглая Э.Ю. *Мониторинг состояния атмосферы в городах.* Л.: ГМИ, 1986. 99 с.
2. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Захарова П.В., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. *Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации.* 2014. № 351. С. 154-172.
3. Старченко А.В., Барт А.А., Кижнер Л.И., Данилкин Е.А. *Мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 для исследования и прогнозирования состояния метеопараметров приземного слоя атмосферы над крупным населенным пунктом // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика.* 2020. № 66. — С. 35-55.



4. Starchenko A., Shelmina E., Kizhner L. Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, № 11. P. 1-15.
5. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-68CSTR. 2008. 100 p.
6. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Махнорылова С.В., Мизяк В.Г., Рогутков В.С. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛИАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды // *Метеорология и гидрология*. — 2018, №11. — С.90-99.
7. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. (2015) NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO.

## On estimation of the emissions of atmospheric gas impurities and turbulence parameters in the simulation of impurities transport processes

Davydova M.<sup>1</sup>, Elanskiy N.F.<sup>2</sup>, Mukhartova Yu.<sup>2</sup>, Postyliakov O.<sup>2</sup>, Ponomarev N.<sup>1</sup>, Chekina V.<sup>1</sup>, Shilkin A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>RPA "Typhoon", Obninsk, Russia)

E-mail: [m.davydova@physics.msu.ru](mailto:m.davydova@physics.msu.ru)

Improving air quality is an actual task for almost all major cities in the world. Despite the widespread systems for monitoring the composition of the atmosphere and the development of numerical methods to assimilate observational data, two main tasks still remain unresolved: the development of a system for quoting emissions from industrial enterprises and forecasting the formation of extreme environmental situations on the territory of the city and in its plumes that can have an adverse impact on the environment and human health. Currently existing chemical transport models allow us to reconstruct the fields of gas and aerosol impurities in the atmosphere of cities and entire regions, identify their sources, optimize the emission quota system and predict changes in the surface air composition for 1-2 days. But, as experience shows, there is a large degree of uncertainty in parameters, especially in cases of significant changes in meteorological conditions and the mode of operation of urban infrastructure facilities.

The existing chemicals transport models, such as SALAMI [1] and COSMO-ART [2], adequately describe the processes of transport and chemical transformation of gas and aerosol impurities in the atmosphere. However, when considering many scenarios, there are significant discrepancies between the results of calculations and observational data, largely due to the insufficient accuracy of the input data. There are two main reasons for such discrepancies – a significant role of subjectivity in the definition of gas and aerosol impurities emissions of anthropogenic origin and large uncertainties in the description of turbulent diffusion in the atmospheric boundary layer.

In this paper, effective mathematical methods are obtained to improve input data (emissions of anthropogenic impurities and turbulent diffusion coefficients) for regional chemical transport models of the atmosphere in order to increase the efficiency of their use.

To solve the inverse problem of reconstructing unknown parameters in models, for example, the intensities of local sources of impurities or turbulence parameters, a new numerical-asymptotic approach based on methods of asymptotic analysis is applied. For the first time, the comparison of the reconstructed parameters of the pollution plume from a specific industrial enterprise with the results of a unique space experiment on observations of atmospheric composition with a record high spatial resolution ( $2.4 \times 2.4$  km) was carried out [3], which confirmed the high quality of the developed models. Also, the application of a new numerical-asymptotic approach to solving the inverse problem of impurity transfer in combination with measurement data at the "Mosecomonitoring" network stations makes it possible to obtain reliable information in a short time about the vertical profile of the turbulent diffusion coefficient taking into account seasonal variability [6] and the vertical profiles of key impurities distribution over the city.

The study was carried out with the financial support of the RSF (project № 21-17-00210) and RFBR (project № 20-05-00826).

# Об оценке эмиссий атмосферных газовых примесей и параметров турбулентности при моделировании процессов переноса примесей

Давыдова М.А.<sup>1</sup>, Еланский Н.Ф.<sup>2</sup>, Мухартова Ю.В.<sup>2</sup>, Постыляков О.В.<sup>2</sup>, Пономарев Н.А.<sup>1</sup>, Чекина В.Н.<sup>1</sup>, Шилкин А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>НПО "Тайфун", Обнинск, Россия

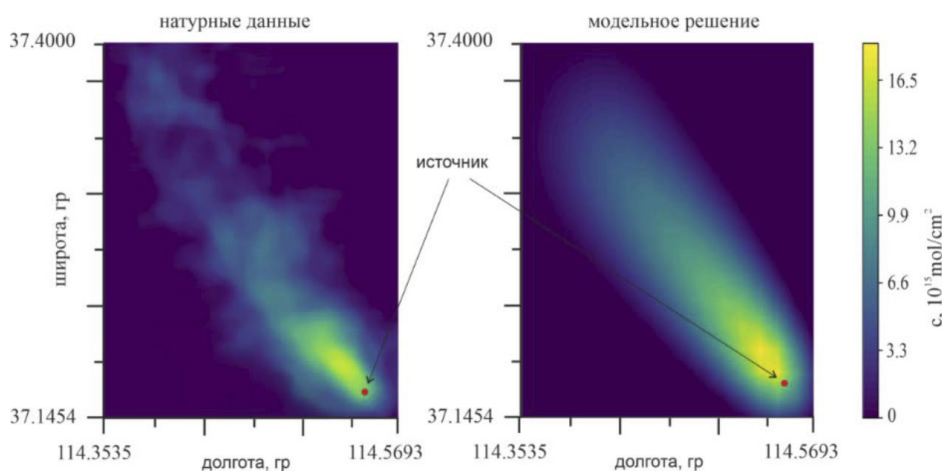
E-mail: m.davydova@physics.msu.ru

Практически для всех крупных городов мира актуальной задачей является улучшение качества воздуха. Несмотря на повсеместно действующие системы мониторинга состава атмосферы и развитие численных методов, используемых для усвоения данных наблюдений, до сих пор остаются нерешенными две основные задачи: разработка системы квотирования выбросов от промышленных предприятий и прогнозирование образования на территории города и в его шлейфах экстремальных экологических ситуаций, способных оказать неблагоприятное воздействие на состояние окружающей среды и здоровье людей. Существующие на данный момент химико-транспортные модели позволяют реконструировать поля газовых и аэрозольных примесей в атмосфере городов и целых регионов, идентифицировать их источники, оптимизировать систему квотирования выбросов и прогнозировать изменения состава приземного воздуха на 1-2 дня. Но как показывает опыт, результаты численного моделирования существенно зависят от неопределенностей в параметрах, особенно в случаях значительных изменений метеорологических условий и режима работы объектов городской инфраструктуры.

Существующие химико-транспортные модели, типа SILAM [1], COSMO-ART [2], в целом адекватно описывают процессы переноса и химической трансформации газовых и аэрозольных примесей в атмосфере. Однако при рассмотрении многих сценариев отмечаются значительные расхождения между результатами расчетов и данными наблюдений, обусловленные, во многом, недостаточной точностью входных данных. Выделяются две основные причины таких расхождений – это значительная доля субъективизма в задании эмиссий газовых и аэрозольных примесей антропогенного происхождения и большие неопределенности в описании турбулентной диффузии в атмосферном пограничном слое.

В настоящей работе получены эффективные математические методы по улучшению входных данных (эмиссии антропогенных примесей и коэффициенты турбулентной диффузии) для региональных химико-транспортных моделей атмосферы с целью повышения эффективности их использования.

Для решения обратных задач по восстановлению неизвестных параметров моделей, например, интенсивностей локальных источников примесей или параметров турбулентности, применен новый численно-асимптотический подход, использующий методы асимптотического анализа. Основу данного подхода составляет использование информации о свойствах решений прямых сингулярно возмущенных задач, полученной в результате строгого асимптотического анализа. В итоге удается свести исходную задачу к задаче с более простым численным решением и значительно сэкономить вычислительные

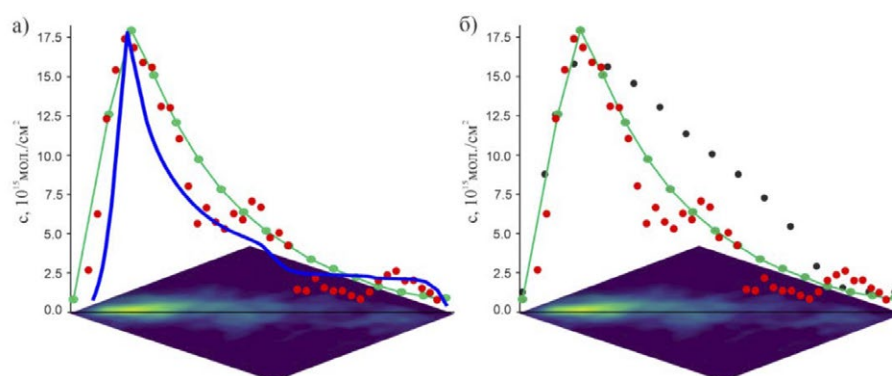


**Рис. 1.** Интегральное по высоте накопление диоксида азота NO<sub>2</sub> (провинция Хэбэй КНР, 29.09.2016, 4:30 UTC): сравнение натурального распределения с результатами моделирования на базе локальной химико-транспортной модели с восстановленными параметрами.

ресурсы, сократить время счета, повысив стабильность работы вычислительного процесса по сравнению с альтернативными, например, вариационными методами.

На основе разработанного подхода впервые проведено сопоставление восстановленных параметров шлейфа загрязненного воздуха от конкретного промышленного предприятия с результатами уникального космического эксперимента по наблюдениям состава атмосферы с рекордно высоким пространственным разрешением ( $2.4 \times 2.4$  км) [3], которое подтвердило высокое качество разработанных моделей (см., напр., рис. 1).

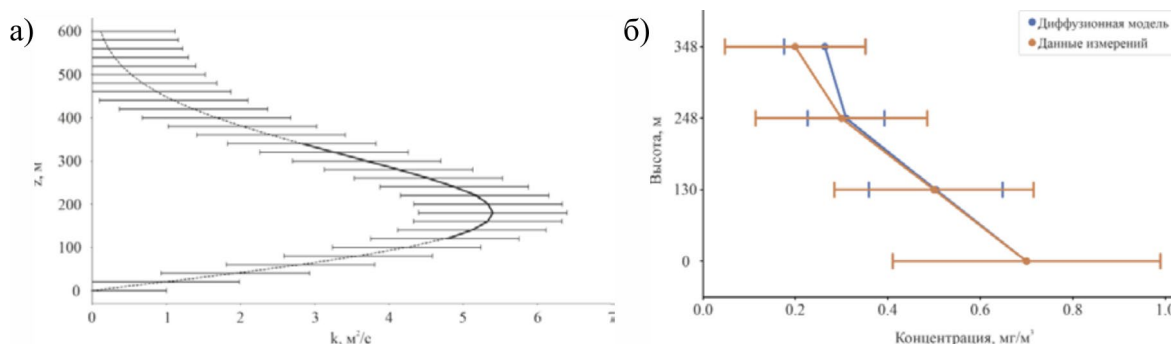
Впервые с использованием высокоточного космического мониторинга и математических методов получена оценка мощности выброса загрязняющей атмосферу примеси (диоксида азота) промышленным предприятием 110 кг/ч [4] или 100 кг/ч с учетом фотохимических процессов, протекающих в шлейфе источника. По данным инвентаризации [5] погрешность в определении интенсивности источника в провинции Хэбэй КНР на основе данных моделирования составляет около 10%. С использованием восстановленной мощности локального источника составлен прогноз распространения примеси в зависимости от метеословий.



**Рис. 2.**

Сравнение натуральных данных интегрального по высоте накопления NO<sub>2</sub> и модельных данных в сечении плоскостью вдоль направления скорости ветра: сплошная зеленая линия — распределение, полученное с использованием локальной химико-транспортной модели с восстановленными параметрами, красные точки — натуральные данные, а) сплошная синяя линия — результат моделирования с использованием альтернативной локальной химико-транспортной модели, б) черные точки — распределение, полученное с использованием региональной модели SILAM.

Применение нового численно-асимптотического подхода к решению обратной задачи переноса примеси в сочетании с данными измерений на сети станций ГПБУ «Мосэкомониторинг» позволяет в короткое время получить достоверную информацию о вертикальных профилях коэффициента турбулентной диффузии с учетом сезонной изменчивости [6] и вертикальных профилях распределения ключевых примесей над городом с высоким пространственным и временным разрешением. Восстановленный вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии по данным измерений на станции ТБ «Останкино» (г. Москва) и средние вертикальные профили концентрации оксида углерода по данным моделирования и измерений представлены на рис. 3.



**Рис. 3**

а) Средний за август 2009 г. вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии. Сплошной линией отмечен участок, на котором проводились измерения. Горизонтальные линии показывают 95% интервал значимости. б) Сравнение средних значений концентрации оксида углерода на 4-х высотных уровнях станции ТБ «Останкино» по данным измерений и модельным данным.



Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ проект № 21-17-00210 (обработка и анализ данных ТБ "Останкино") и РФФИ проект № 20-05-00826 (обработка данных космического зондирования атмосферы).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *System for Integrated modelling of Atmospheric composition*. — 2019. — URL: <http://silam.fmi.fi/index.html>.
2. *Modeling results of atmospheric dispersion of NO<sub>2</sub> in an urban area using METI-LIS and comparison with coincident mobile DOAS measurements / C. M. Dragomir [et al.] // Atmospheric Pollution Research*. — 2015. — Vol. 6, no. 3. — P. 503–510.
3. *Postylyakov O.V., A.N. Borovski, A.A. Makarenkov. First experiment on retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> over polluted areas with 2.4-km spatial resolution basing on satellite spectral measurements. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2017. V. 10466. P.104662Y-8.
4. *Давыдова М.А., Еланский Н.Ф., Захарова С.А., Постыляков О.В. Применение численно-асимптотического подхода в задаче восстановления параметров локального стационарного источника антропогенного загрязнения // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления*. 2021. Т. 496. С. 34–39.
5. *Qi J., Zheng B., Li M., Yu F., Chen C., Liu F., Zhou X., Yuan J., Zhang Q., He K. A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the beijing-tianjin-hebei region, china. // Atmospheric Environment*. vol. 170, p. 156–168. 2017.
6. *Давыдова М. А., Еланский Н. Ф., Захарова С. А. О новом подходе к задаче восстановления вертикального коэффициента турбулентной диффузии в пограничном слое атмосферы // Доклады Академии наук. Наука о Земле*. 2020. Т. 490, № 2. С. 51–56.

## Model study of the heterogeneous vegetation cover effect on the transport of gas polluting emissions in the atmospheric surface layer

Mukhartova Yu., Novikova E., Olchev A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: [muhartova@yandex.ru](mailto:muhartova@yandex.ru)

The significant increase in anthropogenic impact on the environment observed in recent decades, causing changes in vegetation and soil cover, as well as an increase in air and soil pollution, requires the development of modern methods for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, biosphere and hydrosphere [1]. Considering possible approaches to reduce the negative impact of air pollution on natural ecosystems and human living conditions, it is very important to understand the mechanisms of pollutants transport in the atmosphere and to have reliable technologies and methods to describe the influence of various external factors on the transport of atmospheric impurities.

Vegetation is one of the factors that significantly affect the transport of polluting gas impurities in the surface layer. It is known that vegetation is able to absorb atmospheric impurities and aerosols, thereby reducing the level of pollution. In addition, vegetation and, above all, forests are a mechanical barrier to their spread in the surface layer of the atmosphere [2]. Therefore, the task of describing the transport of pollutants in the atmosphere requires an integrated approach that takes into account both the mechanisms of atmospheric transport of small gas components and the mechanisms of gases absorption by vegetation, including dry and wet deposition. In addition, it is necessary to take into account the chemical interactions of gas impurities and their lifetime, for which it is also necessary to consider the chemical reactions of gas components occurring in the atmosphere. Atmospheric chemistry on a regional scale is well described by the RACM mechanism [3]. The RACM mechanism was created to simulate the main gas-phase reactions in the troposphere, including reactions of organic and inorganic substances, as well as an algorithm for calculating the photolysis rates depending on geographical location, date, time of day and cloud conditions.

A local three-dimensional hydrodynamic model of high spatial resolution based on the one-and-a-half closure scheme for averaged Navier-Stokes equation, continuity equation and diffusion-reaction advection equations system was applied to study the transport and dynamics of small gas components in the atmospheric surface layer, as well as to assess the effect of vegetation and soil properties and structure on absorption processes [6].

In this paper, the transfer of NO<sub>x</sub> from distributed ground sources (soil NO emission and NO<sub>2</sub> emission from the highway) was considered. Therefore, from a sufficiently large system of reactions taken into account in the RACM model, the main reactions that have a significant effect on the NO<sub>x</sub> concentration were selected. As an object for model experiments to assess the effect of heterogeneous vegetation cover on NO<sub>x</sub> transport in the atmosphere, as well as to assess its absorption by vegetation, a section of the MSU Carbon Observatory located near the village of Chashnikovo (Moscow region) with a size of 4980x4320 m was selected. Calculations of the distribution of NO, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations were carried out for typical wind directions and speeds in this area.

*This research was funded by Lomonosov Moscow State University (grant number AAAA-A16-116032810086-4)*

## Модельное исследование влияния неоднородного растительного покрова на перенос газовых загрязняющих выбросов в приземном слое атмосферы

Мухартова Ю.В., Новикова Е.В., Ольчев А.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: [muhartova@yandex.ru](mailto:muhartova@yandex.ru)

Наблюдаемое в последние десятилетия значительное усиление антропогенного воздействия на окружающую среду, вызывающее изменения растительного и почвенного покрова, а также рост загрязнения атмосферного воздуха и почв, требует развития современных методов мониторинга и прогноза состояния атмосферы, биосферы и гидросферы [1]. Рассматривая возможные подходы для снижения негативного влияния загрязнения воздуха на природные экосистемы и условия жизни людей, очень важно понимать механизмы переноса загрязняющих веществ в атмосфере и иметь достоверные технологии и методы для описания влияния различных внешних факторов на перенос атмосферных примесей.

Одним из факторов, существенно влияющих на перенос загрязняющих газовых примесей в приземном слое, является растительность. Известно, что растительность способна поглощать атмосферные примеси и аэрозоли, тем самым снижая уровень загрязнения. Кроме того, растительность и, прежде всего, леса являются механической преградой для их распространения в приземном слое атмосферы [2]. Поэтому в задаче описания переноса загрязняющих веществ в атмосфере необходим комплексный подход, учитывающий как механизмы атмосферного переноса малых газовых составляющих, так и механизмы поглощения газов растительностью, включая сухое и влажное осаждение. Кроме того, необходимо учитывать химические взаимодействия газовых примесей и время их жизни, для чего нужно также рассматривать химические реакции газовых компонент, происходящие в атмосфере.

Химию атмосферы в региональном масштабе хорошо описывает механизм RACM, приведенный в статье [3]. Механизм RACM был создан для моделирования основных газофазных реакций в тропосфере, включая реакции органических и неорганических веществ, а также алгоритм вычисления скоростей фотохимической диссоциации в зависимости от географического положения, даты, времени суток и условий облачности.

Неорганическая химия тропосферы относительно хорошо известна. В течение дня химия управляется фотолизом озона и двуокиси азота [4]. При фотолизе озона образуются возбужденные атомы кислорода O(<sup>1</sup>D), и часть из них реагирует с H<sub>2</sub>O с образованием гидроксильного радикала HO. HO реагирует с неорганическими и органическими частицами, окисляя их. Многие из этих реакций производят HO<sub>2</sub> или органические пероксирадикалы, которые либо реагируют с NO, превращая его в NO<sub>2</sub>, либо (в условиях низкого содержания NO<sub>x</sub>) реагируют с образованием гидропероксидов. Превращение NO в NO<sub>2</sub> и последующий фотолиз NO<sub>2</sub> производят больше озона. Озон и NO<sub>2</sub> реагируют с образованием нитратного радикала (NO<sub>3</sub>), который является очень важным реактивным соединением в ночное время [5]. Механизм RACM имеет достаточно полный набор неорганических реакций.

В рамках данной работы для исследования переноса и динамики малых газовых компонент в приземном слое атмосферы, а также для оценки влияния на процессы их поглощения свойств и структуры растительности и почвы использовалась локальная трехмерная гидродинамическая модель высокого пространственного разрешения, основанная на решении системы уравнений Навье-Стокса и неразрывности полуторного порядка замыкания [6]. Выбор модели был обусловлен необходимостью детального описания процессов турбулентного переноса малых газовых компонент в приземном слое атмосферы, с

учетом их локальных эмиссий, их химического взаимодействия и поглощения пространственно-неоднородным растительным покровом. Важным преимуществом выбранного подхода является способность модели описать процессы переноса над земной поверхностью со сложным рельефом и мозаичной растительностью.

Динамическая часть модели включает в себя систему уравнений для осредненной компоненты скорости  $\vec{V} = \{u, v, w\}$  с использованием разложения Рейнольдса  $\vec{V} = \bar{\vec{V}} + \vec{V}'$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\vec{V}}}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \bar{\vec{V}} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P - \left( \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'v'} \right) + \vec{F}_{cor} + \vec{F}_d - \vec{g}, \\ \text{div} \bar{\vec{V}} = 0, \end{cases}$$

где  $\rho_0$  – средняя плотность воздуха,  $P$  – давление,  $\vec{F}_{cor}$  – сила Кориолиса,  $\vec{F}_d$  – сила сопротивления растительности,  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения. Сила сопротивления растительности имеет вид  $\vec{F}_d = -c_d \cdot PLAD \cdot |\bar{\vec{V}}| \bar{\vec{V}}$ , где  $PLAD = LAD + SAD$ , причем

$$LAI(x, y) = \int_0^{h(x,y)} LAD(x, y, z) dz, \quad SAI(x, y) = \int_0^{h(x,y)} SAD(x, y, z) dz,$$

$LAD(x, y, z)$  – плотность листовой поверхности,  $SAD(x, y, z)$  – аналог  $LAD$  для нефотосинтезирующих частей растений (стволов, ветвей),  $LAI(x, y)$  – листовой индекс,  $SAI(x, y)$  – соответствующий индекс для нефотосинтезирующих частей растений,  $h(x, y)$  – высота растительности в точке с координатами  $(x, y)$ . Для параметризации турбулентных потоков  $u'v'$ ,  $v'v'$  и  $w'v'$  используется гипотеза Буссинеска:

$$\overline{u'u'} = \frac{2}{3} \bar{\epsilon} - 2K \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad \overline{u'v'} = -K \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \text{ и т.д.,}$$

и замыкание «полуторного» порядка, при котором коэффициент турбулентного обмена  $K = C_\mu \frac{\bar{\epsilon}^2}{\epsilon}$  выражается через турбулентную кинетическую энергию  $\bar{\epsilon}$  и скорость ее диссипации  $\epsilon$ , которые в свою очередь находятся из системы уравнений [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \bar{\epsilon} = \text{div}(K_\epsilon \nabla \bar{\epsilon}) + P_\epsilon - \epsilon, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \omega = \text{div}(K_\omega \nabla \omega) + \frac{\omega}{\bar{\epsilon}} (C_\omega^1 P_\epsilon - C_\omega^2 \epsilon) + \omega \Delta_\omega, \end{cases}$$

где  $\omega = \bar{\epsilon} / \sigma_\omega$ ,  $K_\epsilon = K / \sigma_\epsilon$  – коэффициент турбулентного обмена для  $\bar{\epsilon}$ ,  $K_\omega = K / \sigma_\omega$  – коэффициент турбулентного обмена для  $\omega$  ( $\sigma_\epsilon = \sigma_\omega = 2$ ),  $C_\omega^1 = 0,52$ ;  $C_\omega^2 = 0,8$  – безразмерные модельные константы [8],  $P_\epsilon$  – сдвиговая генерация ТКЭ:

$$P_\epsilon = - \left\{ \overline{u'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}} + \overline{u'v' \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}} + \overline{u'w' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}} + \overline{v'u' \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}} + \overline{v'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}} + \overline{v'w' \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}} + \overline{w'u' \frac{\partial \bar{w}}{\partial x}} + \overline{w'v' \frac{\partial \bar{w}}{\partial y}} + \overline{w'w' \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}} \right\},$$

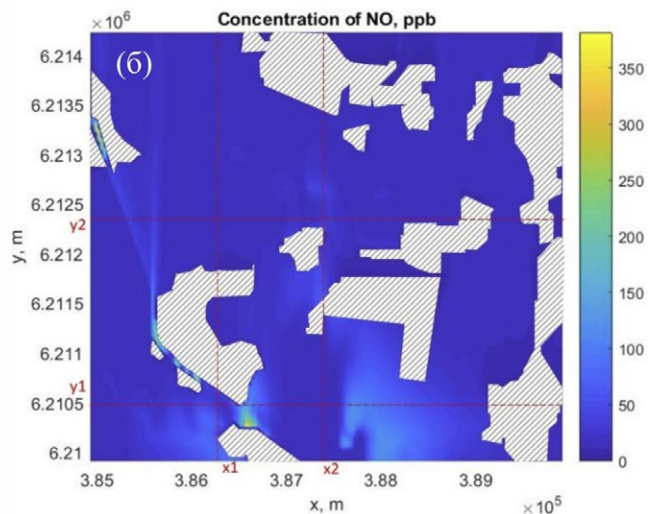
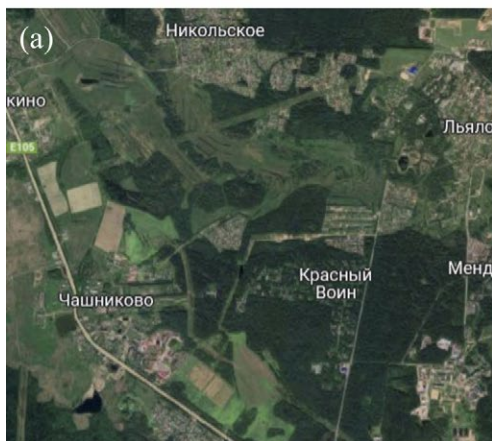
$\omega \Delta_\omega$  – увеличение скорости диссипации ТКЭ за счет взаимодействия с растительностью [7]:

$$\Delta_\omega = 12 \sqrt{C_\mu} (C_\omega^2 - C_\omega^1) c_d PLAD |\bar{\vec{V}}|.$$

Пространственное распределение концентраций веществ находится из уравнений диффузии-реакции-адвекции:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) C_i = \text{div}(K_c \nabla C_i) + \phi_i - C_i \psi_i + F_i - F_i^d, \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

где  $i$  – номер вещества в системе  $I$  реагирующих между собой веществ,  $C_i(x, y, z, t)$  – концентрация  $i$ -го вещества,  $K_c$  – коэффициент турбулентной диффузии для  $C_i$ ,  $\phi_i(C_1, \dots, C_I)$  – слагаемые, описывающие источники, а  $C_i \psi_i(C_1, \dots, C_I)$  – слагаемые, описывающие стоки  $i$ -го вещества за счет химических реакций,  $F_i$  – источники  $C_i$ , обусловленные эмиссией,  $F_i^d$  – сухое осаждение  $i$ -й компоненты системы.



**Рис. 1.** Объект исследования (а) и пример расчета поля концентрации NO на высоте 3 м над поверхностью (б) при фоновом южном ветре.

В данной работе рассматривался перенос NO<sub>x</sub> от наземных распределенных источников (почвенная эмиссия NO и эмиссия NO<sub>2</sub> от автомобильной дороги). Поэтому из достаточно большой системы реакций, учитываемых в модели RACM, были выбраны основные реакции, оказывающие существенное влияние на концентрацию NO<sub>x</sub>.

В качестве объекта для проведения модельных экспериментов по оценке влияния неоднородного растительного покрова на перенос NO<sub>x</sub> в атмосфере, а также по оценке их поглощения растительностью, был выбран участок Карбонового полигона МГУ, расположенный в районе деревни Чашниково (Московская область) размером 4980x4320 м.

*Исследование выполнено при поддержке МГУ имени М.В. Ломоносова (грант номер АААА-А16-116032810086-4).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чернявский С.А. математическая модель распространения в атмосфере парниковых газов, порожденных стационарным точечным источником // научный вестник МГТУ ГА, 2012.
2. Saylor R.D., Wolfe G.M., Meyers T.P., Hicks B.B. A Corrected Formulation of the Multilayer Model (MLM) for Inferring Gaseous Dry Deposition to Vegetated Surfaces // *Atmospheric Environment*, № 92, p.141-145. 2014
3. Stockwell W.R., Kirchner F., Kuhn M., Seefeld S. A New Mechanism for Regional Atmospheric Chemistry Modeling // *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, № D22, p. 25,847-25,879. 1997
4. Warneck, P., *Chemistry of the Natural Atmosphere* // Academic, San Diego, California, 1988
5. Morris, E. D., Jr., and H. Niki, Reaction of the nitrate radical with acetaldehyde and propylene // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 78, 1337-1338, 1974.
6. Mukhartova, Yu.V.; Dyachenko, M.S.; Mangura, P.A.; Mamkin, V.V.; Kurbatova, J.A.; Olchev, A.V. Application of a three-dimensional model to assess the effect of clear-cutting on carbon dioxide exchange at the soil-vegetation-atmosphere interface. // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 368, p. 012036, 2019.
7. Sogachev, A.; Panferov, O. Modification of two-equation models to account for plant drag. // *Bound. Lay. Meteorol.* 121(2), pp. 229-266, 2006.
8. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., La Cañada, CA, 1998.

## Tritium activity in precipitation in Tomsk

**Markelova A.N., Kalashnikova D.A., Simonova G.V.**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [maranna.levoka@yandex.ru](mailto:maranna.levoka@yandex.ru)

Understanding the behavior of tritium in environment is important for several reasons. The first, it is necessary to evaluate the exposure risk of releases from nuclear power and some other medical and industrial activities. The second, tritium is a tracer for studying processes in the hydrological cycle. In this study we focused on natural daily variations in tritium activity in precipitation in Tomsk, Russia.

Precipitation samples were collected in 2020 at the meteorological site of the Geophysical Observatory of IMCES SB RAS. The tritium activity of precipitation samples was analyzed using ultra-low background liquid scintillation spectrometer Quantulus 1220 (equipment provided by Shared Research Facilities of the Tomsk Scientific Center SB RAS).

Also we used the following data: daily precipitation amounts, precipitation intensity, average daily temperatures, proportions of convective and stratiform precipitation [1, 2].

The results of our research are following. The tritium activity in precipitation varied within 0.7–6.4 Bq/l during 2020. The minimum values were observed mainly in November, the maximum - in June and August. Significant correlations of tritium activity with air temperature, amount and intensity of precipitation were not found. We also compared the values of tritium activity in precipitation samples with the type (convective and stratiform). It turned out that changing proportions of convective and stratiform precipitation types may be responsible for daily variability of tritium activity in precipitation in Tomsk. In most cases, in precipitation samples which the convective fraction ranged from 30 to 100%, the values of tritium activity are noticeably higher than in samples in which the stratiform fraction ranges from 70 to 100%. A similar pattern was revealed in [3].

*The research was carried out within the framework of the FWRG-2021-0001 project.*



## REFERENCES:

1. Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at the stations of Russia. Certificate of state registration of the database No. 2014620549 <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#opisanie-massiva-dannykh>
2. Bulygina O.N., Veselov V.M., Alexandrova T.M., Korshunova N.N. Description of the array of data on atmospheric phenomena at meteorological stations in Russia. Certificate of state registration of the database No. 2015620081 <http://meteo.ru/data/345-atmosfernyye-yavleniya-sroki#opisanie-massiva-dannykh>
3. Aggarwal P.K., Romatschke U., Araguas-Araguas L. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. – *Nature Geoscience*. – 2016. – P. 624-629.

## Активность трития в атмосферных осадках г. Томска

Маркелова А.Н., Калашникова Д.А., Симонова Г.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [maranna.levoka@yandex.ru](mailto:maranna.levoka@yandex.ru)

**Т**ритий — радиоактивный изотоп водорода. Он имеет природное и техногенное происхождение, поэтому его активность в компонентах окружающей среды является объектом экологического мониторинга. Кроме того, являясь частью молекулы воды, тритий участвует в биологическом и гидрологическом круговоротах. Это позволяет использовать этот изотоп в качестве метки при наблюдениях за природно-климатическими процессами. В силу перечисленного, изучение пространственной и временной изменчивости активности трития в атмосферных осадках является актуальной задачей.

Основным природным источником трития для осадков является стратосфера, откуда он вместе с существующими в верхних слоях атмосферы воздушными потоками, а также во время мощных ураганов попадает в тропосферу и включается в круговорот воды. Распределение трития в осадках в конечном счете определяется механизмом циркуляции атмосферы. Значения активности трития в атмосферных осадках отдельных выпадений могут сильно различаться. Отличия могут быть связаны с происхождением влаги воздушных масс и траекториями их движения. Согласно последним исследованиям [4], на содержание трития в осадках может оказывать влияния и тип осадков

Цель данной работы — определить особенности природных изменений активности трития в атмосферных осадках г. Томска в 2020 г.

В работе были использованы следующие данные: значения активности трития в суточных пробах атмосферных осадков, суточные суммы и значения интенсивности осадков, среднесуточные значения температуры воздуха, информация о типе осадков (ливневые, обложные, морозящие, комбинированные).

Суточные пробы осадков были отобраны на метеоплощадке Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН. Активность трития была определена в пробах, соответствующих суткам с количеством 2 мм и более. Измерения выполнены с помощью низкофонового жидкостинтилляционного спектрометра Quantulus 1220 (предоставлен ТомЦКП СО РАН).

Данные по количеству, интенсивности и типу осадков, среднесуточным температурам воздуха за исследуемый период были получены из двух источников: Геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН и ВНИИГМИ-МЦД [1, 2].

В 2020 году наблюдалось 196 дней с осадками. Суточные значения активности трития в осадках были определены только для 85 дней из 196. В эти дни выпало 45 % осадков. Согласно данным наблюдений [1, 2], только ливневые осадки наблюдались 24 дня из 85, только обложные - 16 дней, в оставшиеся 45 дней осадки были комбинированные, то есть в течение дня наблюдались и ливневые, и обложные осадки. В 31 случае в пробах осадков удалось определить доли осадков разных типов.

Активность трития в осадках изменялась в пределах 0,7 — 6,4 Бк/л в течение исследуемого периода. Среднегодовые и среднемесячные значения не вычислялись. Минимальные значения активности наблюдались в основном в ноябре, максимальные — в июне и августе. Такое распределение минимальных и максимальных значений согласуется с годовым ходом содержания трития в осадках Северного полушария и объясняется усиленным обменом воздушными массами между стратосферой и тропосферой в весенне-летний период, и более слабым обменом осенью и зимой [3].

Статистически значимых связей активности трития с температурой воздуха, количеством и интенсивностью осадков не обнаружено.

Aggarwal et al. (2016) при изучении изотопного состава атмосферных осадков, собранных на некоторых метеостанциях в тропиках и на территории континентальной Европы, обнаружили, что уменьше-

нием доли обложных осадков в месячных пробах увеличивается содержание трития. Мы также сопоставили значения активности трития в суточных пробах с типом осадков. Оказалось, что в большинстве случаев в пробах, где доля ливневых осадков составляла от 30 до 100%, эти значения заметно выше, чем в пробах, где от 70 до 100 % приходится на обложные осадки. Далее для удобства изложения материала пробы, в которых более 30% составляют ливневые осадки, будем относить к ливневым осадкам, а пробы, где более 70 % приходится на обложные осадки, будем относить к обложным осадкам.

В целом значения активности трития для обложных и ливневых осадков распределяются в течение 2020 года по месяцам следующим образом. Ноябрь – единственный месяц, когда активность трития в обложных осадках была выше, чем в ливневых, и составляла 2,2 и 1,1 Бк/л соответственно. Максимальные отличия, почти в два раза, наблюдались с января по март. В этот период активность трития в обложных осадках изменялась 1,4 – 2,1 Бк/л, в ливневых 3,3 – 4,3 Бк/л. В остальные месяцы различия не столь существенны. В обложных осадках активность трития изменялась в пределах 2,2-2,6 Бк/л, в ливневых 2,6-2,8 Бк/л.

Отличия в значениях активности трития в ливневых и обложных осадках возникают из-за различий в вертикальных движениях воздуха в кучево-дождевых и слоисто-дождевых облаках и микрофизических процессов во время образования, роста и выпадения гидрометеоров на земную поверхность.

Таким образом, полученные нами результаты позволяют оценить пределы естественных колебаний активности трития в атмосферных осадках г. Томска, что является весьма полезным для мониторинга радиационного состояния территории города и его окрестностей. Изменения активности трития в атмосферных осадках, выпавших в Томске в 2020 г, определялись глобальными особенностями циркуляции атмосферы и особенностями формирования атмосферных осадков.

*Работа выполнена в рамках проекта FWRG-2021-0001.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>
2. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коришанова Н.Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081 <http://meteo.ru/data/345-atmosfernye-yavleniya-sroki#описание-массива-данных>
3. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. - М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
4. Aggarwal P.K., Romatschke U., Araguas-Araguas L. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. – *Nature Geoscience*. – 2016. – P. 624-629.

## Use of synchrotron $\mu$ XRF to study microparticles in lake bottom sediments, on the example of searching for traces of the «millennium eruption» in the Lake Bele (Khakassia) varves sediments

Darin A.V.<sup>1</sup>, Darin F.A.<sup>2,3</sup>, Sorokoletov D.S.<sup>2</sup>, Rakshun Ya.V.<sup>2</sup>, Rogozin D.Yu.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Synchrotron Radiation Facility - Siberian Circular Photon Source "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis of SB RAS (SRF "SKIF"), Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Ash layers (tephra) in continental and marine sediments have information about the history and nature of volcanic eruptions, which could have influenced sedimentation processes, the ecological state of the environment, and climate. The impact of volcanic activity on climate is determined by changes in the composition of the atmosphere due to the ejection of large amounts of gases and ash particles. To measure the power of volcanic eruptions, one of the most commonly used is the VEI index (Volcanic Explosivity Index) [Newhall, C. G. 1982]. In the last millennium, at least four most powerful eruptions with a VEI index of 7 are known [Oppenheimer C. 2003; Oppenheimer C. 2017; Witter, J. B. 2006]: Tambora (1815 AD), Kuwae (1452-53 AD), Samalas (1257 AD) and Paektusan-Baitoushan-Changbaishan (944-947 AD).

In the cores of Bele-2012 and Bele-2014 obtained in different parts of the lake, a dark layer 2-3 mm thick is visually segregate (fig.1). The dating of the layer by the varvochronology method gives an age estimate of  $942 \pm 26$  AD, which coincides within the error with modern estimates of the Paektusan eruption date.

To search for possible microparticles of volcanic ash that differ in elemental composition from bottom sediments, a confocal X-ray microscope (CRM) unit presented in [Darin F.A. 2017; Darin F. 2020] was used.

In the dated layer, several particles 10–20  $\mu\text{m}$  in size with high contents of yttrium and zirconium were found. One rounded particle  $\sim 20$   $\mu\text{m}$  in size, which sharp segregate of the yttrium and zirconium content, was studied in detail (Fig. 3).

The detected microparticles, from the dating and elemental composition, may be traces of the largest eruption of the Paektusan volcano in the 10th century. Further studies require the isolation of microparticles from the sedimentary matrix.

The used method of synchrotron  $\mu\text{XRF}$  allows in situ detection and investigation of individual microparticles in the matrix of lacustrine bottom sediments by differences in elemental composition.

*The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 19-05-50046.*

## Использование синхротронного $\mu\text{РФА}$ для изучения микрочастиц в озерных донных отложениях, на примере поиска следов «извержения тысячелетия» в варвных осадках оз.Беле (Хакасия)

Дарьин А.В.<sup>1</sup>, Дарьин Ф.А.<sup>2,3</sup>, Сороколетов Д.С.<sup>2</sup>, Ракшун Я.В.<sup>2</sup>, Рогозин Д.Ю.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ЦКП "СКИФ"), Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

Прошлое пепла (тефра) в континентальных и морских отложениях несут информацию об истории и характере вулканических извержений, которые могли оказывать влияние на процессы осадконакопления, экологическое состояние окружающей среды и климат. Влияние вулканической активности на климат определяется изменением состава атмосферы из-за выброса большого количества газов и частиц пепла. В шлейфе извержения в атмосферу поступают газы, в основном состоящим из диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), увлекающие за собой магматические материалы. Наибольшее воздействие на климат оказывают сильные эксплозивные извержения (Swingedouw, D. 2017).

Для измерения мощности вулканических извержений один из наиболее часто используемых - индекс VEI (Volcanic Explosivity Index). Это комплексная оценка эксплозивного характера извержения (Newhall, C. G. 1982), которая связана с объемом тефры, выброшенной из магматического очага в атмосферу. Диапазон индекса VEI от 0 (объем выбросов менее  $10^4 \text{ м}^3$ ) до 8 (объем выбросов  $10^{12} \text{ м}^3$  и высотой столба пепла более 25 км). Шкала логарифмическая от VEI-2 и выше, т.е. увеличение индекса на 1 указывает на извержение в 10 раз более мощное.

В последнее тысячелетие известны, по крайней мере четыре (табл.1) самых мощных извержения с индексом VEI равным 7 (Oppenheimer C. 2003; Oppenheimer C. 2017; Witter, J. B. 2006).

**Таблица 1.** Извержения последнего тысячелетия с индексом VEI равным 7.

Вулкан/регион	Дата, г.н.э.	Объем выбросов, км <sup>3</sup>	Высота колонны, км
Тамбора (Tambora) / Индонезия	1815	160-213	43
Кувае (Kuwaе) / Вануату	1452 - 1453	60-108	?
Самалас (Samalас) / Индонезия	1257	130-200	?
Пэктусан (Paektu, Vaitoushan, Changbaishan, Tianchi) /Корея	944–947	120	25-36

Пепел от крупных эксплозивных извержений, с большим объемом эруптивного материала, поднимаясь в стратосферу на десятки км, может разноситься на огромные расстояния. Учитывая, что выпадение пепла происходит достаточно быстро, в озерных и морских осадках на обширных территориях образуется одновозрастной монослой, характеризующийся уникальным химическим составом, что по-

зволяет идентифицировать источник его происхождения. Тефровые изохроны в донных отложениях позволяют коррелировать удаленные разрезы, что важно для палеоклиматических исследований.

Вне зон вулканической активности находки видимых прослоев тефры довольно редки, и связаны только с крупнейшими эксплозивными извержениями. Извержение вулкана Пэктусан в X веке является единственным, происшедшем в северном полушарии, из крупнейших в мире за последнее тысячелетие. Тефра, рассеянная во время извержения вулкана, обеспечивает одну из ключевых стратиграфических связей между Азией и Гренландией для синхронизации палеоэкологических данных (Chen X, 2016).

Учитывая объем и глобальный характер воздействия выбросов этого вулкана, можно найти его следы в различных местах планеты. Важен выбор депонирующего материала и используемый аналитический инструмент.

В нашем случае – депонирующим материалом является донный осадок оз. Беле, содержащий годовые слои (варвы). В кернах Беле-2012 и Беле-2014, полученных в разных частях озера, визуально выделяется темный слой мощностью 2-3 мм (рис.1). Датировка слоя методом варвохронологии дает оценку возраста в  $942 \pm 26$  г.н.э., что в пределах погрешности совпадает с современными оценками даты извержения.

В качестве инструмента, позволяющего проводить *in situ* поиск микрочастиц в донных осадках, был использован сканирующий  $\mu$ РФА с возбуждением синхротронным излучением (СИ). Для поиска микрочастиц, отличающихся по элементному составу от вмещающей матрицы использован блок конфокального рентгеновского микроскопа (КРМ), представленный в (Дарьин Ф.А. 2017; Darin F. 2020).

Поиск и исследование микрочастиц осуществлялось по следующей схеме. На первоначальном этапе проводилось одномерное сканирование образцов керна, изготовленных из пропитанных эпоксидной смолой твердых препаратов донных осадков, по методике (Dar'in A.V. 2013). Кроме измерений в ИЯФ СО РАН (ВЭПП-3), проводились анализы в SSRF - Шанхайском центре синхротронных исследований (Darin A.V. 2015). Полученные результаты одномерного сканирования показали наличие в области маркирующего слоя геохимической аномалии, характеризующейся повышенными содержаниями иттрия, циркония и ниобия.

Для уточнения характеристик геохимической аномалии проводилось двумерное сканирование оптического шлифа (Б50, интервал глубин 830-885 мм керна Беле-2014) с использованием блока КРМ. Исследована область размерами 5,5x1,0 мм<sup>2</sup>, пересекающая маркирующий слой. Параметры сканирования: 5 рядов по 110 точек с шагом – 50 мкм, расстояние между рядами – 200 мкм. Использована мода частичной расфокусировки пятна возбуждающего излучения с размером на образце 40 мкм.

Слой выделяется по элементному составу от остальной части керна. Внутри слоя были обнаружены несколько микрочастиц с резко повышенными содержаниями иттрия и циркония (рис.2).

Для уточнения морфологии и состава отдельной частицы было проведено сканирование области внутри аномального слоя размерами 320 x 420 мкм<sup>2</sup>. Пятно возбуждающего излучения с энергией 19 кэВ было сфокусировано до размера 15 мкм. Сделано 16 рядов по 21 точке с шагом сканирования 20 мкм и шагом между рядами – 20 мкм. Оконтурена округлая частица размером ~ 20x40 мкм<sup>2</sup>, резко выделяющаяся по содержанию иттрия и циркония (рис.3).

Использованный метод синхротронного  $\mu$ РФА позволяет *in situ* обнаруживать и выделять отдельные микрочастицы в матрице озерных донных осадков по отличиям в элементном составе. Найденные в керне донных осадков оз.Беле микрочастицы, судя по датировке и составу, могут быть следами крупнейшего извержения вулкана Пэктусан в X веке. Для дальнейших исследований требуется провести выделение микрочастиц из осадочной матрицы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №19-05-50046.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дарьин Ф.А., Ракишун Я.В., Сороколетов Д.С., Дарьин А.В., Калугин В.М. Разработка методик микро-РФА на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 и их применение для исследования распределения элементов в природных образцах. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2017. Т. 8. № 1. С. 86-90. DOI: 10.1134/S2079562917010067
2. Chen Xuan-Yu, Simon P.E. Blockley, Pavel E. Tarasov, Yi-Gang Xu, Danielle McLean, Emma L. Tomlinson, Paul G. Albert, Jia-Qi Liu, Stefanie Müller, Mayke Wagner, Martin A. Menzies. Clarifying the distal to proximal tephrochronology of the Millennium (BeTm) eruption, Changbaishan Volcano, northeast China. *Quaternary Geochronology* 33 (2016) 61-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quageo.2016.02.003>
3. Dar'in A.V., Kalugin I.A., Rakshun Ya.V. Scanning x-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 STORAGE RING. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2013. Т. 77. № 2. С. 182-184. DOI: 10.3103/S106287381302010X
4. Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Y.V., Darin F.A., Sorokoletov D.S., Guoqiang C., Qing S., Rogozin D.Y. Microanalytical study of varves in the recent sediments of lake Bele. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2015. Т. 79. № 1. С. 131-133. DOI: 10.3103/S1062873815010128



5. Darin F., Sorokoletov D., Rakshun I., Kriventsov V., Darin A. Search for and analysis of composition and structure of submicron-size particles in geological and environmental samples. AIP conference proceedings. "Synchrotron and free electron laser radiation: generation and application, SFR 2020" 2020. p. 070001. doi: 10.1063/5.0030411
6. Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87(C2), 1231. doi:10.1029/jc087ic02p01231
7. Oppenheimer Clive, Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815, *Progress in Physical Geography* 27,2 (2003) pp. 230–259, doi:10.1191/0309133303pp379r
8. Oppenheimer Clive, Lukas Wacker, Jiandong Xu, Juan Diego Galvan, Markus Stoffel, Sebastien Guillet, Christophe Corona, Michael Sigl, Nicola Di Cosmo, Irka Hajdas, Bo Pan, Remco Breuker, Lea Schneider, Jan Esper, Jie Fei, James O.S. Hammond, Ulf Büntgen. Multi-proxy dating the 'Millennium Eruption' of Changbaishan to late 946 CE. *Quaternary Science Reviews* 158 (2017) 164–171, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.12.024>
9. Swingedouw, D., Mignot, J., Ortega, P., Khodri, M., Menegoz, M., Cassou, C., & Hanquiez, V. (2017). Impact of explosive volcanic eruptions on the main climate variability modes. *Global and Planetary Change*, 150, 24–45. doi:10.1016/j.gloplacha.2017.01.00
10. Witter, J. B., & Self, S. (2006). The Kuwae (Vanuatu) eruption of AD 1452: potential magnitude and volatile release. *Bulletin of Volcanology*, 69(3), 301–318. doi:10.1007/s00445-006-0075-4

## Using ERA5 Reanalysis to Interpret Data from Laser Polarization Sounding of Aircraft Contrails

Loktyushin O.Yu.<sup>1</sup>, Bryukhanov I.D.<sup>1,2</sup>, Pustovalov K.N.<sup>1,3</sup>, Ni E.V.<sup>1</sup>, Samokhvalov I.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [lega.lega123@mail.ru](mailto:lega.lega123@mail.ru)

The ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) reanalysis v5 (ERA5) is used for the calculation of contrail drift parameters. The results are compared with ones obtained using the radiosonde measurements. The small difference between them and relative to the real time of the lidar contrail observation is noticed. It is concluded that ERA5 can be used for the contrail drift calculations and for the interpretation of the lidar experiments.

*Acknowledgements:* This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 19-45-700008), by the State Assignment of the V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS6, and by the Russian Science Foundation (Agreement No. 21-72-10089).

### REFERENCES:

1. Dmitrieva-Arrago L.R., Trubina M.A., Tolstykh M.A. // *Trudy Gidromettsentra Rossii*. – 2017. – No. 363. – P. 19–34.
2. *Radiatsionnye svoistva peristykh oblakov* / Ed. E.M. Feigel'son. – M.: Nauka, 1989. – 223 p.
3. Shanks J.G., Lynch D.K. // *Proceedings of SPIE*. – 1995. – V. 2578. – P. 227–238.
4. Morozov A.M., Galileiskii V.P., Elizarov A.I., et al. // *Optika atmosfery i okeana*. – 2017. – V. 30, No. 1. – P. 88–92.
5. Samokhvalov I.V., Kaul B.V., Nasonov S.V., et al. // *Optika atmosfery i okeana*. – 2012. – V. 25, No. 5. – P. 403–411.
6. Kärcher B. // *Nature Communications*. – 2018. – No. 9. – 1824.
7. Gierens K., Vazquez-Navarro M. // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2018. – V. 27, No. 3. – P. 183–193.
8. Rozenberg G.V. // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. – 1955. – V. 56. – C. 79–110.
9. Kaul B.V. *Optiko-lokatsionnyi metod polarizatsionnykh issledovaniy anizo-tropnykh aërozol'nykh sred: dis. dokt. fiz.-mat. nauk*. – Tomsk. – 2004. – 219 p.
10. Hayman M., Spuler S., Morley B., et al. // *Optics Express*. – 2012. – V. 20, No. 28. – P. 29553–29567.
11. Volkov S.N., Samokhvalov I.V., Cheong H.D., et al. // *Applied Optics*. – 2015. – V. 54, No. 11. – P. 3095–3105.

12. Flightradar24. Live Air Traffic [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 25.07.2021 г.).
13. Loktyushin O.Yu., Bryukhanov I.V., Samokhvalov I.V. // Aktual'nye problemy ra-diofiziki : VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, Tomsk. Sbornik trudov. – Tomsk : Izdatel'skii dom TGU, 2019. – P. 319–322.
14. Loktyushin O.Yu., Bryukhanov I.D., Ni E.V. et al. // Aktual'nye problemy radio-fiziki : IX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, Tomsk, Sbornik trudov. – Tomsk : Izdatel'skii dom TGU, 2021. – P. 180–184.

## Использование реанализа ERA5 для интерпретации данных лазерного поляризационного зондирования конденсационных следов самолетов

Локтюшин О.Ю.<sup>1</sup>, Брюханов И.Д.<sup>1,2</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,3</sup>, Ни Е.В.<sup>1</sup>, Самохвалов И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [lega.lega123@mail.ru](mailto:lega.lega123@mail.ru)

Облака верхнего яруса (ОВЯ) являются важным фактором радиационного баланса Земли [1]. Они состоят из несферических ледяных частиц [2], примечательным свойством которых является возможность ориентироваться горизонтально. Облака, образованные преимущественно горизонтально ориентированными ледяными частицами, названы зеркальными из-за аномально высокого коэффициента обратного рассеяния [3–5]. Следы не только сами влияют на количество солнечной энергии, достигающей земной поверхности, но и инициируют рост перистой облачности. Конденсационные следы самолётов и образовавшиеся из них облака, существующие более 10 минут, названы Всемирной метеорологической ассоциацией (WMO) единственным типом ледяных облаков [6] антропогенного происхождения.

Оптические свойства облаков определяются параметрами их микроструктуры: формой, размерами и пространственной ориентацией ледяных частиц в них. Контактными методами оценить ориентацию частиц в облаках невозможно, поскольку она нарушается при заборе проб исследуемой среды. Различить самолётные следы на начальной стадии формирования с космических платформ не представляется возможным из-за их небольших поперечных размеров. Следы становятся доступными для наблюдения спутниковыми средствами только спустя 1–2 ч после формирования, что неудовлетворительно много, поскольку среднее время существования конденсационного следа составляет около 1–6 ч [7].

Максимальное количество информации о микрофизических параметрах ансамбля частиц, доступной для получения в эксперименте по рассеянию света, содержится в матрице рассеяния света [8]. Метод поляризационного лазерного зондирования [9] основан на определении матрицы рассеяния только для направления «назад» под углами близкими к 180 градусов - матрицы обратного рассеяния света (МОРС). Этот метод чувствителен к форме и ориентации частиц льда в ОВЯ. Метод реализован в высотном матричном поляризационном лидаре (ВМПЛ) НИ ТГУ, отличительной особенностью которого является наличие узлов трансформации состояния поляризации в передающей и принимающей системах [5]. Их совместное использование позволяет направлять в атмосферу пучки лазерного излучения с четырьмя состояниями поляризации и определять для каждого вектор-параметр Стокса обратного рассеянного излучения. Это обеспечивает выполнение всех измерений, необходимых для определения всех 16 элементов МОРС. Эта возможность выделяет ВМПЛ на фоне существующих аналогов (например, [10, 11]), позволяющих выполнять измерения только для отдельных элементов МОРС. Остальные при этом рассчитываются с использованием математических соотношений между элементами МОРС, вытекающих из теории рассеяния электромагнитных волн частицами строго назад. ВМПЛ ориентирован в зенит.

В радиусе 100 км от Томска расположен ряд трасс регулярного авиасообщения [12]. При определённых метеорологических условиях конденсационные следы самолётов дрейфуют к месту расположения ВМПЛ, что позволяет зондировать их для изучения микроструктуры. Для этого необходимо наличие ветра с соответствующим направлением. Кроме того, скорость ветра, температура и влажность воздуха должны быть такими, чтобы время существования самолётных следов было достаточным для их изучения. Круглосуточный мониторинг авиационной обстановки и планирование лидарных измерений на основе метеорологических прогнозов обеспечивает изучение оптических и микрофизических

свойств самолётных следов на разных стадиях их эволюции. Ранее была разработана и апробирована методика идентификации следов на основе совместного анализа траекторных, лидарных и аэрологических данных (например, [13]).

Самым надёжным и чрезвычайно важным с точки зрения изучения атмосферы и климата источником информации о вертикальных профилях метеовеличин являются аэрологические измерения. Ближайшие к Томску станции такого зондирования находятся в Колпашево и Новосибирске, поэтому для интерпретации результатов зондирования на лидаре НИ ТГУ используются данные с этих станций. Несмотря на их удаление между собой и от Томска, метеорологическая обстановка на высотах формирования ОВЯ по их данным обычно близка [5]. Тем не менее, близость значений метеовеличин по данным измерений указанных аэрологических станций имеет место не всегда. Кроме того, измерения на них выполняются только дважды в сутки – в 7:00 и 19:00 местного времени. В то же время эксперименты на лидаре проводятся круглосуточно и, соответственно, данные о метеобстановке нужны не только два раза в сутки. Таким образом, очень важно найти возможность получения вертикальных профилей метеовеличин в любое время суток для интерпретации лидарных данных. Эта задача становится более актуальной при оценке параметров дрейфа исследуемых облаков. Представляет интерес нахождение источника метеоданных, соответствующих месту расположения лидара НИ ТГУ, а также обеспечивающего более высокое временное разрешение. В качестве такого источника метеоданных был выбран реанализ ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). У него высокое пространственное разрешение ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) и частый шаг по времени (1 час). Кроме того, ERA5 объединяет непрерывные ряды метеоданных за период длительностью более 40 лет. Сопоставление данных аэрологических измерений с ним показало, что температура, направление и скорость ветра могут применяться при обработке лидарных данных [14].

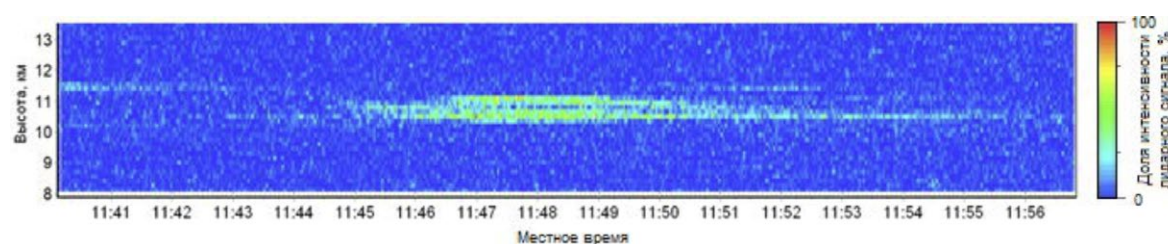
Настоящий доклад посвящён оценке применимости данных реанализа ERA5 для расчёта параметров дрейфа конденсационных следов самолетов и интерпретации результатов лидарного зондирования. Обработаны данные 5 дней поляризационного зондирования самолётных следов в 2019 и 2020 гг. Для проверки применимости ERA5 рассчитаны параметры дрейфа самолётных следов с использованием метеоданных, полученных на основе аэрологических измерений; результаты сопоставлялись с аналогичными, рассчитанными на основе реанализа. В качестве примера рассмотрим данные измерений 21 сентября 2020 г. С 11:40 на высотах 10–11,8 км регистрировался аэрозольный слой, который был идентифицирован как конденсационный след самолёта с номером рейса 6R9843/DRU9843 [12]. В радиусе 100 км от ВМПЛ НИ ТГУ высота полёта самолёта составляла 10,9 км. Для расчёта параметров дрейфа использовались результаты аэрологических измерений, выполненных в Колпашево в 7:00 местного времени. Данные реанализа использовались для тех же координат и времени измерений. Результаты расчётов приведены в таблице 1. Динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала, иллюстрирующая начало регистрации самолётного следа, представлена на рис. 1.

**Таблица 1.**

Параметры дрейфа конденсационного следа самолёта к месту расположения ВМПЛ НИ ТГУ по данным аэрологических измерений и реанализа ERA5.

	Дистанция дрейфа, км	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, °	Время 1*	Время 2**	Время 3***
Аэрологические измерения	29,8	8,2	230	0:29:18	11:39:03	0:01:05
Реанализ ERA5	32,6	8,2	228	0:31:58	11:41:30	0:01:22

\* Длительность дрейфа следа;  
 \*\* рассчитанное время появления следа над лидаром;  
 \*\*\* разница между рассчитанным временем появления следа над лидаром и фактическим временем начала регистрации аэрозольного слоя



**Рис 1.**

Динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала в фотоотсчётах, полученная в течение одной серии лидарных измерений (21.09.2020 г., 11:40–11:57).

Время появления самолётного следа над ВМПЛ, рассчитанное на основе метеоданных из обоих источников, отличается друг от друга не более чем на 2,5 минуты. Различия между этими значениями и фактическим временем начала регистрации аэрозольного слоя не превышает полутора минут. Похожая картина наблюдается и в данных других указанных лидарных экспериментов. Заключаем, что применение реанализа ERA5 для расчёта параметров дрейфа самолётных следов и их изучения лидаром наземного базирования является возможным. Результаты могут быть улучшены при применении данных реанализа, рассчитанных непосредственно для координат экспериментальной установки и времени измерений на ней.

*Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-45-700008), государственного задания Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН и Российского научного фонда (грант № 2172-10089).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дмитриева-Араго Л.Р., Трубина М.А., Толстых М.А. // *Труды Гидрометцентра России*. – 2017. – № 363. – С. 19–34.
2. *Радиационные свойства перистых облаков / Под ред. Е.М. Фейгельсон*. – М.: Наука, 1989. – 223 с.
3. Shanks J.G., Lynch D.K. // *Proceedings of SPIE*. – 1995. – V. 2578. – P. 227–238.
4. Морозов А.М., Галилейский В.П., Елизаров А.И. и др. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 88–92.
5. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В. и др. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25, № 5. – С. 403–411.
6. Kärcher B. // *Nature Communications*. – 2018. – No. 9. – 1824.
7. Gierens K., Vazquez-Navarro M. // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2018. – V. 27, No. 3. – P. 183–193.
8. Розенберг Г.В. // *Успехи физических наук*. – 1955. – Т. 56. – С. 79–110.
9. Кауль Б.В. *Опτικο-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. докт. физ.-мат. наук*. – Томск. – 2004. – 219 с.
10. Hayman M., Spuler S., Morley B., et al. // *Optics Express*. – 2012. – V. 20, No. 28. – P. 29553–29567.
11. Volkov S.N., Samokvalov I.V., Cheong H.D., et al. // *Applied Optics*. – 2015. – V. 54, No. 11. – P. 3095–3105.
12. *Flightradar24. Live Air Traffic [Электронный ресурс]*. – URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 25.07.2021 г.).
13. Локтюшин О.Ю., Брюханов И.В., Самохвалов И.В. // *Актуальные проблемы радиофизики: VIII Международная научно-практическая конференция, г. Томск. Сборник трудов*. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2019. – С. 319–322.
14. Локтюшин О.Ю., Брюханов И.Д., Ни Е.В. и др. // *Актуальные проблемы радиофизики: IX Международная научно-практическая конференция, г. Томск, Сборник трудов*. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2021. – С. 180–184.

## Analysis of large-scale wildfires and atmospheric parameters in Yakutia in 2021

Tomshin O.A., Solovyev V.S.

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakutsk, Russia  
E-mail: [tomshinoa@gmail.com](mailto:tomshinoa@gmail.com)

In recent decades, climate warming has led to the formation of more favorable conditions for the occurrence and development of wildfires both on a regional and global scale [1, 2]. Yakutia is one of the most fire hazardous regions in Russia. According to FBU Avialesookhrana, the total area of wildfires during the 2021 fire season in Yakutia amounted to ~9.4 million ha [3].

This paper considers the spatiotemporal dynamics of forest fires and atmospheric parameters in Yakutia in 2021 based on the results of satellite observations and reanalysis data.

The development of catastrophic forest fires in central Yakutia in 2021 was facilitated by significant negative precipitation anomalies, observed from early May to mid-August (on average ~9.5 mm/month) and positive temperature anomalies, observed in August (+2.4 °C).

Two periods of intensification of forest fires can be distinguished: the first, from the end of June to the middle of the second half of July, and the second, the main one, from the end of July to the middle of August. It



is known that anticyclonic processes have a significant impact on the dynamics of the forest fire situation [for example, 10]. The main period of intensification of forest fires in 2021 fell on the period of strong atmospheric blocking, which is seen from the pressure anomalies at sea level. During this period, cloudless weather settled over the study area and significant positive temperature anomalies were observed on some days exceeding the long-term average values by +5 °C.

As a result of forest fires, a huge amount of aerosols was released into the atmosphere, which is clearly seen from the AOT and AI variations. On some days, the average daily AOT values over some parts of the region reached ~5. The fire season of 2021 set a record for average monthly AOD values observed in July (~0.81) and August (~0.77), exceeding the background, undisturbed values by ~3-4 times.

An analysis of the spatial and temporal dynamics of forest fires in Yakutia in 2021 showed that the emergence and development of catastrophic fires was facilitated by significant positive air temperature anomalies and negative precipitation anomalies observed in the summer months and created favorable conditions for fires.

The blocking anticyclone, which was established from late July to mid-August, led to the intensification of forest fires, as well as to the stagnation of air masses and the accumulation of combustion products in the atmosphere and prevented the penetration of moisture-saturated air masses from the western part of Russia.

The average monthly AOT values in Central Yakutia were 3-4 times higher than the background values at the phase of maximum forest fire activity. On some days, the average daily AOT values over some parts of the region reached ~5.

## Анализ катастрофических лесных пожаров и параметров атмосферы в Якутии в 2021 г.

Томшин О.А., Соловьев В.С.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
E-mail: tomshinoa@gmail.com

**Введение.** В последние десятилетия потепление климата приводит к формированию более благоприятных условий для возникновения и развития природных пожаров как в региональном, так и в глобальном масштабе [1, 2]. Якутия является одним из наиболее пожароопасных регионов в России. По данным ФБУ «Авиалесоохрана» итоговая площадь лесов, пройденная огнём в течение пожароопасного сезона 2021 г. в Якутии составила ~9.4 млн. га [3].

В данной работе рассмотрена пространственно-временная динамика лесных пожаров и параметров атмосферы в Якутии в 2021 г. по результатам спутниковых наблюдений и данным реанализов.

**Данные и методика.** Для исследований был выбран регион центральной Якутии (60-67° с.ш., 110-140° в.д.), на который пришлось подавляющее большинство лесных пожаров в 2021 г.

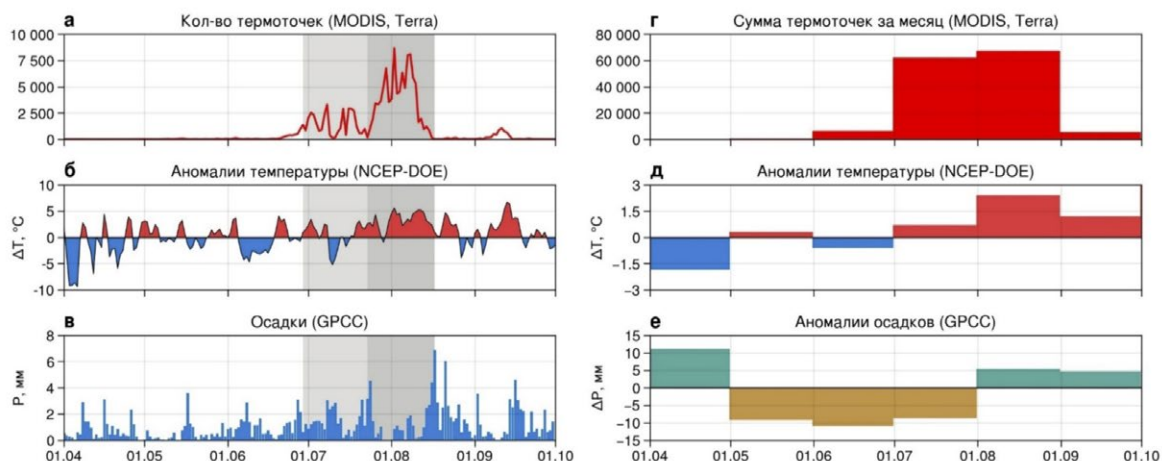
Для анализа пожарной активности использованы данные спектрорадиометра MODIS (продукт MOD14A1 C6.1) [4], установленного на спутнике Terra. Продукт MOD14A1 C6.1 содержит ежедневные сведения об очагах активного горения («термоточках»), обнаруженных на космоснимках с пространственным разрешением 1 км.

Вариации среднесуточных и среднемесячных значений аномалий температуры приземного воздуха ( $\Delta T$ ) и давления на уровне моря ( $\Delta SLP$ ) получены из NCEP-DOE реанализа [5], пространственное разрешение данных 2.5°. Аналогичные значения по количеству осадков получены из данных GPCC [6], пространственное разрешение данных 1.0°. Аномалии рассчитывались как отклонения значений от среднесуточных, рассчитанных за период 1980-2010 гг. для данных NCEP-DOE реанализа и 1951-2000 гг. для данных GPCC.

Для оценки вариаций аэрозольной оптической толщины (AOT 500 нм) и аэрозольного индекса (AI) использованы данные приборов MODIS (продукт MOD08D3 AOD DTDB C6.1, ИСЗ Terra) [7], OMI (продукт OMI03d, ИСЗ Aura) [8] и OMPS (продукт NMMIEAI L2, ИСЗ NPP) [9], пространственное разрешение данных 1°.

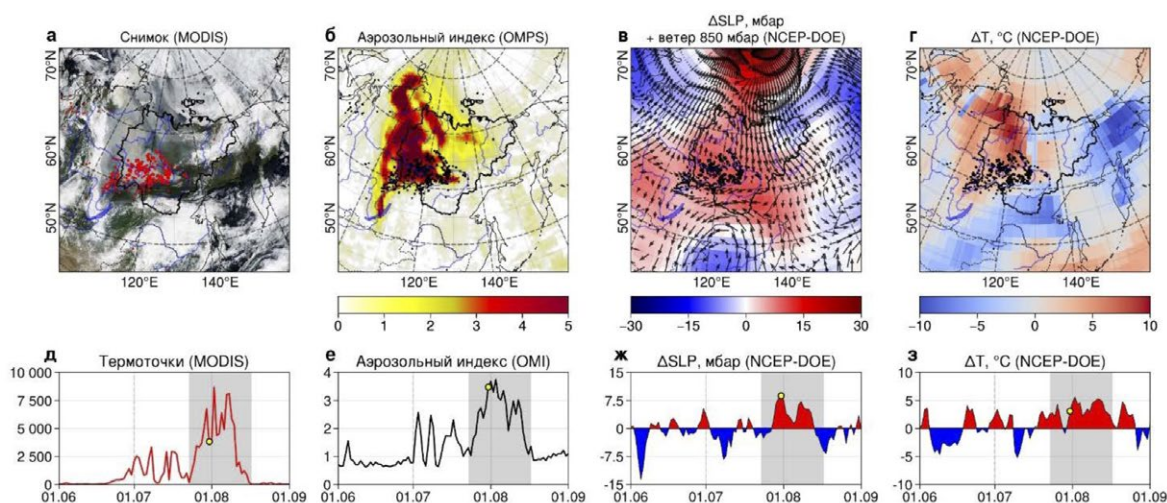
**Результаты.** Развитию катастрофических лесных пожаров в центральной Якутии в 2021 г. способствовали значительные отрицательные аномалии количества осадков (рис. 1е), наблюдавшиеся с начала мая до середины августа (в среднем -9.5 мм/мес.) и положительные аномалии температуры (рис. 1д), наблюдавшиеся в августе (+2.4 °C).

Можно выделить два периода интенсификации лесных пожаров (рис. 1а): первый – с конца июня до середины второй половины июля и второй, основной, с конца июля до середины августа. Известно, что антициклонические процессы оказывают значительное влияние на динамику лесопожарной обстановки [например, 10]. Основным периодом интенсификации лесных пожаров в 2021 г. пришёл на период сильного атмосферного блокирования, что хорошо видно по аномалиям давления на уровне моря (рис.



**Рис. 1.** Лесопожарная обстановка в Якутии в 2021 г. а, г) Суточное и месячное количество зарегистрированных термоточек; б, д) среднесуточные и среднемесячные аномалии температуры приземного воздуха; в, е) суточное количество осадков и их месячные аномалии. Серыми участками на графиках (а, б, в) отмечены периоды интенсификации лесных пожаров.

2ж). В этот период над исследуемым участком установилась безоблачная погода (рис. 2а) и наблюдались значительные положительные аномалии температуры (рис. 2з) в отдельные дни превышавшие среднегодовое значения на 5 °С.

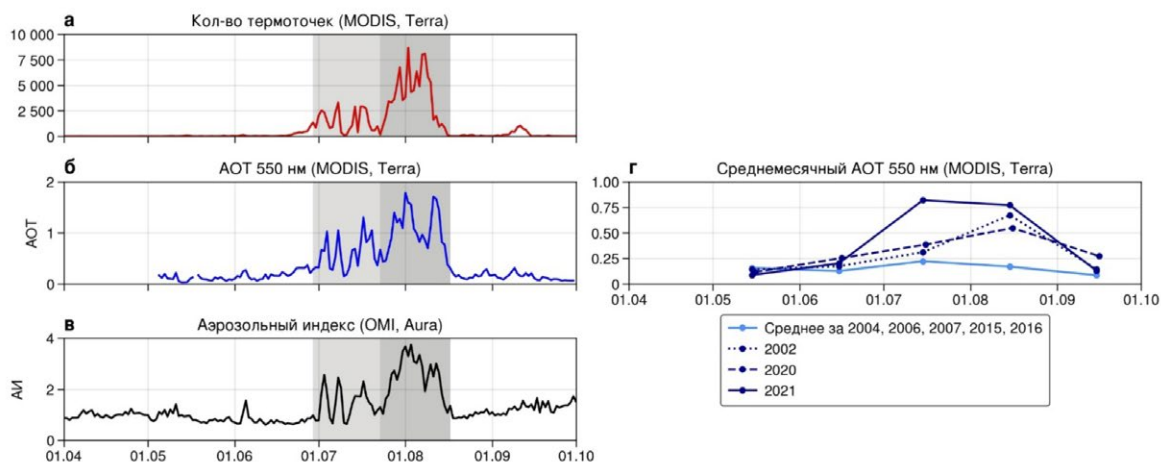


**Рис. 2.** а) Мозаика снимков MODIS; б) пространственное распределение АИ по данным OMPS; в) пространственное распределение  $\Delta$ SLP и поле ветров на уровне 850 мбар; г) пространственное распределение  $\Delta$ T; д) вариации количества зарегистрированных термоточек; е) вариации среднесуточных значений АИ по данным OMI; ж) вариации среднесуточных значений  $\Delta$ SLP; з) вариации среднесуточных значений  $\Delta$ T. Карты (а, б, в, г) отражают данные за 31 июля 2021 г. На графиках (д, е, ж, з) серой областью отмечен период сильной интенсификации лесных пожаров, жёлтыми точками отмечены значения за 31 июля 2021 г.

В результате лесных пожаров в атмосферу было выброшено огромное количество аэрозолей, что хорошо видно по вариациям АОТ и АИ (рис. 3б, в). В отдельные дни, среднесуточные значения АОТ над отдельными участками региона достигали ~5. Пожароопасный сезон 2021 г. стал рекордным по среднемесячным значениям АОТ, наблюдаемым в июле (~0.81) и августе (~0.77), превысив фоновые, невозмущённые значения в ~3-4 раза.

**Заключение.** Анализ пространственно-временной динамики лесных пожаров в Якутии в 2021 году показал, что возникновению и развитию катастрофических пожаров способствовали значительные положительные аномалии температуры воздуха и отрицательные аномалии осадков, наблюдавшиеся в летние месяцы и создавшие благоприятные условия для пожаров.

Блокирующий антициклон, установившийся с конца июля до середины августа, привёл к интенсификации лесных пожаров, а также к стагнации воздушных масс и накоплению продуктов горения в атмосфере и препятствовал проникновению влагонасыщенных воздушных масс с западной части России.



**Рис. 3.**

а) вариации количества зарегистрированных термоточек; б) вариации среднесуточных значений АОТ; в) вариации среднесуточных значений АИ; г) вариации среднемесячных значений АОТ. Серыми участками на графиках (а, б, в) отмечены периоды интенсификации лесных пожаров.

Среднемесячные значения АОТ по Центральной Якутии в 3-4 раза превышали фоновые показатели на фазе максимума активности лесных пожаров. В отдельные дни, среднесуточные значения АОТ над отдельными участками региона достигали ~5.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Abatzoglou J.T., Williams A.P., Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. P. 326-336. doi: 10.1029/2018GL080959.
2. Tomshin O.A., Solovyev V.S. Spatio-temporal patterns of wildfires in Siberia during 2001–2020 // *Geocarto International*. 2021. doi: 10.1080/10106049.2021.1973581.
3. ФБУ «Авиалесоохрана». Сводный отчет о лесных пожарах (термических аномалиях) на всех видах территорий по данным космического мониторинга по состоянию на 31 декабря 2021 г. (нарастающим итогом с 01.01.2021) [Электронный ресурс]. URL: [https://public.aviales.ru/main\\_pages/openform1.shtml?2021-12-31](https://public.aviales.ru/main_pages/openform1.shtml?2021-12-31) (дата обращения 20.02.2022).
4. Giglio, L., Schroeder, W., and Justice, C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment*. 2016. № 178. P. 31-41.
5. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. P. 1631-1643.
6. Schneider U., Ziese M., Meyer-Christoffer A., Finger P., Rustemeier E., Becker A. The new portfolio of global precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre suitable to assess and quantify the global water cycle and resources // *Proc. IAHS*. 2016. № 374. P. 29–34. doi: 10.5194/piahs-374-29-2016.
7. Platnick, S. MODIS Atmosphere L3 Monthly Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA. 2015. [Электронный ресурс]. URL: [http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD08\\_M3.006](http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD08_M3.006) (дата обращения 20.02.2022).
8. Pawan K. Bhartia. OMI/Aura TOMS-Like Ozone, Aerosol Index, Cloud Radiance Fraction L3 1 day 1 degree x 1 degree V3, NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3001> (дата обращения 20.02.2022).
9. Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS). NMMIEAI-L2-NRT product. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/download-nrt-data/omps-nrt> (дата обращения 20.02.2022).
10. Hayasaka H., Yamazaki K., Naito D. Weather conditions and warm air masses during active fire periods in boreal forests // *Polar Sci*. 2019. V. 22. P. 100472.

# The influence of wind speed on the variations of the daily average carbon monoxide concentration in the Moscow air basin

Alexandrov G.G., Ginzburg A.S.

Institute of Atmospheric Physics A.M. Obukhov RAS, Moscow, Russia  
E-mail: [gleb@ifaran.ru](mailto:gleb@ifaran.ru)

The influence of meteorological conditions on the variations in the concentration of carbon monoxide in the Moscow air basin has been a popular topic of research over the last two decades. The importance of this topic is explained by the fact that carbon monoxide is not only a pollutant, the increased concentration of which in a metropolis can lead to the formation of tropospheric ozone, but also an indicator of global atmospheric changes. The atmospheric pollution in Moscow is largely determined by anthropogenic factors, and therefore carbon monoxide variations reflect the weekly cycle of economic and business activity: its concentration decreases noticeably on weekends that makes it necessary to take into account the "calendar" variability in the studies of the influence of meteorological conditions. Wind speed is considered to be one of the most significant factors determining the variability of carbon monoxide concentration in the Moscow atmosphere, despite the fact that the general conditions for air pollution dispersion are considered as favorable. This paper reports the results of the study aimed to evaluate the role of wind speed in the variations in the daily average carbon monoxide concentration during the period from May to June 2021 provided by automatic air pollution monitoring stations of "Mosecomonitoring". We compared the results of modeling the observed values of the daily average carbon monoxide concentration using a model explaining CO concentration variations by the "calendar" variability, and a model explaining CO concentration variations both by "calendar" variability and wind speed variability, and found that the effect of adding wind speed into the list of predictors was not significant. Our findings allow us to assume that the wind speed should be considered not as an independent predictor, but as part of a complex indicator of unfavorable meteorological conditions, which could be a non-linear function of wind speed, air temperature and humidity, as well as other meteorological factors affecting the intensity of air pollution dispersion in the lower layers of the atmospheric boundary layer.

## Влияние скорости ветра на вариации среднесуточной концентрации угарного газа в воздушном бассейне Москвы

Александров Г.Г., Гинзбург А.С.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
E-mail: [gleb@ifaran.ru](mailto:gleb@ifaran.ru)

Влиянию метеорологических условий на вариации концентрации угарного газа в воздушном бассейне Москвы посвящено немало работ (Кузнецова и др., 2012; Вильфанд и др., 2014; Голицын и др., 2015; Еланский и др., 2015; Демченко и др., 2015; Ракитин и др., 2021). Актуальность этой темы объясняется тем, что угарный газ является не только загрязнителем, повышенная концентрация которого в условиях мегаполиса может приводить к образованию тропосферного озона, но и индикатором глобальных атмосферных изменений (Гречко и др., 2009).

Так как загрязнение атмосферы Москвы в значительной степени определяется антропогенными факторами, то вариации угарного газа отражают недельный цикл хозяйственной и деловой активности (Горчаков и др., 2010а). В выходные дни концентрация угарного газа снижается (Горчаков и др., 2006) и в среднем составляет 87.5% от концентрации в рабочие дни, а в отдельные периоды 75% (Горчаков и др., 2010б), что делает необходимым учет «календарной» вариабельности (Горчаков и др., 2010в).

Скорость ветра считается одним из наиболее существенных факторов, определяющих вариабельность концентрации угарного газа в атмосфере Москвы (Гречко и др., 2009; Демченко и др., 2013; Еланский и др., 2015; Ракитин и др., 2021), несмотря на то, что в целом условия для рассеяния этой газовой примеси можно считать благоприятными (Фокеева и др., 2006), а периоды высокой термической стабильности пограничного слоя атмосферы, например, такие, как летом 2010 г. (Голицын и др., 2011), относительно редкими.



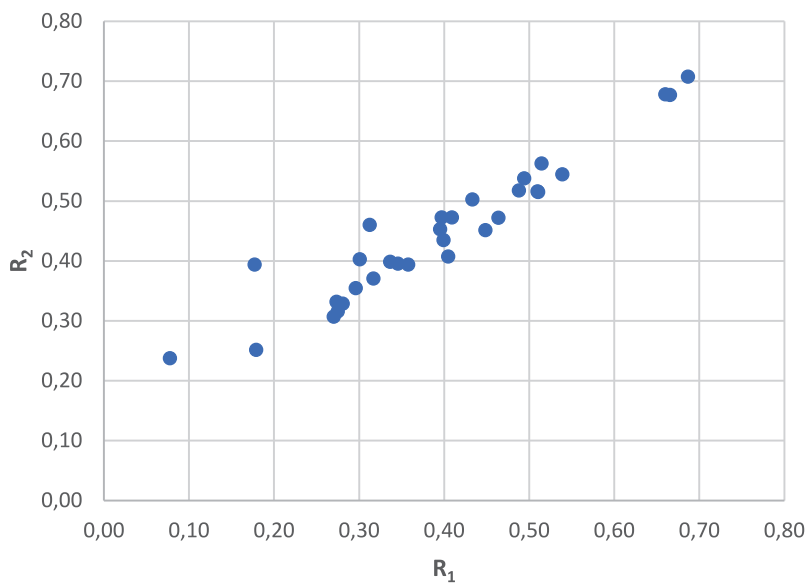
Ниже приведен анализ роли скорости ветра в вариациях среднесуточной концентрации угарного газа в период с мая по июнь 2021 года на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы, принадлежащих «Мосэкомониторинг» путем сравнения результатов моделирования наблюдаемых значений с помощью авторегрессионной модели без метеорологических предикторов (уравнение 1) и с помощью модели регрессии-авторегрессии, включающей в качестве предиктора скорость ветра (уравнение 2):

$$Y_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} \quad (1)$$

$$Y_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} + a_3 (v_i - a_4) \quad (2)$$

где  $Y_i$  - прогнозируемая на  $i$ -е сутки среднесуточная концентрация загрязняющего вещества,  $y_{i-1}$  - наблюдаемая среднесуточная концентрация за  $(i-1)$ -е сутки,  $y_{i-2}$  - наблюдаемая среднесуточная концентрация за  $(i-2)$ -е сутки,  $v$  - среднесуточная скорость ветра,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  - коэффициенты, обеспечивающие наилучшее приближение в смысле среднеквадратичного отклонения наблюдаемых значений прогнозируемым.

Как видно из рис. 1, коэффициент корреляции ( $R_2$ ) между данными наблюдений и значениями, предсказываемыми моделью регрессии-авторегрессии, во многих случаях несущественно выше коэффициента корреляции ( $R_1$ ) между данными наблюдений и значениями, предсказываемыми моделью авторегрессии.



**Рис. 1.** Диаграмма рассеяния, показывающая увеличение коэффициента корреляции ( $R_2$ ) между данными наблюдений и значениями, предсказываемыми уравнением (2) по сравнению с коэффициентом корреляции ( $R_1$ ) между данными наблюдений и значениями, предсказываемыми уравнением (1).

Отсюда можно предположить, что скорость ветра нужно рассматривать не как самостоятельный предиктор, а как часть комплексного показателя неблагоприятных метеорологических условий (Вильфанд и др., 2014), в общем случае, представляющего собой нелинейную функцию скорости ветра, температуры и влажности воздуха, а также других метеорологических факторов, влияющих на интенсивность рассеивания газовых примесей в нижних слоях пограничного слоя атмосферы.

*Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00254).*

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Аношин БА. Статистический анализ вариаций среднесуточных и максимальных концентраций угарного газа в воздушном бассейне г. Москвы. *Оптика атмосферы и океана.* 2008;21(6):546-50.
2. Вильфанд РМ, Кузнецова ИН, Шалыгина ИЮ, Звягинцев АМ, Нахаев МИ, Захарова ПВ, Лапченко ВА. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе. *Биосфера.* 2014;6(4):339-51.
3. Голицын ГС, Горчаков ГИ, Гречко ЕИ, Семутникова ЕГ, Ракитин ВС, Фокеева ЕВ, Карпов АВ, Курбатов ГА, Байкова ЕС, Сафрыгина ТП. Экстремальное загрязнение угарным газом пограничного слоя атмосферы в московском регионе летом 2010 г. *Доклады Академии наук* 2011. Vol. 441, No. 4, С. 532-532.
4. Голицын ГС, Гречко ЕИ, Генчен В, Пусай В, Джозла АВ, Емиленко АС, Копейкин ВМ, Ракитин ВС, Сафронов АН, Фокеева ЕВ. Исследование загрязнения атмосферы Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолям. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2015;51(1):8-19.



5. Горчаков ГИ, Семутникова ЕГ, Зоткин ЕВ, Карпов АВ, Лезина ЕА, Ульяненко АВ. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2006;42(2):176-90.
6. Горчаков ГИ, Карпов АВ, Колесникова АБ, Байкова ЕС, Семутникова ЕГ, Задорожная ОС. Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентраций примесей. *Оптика атмосферы и океана*. 2010;23(9):784-92.
7. Горчаков ГИ, Семутникова ЕГ, Аношин БА, Карпов АВ, Колесникова АБ. Статистический прогноз загрязнения городской атмосферы. 1. Статистические закономерности межсуточной изменчивости концентраций угарного газа и оксидов азота. *Оптика атмосферы и океана*. 2010;23(3):211-7.
8. Горчаков ГИ, Семутникова ЕГ, Аношин БА, Карпов АВ, Колесникова АБ. Статистический прогноз загрязнения городской атмосферы. 2. Методика прогноза межсуточной и внутрисуточной изменчивости концентраций угарного газа и оксидов азота. *Оптика атмосферы и океана*. 2010;23(4):287-93.
9. Гречко ЕИ, Джола АВ, Ракитин ВС, Фокеева ЕВ, Кузнецов РД. Вариации общего содержания окиси углерода и параметры атмосферного пограничного слоя в центре Москвы. *Оптика атмосферы и океана*. 2009;22(3):284-8.
10. Демченко П.Ф., Гинзбург А.С., Александров Г.Г., Вересков А.И., Горчаков Г.И., Завалишин Н.Н., Захарова П.В., Лезина Е.А., Юдин Н.И. Статистическое моделирование среднесуточных концентраций загрязняющих веществ атмосфере Московского мегаполиса методом множественной регрессии. *Метеорология и гидрология*, 2015, № 10, с. 31-43.
11. Еланский НФ, Локощенко МА, Трифанова АВ, Беликов ИБ, Скороход АИ. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2015;51(1):39-51.
12. Завалишин Н.Н., Гинзбург А.С., Александров Г.Г. Методика статистического прогноза загрязнения атмосферного воздуха в мегаполисах на примере г. Москвы. *Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018*, стр. 303
13. Кузнецова ИИ. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха москвы в летних эпизодах 2010 г. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2012;48(5):566-577.
14. Ракитин ВС, Еланский НФ, Скороход АИ, Джола АВ, Ракитина АВ, Шилкин АВ, Кириллова НС, Казаков АВ. Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2021;57(1):126-36.
15. Фокеева ЕВ, Гречко ЕИ, Джола АВ, Ракитин ВС. Определение загрязнения атмосферы города Москвы окисью углерода спектроскопическим методом. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2007;43(5):664-70.

## Atmospheric electrical variability in the Tunkinsky District of the Republic of Buryatia

Oglezneva M.V.<sup>1</sup>, Nagorskiy P.M.<sup>1</sup>, Pustovalov K.N.<sup>1,2</sup>, Sat A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru

We estimate the surface electric field and air ions variability in undisturbed atmospheric conditions in the Tunkinsky District. It is noted, the maximum of the electric field potential gradient is shifted relative to the main maximum by the Carnegie curve by ~10 h earlier, and the minimum is observed at night. The diurnal electric field potential gradient at the site "Tunkin Depression" (770 msl) is 103 V/m, and at "Tunka Goltsy" (1440 msl) it is 135 V/m. The content of air ions is antiphase to the potential gradient, the minimum is observed in the afternoon and evening, and at night and morning - the maximum. At the same time, the highest concentrations of air ions of both polarities are observed on the Tunkinsky bald mountains.

*Acknowledgements: This research is supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-27-00482, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>.*

**REFERENCES:**

1. Harrison R.G. *The Carnegie Curve // Surveys in Geophysics*. 2013. V. 34. P. 209–232.
2. Bennett A.J., Harrison R.G. *Variability in surface atmospheric electric field measurements // Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 142. P. 012046.
3. Adzhiev A.K., Kupovykh G.V. *Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. 633–638.
4. Yaniv R., et al. *Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // Atmospheric Research*. 2016. V. 172–173. P. 119–125.
5. Smirnov V.V. *Ionization in the troposphere; St.-Petersburg, Hydrometeoizdat*. 1992. 309 p.
6. Ling X., Jayaratne R., Morawska L. *Air ion concentrations in various urban outdoor environments // Atmos. Environ*. 2010. V. 44. P. 2186–2193.
7. Hirsikko A., et al. *Atmospheric ions and nucleation: a review of observations // Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. V. 11(2). P. 767–798.
8. Grafetstätter C., et al. *Does waterfall aerosol influence mucosal immunity and chronic stress? A randomized controlled clinical trial? // J. Physiol. Anthropol*. 2017. V. 36. P.10.

## Электрическая изменчивость атмосферы в Тункинском районе Республики Бурятия

Оглезнева М.В.<sup>1</sup>, Нагорский П.М.<sup>1</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>, Сат А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

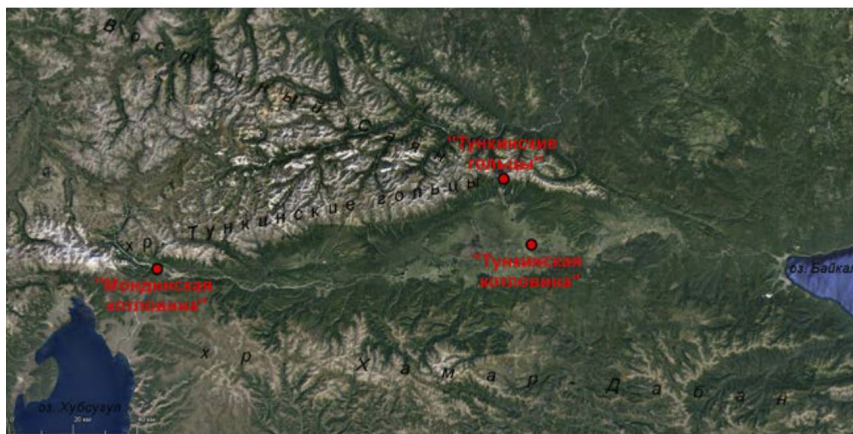
<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru

Известно, что изменчивость атмосферно-электрических величин обусловлена влиянием как глобальных, так региональных и локальных факторов [1, 2]. Вклад последних может существенно отличаться в различных регионах земного шара [3–8]. Знания о закономерностях пространственно-временной изменчивости атмосферно-электрических величин позволяют оценивать степень комфортности и полезности различных физико-географических условий и ландшафтов для жизнедеятельности человека [6, 8]. Кроме того, мониторинг фоновых значений этих величин, как индикаторов состояния окружающей среды, необходим для выявления их многолетней изменчивости в условиях возрастающей антропогенной нагрузки и современных климатических изменений.

В августе 2020 г. проводилась геофизическая экспедиция в Тункинский район Республики Бурятия с целью оценки фоновых значений атмосферно-электрических величин и их изменчивости под влиянием физико-географических факторов.

Территория исследования располагается в пределах юго-западной части Байкальской рифтовой зоны и представляет собой серию котловин, ограниченную с юга и севера хребтами Хамар-Дабан и Тункинские гольцы, соответственно. Измерения суточной изменчивости атмосферно-электрических величин проводились на трёх ключевых участках в пределах исследуемой территории (рис. 1): «Тункинская котловина» (степной участок в восточной части Тункинской котловины вблизи с. Тунка); «Мондинская котловина» (пойма р. Иркут в западной части Мондинской котловины вблизи п. Монды); «Тункинские гольцы» (южный склон хр. Тункинские гольцы вблизи с. Аршан).



**Рис. 1.** Спутниковое изображение Landsat (по данным Google Earth) территории исследования и расположение ключевых участков.



Для исследования было использовано следующее основное оборудование: электростатический флюксметр EFS-2/50; счётчик аэроионов Air Ion Counter Model; автоматическая метеорологическая станция Amtast AW003; портативные термогигрометр MS-6508 и анемометр MS6252A. Измерения вариаций исследуемых величин на каждом ключевом участке производились в течении не менее одних полных суток в условиях «хорошей погоды» (РД-52.04.168-88). Дополнительно производились наблюдения за облачностью и атмосферными явлениями.

На основе экспериментальных данных были получены оценки суточной изменчивости атмосферно-электрических величин в невозмущённых атмосферных условиях на территории исследования, а также влияния на неё высоты местности и форм рельефа.

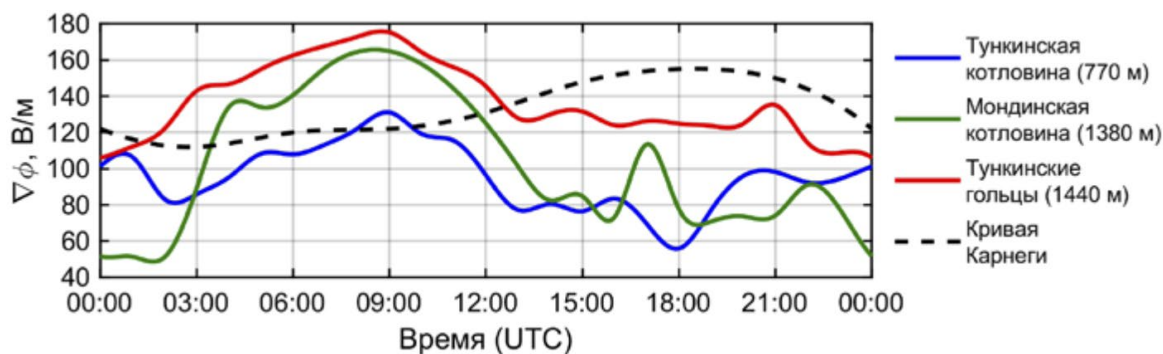
В суточном ходе градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ) на территории исследования максимум отмечается в вечернее время (~16–19 ч LT). При этом данный максимум смещён относительно главного максимума унитарной вариации на ~10 ч на более раннее время. Минимум  $\nabla\phi$ , в целом, отмечается в ночное время. Кроме главного максимума  $\nabla\phi$  на всех ключевых участках также отмечается дополнительный максимум, обусловленный интенсивным прогревом и турбулентным перемешиванием. Первым он регистрируется на ключевом участке «Тункинские гольцы», затем на участке «Мондинская котловина» и последним на участке «Тункинская котловина». Временное отличие связано с разным временем восхода солнца на участках, расположенных на различных высотах и формах рельефа. В таблице 1 представлены основные статистические характеристики, описывающие распределение градиента потенциала.

**Таблица 1.**

Среднее арифметическое ( $M$ ), среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ), медиана ( $Me$ ), интерквартильный размах ( $IQR$ ), а также значения 5-, 25-, 75- и 95-перцентилей ( $P_5, P_{25}, P_{75}$  и  $P_{95}$ ) для  $\nabla\phi$  на ключевых участках: Тункинская котловина (I), Мондинская котловина (II), Тункинские гольцы (III).

Участок	$M$ , В/м	$\sigma$ , В/м	$Me$ , В/м	$IQR$ , В/м	$P_5$ , В/м	$P_{25}$ , В/м	$P_{75}$ , В/м	$P_{95}$ , В/м
I	103	20	103	26	72	90	115	137
II	103	33	97	46	58	77	124	164
III	135	24	130	31	102	119	151	181

Сравнение среднесуточных значений  $\nabla\phi$  на различных ключевых участках показало, что с увеличением абсолютной высоты местности градиент потенциала, в целом, возрастает (рис. 2). Так, среднесуточное значение  $\nabla\phi$  на ключевом участке «Тункинская котловина» (770 м над у.м.) равно 103 В/м, а на «Тункинских гольцах» (1440 м над у.м.) – 135 В/м. Отмеченная зависимость хорошо согласуется с оценками в работе [3], где также был зарегистрирован рост  $\nabla\phi$  с высотой местности.



**Рис. 2.**

Сглаженные суточные вариации  $\nabla\phi$  на ключевых участках и унитарная вариация (кривая Карнеги).

В таблице 2 показаны основные статистические характеристики для концентраций положительных и отрицательных ионов. Содержание аэроионов, в целом, изменяется противофазно  $\nabla\phi$  – в послеполуденное и вечернее время отмечается минимум  $n_{\pm}$ , а в ночное и утреннее – максимум. Наибольшие концентрации аэроионов обеих полярностей наблюдаются на Тункинских гольцах, что связано с меньшим, по сравнению с нижележащими слоями, количеством аэрозоля.

Кроме стационарных наблюдений, на ключевых участках производились маршрутные измерения концентраций аэроионов при подъёме по склону хр. Тункинские гольцы (рис. 3). Подъём осуществлялся от п. Аршан (900 м над у.м.) до высоты 1440 м над у.м. На всех высотах положительные аэроионы преобладали над отрицательными. Значения  $n^+$  и  $n^-$  изменялись в диапазонах 1400–1900  $см^{-3}$  и 500–1500  $см^{-3}$  соответственно.

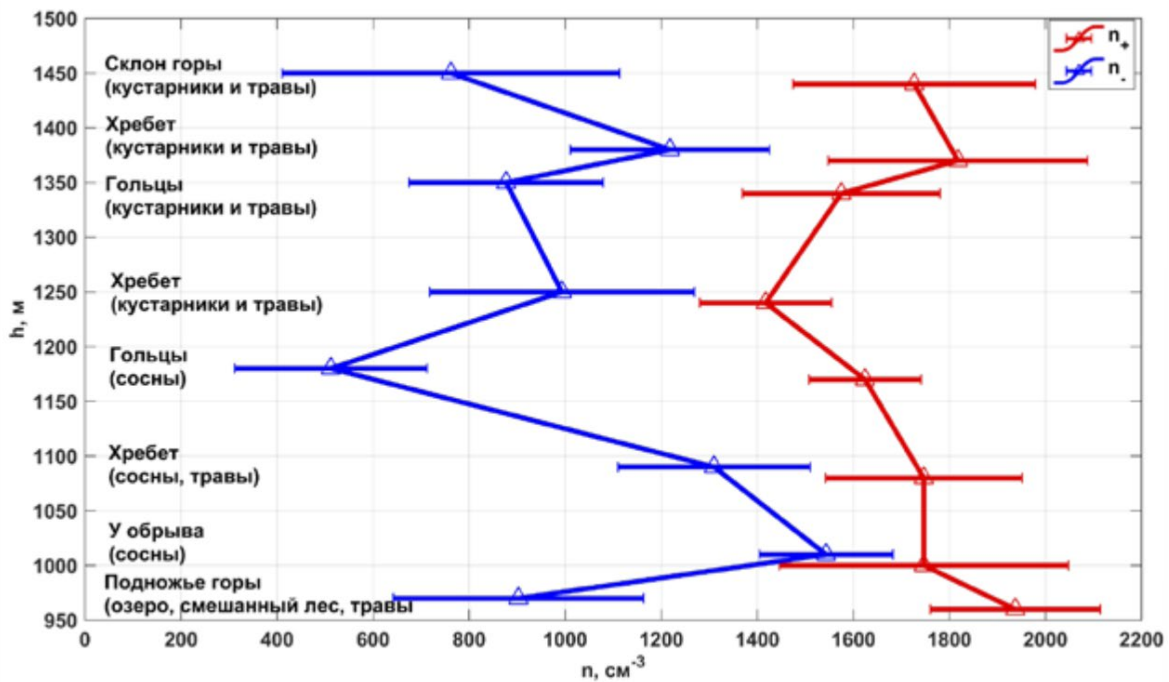


**Таблица 2.**

Статистические характеристики для  $n\pm$  ( $n+$ ;  $n-$ ) для ключевых участков.

Участок	$M$ , В/м	$\sigma$ , В/м	$Me$ , В/м	$IQR$ , В/м	$P_5$ , В/м	$P_{25}$ , В/м	$P_{75}$ , В/м	$P_{95}$ , В/м
I	1490; 570	430; 420	1500; 430	660; 300	820; 180	1150; 310	1810; 610	2160; 1500
II	1680; 810	580; 600	1690; 630	520; 970	130; 120	1510; 330	2030; 1300	2420; 1910
III	1780; 730	430; 460	1760; 650	600; 600	1150; 110	1450; 390	2050; 990	2550; 1550

При подъеме, в целом, отмечено снижение  $n\pm$ . Однако, на некоторых участках отмечались значительные отклонения от общей тенденции, предположительно, обусловленные свойствами подстилающей поверхности. Минимальные значения и разброс  $n\pm$  были зарегистрированы на скальных обнажениях и вблизи сосен, где затруднен выход радона и ограничен воздухообмен, а максимальные – на открытых участках с травянистой с кустарничковой растительностью.



**Рис. 3.**

Содержание аэроионов разных высот на Тункинских гольцах 12.08.2020 г.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (РНФ), № 22-27-00482, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>.

**ЛИТЕРАТУРА:**

- Harrison R.G. The Carnegie Curve // *Surveys in Geophysics*. – 2013. – V. 34. – P. 209–232.
- Bennett A.J., Harrison R.G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2008. – V. 142. – P. 012046.
- Adzhiev A.K., Kupovykh G.V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – V. 51. – P. 633–638.
- Yaniv R., et al. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // *Atmospheric Research*. – 2016. – V. 172–173. – P. 119–125.
- Смирнов В. В. Ионизация в тропосфере. В. В. Смирнов – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 309 с.
- Ling X., Jayaratne R., Morawska L. Air ion concentrations in various urban outdoor environments // *Atmos. Environ.* – 2010. – V. 44. – P. 2186–2193.
- Hirsikko A., et al. Atmospheric ions and nucleation: a review of observations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2011. – V. 11(2). – P. 767–798.
- Grafetstätter C., et al. Does waterfall aerosol influence mucosal immunity and chronic stress? A randomized controlled clinical trial? // *J. Physiol. Anthropol.* – 2017. – V. 36. – P.10.



# Long-range transport impacts on near-surface methane seasonal variations in Arctic

Shtabkin Yu.A., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Fedorova E.I.

A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: [yuryshtabkin@gmail.com](mailto:yuryshtabkin@gmail.com)

Methane ( $\text{CH}_4$ ) is the second most important greenhouse gas in the atmosphere after carbon dioxide,  $\text{CO}_2$ . For Arctic region, the limited data of near-surface methane concentration makes it difficult to conduct quantitative assessments of methane emissions impact from the most important regional anthropogenic and biogenic sources. This gap is partially filled by data from long-term observations on arctic and subarctic monitoring stations. Since 2005, according to observations, there has been a noticeable increase in methane near-surface concentration. The reasons for this increase are not completely clear.

We provide quantitative estimates of the most important regional anthropogenic and biogenic methane emissions sources contribution to observed long-term variability of methane concentration in surface air. To analyze surface methane variations, we use background stations observational data, as well as numerical calculations performed by GEOS-Chem chemical transport model, which is widely applied in chemically active and greenhouse gases fields calculation.

*This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement № 075-15-2021-934).*

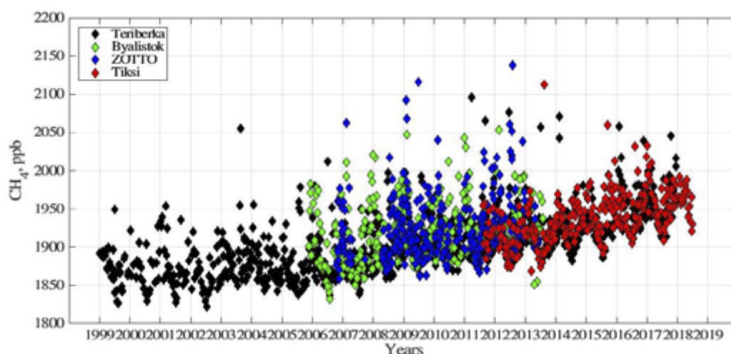
## Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации приземного метана в Арктике

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Федорова Е.И.

Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия  
E-mail: [yuryshtabkin@gmail.com](mailto:yuryshtabkin@gmail.com)

### ВВЕДЕНИЕ

Метан ( $\text{CH}_4$ ) является вторым по значимости (после диоксида углерода,  $\text{CO}_2$ ) парниковым газом в атмосфере, согласно четвертому обобщающему докладу, опубликованному в 2007 г. Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCCAR4). Для Северной Евразии, ограниченность данных по содержанию метана в приземном воздухе затрудняет проведение количественных оценок эмиссий метана от важнейших региональных антропогенных и биогенных источников. Частично указанный пробел восполняется данными долгосрочных наблюдений на станциях Териберка (69.1 с.ш., 35.1 в.д., 15 м. над уровнем моря (далее - н.у.м.)), Белосток (53.1 с.ш., 23.1 в.д., 160 м.н.у.м.), Зотино (60.8 с.ш., 89.4 в.д., 300 м.н.у.м.) и Тикси (71.4 с.ш., 128.5 в.д., 10 м.н.у.м.) предварительный анализ которых приводится ниже. Начиная с 2005 года, по данным на всех выше перечисленных станциях наблюдается заметный рост приземной концентрации метана (см. рис. 1). Причины указанного роста остаются до конца не выяснены. Ниже приводятся количественные оценки возможного вклада важнейших региональных источников эмиссий метана в наблюдаемую долгосрочную изменчивость содержания метана в приземном воздухе.



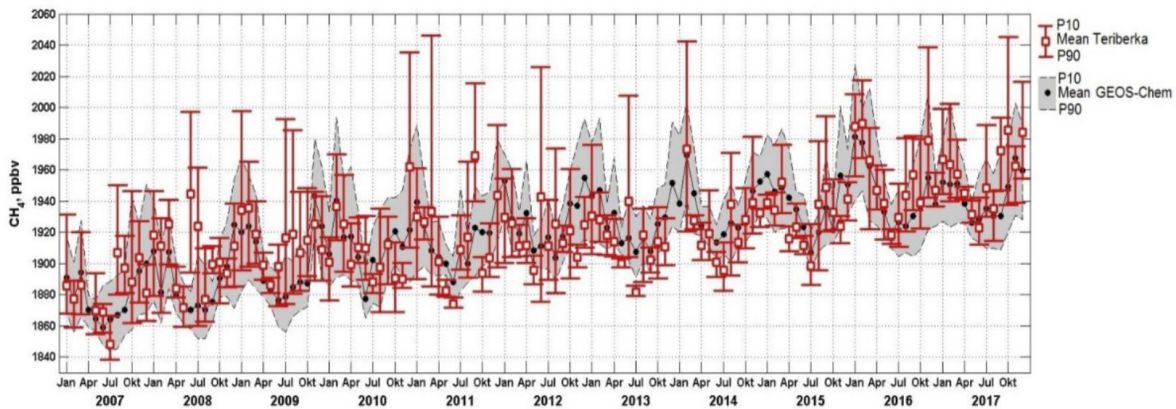
**Рис. 1.** Приземная концентрация метана по данным фляговых измерений на станциях Териберка, Белосток, ZOTTO и Тикси.

Для анализа вариаций приземного содержания метана используются данные наблюдений на фоновых станциях мониторинга состава атмосферного воздуха, а также численные расчеты, проводимые с помощью транспортно-химических моделей (ТХМ), причем для оценки влияния разных источников метана могут использоваться методы как прямого, так и обратного моделирования. Для прямого моделирования в данной работе использовалась ТХМ GEOS-Chem (<http://acmg.seas.harvard.edu/geos/>) [1], широко используемая в международном сообществе для расчетов полей химически активных и парниковых газов в атмосфере.

## СРАВНЕНИЕ С МОДЕЛЬЮ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ В АРКТИКЕ

Для сравнения с данными наблюдений на арктических фоновых станциях мониторинга состава атмосферы использовались результаты наблюдений на станции Териберка и результаты расчетов с ТХМ GEOS-Chem 12–01 на сетке с горизонтальным разрешением  $4^\circ \times 5^\circ$ . Расчеты проводились за период 2007–2017 гг, соответствующий временным рядам используемых данных, с использованием данных реанализа MERRA2. Для задания биогенных эмиссий метана использовалась встроенная модель WetCHARTs v1.0 [2], для задания антропогенных эмиссий применялись данные EDGAR 4.3.2 [3], для задания эмиссий от природных пожаров – GFED4 [4].

В качестве критериев согласованности использовались среднее смещение  $\delta = \bar{O} - \bar{C}$ , среднеквадратическая ошибка  $RMSE = ((O - C)^2)^{1/2}$  и коэффициент корреляции  $COR = (O - \bar{O})(C - \bar{C}) / \sigma_O \sigma_C$ , где  $O$  и  $C$  – наблюдаемые и рассчитанные по модели среднемесячные концентрации  $CH_4$ ,  $\sigma_O, \sigma_C$  – соответствующие стандартные отклонения, верхняя черта означает усреднение по всем значениям из ансамбля. Все представленные ниже результаты получены на основе анализа среднемесячных значений. Приведены соответствующие статистики по месяцам:  $P_{10,90}$  – перцентили,  $\square$  – среднее. Сплошная линия – расчет по модели GEOS-Chem (среднемесячные концентрации, вывод на первом модельном уровне, ~58 м над землей).



**Рис. 2.** Сравнение расчетов GEOS-Chem с наблюдениями приземной концентрации метана на станции Териберка.

Для станции Териберка (Рис. 2) получено  $COR = 0.75$  (0.65 .. 0.82),  $RMSE = 19.1$  (16.9 .. 22.7) ppb и  $\delta = 2.2$  (-1.0 .. 5.6) ppb. Указанные в скобках значения соответствуют границам 95% доверительного интервала, рассчитанного методом бутстрепа.

## МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Количественные оценки вклада антропогенных эмиссий в атмосферное поле концентрации  $CH_4$  были выполнены на основе регионального подхода, при этом определен один макрорегион, включающий западную Европу (35–75 N, -15–27E), европейскую территорию России (ЕТР) (41–75 N, 27–60 E), Сибирь и российский Дальний Восток (49–75 N, 60–180 E).

Для любой географической точки атмосферный отклик (далее – АО) на суммарные антропогенные эмиссии метана от конкретного региона рассчитывается как разность между концентрацией  $\chi(CH_4)_0$  (ppb), полученной из базового модельного расчёта, в котором учитываются все планетарные эмиссии, и концентрацией, рассчитанной из модели при выключении антропогенных эмиссий в данном регионе,  $\chi(CH_4)$ :

$$AO_P = \chi(CH_4)_0 - \chi(CH_4) \text{ (ppb)} \quad (1)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Средние за рассматриваемые годы величины АО приведены в таблице 1. В целом, влияние дальнего переноса от регионов климатически значимых эмиссий  $\text{CH}_4$  в Северной Евразии на содержание метана в нижней тропосфере и величину АО проявляется наиболее сильно в зимний период, что обусловлено сразу несколькими факторами: сезонным увеличением эмиссий при сжигании ископаемого топлива, увеличением фотохимического времени жизни метана в атмосфере за счет уменьшения содержания гидроксила, а также увеличением времени пребывания атмосферных трассеров в нижней тропосфере в связи с уменьшением роли конвективного переноса и более высокой статической устойчивостью тропосферы в целом. По результатам расчетов, величина АО в зимний период может достигать 7% от наблюдаемой концентрации метана.

**Таблица 1.**

Среднесезонные значения приземной концентрации метана в районе наблюдательной станции Териберка (ppb). Среднесезонные значения атмосферного отклика на антропогенные эмиссии метана для обозначенной станции (ppb).

	Териберка	
	Среднее	АО
Зима	1934	129
Весна	1914	114
Лето	1912	104
Осень	1922	120

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе глобальной транспортно-химической модели GEOS-Chem проведена количественная оценка вкладов климатически значимых природных и антропогенных источников эмиссий в Северной Евразии в наблюдаемую сезонную изменчивость  $\text{CH}_4$  на Кольском полуострове (станция Териберка), по данным измерений в 1999–2017 гг. Согласно расчетам, величина вклада региональных эмиссий в измеренные концентрации метана составляет (~104–129 ppbv), или 5.4–6.7 % от среднегодовой величины 1926 ppbv по измерениям на указанной станции. Рассчитанные величины атмосферного отклика в несколько раз превышают амплитуду наблюдаемой годовой изменчивости метана (22–36 ppbv), что позволяет сделать вывод о значимой роли региональных источников атмосферных выбросов метана в Западной Европе, на Европейской территории России и в Сибири в региональном балансе приземного содержания  $\text{CH}_4$  в нижней тропосфере над континентом. В летние месяцы вклад региональных эмиссий метана выражен несколько слабее (~104 ppbv) по сравнению с зимой (~129 ppb), что в первую очередь связано с возрастающей ролью вертикального конвективного обмена в нижних слоях тропосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2021-934).

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, Logan J A, Field B, Fiore A M, Li Q, Liu H, Mickley L J and Schultz M 2001 Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation *J. Geophys. Res.* 106 23073-96
2. Bloom, A. A., Bowman, K. W., Lee, M., Turner, A. J., Schroeder, R., Worden, J. R., Weidner, R., McDonald, K. C., and Jacob, D. J. A global wetland methane emissions and uncertainty dataset for atmospheric chemical transport models (WetCHARTs version 1.0), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2141–2156, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2141-2017>, 2017.
3. Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., Bergamaschi, P., Pagliari, V., Olivier, J. G. J., Peters, J. A. H. W., van Aardenne, J. A., Monni, S., Doering, U., Petrescu, A. M. R., Solazzo, E., and Oreggioni, G. D. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 959–1002, <https://doi.org/10.5194/essd-11-959-2019>, 2019.
4. Van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R. S., Jin Y., van Leeuwen T. T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 11707 11735. doi:10.5194/acp1011707 2010.



# The 2020 spring lockdown's impact on Moscow air quality in comparison with some other regions of the world

**Khlestova Yu.O.<sup>1</sup>, Ginzburg A.S.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: [khlestova2013@yandex.ru](mailto:khlestova2013@yandex.ru)

The Moscow spring lockdown in 2020 is a unique experiment to assess the anthropogenic impact on the metropolis air pollution. Restrictive measures were started in April and stopped in June. The research of (Ginzburg et al., 2020; Gubanova et al., 2022; Skorokhod et al., 2022) showed that the most significant factors of atmospheric pollution reduction were a reduction of transport activity and atypical meteorological conditions.

In this work, 20-minute measurements of the Mosecomonitoring network for the period from March to June 2015-2020 were used. Mass concentrations of carbon monoxide (CO) and atmospheric particulate matter with a size less than 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) were considered. It was analyzed 14 Moscow stations, and only «Sukharevskaya Ploschad» is located near highways. Other stations are located in residential areas. Additionally, it was examined two stations in the downtown – «Sukharevskaya Ploschad» (near highway) and «Spiridonovka» (residential area) to assess the effect of transport activity reducing.

It was found that during the lockdown period the average mass concentration of carbon monoxide was  $289 \pm 27 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $391 \pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for the same period of 2015-2019, that is 26% higher. The daily variation of CO changes during restrictive measures. There was no pronounced daily variation in 2016-2019 due to the continuous anthropogenic load and the long CO lifetime in the atmosphere. But during lockdown period, there was a pronounced daily variation with minimum in the morning and maximum in the evening due the structure of rush hours and the accumulation of carbon monoxide.

The average PM10 mass concentration was  $18 \pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in the lockdown period and  $24 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in 2015-2019. Meteorological conditions have a major effect on the PM10 in spring of 2020 due to the atypical cold mode. We carried out an analog analysis of PM<sub>10</sub> in 2017 and 2020 to identify the effect of anthropogenic emissions under similar temperature and humidity conditions.

It should be noted that restrictive measures in spring of 2020 did not lead to a complete reduction in anthropogenic emissions. We used transport activity data as a criterion of anthropogenic emissions reduction, since road transport plays a leading role in reducing anthropogenic impact under lockdown conditions in many regions. We took the data (Sokhi et al., 2021) on road activity, CO and PM10 content and added results of Moscow lockdown impact. In general, the decrease of average transport activity in the world was 41-74%, with a corresponding decrease of CO by 18-40% and the decrease of PM10 by 5-37%. Average transport activity in Moscow was 44% lower during lockdown, and this led to the reduction of carbon monoxide mass concentrations and PM<sub>10</sub> by 26% and 25% respectively.

*The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No 20-05-00254).*

## REFERENCES:

1. Ginzburg A.S., Semenov V.A., Aleshina M.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V., Lezina E.A. Impact of COVID-2019 lockdown on air quality in Moscow // *Doklady Earth Sciences* – 2020 – V. 495 – №. 1 – P. 862-866.
2. Gubanova D.P. et al. Variability of near-surface aerosol composition in Moscow in 2020-2021: episodes of extreme air pollution of different genesis // *Atmosphere* – 2022 – V. 13 – № 4 – P. 574.
3. Skorokhod A.I. et al. The impact of COVID-19 pandemic measures and meteorological conditions on the composition of atmospheric air in Moscow in 2020 // *Meteorology and hydrology* – 2022 – № 3 – P. 36-46 (in Russian).
4. Sokhi R.S. et al. A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions // *Environment international* – 2021 – V. 157 – P. 106818.

# Влияние весеннего карантина 2020 года на качество воздуха в Москве по сравнению с другими регионами мира

Хлестова Ю.О.<sup>1</sup>, Гинзбург А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: khlestova2013@yandex.ru

Локдаун в Москве весной 2020 года, как и во многих других мегаполисах и регионах мира, стал уникальным экспериментом по оценке влияния антропогенного вклада в загрязнение воздуха мегаполиса. Ограничительные меры в Москве были введены 11 апреля 2020 года и сняты только 9 июня 2020 года. В (Ginzburg et al., 2020; Gubanova et al., 2022; Скороход и др., 2022) показано, что наиболее значимыми факторами снижения уровня атмосферного загрязнения стали уменьшение транспортной активности и нетипичные метеорологические условия весны 2020 года.

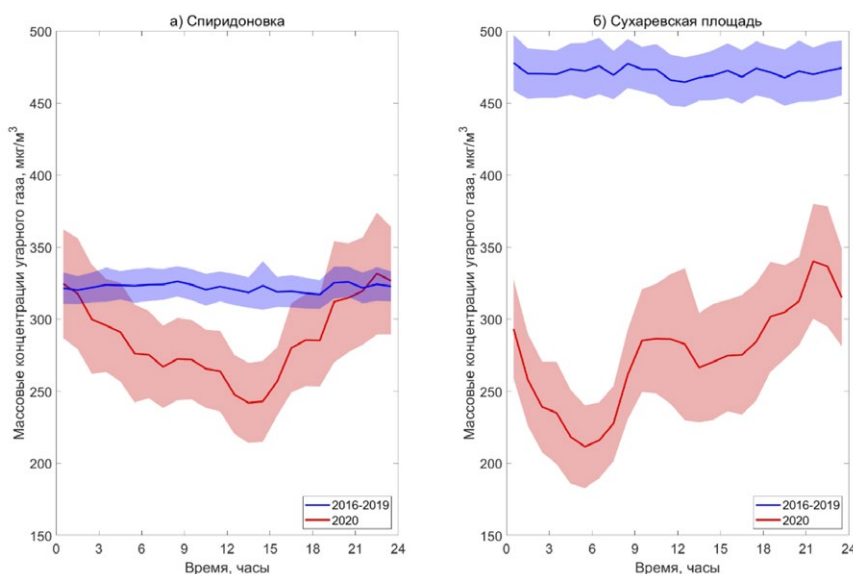
В данной работе использованы 20-минутные измерения сети ГПБУ «Мосэкомониторинг» на территории Москвы за март-июнь 2015-2020 гг. о массовых концентрациях угарного газа (CO) и взвешенных частиц в атмосфере размером не более 10 мкм (PM<sub>10</sub>), а также стандартные гидрометеорологические наблюдения. Отобранные для анализа станции с хорошей обеспеченностью данными за указанный период обозначены на рисунке 1 в границах центральной части Москвы. Из рассмотренных станций только «Сухаревская площадь» расположена вблизи автомагистралей. Остальные станции находятся в жилых зонах, и среди них станции «Черемушки», «Спиридоновка» и «МГУ» наименее подвержены воздействию антропогенных источников (Кульбачевский и др., 2021).



**Рис. 1.**

Анализируемые станции измерения качества воздуха: только PM<sub>10</sub> (зелёным), CO и PM<sub>10</sub> (красным и зелёным). Границы районов и округов Москвы обозначены оранжевым.

За период локдауна концентрация угарного газа в среднем составила  $289 \pm 27$  мкг/м<sup>3</sup>, в то время как за предыдущие 5 лет того же периода –  $391 \pm 7$  мкг/м<sup>3</sup>, что на 26% выше. На рисунке 2 представлен суточный ход массовых концентраций угарного газа в период локдауна в 2020 году и в 2016-2019 гг. на станциях «Спиридоновка» и «Сухаревская площадь». Концентрации в 2016-2019 гг. в среднем составили 317-326 мкг/м<sup>3</sup> на станции «Спиридоновка» и 464-477 мкг/м<sup>3</sup> на



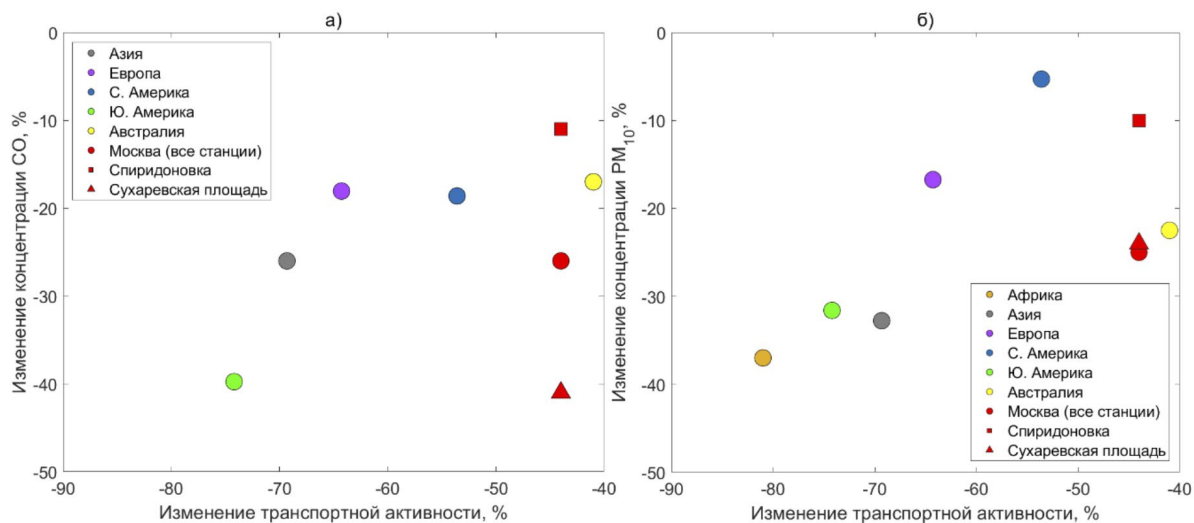
**Рис. 2.**

Суточный ход массовых концентраций угарного газа (мкг/м<sup>3</sup>) локдауна в 2020 году (красным) и в среднем за 2016-2019 гг (синим). Станции (а) «Спиридоновка» и (б) «Сухаревская площадь». Доверительные интервалы показаны заливкой.

«Сухаревской площади». Не прослеживается выраженного суточного хода CO, что связано с непрерывной антропогенной нагрузкой в центральной части Москвы и продолжительным временем жизни угарного газа в атмосфере. В 2020 году наблюдается значимое снижение содержания CO. Для «Спиридоновки» прослеживается выраженный суточный ход с минимумом в полуденные часы и максимумом в ночное время за счет накопления эмиссий CO от автотранспорта, снижение концентраций угарного газа в 2020 году составило 36 мкг/м<sup>3</sup> (11%). Для станции «Сухаревская площадь» в 2020 году также прослеживается суточный ход от 212 мкг/м<sup>3</sup> в утренние часы до 340 мкг/м<sup>3</sup> в вечернее время. «Сухаревская площадь» расположена в зоне высокой активности автотранспорта, однако в период ограничительных мер снижение антропогенного влияния привело к снижению содержания CO на станции до уровня «Спиридоновки», расположенной в жилом районе. Для всего периода локдауна концентрации CO на «Сухаревской площади» снизились в среднем на 41%.

Содержание PM<sub>10</sub> в период локдауна снизилось от 24±1 мкг/м<sup>3</sup> до 18±2 мкг/м<sup>3</sup>, однако большой вклад в изменение PM<sub>10</sub> оказали метеорологические условия. В данной работе дополнительно был проведен аналоговый анализ PM<sub>10</sub> для 2017 и 2020 годов для выявления влияния антропогенных эмиссий в схожих температурно-влажностных условиях.

Данные о транспортной активности могут служить критерием изменения уровня антропогенной нагрузки, потому как во многих регионах автотранспорт занимает ведущую роль в снижении антропогенных эмиссий в период локдауна (Guevara et al., 2021). На рисунке 3 приведены данные о среднем изменении транспортной активности в разных регионах мира в период локдауна относительно прошлых лет и соответствующее им изменение массовых концентраций CO и PM<sub>10</sub>. Данные адаптированы из работы (Sokhi et al., 2021), а также на рисунок добавлены результаты для Москвы со средним снижением транспортной активности на 44%. За неимением детализированной информации об интенсивности автотранспорта в Москве со всеми данными указано только среднее значение. В целом во многих регионах мира наблюдалось значительное снижение транспортной активности: от 41% в Австралии до 81% в Африке. Результаты для Москвы соответствуют результатам других регионов. «Сухаревская площадь» ввиду высокого вклада автотранспорта в структуру эмиссий выделяется более заметным изменением CO.



**Рис. 3.**

Изменение уровня транспортной активности (по горизонтали) и изменения массовых концентраций CO (а) и PM<sub>10</sub> (б) в период локдауна в 2020 году в разных регионах мира (по вертикали). Адаптация результатов (Sokhi et al., 2021) с добавлением данных для Москвы (красным) на всех анализируемых станциях (кружки), на станциях «Спиридоновка» (квадраты) и «Сухаревская площадь» (треугольники).

Таким образом, ограничительные меры оказали значимое влияние на загрязнение воздуха Москвы в 2020 году. На рассмотренных станциях с наиболее высокой и наиболее низкой транспортной активностью в центральной части Москвы наблюдается снижение массовой концентрации угарного газа в период ограничительных мер, но с разной интенсивностью.

*Исследование проведено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 20-05-00254).*

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Кульбачевский А.О. и др. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2020 году» – Москва, 2021. – 330 с.

2. Скороход А.И. и др. Влияние мер по сдерживанию пандемии COVID-19 и метеорологических условий на состав атмосферного воздуха в Москве в 2020 г. // *Метеорология и гидрология*. – 2022. – № 3. – С.36-46.
3. Ginzburg A.S., Semenov V.A., Aleshina M.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V., Lezina E.A. Impact of COVID-2019 lockdown on air quality in Moscow // *Doklady Earth Sciences*. – 2020. – V. 495. – №. 1. – P. 862-866.
4. Gubanov D.P. et al. Variability of near-surface aerosol composition in Moscow in 2020-2021: episodes of extreme air pollution of different genesis // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13. – № 4. – P. 574.
5. Guevara M. et al. Time-resolved emission reductions for atmospheric chemistry modelling in Europe during the COVID-19 lockdowns// *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021. – V.21. – P. 773-797.
6. Sokhi R.S. et al. A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions// *Environment international*. – 2021. – V. 157. – P. 106818.

## Changes in the oxygen content in the near-surface air of Moscow

Ginzburg A.S.<sup>1</sup>, Vinogradova A.A.<sup>1</sup>, Pomelova M.A.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology RAS, Moscow, Russia

E-mail: gin@ifaran.ru

In recent years, there has been a growing concern in the world about changes in the oxygen content in the upper layer of the World Ocean and in the surface air of large cities. Many studies have been devoted to the first aspect, which were reflected in the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [1].

As for the oxygen content in the urban air, this aspect has been studied in much less detail, although the lack of oxygen during strong heat waves has long worried residents of megacities and medical workers. The article [2] considered extreme weather conditions in the summer of 2010 in the European part of Russia and 2012 in Siberia.

The studies of recent decades in many countries and, first of all, within the framework of the "oxygen" program of the Scripps Institution of Oceanography [3, 4] show a quite noticeable decrease in the oxygen content in the surface air, which has a clear correlation with the increase in the carbon dioxide content in the atmosphere. This decrease in oxygen content is confidently recorded at all Scripps Institution of Oceanography observation stations.

Regular observations of the oxygen content in the atmosphere of Moscow have been regularly carried out since 2016 at three automatic monitoring stations. The analysis of these data shows a pronounced annual course of oxygen content in the air and a high correlation between the measured and calculated oxygen content.

### REFERENCES:

1. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In press.
2. Ginzburg A.S., Vinogradova A.A., Fedorova E.I., Nikitich E., and Karpov A.V. Content of Oxygen in the Atmosphere over Large Cities and Respiratory Problems // *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. Vol. 50. No. 8. P. 782–792.
3. Keeling, R. F., Manning, A. C. *Studies of recent changes in atmospheric O<sub>2</sub> content*. In *Treatise on Geochemistry*, Eds R.F. Keeling and L. Russell. 2014. Amsterdam: Elsevier. P. 385–40
4. Keeling R.F., Powell F.L., Shaffer G., Robbins P.A. and Simonson T.S. Impacts of Changes in Atmospheric O<sub>2</sub> on Human Physiology. Is There a Basis for Concern? // *Front. Physiol.* 2021. 12:571137. doi: 10.3389/fphys.2021.571137



# Современные изменения содержания кислорода в приземном воздухе Москвы

Гинзбург А.С.<sup>1</sup>, Виноградова А.А.<sup>1</sup>, Помелова М.А.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва, Россия

E-mail: gin@ifaran.ru

В последние годы в мире растет озабоченность изменением содержания кислорода в верхнем слое Мирового океана и в приземном воздухе больших городов. Первому аспекту посвящено множество исследований, которые нашли свое отражение в Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [1].

Что касается содержания кислорода в городском воздухе, то этот вопрос изучен значительно менее подробно, хотя нехватка кислорода во время сильных волн жары давно волнует жителей мегаполисов и медицинских работников. В статье [2] были рассмотрены экстремальные погодные условия лета 2010 года в Европейской части России и 2012 года в Сибири. При высокой температуре и высокой абсолютной влажности приземного воздуха в центральной части Европейской территории России и, особенно, в Москве летом 2010 года содержание кислорода в атмосферном воздухе было минимально и жители мегаполиса испытывали все признаки гипоксии.

За последующие годы в мире появилось значительное количество публикаций, посвящённых не только некоторому уменьшению содержания кислорода в приземном воздухе в условиях глобального потепления, но и более существенному снижению содержания кислорода в городской атмосфере.

Общеизвестно, что природные источники и стоки кислорода в течение последних тысячелетий поддерживают постоянное процентное содержание кислорода в сухом воздухе у поверхности Земли на уровне 20.95 %, что до недавнего времени считалось практически «мировой константой».

Однако исследования последних десятилетий во многих странах и, в первую очередь, в рамках «кислородной» программы Scripps Institution of Oceanography [3, 4] показывают вполне заметное уменьшение содержания кислорода в приземном воздухе, имеющее четкую корреляцию с ростом содержания углекислого газа в атмосфере.

Это уменьшение содержания кислорода уверенно фиксируется на всех станциях наблюдения Scripps Institution of Oceanography. Эти станции расположены преимущественно в фоновых районах.

Как отмечено в [2] и последующих исследованиях, в городских агломерациях существуют дополнительные факторы снижения содержания кислорода в воздухе, связанные как с загрязнением городской атмосферы угарным газом, так и с наличием городского острова тепла.

В пределах Москвы содержание кислорода в приземном воздухе измеряется на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» в тестовом режиме практически с начала XXI века. Регулярные наблюдения на трех АСКЗА проводятся с 2016 года. Значения концентрации кислорода (%) регистрируются каждые 20 мин с помощью парамагнитного газоанализатора T802 (USA, [www.teledyne-api.com]). Обработка и анализ данных последних шести лет показывает ярко выраженный годовой ход (с минимумом летом) процентного содержания кислорода в воздухе, которым дышат москвичи.

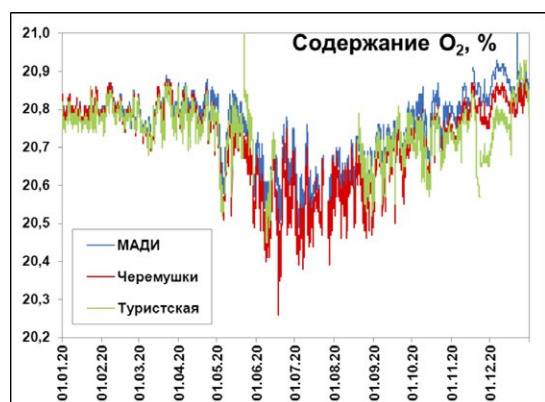


Рис. 1.

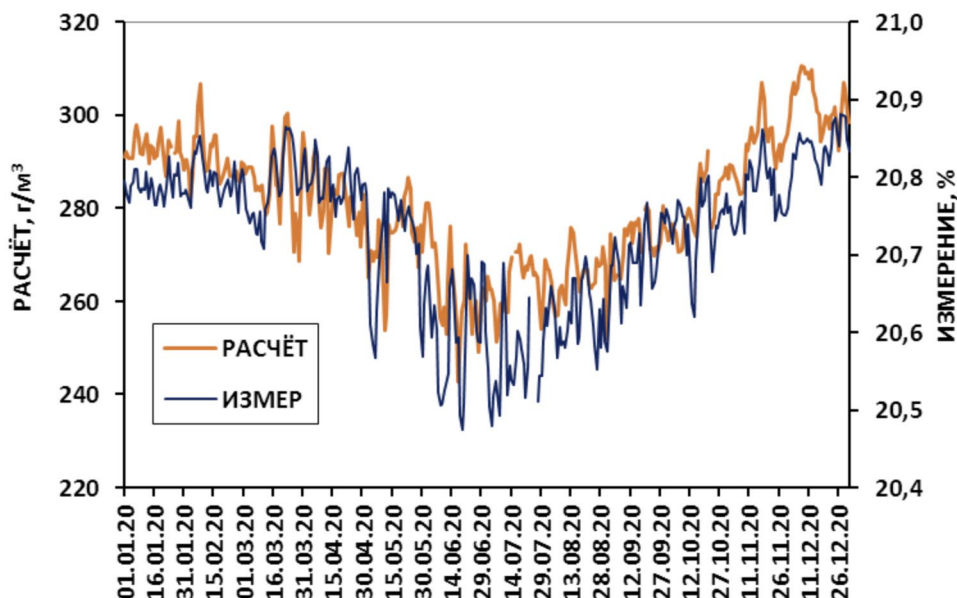
Данные измерений процентного содержания кислорода в атмосфере Москвы на трех АСКЗА (МАДИ, Черемушки и Туристская)



Рис. 2.

Расчет концентрации кислорода в атмосфере Москвы по данным метеостанции Балчуг, красная линия – осреднение по месяцам.

Однако для дыхания важна парциальная плотность кислорода, содержащегося в воздухе, оптимальная величина которой составляет, по оценкам медиков, около  $285 \text{ г/м}^3$ . а признаки гипоксии у человека наблюдаются при значениях ниже  $270 \text{ г/м}^3$ . Плотность  $\text{O}_2$  в приземной атмосфере можно грубо вычислить по метеоданным – давление, относительная влажность и температура воздуха [2]. Выявлена высокая корреляция между измеренными и рассчитанными значениями среднесуточной концентрации кислорода. Первые результаты анализа данных по кислороду, полученных на системе станций «Мосэкомониторинг» представлены на рис. 1-3 на примере 2020 года.



**Рис. 3.**

Сравнение данных измерения процентного содержания (среднее по трем АСКЗА) и расчета концентрации (по данным метеостанции Балчуг) кислорода в атмосфере Москвы в 2020 году – по среднесуточным значениям.

Корреляция среднесуточных значений осреднённого по трем АСКЗА процентного содержания кислорода и его рассчитанной концентрации по данным метеостанции Балчуг за весь 2020 год равна 0.84. Однако, как видно из рис. 3, в отдельные периоды корреляция измерений и расчетов невелика. В другие годы также имеются эпизоды с существенным расхождением измеренных и рассчитанных данных содержания кислорода в атмосфере Москвы. Объяснению и обсуждению этих расхождений и посвящена данная работа.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН. Анализ данных наблюдений выполнен при финансовой поддержке проект РФФИ № 20–05–00254.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In press.
2. Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Фёдорова Е.И., Никитич Е.В., Карнов А.В. Содержание кислорода в атмосфере крупных городов и проблемы дыхания // *Геофизические процессы и биосфера*. 2014. Т. 13. № 2. С. 5–19
3. Keeling, R. F., Manning, A. C. *Studies of recent changes in atmospheric O2 content. In Treatise on Geochemistry*, Eds R.F. Keeling and L. Russell. 2014. Amsterdam: Elsevier. P. 385–404.
4. Keeling R.F., Powell F.L., Shaffer G., Robbins P.A. and Simonson T.S. *Impacts of Changes in Atmospheric O2 on Human Physiology. Is There a Basis for Concern?* // *Front. Physiol.* 2021. 12:571137. doi: 10.3389/fphys.2021.571137

## СЕКЦИЯ 6

Отклик наземных экосистем Северной Евразии на климатические изменения

## SESSION 6

Response of Terrestrial Ecosystems of Northern Eurasia to climate change

### Seasonal and long-term variation in water chemistry of drained part of the Great Vasyugan Mire

**Kharanzhevskaya Yu.A.**

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia  
E-mail: kharan@yandex.ru

According to a report by the World Meteorological Organization, in 2020 the concentration of greenhouse gases in the Earth's atmosphere reached a new maximum, and the last seven years have become the warmest in the history of instrumental observations. An increase in air temperature and a change in the precipitation regime contribute to the disruption of local and regional biogeochemical cycles of chemical elements, enhances the mobilization and removal of organic and mineral substances into surface waters and the World Ocean. Forecast estimates for Western Siberia presented in Frey and Smith, 2005] show that by 2100 the area with an average annual temperature above  $-2^{\circ}\text{C}$  will double, the concentration of dissolved organic carbon in rivers will increase by 700%, and the carbon removal into the Arctic Ocean will increase by 29-46%. The purpose of this work is to assess the patterns of temporal changes in water chemistry of the drained area of the Great Vasyugan Mire.

The studies were carried out within the drained northeastern part of the Great Vasyugan Mire within the boundaries of the Gavrilovka River basin close to Polynyanka village in Tomsk region. Water sampling was carried out once a month from March to September 2015-2021 within pine-dwarf shrub-sphagnum community ( $56^{\circ}53' 25.8''$ ,  $82^{\circ}40' 50.5''$ ). The analysis of the factors determining the variation in water chemistry was carried out using data from observations of air temperature and precipitation at the meteorological station near Bakchar village, as well as data obtained using autonomous level and temperature sensors installed directly in the peat deposit at the sampling site [Kiselev et al., 2018]. Statistical analysis was performed using the Principal component analysis (PCA) with the calculation of factor loadings.

PCA revealed some differences in the formation of the chemical composition depending on the water content and heat supply of the year. Data analysis showed that in 2016-2020 the leading condition that determines the increase in pH, EC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{NH}_4^{+}$ , Fetotal, Cl<sup>-</sup>,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , COD, DOC,  $\text{CO}_2$ , TDS in waters was the temperature regime, while precipitation and rising of water levels lead to lower concentrations due to the dilution effect. Whereas in the low-water year 2015 and the

year 2021, which is average in terms of water content (as a result of 2020 with the absolute maximum of the average annual air temperature for the entire observation period), there was a tendency to increase the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , Fetotal,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , DOC, COD, TDS with increasing water levels and during precipitation events. On the contrary, an inverse correlation was noted between the air and the peat deposit temperature with the concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  in waters in 2015 and 2021, which is associated with the assimilation of these components by plants under favorable thermal conditions of the season.

The study was supported by the Russian Science Foundation, project № 22-27-00242

#### REFERENCES:

1. Frey, K. E. Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100 // *Geophysical Research Letters*, 32(9). (2005). doi:10.1029/2004gl022025
2. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S. and Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. 190. 012031 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/190/1/012031>

## Особенности гидрохимического режима осушенного участка Васюганского болота

Харанжевская Ю.А.

Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа-филиал СФНЦА РАН, Томск, Россия

E-mail: [kharan@yandex.ru](mailto:kharan@yandex.ru)

Согласно отчету Всемирной метеорологической организации, в 2020 году концентрация парниковых газов в атмосфере Земли достигла нового максимума, а последние семь лет стали самыми теплыми в истории инструментальных наблюдений. Рост температуры воздуха и изменение режима выпадения атмосферных осадков способствует нарушению локальных и региональных биогеохимических циклов химических элементов, усиливает мобилизацию и вынос органических и минеральных веществ в поверхностные воды и в Мировой океан. Прогнозные оценки, по Западной Сибири, представленные в работе [Frey and Smith, 2005] показывают, что к 2100 году площадь со среднегодовой температурой выше  $-2^\circ\text{C}$  увеличится в 2 раза, на 700 % увеличится концентрации растворенного Сорг в речных водах, а общий поток углерода в Северный Ледовитый океан возрастет на 29-46 %. Целью данной работы является оценка закономерностей временных изменений химического состава вод осушенного участка Васюганского болота.

Исследования проводились в пределах северо-восточного участка Васюганского болота в границах бассейна р. Гавриловка (левобережный приток р. Икса) вблизи с. Польшанка Бакчарского района Томской области. В 1980-х годах проведена лесомелиорация, осушение выполнено сетью открытых каналов с расстоянием 160-180 м. В настоящее время отмечается зарастание осушительных каналов и восстановление скорости торфонакопления [Sinyutkina, 2021]. В 2016 году на расстоянии 200 м на юг от участка отбора проб произошел пожар и выгорела территория площадью 5,54 км<sup>2</sup>. Наибольшее выгорание растительности и поверхности болота наблюдалось преимущественно вблизи осушительных каналов, где торфяная залежь выгорела на 5-15 см, на остальной территории наблюдалось частичное выгорание поверхности болота в слое до 5 см [Sinyutkina et al., 2020]. В качестве фоновой территории был использован аналогичный естественный участок Васюганского болота, расположенный в 8 км севернее, в границах водосбора малой р. Ключ (правобережный приток р. Бакчар).

Отбор проб болотных вод производился с периодичностью 1 раз в месяц с марта по сентябрь 2015-2021 гг. в пределах аналогичных сосново-кустарничково-сфагновых болотных микроландшафтов, мощность торфяной залежи на осушенном участке ( $56^\circ53'25,8''$ ,  $82^\circ40'50,5''$ ), составила 2,75 м, на естественном участке ( $56^\circ58'24,3''$ ,  $82^\circ36'41,2''$ ) – 2,90 м. Определение химического состава болотных вод проводилось в Лабораторно-аналитическом центре СибНИИСХиТ-филиала СФНЦА РАН. Оценка условий формирования химического состава болотных вод и особенностей гидрохимического режима болота проводилась с применением данных наблюдений за температурой воздуха и количеством атмосферных осадков по метеостанции у с. Бакчар, а также использовались данные полученные с применением автономных сенсорных датчиков уровней и температуры (САМ, ИМКЭС СО РАН), установленных в торфяную залежь непосредственно в месте отбора проб [Kiselev et al., 2018]. Статистический анализ условий формирования химического состава болотных вод осушенного участка Васюганского болота осуществлялся методом главных компонент (Principal component analysis) с расчетом факторных нагрузок и построением графика каменистой осыпи.



Детальный факторный анализ выявил некоторые различия в формировании химического состава осушенного участка Васюганского болота в зависимости от водности и теплообеспеченности года. Анализ данных показал, что в 2016-2020 гг. ведущим условием, определяющим повышение в болотных водах pH, EC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , ХПК, Сорг,  $\text{CO}_2$  и минерализации вод, является температурный режим, а именно температура воды, воздуха и торфяной залежи, тогда как выпадение осадков и повышение уровней воды приводит к снижению концентраций, за счет эффекта разбавления. Тогда как в маловодный 2015 год и средний по водности 2021 год (как следствие 2020 года с абсолютным максимумом среднегодовой температуры воздуха за весь период наблюдений) была отмечена тенденция повышения концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Сорг, ХПК, минерализации вод с ростом уровней болотных вод и при выпадении атмосферных осадков, но также отмечена обратная корреляция температуры воздуха и торфяной залежи с концентрациями  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  в болотных водах в 2015 и 2021 гг., что связано с ассимиляцией растениями этих компонентов в благоприятных термических условиях сезона. В периоды с избыточным увлажнением (2018 г.) в водах отмечается рост концентраций  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , что вероятно определяется атмосферными выпадениями этих компонентов.

Следует отметить, что вариация химического состава вод осушенного участка Васюганского болота существенна по сезонам, поэтому был дополнительно проведен факторный анализ по сезонам. Анализ данных показал, что в апреле ведущую роль в формировании химического состава оказывает процесс снеготаяния и оттаивания торфяной залежи, в результате эффекта разбавления содержание  $\text{Ca}^{2+}$  (-0,64),  $\text{Mg}^{2+}$  (-0,85),  $\text{SO}_4^{2-}$  (-0,60),  $\text{HCO}_3^-$  (-0,65) и минерализация вод (-0,81) достоверно снижается при повышении температуры торфяной залежи (0,75) и уровня болотных вод (0,61). Исключение составляет только  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (0,58),  $\text{Na}^+$  (0,78), EC (0,78) содержание которых в водах, увеличивается с ростом температуры. Высокие факторные нагрузки на вторую компоненту оказывают сумма атмосферных осадков за предшествующие 2 недели (-0,81), которая находится в прямой корреляционной зависимости с содержанием в водах  $\text{K}^+$  (-0,78),  $\text{Cl}^-$  (-0,89),  $\text{NO}_3^-$  (-0,95), что вероятно свидетельствует о поступлении этих компонентов с атмосферными осадками или снеготалыми водами.

В мае ведущую роль в формировании химического состава вод оказывает уровень болотных вод (-0,55), повышение которого в результате снеготаяния приводит к снижению величины EC (0,78) и содержания  $\text{Ca}^{2+}$  (0,66),  $\text{Mg}^{2+}$  (0,75),  $\text{K}^+$  (0,85),  $\text{NH}_4^+$  (0,89),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (0,87),  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,77),  $\text{NO}_3^-$  (0,88),  $\text{HCO}_3^-$  (0,82), ХПК (0,51), Сорг (0,94), минерализации вод (0,95).

В июне ведущим фактором становится температура воздуха (-0,79), повышение которой приводит к росту в водах осушенного участка концентраций  $\text{K}^+$  (-0,68),  $\text{NH}_4^+$  (-0,82),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (-0,54), а также минерализации вод (-0,74) и  $\text{O}_2$  (-0,58). В условиях повышения уровня болотных вод (0,90) при выпадении атмосферных осадков наблюдается достоверное снижение концентраций  $\text{Ca}^{2+}$  (-0,63),  $\text{Mg}^{2+}$  (-0,50),  $\text{SO}_4^{2-}$  (-0,87),  $\text{NO}_3^-$  (-0,68). Исключение составляет содержание Сорг в водах (0,69) и  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (0,45), концентрации которых повышаются с ростом уровня болотных вод.

В июле ведущим фактором, определяющим химический состав, является уровень болотных вод (-0,96), при снижении которого вследствие понижения количества атмосферных осадков (-0,82) наблюдается рост величины pH и концентраций  $\text{K}^+$  (0,60),  $\text{Ca}^{2+}$  (0,87),  $\text{Mg}^{2+}$  (0,47),  $\text{HCO}_3^-$  (0,92),  $\text{CO}_2$  (0,79), минерализации вод (0,93). Температурный фактор (-0,92) в этот период в основном определяет величину EC (-0,70), концентрации  $\text{Na}^+$  (-0,75),  $\text{NH}_4^+$  (-0,67),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (-0,90), в меньшей степени  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,46).

В августе ведущим фактором химического состава вод является температура воздуха (-0,80), воды (-0,66) и торфяной залежи (-0,55), которые определяют повышение содержания в этот период в составе вод  $\text{NH}_4^+$  (-0,65),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (-0,51),  $\text{SO}_4^{2-}$  (-0,91),  $\text{NO}_3^-$  (-0,78),  $\text{HCO}_3^-$  (-0,97), минерализации (-0,94). Наоборот поступление атмосферных осадков (-0,75) приводит к разбавлению вод и в итоге снижению концентрации  $\text{K}^+$  (0,92),  $\text{Ca}^{2+}$  (0,50),  $\text{Cl}^-$  (0,93), Сорг (0,63), но величина EC возрастает (-0,86).

В сентябре складываются наиболее благоприятные условия для минерализации растительных остатков, как правило отмечается снижение уровня воды (-0,65), а торфяная залежь хорошо прогрета (0,77). В результате наблюдается рост концентраций  $\text{K}^+$  (0,55),  $\text{Ca}^{2+}$  (0,84),  $\text{Mg}^{2+}$  (0,68),  $\text{Cl}^-$  (0,78), ХПК (0,60). Наоборот в водах отмечается снижение концентраций  $\text{NH}_4^+$  (-0,81),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (-0,70), что свидетельствует о затухании биологических процессов в торфяной залежи в осенний период. Вторая компонента характеризует условия формирования химического состава вод при выпадении осадков (-0,69), которое приводит к увеличению концентрации одних компонентов Сорг (-0,69),  $\text{NO}_3^-$  (-0,81),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (-0,55), что свидетельствует о их выносе, и снижению других  $\text{Na}^+$  (0,58),  $\text{K}^+$  (0,51),  $\text{HCO}_3^-$  (0,78),  $\text{CO}_2$  (0,75) и минерализации вод (0,56), в результате разбавления атмосферными водами.

Таким образом, факторный анализ, проведенный с применением метода главных компонент показал, что ведущим фактором формирования химического состава вод Васюганского болота является температурный режим, при этом повышение уровней болотных вод после продолжительных засушливых периодов приводит к повышению концентраций химических веществ в водах. Сезонная вариация химического состава вод болот весьма существенна по сезонам года, что следует учитывать при дискретном отборе проб.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Frey, K. E. Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100 // *Geophysical Research Letters*, 32(9). (2005). doi:10.1029/2004gl022025
2. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S. and Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. 190. 012031 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/190/1/012031>
3. Sinyutkina A. A., Gashkova L.P., Koronatova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N. P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K. Kharanzhevskaya Yu. A. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation // *IOP Conference Series: Earth Environmental Sciences*. 2020. Vol. 408. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
4. Sinyutkina A. A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics // *Catena*. – 2021. – № 205. – 105464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>

## Distribution of species of the *Bryum* Hedw. genus on the foreland of the Maly Aktru glacier (Severo-Chuisky range, Central Altai Mountains)

**Chernova N.A., Belova M.N.**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [naitina79@mail.ru](mailto:naitina79@mail.ru)

Mosses are an impotent component of developing plant communities of glacier forelands of the Russian Altai Mountains. Species of the *Bryum* genus appear already in the first years after the glaciers retreat and play a significant role at the initial stage of the formation of a closed ground cover.

A study of mosses distribution by successional stages and age fragments on the foreland of the Maly Aktru glacier (Central Altai Mountains) was carried out to assess the species diversity of the *Bryum* genus.

The *Bryum* genus is the largest in the floristic list of mosses of the study area and includes seven species (16.3% of the bryoflora, numbering 43 species). It is the species of the *Bryum* genus among plants that are among the earliest settlers and occur at all three successional stages on the foreland of the Maly Aktru glacier. Four species of *Bryum* genus, such as *B. intermedium*, *B. caespiticium*, *B. creberrimum* and *B. elegans*, appear at the pioneer stage of vegetation development, which is characterized by a minimal species diversity of mosses and vascular plants. Six species, such as *B. caespiticium*, *B. capillare*, *B. creberrimum*, *B. elegans*, *B. intermedium* and *B. lonchocaulon*, were found at the second willow-moss successional stage. Six species were identified at the third larch-birch-moss stage of succession, as at the previous stage, but *B. pseudotriquetrum* appears for the first time and *B. lonchocaulon* disappears here.

In general, the great diversity of species of the *Bryum* genus on the foreland of the Maly Aktru glacier is mainly due to the wide distribution of open and rather moist calcium-containing fine earth, which is the optimal substrate for many species of the genus.

The highest frequency of occurrence of species was observed at the second stage (Table). At the same time, a third of the species of the *Bryum* genus is rare, and another third part is sporadic. Most of the *Bryum* species noted by us in the studied area grow at all three successional stages. The exceptions are *B. lonchocaulon*, which is limited in its distribution only to the second stage, as well as *B. pseudotriquetrum*, which occurs only in the third stage. *B. caespiticium* is distinguished by the highest frequency of occurrence on the foreland.

# Распространение видов р. *Bryum* Hedw. на форленде ледника Малый Актру (Северо-Чуйский хребет, Центральный Алтай)

Чернова Н.А., Белова М.Н.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: naitina79@mail.ru

**М**хи рода *Bryum* Hedw. являются одной из важнейших групп пионерных растений на форлендах горных ледников северного полушария. Виды этого рода появляются уже в первые годы после отступления ледников и играют существенную роль на начальной стадии формирования сомкнутого напочвенного покрова (Lüdi, 1945; Persson, 1964; Zollitsch, 1969; Birks, 1980).

Исследования проводились на форленде ледника Малый Актру (Северо-Чуйский хребет, 2200-2340 м над ур. м.), для которого имеются наиболее подробные данные о его отступании в регрессивную фазу малого ледникового периода (Narozhnyi, Zemtsov, 2011). Здесь выделено три стадии постгляциальной сукцессии растительности: пионерная, ивово-моховая, лиственнично-березково-моховая (Тимошок и др., 2020). Для детальной оценки разнообразия бриумов на 21 фрагменте форленда, выделенном на основе данных по отступанию ледника, было собрано более 200 гербарных образцов моховидных, в подавляющем большинстве которых оказались виды р. *Bryum*.

Род *Bryum* на территории исследований является наиболее крупным во флористическом списке бриевых мхов (Chernova et al., 2021) и включает семь видов (16,3% бриофлоры, насчитывающей 43 вида). Распределение видов р. *Bryum* по разновозрастным фрагментам и стадиям сукцессии приведено в таблице.

## Таблица.

Распределение видов р. *Bryum* по фрагментам и стадиям сукцессии на форленде ледника Малый Актру.

Виды	Фрагменты и стадии постгляциальной сукцессии																		Встречаемость/ сукцессионная стадия			
	1									2										3		
	2003-1998	1998-1993	1997-1996	1996-1995	1995-1993	1993-1988	1988-1983	1983-1978	1978-1973	1973-1968	1968-1963	1963-1958	1958-1952	1952-1946	1946-1941	1941-1936	1936-1931	1931-1926		1926-1921	1921-1916	1911-1850
<i>B. caespiticium</i>		1		1		2	2	1	5	2	7		1	4	1	2	4	4			2	Cm/1-3
<i>B. capillare</i>										1				2							1	r/2-3
<i>B. creberrium</i>							1	1								2					1	r/1-3
<i>B. elegans</i>		1									2				4						1	Sp/1-3
<i>B. intermedium</i>	1									2					4						4	Sp/1-3
<i>B. lonchocaulon</i>										2					1			2	2			Sp/2
<i>B. pseudotriquetrum</i>																					5	r/3
<i>B. sp.</i>											1	1	2	5	12	1	2	10	2	18		-

Примечания: Цифрами обозначено число образцов.  
Встречаемость: Ст – часто; Sp – спорадически; r – редко; + – единичные находки.

На форленде ледника Малый Актру именно виды р. *Bryum* среди растений являются одними из самых ранних поселенцев и встречаются на всех трех сукцессионных стадиях.

*B. caespitium* Hedw. встречается на всей территории форленда в виде чистых и смешанных дернин на влажном и сухом мелкоземе на всех стадиях сукцессии (фрагменты 1998-1850 гг.), произрастает также в составе рыхлого мохового покрова первичных растительных группировок под кустарниковыми ивами и *Myricaria dahurica* (Willd.) Ehrenb. на фрагментах 1968-1926 гг., а также в сомкнутом моховом покрове лиственнично-березково-мохового растительного сообщества (1911–1850 гг.).

*B. capillare* Hedw. встречается на открытом участке мелкозема на фрагменте 1968-1963 гг., в составе разреженного мохового покрова первичных растительных группировок под кустарниковыми ивами и *Myricaria dahurica* (фрагмент 1946–1941 гг.) и в составе сомкнутого мохового покрова в конце лиственнично-березково-моховой стадии.

*B. creberrimum* Taylog произрастает в виде чистых и смешанных дернин на мелкоземе на пионерной стадии сукцессии (1983–1973 гг.), в составе разреженного мохового покрова под кустарниковыми ивами и *Myricaria dahurica* в первичных растительных группировках ивово-моховой (1936–1931 гг.) стадии, а также в моховом покрове лиственнично-березково-моховой стадии.

*B. elegans* Nees отмечен в виде чистых и смешанных дернин на мелкоземе на пионерной (1998–1993 гг.) и ивово-моховой (1963–1958 гг.) стадиях сукцессии, а также в составе микрогруппировок ивово-моховой (1941–1936 гг.) и лиственнично-березково-моховой (1911–1850 гг.) стадий.

*B. intermedium* (Brid.) Blandow отмечен на мелкоземе в составе смешанных дернинок на всех сукцессионных стадиях (фрагменты 1973–1968 гг., 1941–1936 гг., 1911–1850 гг.), а также в сомкнутом моховом покрове лиственнично-березково-мохового растительного сообщества (1911–1850 гг.).

*B. lonchocaulon* Müll.Hal. встречается в составе смешанных дернинок на мелкоземе и в разреженном моховом покрове под кустарниковыми ивами в первичных растительных группировках на ивово-моховой стадий сукцессии (фрагменты 1968–1963, 1941–1936, 1926–1916 гг.), а также в сомкнутом моховом покрове лиственнично-березково-мохового растительного сообщества (1911–1850 гг.).

*B. pseudotriquetrum* (Hedw.) P.Gaertn., В.Мey. & Scherb. приурочен к небольшому переувлажненному заболоченному участку последней стадии сукцессии.

В целом, на пионерной стадии развития растительности, для которой характерно минимальное разнообразие мхов и сосудистых растений, уже появляются четыре вида р. *Bryum*. На наиболее молодых участках форленда, освободившихся ото льда менее 10 лет назад, на мелкоземном субстрате отмечены мелкие, очень рыхлые дернинки *B. intermedium*, *B. caespitium* и *B. elegans*. На открытых участках, свободных от ледника в течение 20–25 лет впервые появляются *B. creberrimum*.

На второй ивово-моховой сукцессионной стадии найдено шесть видов р. *Bryum*: *B. caespitium*, *B. capillare*, *B. creberrimum*, *B. elegans*, *B. intermedium* и *B. lonchocaulon*. Последний вид отмечен только здесь. На этой стадии формирования растительного покрова мхи встречаются не только на открытом мелкоземе, но и в составе формирующихся растительных микрогруппировок под кустарниковыми ивами (*Salix saposhnikovii* А.К. Skvortsov, *S. glauca* L. и др.) и *Myricaria dahurica* на опаде. Характерной особенностью бриумов в составе микрогруппировок является формирование плотных чистых или смешанных дернинок, тогда как на преобладающих по площади открытых участках часто встречаются рыхлые дернинки с их участием.

На третьей лиственнично-березково-моховой стадии сукцессии, как и на предыдущей стадии, выявлено шесть видов р. *Bryum*. Здесь впервые появляется *B. pseudotriquetrum*. Этот вид характерен для горных болот Алтае-Саянского региона (Volkova et al., 2018) и произрастает здесь только на небольшом переувлажненном заболоченном моховом участке склона совместно с *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, *Philonotis tomentella* Molendo, *Palustriella falcata* (Brid.) Hedenäs. На этой сукцессионной стадии уже встречаются участки с сомкнутым моховым покровом. Здесь виды бриум на открытых участках формируют чистые или смешанные с верхплодными мхами дернинки, тогда как в составе мохового покрова они участвуют только в качестве небольшой примеси к образующим его бокоплодным мхам (*Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske, *Brachythecium turgidum* (Hartm.) Kindb. и др.).

В целом, большое разнообразие видов р. *Bryum* на форленде ледника Малый Актру обусловлено в основном широким распространением открытого и достаточно влажного кальцийсодержащего мелкозема (Тимошок и др., 2008), являющегося оптимальным субстратом для многих видов рода (Игнатов 2003, Золотов 2018).

Наибольшая частота встречаемости видов наблюдается на второй стадии (табл.). При этом треть видов р. *Bryum* встречается редко, еще третья часть – спорадически. Большая часть отмеченных нами на исследованной территории бриумов произрастают на всех трех сукцессионных стадиях. Исключениями являются *B. lonchocaulon*, приуроченный в своем распространении только ко второй стадии, а также *B. pseudotriquetrum*, встречающийся только на 3 стадии. Наибольшей частотой встречаемости на форленде отличается *B. caespitium*.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Золотов В.И. Под *Bryum* // Флора мхов России. Том 4. *Bartramiales – Aulacomniales*. / М.С. Игнатов (отв. ред.). Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2018. С. 255–361.



2. Игнатов М.С., Игнатова Е.А. Флора мхов средней части европейской России. Т.1. М.: КМК, 2003. 608 С.
3. Тимошок Е.Е., Нарожный Ю.К., Диркс М.Н., Скороходов С.Н., Березов А.А. Динамика ледников и формирование растительности на молодых моренах Центрального Алтая. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 208 с.
4. Тимошок Е.Е., Тимошок Е.Н., Гуреева И.И., Скороходов С.Н. Первичные сукцессии растительности на молодых моренах в Северо-Чуйском центре оледенения (Центральный Алтай) // Сибирский экологический журнал, 2020. Т. 27, № 1. С. 46–61.
5. Birks H.J.B. The present flora and vegetation of the moraines of the Klutlan glacier, Yukon territory, Canada: A study in plant succession // *Quaternary Research*, 1980. № 14. P. 60–86.
6. Chernova N.A., Belova M.N., Timoshok E.E., Timoshok E.N., Skorokhodov S.N. Check-list of mosses on the Maly Aktru glacier foreland (Russian Altai Mountains) // *International Journal of Environmental Studies*, 2021. 78:6. P. 1037–1043.
7. Lüdi W. Besiedlung und Vegetationsentwicklung auf den jungen Seitenmoränen des Grossen Aletschglatschers, mit einem Vergleich der Besiedlung im Vorfeld des Rhonegletschers und des Oberen Grindelwaldgletschers. In: Bericht über das Geobotanische Forschungsinstitut Rübel in Zürich für das Jahr. 1944. 1945. P. 35–112.
8. Narozhnyi Yu., Zemtsov V. Current State of the Altai Glaciers (Russia) and Trends Over the Period of Instrumental Observations 1952–2008 // *AMBIO*, 2011. N 40. P. 575–588.
9. Persson A. The vegetation at the margin of the receding glacier Skaftafellsjökull, Southeastern Iceland // *Botaniska Notiser*, 1964. № 117(4). P. 323–354.
10. Volkova, I.I., Chernova, N.A., Muldiyarov, E.Y. A check-list of Bryophytes in mire habitats found within the Altai-Sayan Mountains (Southern Siberia). In: O.S. Pokrovsky et al. (Ed.) *Mosses. Ecology, life cycle and significance*, 2018. P. 153–174.
11. Zollitsch B. Die Vegetationsentwicklung im Pasterzenvorfeld // *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, 1969. № 21. P. 267–290.

## Ecological peculiarities of *Cypripedium guttatum* Sw. in the Southern Evenkia («Tunguskiy» reserve)

**Raiskaya Yu.G., Timoshok E.N.**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
 E-mail: [raiskaya.julia@mail.ru](mailto:raiskaya.julia@mail.ru)

**C***ypridium guttatum* Sw. is a species of the orchids, which had a wide range (East Europe, Asia, North America) but this species are rare overall. Human impact on nature affects number of existing populations, so studies on ecology of the species have meaning in sense of conservation of this orchid. We studied how this species fit to the conditions of Evenkia - cold region of the globe with long cold winter (about 225 days) and short and hot summer.

Studies covered 39 model coenopopulations located in 12 sampling areas. We have fetched out the species occurs in larch-fir, larch, fir, pine and pine-larch forests with grass - dwarf shrubs -moss and dwarf shrub - moss - lichen types of land cover. Population density varies from 0,1 to 46,1 (mean 12.2) individuals per sq.m.

Analysis of standard ecological scales of I, Tsatsenkin made by the E. Prokopiev method allowed us to fetch out the tolerancy ranges of *Cypripedium guttatum* are 15 steps (58 to 73) by humidity scale and 5 steps (6 to 11) by active soil richness scale. Range of ecological factors intensity was studied by the method of phytoidication of Ramensky-Tsatsenkin. All habitats of where *Cypripedium guttatum* was present lied in range of 63,1 to 68 by humidity scale and 7,9 to 9,4, Maximal abundance of the species (about 5%) was reached in habitats with hunity of 63–66 steps and active soil richness of 8–9 scales.

Our studies allowed to understand the area of the reserve is optima for the *Cypripedium guttatum* l by the factors of humidity and soil reachness. Populations here are stable and plants are capable to reproduction. It make the reserve a key element of the species stability in conditions of global climate changes and could serve as a point of future dispersion of *Cypripedium guttatum* seeds in case if surrounding populations will be lost because of natural or human-caused impacts.

## Экологические особенности *Cypripedium guttatum* Sw. в Южной Эвенкии (Заповедник «Тунгусский»)

Райская Ю.Г., Тимошок Е.Н.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: raiskaya.julia@mail.ru

*Cypripedium guttatum* Sw. – венерин башмачок капельный (Сем. Orchidaceae) является редким видом сосудистых растений. Из-за сокращения площадей местообитаний этого вида из-за вырубок леса во многих регионах России, его численность быстро сокращается; иногда целые популяции этого вида оказываются под угрозой исчезновения (Горчаковский, Игошева, 2003; и др.). *Cypripedium guttatum* включен в Красную книгу Красноярского края (2012) со статусом 3 (R), редкий вид. Этот вид распространен в Северном полушарии: вид встречается в восточной Европе, Азии и Северной Америке. Исследования проводились с 2006 по 2019 гг. на территории заповедника «Тунгусский». Его территория расположена в юго-восточной части одной из самых малонаселённых частей Российской Федерации – Эвенкийском муниципальном районе Красноярского края, в междуречье наиболее крупных рек юга Эвенкии – Подкаменной Тунгуски и Чуни. Международным Союзом Охраны Природы и Природных Ресурсов (МСОП) территория заповедника включена в категорию Ia (строгий природный резерват), как участок земной поверхности с нетронутой природой, нуждающейся в полной охране. В заповеднике осуществляется абсолютно заповедный режим, при котором исключается любая хозяйственная и рекреационная деятельность и любые другие вмешательства в ход природных процессов (Тимошок и др., 2016).

Для данной территории характерен резко континентальный климат с длинной холодной (около 225 дней с отрицательной температурой) зимой и коротким жарким летом с периодом засухи. Среднегодовая температура воздуха на территории заповедника составляет  $-5,09^{\circ}\text{C}$ . Вегетационный период длится 110–120 дней. В течение года на территории заповедника выпадает в среднем 422 мм осадков, 40% от количества которых приходится на летние месяцы. Наименьшее количество осадков приходится на февраль и март (Васильев и др., 2003; Сопин, 2008).

Исследования сосудистых растений, в особенности редких и исчезающих видов на границах их ареалов представляют особый интерес. И.Г. Серебряков (1962) указывал, что пограничные популяции растений существуют на пределе своих биологических возможностей, и, как следствие, их исчезновение может привести к сокращению ареала вида, что, в свою очередь, может стать опасным, в случае если популяции в центральной части ареала будут угнетены или подавлены, например, в результате действия антропогенных факторов. При этом сокращение популяций видов на границах ареалов может идти с большей скоростью, потому что на границах ареалов в наибольшей степени проявляется влияние лимитирующих факторов. (Юрцев, 1991).

Исследование экологических особенностей местообитаний *Cypripedium guttatum* было проведено методом фитоиндикации с использованием стандартных экологических шкал И.А. Цаценкина (1978) с применением метода установления экологической амплитуды Е.П. Прокопьева (1993).

Было изучено 39 ценопопуляций (ЦП) *Cypripedium guttatum* на восьми ключевых участках (Таб. 1), где были заложены 9 постоянных и 3 временных пробных площадей (10×10 м). Изучение структуры ценопопуляций *Cypripedium guttatum* проводилась с учетом требований изложенных в действующем руководстве “Программа и методика наблюдений за ценопопуляциями видов растений Красной книги СССР” (1986). При выявлении онтогенетической структуры ценопопуляций в качестве счетной единицы принимался парциальный побег.

Таблица 1.

Местонахождение ключевого участка	Ключевые участки	Расстояние от с. Ванавара	Координаты
Южная часть заповедника	«Устье Чамбы»	30 км вниз по течению р. П. Тунгуска	60°23'13" с. ш., 101°58'17" в. д.
	«Белая Гора»	40 км вниз по течению р. П. Тунгуска	60°21'06" с. ш., 101°50'10" в. д.
	«Малин кордон»	47 км вниз по течению р. П. Тунгуска	60°23'12" с. ш., 101°50'30" в. д.
Восточная часть заповедника	«Баркулиха»	18 км на запад от села	60°23'54" с. ш., 101°58'02" в. д.
Центральная часть заповедника	«Укагиткон»	55 км на север от села	60°49'47" с. ш. 101°15'23" в. д.

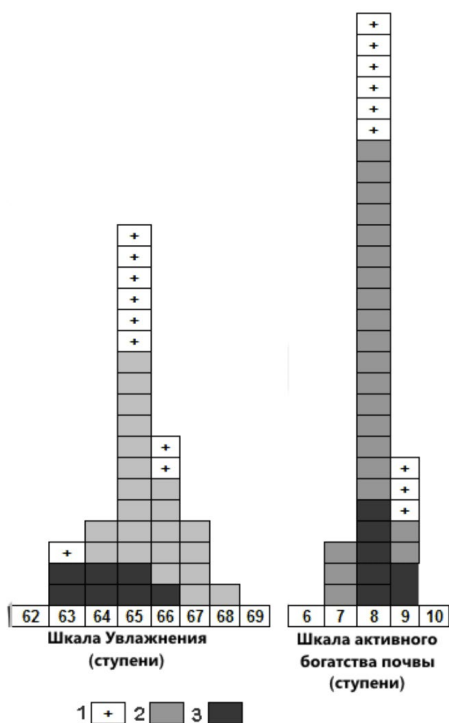
Центральная часть заповедника	«Кордон Пристань»	61 км на северо-северо-запад от села	60°51'17" с. ш. 101°52'53" в. д.
	«Чургим»	63 км на северо-северо-запад от села	60°52'17" с. ш., 101°52'58" в. д.
	«Хребет Сильгами»	66 км на северо-запад от села	60°55'22" с. ш., 102°08'53" в. д.
Западная часть заповедника	«Пеюнгада»	45 км на северо-запад от села	60°37'36" с. ш., 101°39'13" в. д.

На территории заповедника изучаемый вид встречается в таких растительных сообществах как: лиственнично-сосновые, лиственничные, сосновые и сосново-лиственничные леса, реже в лиственнично-еловых и елово-лиственничных лесах с разнотравно-кустарничково-зеленомошным, кустарничково-зеленомошно-лишайниковым напочвенным покровом. Для этих лесов характерны невысокая сомкнутость крон (0,1–0,3, реже 0,4–0,6); проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса варьирует от 15 до 70%, но чаще составляет 50–60%, проективное покрытие мохово-лишайникового яруса варьирует от 10 до 90%, обычно – около 50%. Видовое богатство в исследованных ЦП составляет от 16 до 44 видов.

Изучение плотности популяций *Cypripedium guttatum* показало, что она довольно велика по сравнению с остальными видами рода *Cypripedium* на территории заповедника. В среднем она составляла 12,2 побегов/м<sup>2</sup> и изменялась в интервале 0,1–46,1 парциальных побега/1 м<sup>2</sup>.

Анализ стандартных экологических шкал И.А. Цаценкина (1978) для изучаемого вида, проведенный по методу Е.П. Прокопьева (1993) показал, что он имеет низкую экологическую пластичность относительно таких факторов как увлажнение и активное богатство почвы: диапазон толерантности по фактору увлажнения составляет 15 ступеней (с 58 по 73-ю), а по активному богатству почвы – 5 ступеней (с 6 по 11-ю). Изучение увлажнения и активного богатства почв местообитаний этого вида показало, что увлажнение местообитаний *Cypripedium guttatum* на территории заповедника «Тунгусский» варьирует в пределах 6 ступеней (с 63,1 по 68), а активное богатство почвы – 3 ступеней (с 7,9 по 9,4). Значения обоих показателей близки к расчетным точкам оптимума для этого вида (67 ступень по увлажнению и 9 ступень по активному богатству почвы); большинство обследованных популяций находятся на 65 ступени по активному богатству почвы и 8 ступени по активному богатству почвы - т.е. имеют показатели близкие к оптимальным по исследованным факторам сред (рис. 1). Максимальное обилие этого вида достигается на пробных площадях с увлажнением 63–66 ступеней и активным богатством 8–9 ступеней.

Достаточно высокие плотности популяций и то, что условия на территории заповедника близки к оптимальным для этого вида, по факторам увлажнения и активного богатства почвы, говорит о том, что популяции на территории заповедника устойчивы, способны к самоподдержанию, а так же о том, что территория заповедника имеет особую ценность для охраны этого вида, т.к. может служить центром его возобновления в случае его утраты на сопредельных территориях в случае природных и антропогенных нарушений.



**Рис. 1.**

Экологические кривые обилия *Cypripedium guttatum* на территории заповедника "Тунгусский". На рисунке цифрами обозначены: 1: вид представлен с обилием менее 1%, 2: обилие вида 1–3%; 3: обилие вида 4–5%.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Васильев Н.В., Львов Ю.А., Плеханов Г.Ф. и др. Государственный природный заповедник «Тунгусский» (очерк основных данных) // Тунгусский заповедник. Биоценозы северной тайги и влияние на них экстремальных природных факторов. Труды ГПЗ «Тунгусский». Вып. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. С. 33–89.
2. Горчаковский П.Л., Игошева Н.И. Мониторинг популяций орхидных в уникальном месте их скопления на среднем Урале // Экология, 2003. №6. С. 403–409.
3. Красная книга Красноярского края. Растения и грибы. Красноярск. 2012. 597 с.
4. Прокопьев Е.П. Использование метода стандартных экологических шкал в ландшафтной экологии. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1993. 29 с.

5. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений. Жизненные формы покрытосеменных и хвойных. М.: Высш. шк., 1962. 378 с.
6. Сопин В.Ю. К метеорологической характеристике территории заповедника «Тунгусский» // Труды ГПЗ «Тунгусский». Томск: Изд-во НТЛ, 2008. Вып. 2. Томск. С. 7–18.
7. Тимошок Е.Е., Райская Ю.Г., Скороходов С.Н., Сопин В.Ю. Редкие и исчезающие виды орхидных в лесных сообществах государственного природного заповедника «Тунгусский» (Южная Эвенкия) — Сибирский лесной журнал, 2016. №1. С. 13–26.
8. Цаценкин И.А., Савченко И.В., Дмитриева С.И. Методические указания по экологической оценке кормовых угодий тундровой и лесной зон Сибири и Дальнего Востока по растительному покрову. – М., 1978. –301 с.
9. Юрцев Б.А., Камелин Р.В. Основные понятия и термины флористики. Пермь, 1991. 80 с.

## Response of Boreal conifers on recent climatic changes inferred from oxygen and hydrogen stable isotopes in tree rings

Taynik A.V.<sup>1</sup>, Zharkov M.S.<sup>1</sup>, Fonti M.V.<sup>1,3</sup>, Trushkina T.V.<sup>2</sup>, Barinov V.V.<sup>1</sup>, Bondarev, A.I.<sup>3</sup>, Kirdyanov A.V.<sup>1,3</sup>, Arzac A.<sup>1</sup>, Saurer M.<sup>4</sup>, Churakova (Sidorova) O.V.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk, Russia

<sup>4</sup>Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Switzerland

E-mail: [taynik\\_anna@mail.ru](mailto:taynik_anna@mail.ru)

Significant air temperature and precipitation changes have occurred since the 2000s in vulnerable Siberian subarctic regions and urged updates of available chronologies towards the third millennium to better understand recent climatic changes compared to the past decades, centuries and even millennia.

In this study, we present the first annually resolved stable oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) and hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) isotope time series in tree-ring cellulose obtained from larch trees (*Larix cajanderi* Mayr. and *Larix gmelinii* Rupr. Rupr.) from Yakutia (YAK) and eastern Taimyr (TAY) for the period from 1900 to 2020. We found that  $\delta^2\text{H}$  of larch tree-ring cellulose was linked significantly with  $\delta^{18}\text{O}$  for the YAK site. Significant correlations were found between tree-ring  $\delta^{18}\text{O}$  and summer air temperatures and evaporation. Simulated by the Land surface Processes and eXchanges (LPX-Bern 1.0) model, the water fraction per year for soil depths at 0-10 cm and 20-30 cm significantly linked with tree-ring  $\delta^2\text{H}$  data ( $r = 0.58$ ,  $p = 0.000$  and  $r = 0.46$ ;  $p = 0.000$ ), respectively. Our results suggest increasing evapotranspiration and trees' water relation response to rising thaw water uptake from lower (20-30) cm soil depth. A positive effect of summer air temperature on tree-ring  $\delta^{18}\text{O}$  and a negative impact of precipitation during July were found, which is the warmest summer month in Siberia, indicating on increasing dry conditions.

*This research was funded by the Russian Science Foundation (RSF) grant number 21-17-00006 «Hydrogen isotopes and deuterium excess (d-excess) in conifer tree-ring cellulose as indicator of extreme eco-hydrological changes in boreal forests (ECO-HYDROTREE)».*



# Отклик бореальных хвойных на текущие изменения климата по данным стабильных изотопов кислорода и водорода в годичных кольцах

Тайник А.В.<sup>1</sup>, Жарков М.С.<sup>1</sup>, Фонти М.В.<sup>1,3</sup>, Трушкина Т.В.<sup>2</sup>, Баринов В.В.<sup>1</sup>, Бондарев А.И.<sup>3</sup>, Кирдянов А.В.<sup>1,3</sup>, Арцак А.<sup>1</sup>, Саурер М.<sup>4</sup>, Чуракова (Сидорова) О.В.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Гуманитарный Институт, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. Ак. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>4</sup>Швейцарский федеральный институт исследований леса, снега и ландшафта WSL, Бирменсдорф, Швейцария

E-mail: tainik\_anna@mail.ru

Глобальные климатические изменения наблюдаются во всех регионах планеты, наиболее сильно отражаясь в бореальных лесах и зоне вечной мерзлоты. Резкие изменения температуры и осадков за последние несколько десятилетий привели к массовым лесным пожарам [1-3] и деградации вечной мерзлоты [4] в бореальных лесах [5]. Хвойные деревья, произрастающие в приполярных регионах, очень чувствительны к быстрым климатическим изменениям из-за их расположения в высоких широтах, где температура воздуха является ограничивающим фактором, оказывая сильное влияние на рост деревьев [6-11]. В связи с потеплением климата в субарктике ожидается увеличение дефицита давления пара (VPD) и эвапотранспирации, что оказывает сильное влияние на рост деревьев и вариацию изотопного состава в годичных кольцах деревьев [4,10,12,13]. Удаленность хвойных деревьев из приполярных регионов дает возможность исследовать реакцию деревьев на изменения окружающей среды без антропогенных нарушений. Для оценки влияния изменения температуры и влажности на хвойные деревья нами проведен анализ изменчивости климатических данных и содержания стабильных изотопов кислорода (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) и водорода (<sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H) в целлюлозе древесных колец лиственниц: *Larix cajanderi* Maug. для северо-востока Якутии (YAK) и *Larix gmelinii* Rupr. для востока Таймыра (TAY).

Оба участка отбора образцов характеризуются суровыми климатическими условиями с низкой годовой температурой -13°C для YAK и -12,1°C для TAY, а также низким количеством годовых осадков (236 мм/год для YAK и 343 мм/год для TAY. Возраст деревьев, произрастающих в субарктических регионах, может достигать 1216 лет [14]. Вегетационный период в Сибирской субарктике длится около 75-90 дней [14,15].

Динамика изменения климата была рассчитана на основе данных метеостанций наиболее близко расположенных к участкам отбора образцов (Чокурдах для YAK и Хатанга для TAY) для трех важных параметров окружающей среды: температуры воздуха, осадков и дефицита давления пара (VPD). Результаты показали, что средняя температура воздуха значительно увеличилась в основном за последние годы, начиная с 1980-х годов, что подтверждается значительными трендами ( $p < 0.0001$ ) за период 1980-2000 гг. для среднегодовых (январь-декабрь), зимних (декабрь предыдущего гидрологического года - январь-февраль текущего - ДЯФ), весенних (март, апрель, май - МАМ) и летних (июнь, июль, август - ДЯФ) температур для Сибирской субарктики. Чтобы оценить разницу между двумя периодами до 1980-х годов и после, был рассчитан процентный показатель для всех исследованных метеостанций. Мы обнаружили, что изменения средней температуры на участках YAK (8%) и TAY (9%) изменились незначительно. Осенняя температура увеличилась на 13% на участках YAK и TAY за период 1980-2020 гг. Весенняя температура увеличилась на 10% для TAY, в то время как в восточной части Сибири она увеличилась только на 6%.

С 1980-х годов было выявлено значительное уменьшение количества осадков для участка YAK. На участке TAY значительные изменения количества осадков произошли раньше, чем на YAK, начиная с 1960-х годов. С 1980-х годов годовое количество осадков уменьшилось на 16% на YAK, в отличие от увеличения (до 6%) на TAY по сравнению с периодом 1966-1979 гг. Летние и зимние осадки резко сократились на YAK (23% и 24%, соответственно). На участке TAY весенние и летние осадки увеличились за последние 40 лет, при этом наблюдается уменьшение осадков в основном зимой и осенью. Значения измерений дефицита давления пара (VPD), показали значительные тенденции к увеличению весной на YAK и TAY после 1980-х годов. Данные по зимнему VPD оставались стабильными в течение холодных зим в Сибирской субарктике.

При рассмотрении изотопных моделей кислорода и климатических изменений более низкие усредненные значения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cell}}$  были выявлены для YAK (19,6‰) по сравнению с центральной частью Сибири, TAY (20,7‰). Значения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cell}}$  показали значительные увеличения только с 1980-х годов для TAY ( $t = 0,56$ ,  $p = 0,0014$ ), в то время как незначительные изменения были обнаружены только для YAK ( $p > 0,1$ ).

На основе множественного линейного регрессионного анализа мы выявили положительные значимые связи между  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cell-YAK}}$  и июльской температурой воздуха ( $r = 0,49$ ,  $p = 0,0001$ ), а также июльским VPD ( $r = 0,31$ ,  $p = 0,02$ ). Температура июля (26,3%) и VPD июня (24,9%) и июля (28,6%) играют значительную роль в изменчивости  $\delta^{18}\text{O}$  -YAK, в то время как вклад осадков менее значителен, с отрицательной корреляцией между  $\delta^{18}\text{O}$ -YAK и осадками июля ( $r = 0,37$ ,  $p = 0,02$ ) за период 1966-2003 гг.

Июльская температура воздуха показала значимые корреляции  $\delta^{18}\text{O}$  на участке ТАУ ( $r = 0,23$ ,  $p = 0,04$ ) с мартовскими значениями VPD ( $r = 0,26$ ,  $p = 0,03$ ). Наибольший вклад июльского VPD был выявлен для  $\delta^{18}\text{O}$  на участке ТАУ, достигнув 29,4%. Средняя температура июня-августа значительно влияет на  $\delta^{18}\text{O}$  на участке YAK и ТАУ.

Процессное моделирование LPX-Bern 1.0 показало, что доля воды в год для глубин почвы 0-10 см и 20-30 см значительно связана с новыми экогидрологическими данными по кольцам деревьев  $\delta^2\text{H}$  ( $r = 0,58$ ,  $p = 0,000$  и  $r = 0,46$ ;  $p = 0,000$ ), соответственно. Наши результаты свидетельствуют об увеличении эвапотранспирации и изменении водного отношения деревьев в ответ на увеличение поглощения воды оттаивания с глубины почвы 20-30 см. Было обнаружено положительное влияние летней температуры воздуха на  $\delta^{18}\text{O}$  в кольцах деревьев и отрицательное влияние осадков в июле месяце, что указывает на засушливые условия.

Анализ климатических данных показал, что резкие изменения в изменчивости климата произошли с 1980-х годов в субарктических регионах, при этом более выражены с 2000 по 2020 год. Сравнительный анализ с другими районами исследования позволил выявить, что современное потепление и развитие засушливых условий более выражено в западном полушарии (Канадская субарктика) по сравнению с Сибирской субарктикой. Снижение осадков, повышение температуры и VPD в основном происходят зимой, весной и осенью в субарктических регионах, покрытых вечной мерзлотой, что оказывает значимое влияние на рост древесных растений в бореальных лесах и ведет к засушливым условиям.

*Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) № 21-17-00006 «Изотопы водорода и дейтериевый эксцесс в целлюлозе годичных колец хвойных как индикатор экстремальных эко-гидрологических изменений в бореальных лесах (ECO-HYDROTREE)».*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Soja A.J., Tchepakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfe-nova E.I., Chapin F.S., Stackhouse P.W. Climate induced boreal forest change: Predictions versus current observations // *Glob. Planet. Chang.*, 2007, 56, 274–296.
2. Knorre A.A., Kirilyanov A.V., Prokushkin A.S., Krusic P.J., Büntgen, U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia. // *Sci. Total Environ.*, 2019, 652, 314–319.
3. Kirilyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // *Environ. Res. Lett.*, 2020, 15, 034061.
4. AMAP. Impacts of a Warming Arctic. In *Arctic Climate Impact Assessment—ACIA Overview Report*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2004; p. 140.
5. Apps M.J., Shvidenko A.Z., Vaganov E.A. Boreal Forests and the Environment: A Foreword // *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Chang.*, 2006, 11, 1–4.
6. Hughes M.K., Vaganov E.A., Shiyatov S., Touchan R., Funkhouser G. Twentieth-century summer warmth in northern Yakutia in a 600-year context // *Holocene*, 1999, 9, 629–634.
7. Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., Sidorova O.V., Schweingruber F.H. Summer temperatures in eastern Tai-myrs inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series // *Holocene*, 2002, 12, 727–736.
8. Briffa K. Annual climate variability in the Holocene: Interpreting the message of ancient trees // *Quat. Sci. Rev.*, 2000, 19, 87–105.
9. Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Saurer M., Guillet S., Corona S., Fonti P., Mygland V.S., Kirilyanov A.V., Naumova O.V., Ovchinnikov D.V., et al. Siberian tree-ring and stable isotope proxies as indicators of temperature and moisture changes after major stratospheric volcanic eruptions // *Clim. Past*, 2019, 15, 685–700.
10. Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Siegwolf R.T.W., Saurer M., Mygland V.S. Impact of Recent Climate Change on Water-Use Efficiency Strategies of *Larix sibirica* in the Altai-Sayan Mountain Range // *Forests*, 2020, 11, 1103.
11. Churakova (Sidorova) O.V., Mygland V.S., Fonti M.V., Saurer M. Isotopic responses to dry and wet episodes as captured in tree rings of southern Altai relict forests // *Eur. J. For. Res.*, 2021, 140, 527–535.
12. Sugimoto A., Yanagisawa N., Naito D., Fujita N., Maximov T.C. Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga // *Ecol. Res.*, 2002, 17, 493–503.

13. Churakova (Sidorova) O.V., Shashkin A.V., Siegwolf R.T., Spahni R., Launois T., Saurer M., Bryukhanova M.V., Benkova A.V., Kuptsova A.V., Peylin P., et al. Application of eco-physiological models to the climatic interpretation of  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$  measured in Siberian larch tree-rings // *Dendrochronologia*, 2016, 39, 51–59.
14. Sidorova O.V. Long-Term Climatic Changes and the Larch Radial Growth on the Northern Middle Siberia and the Northeastern Yakutia in the Late Holocene // *Sukachev Institute of Forest: Krasnoyarsk, Russia*, 2003.
15. Abaimov A.P., Bondarev A.I., Zyryanova O.A., Shitova S.A. Polar Forests of Krasnoyarsk Region; *Novosibirsk Branch of the Publishing House "Science": Novosibirsk, Russia*, 1997; p. 208.

## ГИС инвентаризация приледниковых озер Алтая в пределах России, Монголии и Китая

**Бородавко П.С., Корф Е.Д., Мельник М.А., Волкова Е.С.,**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: bor@ggf.tsu.ru

С о времени Малой ледниковой эпохи, высотный и широтный диапазон распространения криогенных образований Земли неуклонно сужается и выражается в прогрессирующем сокращении гляциосферы. Подчиняясь глобальным климатическим тенденциям, оледенение Алтая (Русского, Монгольского, Китайского) на протяжении полутора столетий находится в стадии устойчивой регрессии, а ледники его основных центров демонстрируют отрицательный баланс массы и уменьшают занимаемую площадь. Характерным элементом ландшафтов перигляциального пояса Большого Алтая, как области с активно деградирующим оледенением, являются комплексы полигенных и полиморфных озерных водоемов, количество которых возрастает пропорционально темпам сокращения оледенения. Сравнительный анализ материалов космической съемки с 1966 по 2020 гг. показывает, что большая часть из них образовалась за последний полувековой период. Приледниковые озера по праву рассматриваются как источник формирования гляциальных селей, обладающей огромной разрушительной силой. Именно поэтому, данный тип озер относится к особо опасным источникам стихийных бедствий. В настоящее время не существует подробного каталога приледниковых озер Алтая, поэтому чрезвычайно важно выполнить их инвентаризацию и на основе комплексного анализа получить данные о потенциально опасных озерах, представляющих угрозу населению нижележащих речных долин.

Для систематизации, аналитической обработки и отображения пространственно координированных данных о приледниковых озерах Алтая нами разработана геоинформационная система «GL Altai». В качестве основного программного обеспечения ГИС был выбран комплекс программных средств Microdem/TerraBaseII V12.0 и Global Mapper V 16.0®. Структура разработанной нами ГИС включает: банк данных, программно-аппаратный комплекс и средства создания оперативных материалов для разработки прогнозных заключений. Банк данных ГИС состоит из картографического архива, тематических баз данных в формате DBase и материалов дистанционного зондирования. Векторные цифровые карты в ГИС «GL Altai» представлены в формате Shape-файлов. Наличие цифровой топографической основы позволило привести к единой системе координат цифровые тематические карты и материалы дистанционного зондирования. В качестве цифровой модели рельефа использованы планшеты Aster GDEM, SRTM матриц третьего поколения и DTED level 3. Современное озерное покрытие горно-ледниковых бассейнов Алтая картировалось по прямым признакам дешифрирования мультиспектральных и панхроматических космоснимков высокого и сверхвысокого разрешения: Канопус-В МСС, Ресурс-П Геотон Мультиспектр и монохромных космических изображений с пространственным разрешением от 1 до 3.5 м. за период с 2017 по 2020 гг. Все имеющиеся сцены в формате GeoTiff были преобразованы в единую картографическую проекцию (45 и 46 зона UTM, WGS84). Пространственное положение водоемов середины 60-х годов XX века картировалось по монохромным геотрансформированным и геоферированным электронным скан-копиям отпечатков космоснимков миссии Corona (КН-2, КН-3). Основные гидрографические характеристики водоемов (площадь акватории, длина береговой линии, отметка уреза) рассчитывались программными средствами ГИС. Объемы озерных вод рассчитывались по зависимостям К. Хюгелля и С. Эванса.

К настоящему времени выполнена ГИС инвентаризация приледниковых озер Юго-восточной части Русского Алтая и основных центров оледенения Монгольского Алтая. Трём приледниковым водоемам присвоен ранг критической опасности.

# GIS inventory of glacial lakes in the Altai Mountains within Russia, Mongolia and China

Borodavko P.S, Korf E.D, Melnik M.A, Volkova E.S.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: bor@ggf.tsu.ru

Since the Little Ice Age, the altitudinal and latitudinal range of the Earth's cryogenic formations has been steadily narrowing and expressed in a progressive reduction of the glaciopause [1]. Subject to global climatic trends, the glaciation of the Altai (Russian, Mongolian, Chinese) has been in steady regression for a century and a half, and the glaciers of its main centres demonstrate a negative mass balance and decrease in the area occupied [2,3,4,5]. A characteristic element of landscapes of the Altai periglacial belt, as an area with actively shrinking glaciation, are complexes of polygenic and polymorphic lake water bodies, the number of which increases in proportion to the rate of glaciation reduction. The uneven distribution of lakes across the mountain-glacial basins of the Altai is dictated by their morphological features: most of the lake water bodies are confined to the gentle precipices of valley and car-valley glaciers with well-defined marginal moraine complexes, which act either as natural dams or provide conditions for the development of thermokarst limnogenesis. In basins dominated by glaciers of flat-top or slope type, there are no conditions for the formation of water bodies. A comparative analysis of the space survey materials from 1968 to 2020 shows that most of them were formed in the last half-century. Lakes of the deglaciation belt are represented by the following morphogenetic types:

**1. Glacial lakes.** Glacial lake basins are formed in the ablation zone of valley glaciers in thermoerosional or thermokarst depressions of the glacial terrain. This type of lakes belongs to ephemeral formations; the hydrographic characteristics of this type of lakes (water area, volume) change annually with a steady upward trend due to their thermal impact on the occupied depression and natural transformation of the glacial surface. When critical volumes are reached, after a short period of time, glacial lakes empty, with a more or less pronounced degree of catastrophism.

**2. Moraine lakes** are formed in intra-marine depressions at the stage of active regression of valley glaciers. Most often they are confined to areas of widening and deepening of inter-moraine flow channels. Their number on large end-marine complexes may reach several dozens. The bottoms and sides of lake depressions are composed of moraine-containing ice, ice-bearing moraine or frozen varieties of moraine sediments. Water volumes in moraine lakes can reach considerable values, depending on the local topography and balance characteristics of water bodies. The development and time of existence of this type of lakes is controlled by the intensity of thermoabrasion impact on the lake basin and cryolithological properties of sediments composing the sides and bottoms of the occupied depression.

**3 Lakes dammed by rock glaciers.** The origin of this type of lakes is related to blocking of the main glacier melt-water channel by the margins of the rock glaciers rising from tributary valleys of the first order or from the sides of the main valley. The vast majority of the lakes in question were formed during the maximum stage of the Little Ice Age, their stable volumes being controlled by features of the local topography, indicators of the solid runoff of the main watercourse (as the main factor of aggradation of the lake reservoir) and regime characteristics of the under-run rock glacier.

**4. Moraine-dammed lakes** are located hypsometrically above the marginal moraine complexes of the Little Ice Age and, as a rule, occupy the depressions excavated by valley glaciers during the transgressive stage of the Little Ice Age. Dams of these lakes are represented by moraine ramparts composed of frozen loose clastic weakly water-permeable rocks. Most of the moraine-dammed lakes have surface runoff, more rarely the source is through filtration of water through the lake dam. Moraine-dammed lakes are time-stable accumulators of regulated glacier runoff and are an important element of water redistribution in mountain-glacial basins.

**5. Rigel and kar lakes** occupy the lowest parts of glacial kars and cirques, separated by a rock or moraine rigel. Kar lakes are formed during the final stage of glaciation degradation and are fed by atmospheric precipitation on the surface of the catchment. The stable volume of karst lakes in time is ensured by the height of the rock or moraine transom and the regime of atmospheric precipitation.

**6. Zander lakes** are small and unstable in time reservoirs with insignificant depths, formed in local depressions of relief within pre-ices of retreating glaciers.

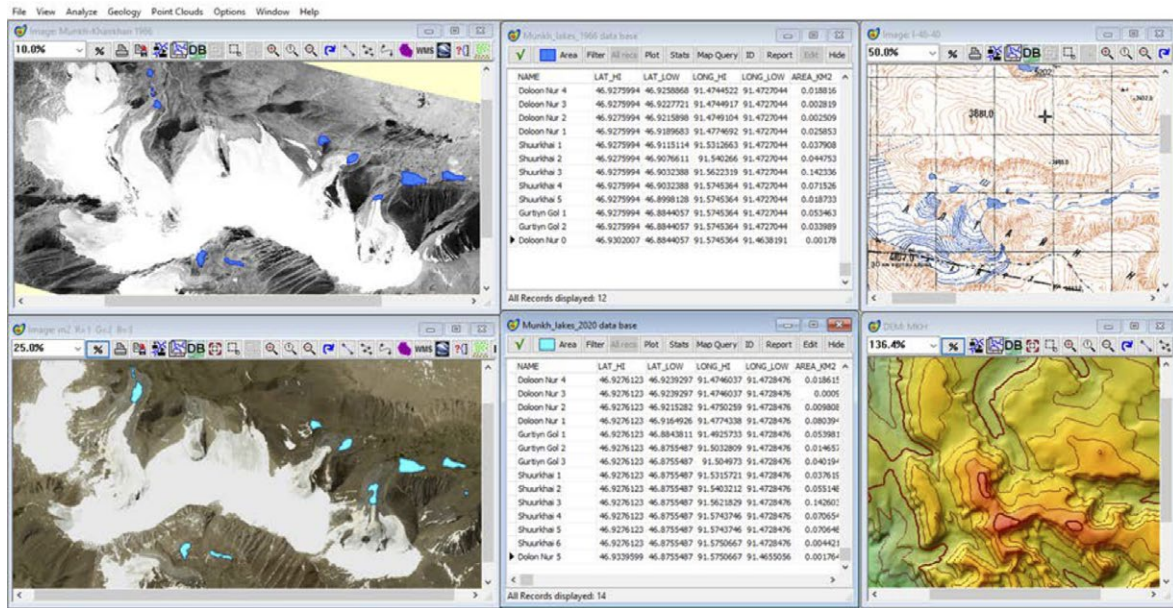
Glacial lakes are usually classified as distant geological hazards (in terms of distance rather than time) as they originate in high altitude areas, far from populated areas. They are predominantly located in the highlands, in uninhabited areas. Glacial lakes contain a store of water which under certain conditions can have an enormous destructive force. Therefore mountain lakes should be classified as particularly dangerous sources of natural disasters. The most dramatic event was the outburst of the Maashey moraine-dammed lake in July 2012. The outburst flood caused significant damage to the infrastructure of the Ulagan district: destroyed 4 bridges



on the Maashey River and Chuya River, and indefinitely delayed the building of a hydroelectric power station on the Chuya River, important for the local population.

There is currently no detailed catalogue of glacial lakes in the Altai, so it is crucial to carry out an inventory and survey of glacial lakes to obtain data on potentially dangerous lakes that could trigger floods and cause harm to the population of the downstream river valleys.

For systematization, analytical processing and display of spatially coordinated data on glacial lakes in the Altai, we have developed the GIS «GL Altai» (Fig. 1). Microdem/TerraBaseII V12.0 and Global Mapper V 16.0 software package was chosen as the main GIS software. The structure of our developed GIS includes: data bank, hardware-software complex and tools for creation of operational materials for development of forecast conclusions. The databank serves as the information basis of the GIS, its composition and structure were determined by the composition of input and output data required to solve the functional tasks of the research topic. The GIS databank consists of a map archive, thematic databases in DBase format and remote sensing materials. The vector digital maps in the GIS are in Shape-file format. The availability of a digital topographic base made it possible to bring digital thematic maps and remote sensing materials into a unified coordinate system. Aster GDEM, SRTM matrix third generation and DTED level 3 are used as digital elevation model.



**Fig.1**  
«GL ALTAI» GIS Interface with the thematic project "Glacial Lakes of the Munkh- Khairkhan Range".

Glacial lake mapping was performed by digitizing with Microdem/TerraBaseII V12.0 tools in Stream mode using raster pattern of summer scenes of multispectral Canopus-B MSS, Resurs-P Geoton multispectral and monochrome satellite images (scenes obtained using authorized access to the file archive of Roscosmos Geoportal's DPC, <https://gptl.ru/>) with spatial resolution of 1 to 3.5 m for the period from 2017 to 2020. All available scenes in GeoTiff format were converted into a single map projection (46 UTM zone, WGS84), geo-transformed using Aster GDEM matrices and coordinates of reference points prepared during the field expedition research. The spatial position of the lakes for the time interval of the 1960s was mapped using monochrome geotransformed and geo-referenced electronic scans of Corona satellite imagery (materials were ordered and obtained through authorized access to the USGS GDEM file archive, <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

The lake coverage of the mountain-glacier basins was mapped using direct signatures from high and ultra-high resolution multispectral and panchromatic satellite imagery. The main decoding features of lake water bodies were: smooth phototone and specific monotone or expressive structure of water images; oval shape of lakes and confinement of water bodies to low relief elements. Lakes were mapped when their shape became visible. The main hydrographic characteristics of the lakes (water area, shoreline length, and shoreline elevation) were calculated using GIS software. The lake water volumes were calculated in two ways: by C. Hugel's [6] dependence using formula (2) and by formula (3) proposed by S. Evans [7].

$$V = 0,104 \cdot A^{1,42} \quad (2),$$

$$V = 0,035 \cdot A^{1,5} \quad (3),$$

where  $V$  is water body volume,  $m^3$ ,  $A$  is water body area,  $m^2$ .

To verify the obtained values, a bathymetric survey of potentially hazardous lakes was carried out. Measurements were taken with GPSMAP 585 Plus sonar with built-in GPS receiver. The echo sounding results

were processed in Garmin Quickdraw Contours, from which depth maps of the water bodies were generated and their true volumes were established. The discrepancy between the measured volumes and those calculated using formula (2) was on average  $\pm 15\%$ , and  $\pm 12\%$  using formula (3).

*The research was supported by Asia-Pacific Network for Global Change Research. Project - CRRP2021-03MY-Borodavko «Hazard assessment of glacial lake outburst floods in Russian, Mongolian and Chinese Altai».*

#### REFERENCES:

1. Ganiushkin D., Chistyakov K., Kunaeva E. Fluctuation of glaciers in the southeast Russian Altai and northwest Mongolia Mountains since the Little Ice Age maximum // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 74. – P. 1883-1904.
2. Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid 20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – Vol. 115(D16). – DOI: 10.1029/2009JDO12976
3. Pan C.G., Pope A., Kamp U., Dashtseren A., Walther M.P., Syromyatina M.V. Glacier recession in the Altai Mountains of Mongolia in 1990–2016 // *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. – 2018. – Vol. 100. – P. 185-203.
4. Plyusnin V., Zehong L., Xiaona C. The Response of Glaciers to Global Warming in the Mountains of Eastern Siberia, Mongolia, and Northwest China // *Geography and Natural Resources*. – 2021. – Vol. 42. – P. 306-314.
5. Khrutsky V.S., Golubeva E.I. Dynamics of the glaciers of the Turgan-Kharkhira mountain range (Western Mongolia) // *Geography and Natural Resources*. – 2008. – Vol. 29. – P. 278-287.
6. Huggel C., Kaab A., Haerberli W., Teyssere P., Paul F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps // *Can. Geotech. J.* – 2002. – Vol. 39. – P. 316– 330.
7. Evans S.G. Landslide damming in the Cordillera of Western Canada // *Landslide dams: processes, risk, and mitigation* – 1986. – No. 3. – P. 111-130.

## Lithological-geochemical and biological response of lacustrine sedimentation systems to weather-climatic changes (on the example of Gorny Altai lakes)

Darin A.V.<sup>1</sup>, Babich V.V.<sup>1</sup>, Markovich T.I.<sup>1</sup>, Darin F.A.<sup>2,3</sup>, Rakshun Ya.V.<sup>3</sup>, Карачурина С.Е.<sup>4</sup>, Rudaya N.A.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Synchrotron Radiation Facility - Siberian Circular Photon Source "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis of SB RAS (SRF "SKIF"), Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS, Novosibirsk, Russia

The formation of bottom sediments in freshwater lakes depends on the external conditions that determine the inflow of sedimentary material from the catchment area. In many cases, lacustrine bottom sediments are paleoarchives that make it possible to obtain climate reconstructions of high time resolution. Special interest to researchers around the world present bottom sediments with annual layers (varves), which provide a high level of detail and accuracy of reconstructions [Zolitschka, 2015].

The high time resolution allows a direct comparison of the obtained proxies with the data of regional meteorological observations over the last century with the finding of climate indicators and the construction of transfer functions for the reconstructed parameters.

The study objects were three freshwater lakes located in the Central Altai physical-geographical province, at the northwestern end of the Katunsky ridge (Gorny Altai) - Kucherlinskoe, Srednee and Nizhnee Multinskie.

Bottom sediment cores were obtained using a hammer tubes and a box-corer. The use of a box-corer made it possible to obtain the upper layer of modern (last century), weakly consolidated sediments with practically no loss or damage. Thus, the top of the cores was dated by the year of sampling, which made it possible to build accurate and correct time series for the recent decades [Darin, 2019].

Scanning microanalysis of bottom sediments samples were carried out at the Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation at the experimental station "Elemental Analysis" according to the method [Darin,

2017; Darin 2013]. The resulting set of lithological-geochemical data was recalculated into time series with an annual step, based on the constructed age model.

To build transfer functions that combine lithological-geochemical and meteorological observations instrumental data, we used the average annual values of air temperature and the amount of atmospheric precipitation for the regional meteorological stations Ust-Koksa and Kara-Turek. An annual comparison with meteorological observations showed that lake systems are more responsive to changes in average annual temperatures than to humidity.

For the age interval 1940 - 2014, transfer functions that quantitatively relate the average annual temperatures and a set of lithological-geochemical proxies were constructed (an example for Lake N. Multinskoe is shown in Fig. 1). For the lake Kucherlinskoe sediments core a temperature reconstruction was built to a sampling depth of 600 years [Дарьин, 2020; Дарьин, 2021].

Palynological analysis data were used as an indicator of the biological response of the lake system to climate change [Rudaya, 2020]. The comparison of the geochemical reconstruction with the palynological data was carried out by calculating the pair correlation coefficients. For a correct comparison, the temperature reconstruction data were averaged to time intervals corresponding to the time interval of the metric size of the palynological sample (10 mm). Depending on the age model, the time interval of the palynological sample varied from 4 to 12 years. After that, a pairwise comparison of the same-age data of temperature reconstruction and palynological analysis was carried out. 4 palynological parameters were identified with pairwise correlation coefficients above the critical value.

*The study was supported by RSF project No. 20-17-00110, was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030) and partial support of RFBR project No. 19-05-50046 (analytical microstratigraphy).*

## Литолого-геохимический и биологический отклик систем озерного осадкообразования на погодно-климатические изменения (на примере озер Горного Алтая)

Дарьин А.В.<sup>1</sup>, Бабич В.В.<sup>1</sup>, Маркович Т.И.<sup>1</sup>, Дарьин Ф.А.<sup>2,3</sup>, Ракшун Я.В.<sup>2</sup>, Карачурина С.Е.<sup>4</sup>, Рудая Н.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов"

Федерального государственного бюджетного учреждения науки, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ЦКП "СКИФ"), Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия

**О**бразование донных осадков в пресноводных озерах зависит от внешних условий, определяющих поступление осадочного материала с территории водосбора. При этом стратифицированные донные отложения содержат информацию о геологическом строении территории водосбора и динамике поступления осадочного вещества за счет накопления тех или иных химических элементов [Дауваальтер В.А., 2012].

Озерные донные осадки во многих случаях являются палеоархивами, позволяющими получить климатические реконструкции высокого временного разрешения. Особенный интерес исследователей во всем мире вызывают донные отложения с годовыми слоями (варвами), обеспечивающими высокий уровень детализации и точности реконструкций [Zolitschka, 2015].

В приледниковых озерах ленточные (варвные) глины образуются сезонными поставками ледниковой мути и состоят из крупных алевритовых частиц (весенне-летний слой) и мелкозернистой глины, осаждающейся в зимний период. Использование современных аналитических методов позволяет исследовать такие донные отложения с годовым, а иногда и сезонным разрешением, что открывает новые подходы в палеоклиматических исследованиях [Alexandrin, 2018; Brauer A., 2004]. Необходимым требованием к таким работам является использование инструментальных аналитических методик с субмиллиметровым пространственным разрешением, таких как гиперспектральная спектроскопия [Butz, 2015], XRF core scanners [Stoudace, 2019] и  $\mu$ -РФА с синхротронным возбуждением ( $\mu$ -XRF-SR) [Darin, 2013].

Высокое временное разрешение позволяет проводить прямое сравнение набора полученных прокси с данными региональных метеонаблюдений на интервале последнего столетия с нахождением климатических индикаторов и построением трансферных функций для реконструируемых параметров.

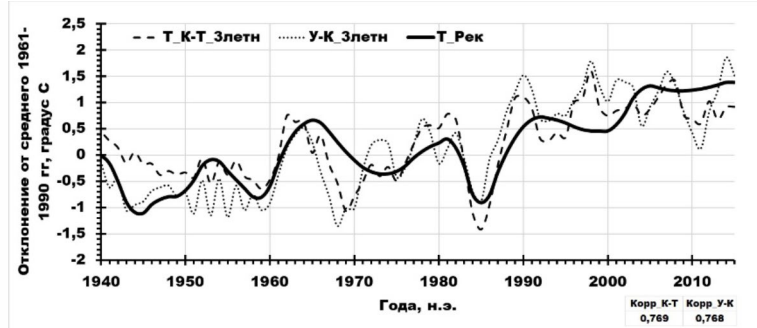


Изучая разрез современных донных осадков, и сравнивая химический состав и структуру датированных интервалов разреза с внешними факторами, можно получить детальную информацию о процессе осадкообразования с выявлением устойчивых связей индикаторных показателей осадка с параметрами внешней среды, в первую очередь с данными региональных инструментальных метео- и гидрологических наблюдений.

Объектами исследования являются три пресноводных озера, расположенных в Центральной Алтайской физико-географической провинции, на северо-западном окончании Катунского хребта (Горный Алтай) – Кучерлинское, Среднее и Нижнее Мультиинские. Керна донных осадков были получены с использованием ударных трубок и ящика-пробоотборника (box-corer). Использование box-corer позволило получить верхний слой современных (последнее столетие), слабо консолидированных осадков практически без потерь и повреждений. Таким образом, верх кернов был датирован годом отбора, что позволило построить точные и правильные временные ряды для последних десятилетий [Darin, 2019].

Сканирующий микроанализ образцов донных осадков проводился в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения на экспериментальной станции «Элементный анализ» по методике [Дарьин, 2017; Darin 2013]. Полученный набор литолого-геохимических данных пересчитывался во временные ряды с годовым шагом, исходя из построенной возрастной модели.

Для построения трансферных функций, объединяющих литолого-геохимические и инструментальные данные метеонаблюдений, использовались среднегодовые значения температуры воздуха и количества атмосферных выпадений для региональных метеостанций Усть-Кокса и Кара-Тюрек. По годовое сравнение с метеонаблюдениями показало, что озерные системы сильнее реагируют на изменение среднегодовых температур, чем влажности. Для возрастного интервала 1940 – 2014 гг. были построены трансферные функции, количественно связывающие среднегодовые температуры и набор литолого-геохимических прокси (для оз. Н. Мультиинское пример на рис. 1).



**Рис. 1.** Трехлетние температуры воздуха по данным метеостанции Кара-Тюрек (Т\_К-Т\_3летн), Усть-Кокса (Т\_У-К\_3летн) и для оз. Н.Мультиинское температурная реконструкция по литолого-геохимической трансферной функции (Т\_Рек).

Для керна донных осадков оз. Кучерла была построена температурная реконструкция на глубину опробования 600 лет [Дарьин, 2020; Дарьин, 2021].

В качестве индикатора биологического отклика озерной системы на климатические изменения использованы данные палинологического анализа. По глубине керна оз. Кучерлинское было отобрано 20 образцов с интервалом 6 см. Анализ проводился по стандартной методике [Fægri, 1989]. Для подсчета концентрации пыльцевых зерен и спор использовались таблетки спор *Lycopodium*. В каждой пробе считывалось не менее 300 зерен пыльцы и спор, также учитывались непильцевые палиноморфы [Rudaya, 2020]. Спорово-пыльцевая диаграмма построена в программе Tilia.

Сравнение геохимической реконструкции с данными палинологии проводилось путем вычисления коэффициентов парной корреляции. Для этого данные температурной реконструкции были усреднены до временных интервалов, соответствующих временному интервалу метрического размера палинологической пробы (10 мм). В зависимости от возрастной модели временной интервал палинологической пробы менялся от 4 до 12 лет. После этого проводилось попарное сравнение одновозрастных данных температурной реконструкции и палинологического анализа. В таблице 1 представлены палинологические индикаторы, имеющие значимые парные коэффициенты корреляции с реконструированной температурой региона.

**Таблица 1.** Парные коэффициенты корреляции температурной реконструкции и палинологических данных.

Маркер	Коэффициент	Маркер	Коэффициент
Pollen Sum	-0,59	Upland Herbs	-0,73
Poaceae	-0,59	Artemisia	-0,61

Были выделены 4 палинологических параметра, имеющие парные коэффициенты корреляции выше критического значения для данных условий (n=14, p=0.05, k=0.53). Все относятся к травянистой



растительности и имеют отрицательную корреляцию с температурой, что может быть объяснено расширением площади степей при похолоданиях, сопровождающихся снижением количества атмосферных осадков.

Показана возможность построения количественных литолого-геохимических палеорекострукций, калиброванных по современным метеонаблюдениям, верифицируемых данными палинологического анализа.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ №20-17-00110, при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и частичной поддержке проекта РФФИ № 19-05-50046 (аналитическая микростратиграфия).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дарьин А.В., Чу Г., Сан Ц., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Новиков В.С., Дарьин Ф.А., Ракиун Я.В. Архив климатических изменений и сейсмических событий в ледниковых глинах озера Кучерлинского (Алтай). *Геодинамика и тектонофизика*. 2020. Т. 11. № 3. С. 624-631. DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0495
2. Дарьин А.В., Чу Г., Сан Ц., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Новиков В.С., Максимов М.А., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Ракиун Я.В., Гогин А.А., Сенин Р.А. Количественная реконструкция годовых температур воздуха Алтайского региона за последние 1400 лет по данным аналитической микростратиграфии ленточных глин оз. Кучерлинское. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2021. Т. 85. № 1. С. 97-108. DOI: 10.31857/S2587556621010039
3. Дарьин Ф.А., Ракиун Я.В., Сороколетов Д.С., Дарьин А.В., Калугин В.М. Разработка методик микро-РФА на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 и их применение для исследования распределения элементов в природных образцах. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2017. Т. 8. № 1. С. 86-90. DOI: 10.1134/S2079562917010067
4. Даувальтер В.А. *Геоэкология донных отложений озер*. – Мурманск: изд-во МГТУ, 2012. -242 с. ISBN 978-5-86185-655-3
5. Alexandrin M., Dolgova E., Grachev A., Solomina O., Darin A., Kalugin I. Annual sedimentary record from lake Donguz-orun (central Caucasus) constrained by high resolution SR-XRF analysis and its potential for climate reconstructions // *Frontiers in Earth Science*. 2018. v. 6. pp. 158. DOI: 10.3389/feart.2018.00158
6. Brauer A. Annually laminated lake sediments and their paleoclimatic relevance. // In: Fischer H. et al. (eds) *The Climate in Historical Times*. GKSS School of Environmental Research. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 109-127. DOI: 10.1007/978-3-662-10313-5\_7
7. Butz C., Grosjean M., Fischer D., Wunderle S., Tylmann W., Rein B. Hyperspectral imaging spectroscopy: A promising method for the biogeochemical analysis of lake sediments. // *J. Appl. Remote Sens*. 2015, v.9, no.1, 096031. DOI: 10.1117/1.JRS.9.096031
8. Croudace I., Löwemark L., Tjallingii R., Zolitschka B. Current perspectives on the capabilities of high resolution XRF core scanners // *Quaternary International Volume 514*, 2019, Pages 5-15. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.04.002
9. Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Ya.V. Scanning x-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 STORAGE RING. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2013. 77. № 2. p. 182-184. DOI: 10.3103/S106287381302010X
10. Darin A., Chu G., Maksimov M., Novikov V. Layer counting and isotopic analysis of the recent bottom sediments of the glacial lake Kucherla (Russia, Gorny Altai). *19th International Scientific Geo-Conference SGEM 2019*. 2019. С. 257-264. DOI: 10.5593/sgem2019V/4.2/S06.035
11. Fægri, K., Iversen, J., 1989. *Textbook of pollen analysis: by K. Fægri and J. Iversen*, John Wiley and Sons, Chichester, UK, 1989, 328 pp. DOI: 10.1016/0048-9697(91)90087-U
12. Rudaya N.A., Darin A.V. Correlation of the annual temperature reconstructed with  $\mu$ XRF-SR method and pollen data from varved sediments of lake Kucherla, the Altai mountains, for the last 500 years. *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. № 4. p. 541-543. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-541]
13. Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E., Schimmelmann A. Varves in lake sediments – A review. *Quat. Sci. Rev*. 2015, v. 117, pp. 1–41. doi 10.1016/j.quascirev.2015.03.019

# Features of absorption of elements by plants in post-pyrogenic and neighboring sites of the Bakcharsky mire

Gashkova L.P.

Siberian Institute of Agriculture and Peat - a branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [gashkova-lp@rambler.ru](mailto:gashkova-lp@rambler.ru)

The study is aimed at studying the intensity of the absorption of elements by plants of three types in areas affected to varying degrees by the fire.

The objects of study are located on a drained pine-shrub-sphagnum bog in the interfluvium of the Bakchar and Gavrilovka rivers, which suffered from a fire in 2016. The research was carried out in four areas. Vegetation was completely burnt out at plot PG1, partially burned at PG2, vegetation was not damaged at PG3 and RG. Peat and plant samples were taken 4 years after the fire, in August 2020. The content of Pb, Cd, Cu, Fe, Mn, Ca, K, P, Mg, Na was determined in peat and three plant species: *Pinus sylvestris* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, and *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr. Statistical analysis was carried out using Statsoft Statistica for Windows 6.0. and Excel 7.0. The degree of dependence between variables was established using the Spearman correlation. The significance of differences was determined using the Kruskal-Wallis test.

Previous studies in this area have shown that the content of elements in the upper peat layer is directly dependent on the degree of vegetation burnout in the area [Gashkova, 2022]. Based on the results of the analysis of the content of elements in plants, it became obvious that the concentration of elements in plant tissues does not depend so unambiguously on the degree of burnout of the site as their concentration in peat. The correlation between the degree of pyrogenic load and the concentration of elements in plants showed the following results. A positive correlation is observed for the concentration of the elements Pb, Cd, Fe, P, and Na. For the concentrations of Mg, K, and Cu, no correlation was found. A negative correlation is observed for the content of Ca and Mn.

When comparing the median values of the content of elements among all plant species, it was found that the differences in concentration between the plots are not significant. However, at PG1, compared with other sites, an increase in the content of K, P, Cd, and Pb is observed.

Comparison of the ratio of elements for each species and plot separately showed that the content and ratio of elements change statistically significantly. For example, a feature of *S. fuscum* in burnt areas was a decrease in the concentration of Mn and an increase in the concentration of Cd and Pb, compared with unburned areas. A feature of *P. sylvestris* is an increase in the concentration of Fe, Cd, and Cu in the PG2 area. The content of Cd in *C. calyculata* is 1.5-3 times higher in post-pyrogenic areas.

The content of elements in plants of different species, regardless of the degree of anthropogenic load, differs significantly. Thus, *S. fuscum* is characterized by an increased content of Na and Pb than in other species, moreover, in all samples. The excess is 8 to 28 times the Na concentration, and 7 to 34 times the Pb concentration. On the contrary, the lowest concentration in *S. fuscum* is observed for elements P and Ca. *C. calyculata*, in comparison with the other two considered species, contains an increased concentration of Mn and Ca in its tissues. The increase is 3 to 11 times for Mn and 1.3 to 6 times for Ca. In the tissues of *P. sylvestris*, the content of Zn is 2.3 to 6 times higher than in other species.

In addition to comparing the absolute values of the content of elements in peat and plants, the bioconcentration factor (BCF) are considered. Changes in BCF are observed both between species and between areas with different pyrogenic load.

The degree of absorption of elements increases with an increase in the pyrogenic load, but interspecies differences in BCF exceed these differences. A specific feature of the postpyrogenic sites was an increase in Cd BCF in *C. calyculata* and *S. fuscum*, as well as an increase in Fe and Cu BCF in *P. sylvestris* and *S. fuscum*.

Thus, the species specificity of swamp plants with respect to some elements was found. More actively than other species, *P. sylvestris* absorbs Zn, *C. calyculata* accumulates Mn and Ca, and *S. fuscum* concentrates Pb and Na. In all the considered species, the content of Cd increases in the postpyrogenic areas. In burnt areas, with an increase in the number of elements available to plants, the intensity of their absorption increases.

# Особенности поглощения элементов растениями на постпирогенных и соседних с ними участках Бакчарского болота

Гашкова Л.П.

Сибирский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия  
E-mail: gashkova-lp@rambler.ru

Осушенные болота становятся потенциально пожароопасными объектами благодаря созданию на них дорожной сети, повышающей доступность таких участков для людей. С деятельностью человека в последние десятилетия связано увеличение пожарной активности в Западной Сибири [Lamentowicz et al., 2015; Feurdean et al., 2020]. Выгорание растительности и торфа увеличивает доступность микроэлементов для растений, обогащая почву и приводя к накоплению некоторых элементов растениями [Cruz-Paredes et al., 2017].

Цель работы заключалась в сравнении интенсивности поглощения элементов растениями трёх видов на участках, в разной степени пострадавших от пожара.

Объекты исследования находятся на осушенном сосново-кустарничково-сфагновом болоте в междуречье рек Бакчар и Гавриловка, на котором в 2016 году произошёл пожар. Участок с полностью выгоревшей растительностью (ПГ1) находится в непосредственной близости от осушительного канала. На участке ПГ2, в 50 м от канала, выгорели только понижения. Растительность участка ПГ3, расположенного в 100 м от канала, не пострадала от огня. Контрольный участок РГ наиболее отдален от выгоревших участков и отделен от них двумя каналами и дорогой. Пробы торфа и растений отбирались спустя 4 года после пожара, в августе 2020 года. Определялось содержание Pb, Cd, Cu, Fe, Mn, Ca, K, P, Mg, Na в торфе и трёх видах растений: *Pinus sylvestris* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench и *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr. Содержание элементов в растениях и торфе определялось методом масс-спектрометрии. Коэффициент биологического поглощения (КБП) рассчитывался как отношение содержания элемента в золе растения к его содержанию в торфе. Статистический анализ проводился с помощью Statsoft Statistica for Windows 6.0. и Excel 7.0. Степень зависимости между переменными устанавливалась при помощи корреляции Спирмена. Значимость отличий устанавливалась при помощи критерия Краскела-Уоллиса.

Ранее проведённые исследования на данном объекте показали, что содержание элементов в верхнем слое торфа находится в прямой зависимости от степени выгорания растительности на участке [Гашкова, 2022]. По результатам анализа содержания элементов в растениях стало очевидно, что концентрация элементов в тканях растений не так однозначно зависит от степени выгорания участка, как их концентрация в торфе. Корреляция степени пирогенной нагрузки и концентрации элементов в растениях показала следующие результаты. Положительная корреляция наблюдается для концентрации элементов Pb, Cd, Fe, P и Na. Чем больше растительность участка пострадала от пожара, тем больше Pb, Cd, Fe, P и Na содержится в растениях. Для концентрации Mg, K и Cu корреляция не выявлена. Отрицательная корреляция наблюдается по содержанию Ca и Mn, то есть на соседних с выгоревшими участками данные элементы становятся более доступными для растений, хотя в верхнем слое торфа их содержание ниже, чем на постпирогенных участках. Дополнительное поступление элементов на соседние с выгоревшими участками может происходить с водой и аэрозолями.

При сравнении медианных значений содержания элементов у всех трёх видов обнаружено, что на ПГ1, по сравнению с остальными участками, наблюдается увеличение содержания K, P, Cd, и Pb в растениях. Однако, в данном случае, когда все виды рассматриваются вместе, различия по концентрации элементов в растениях между участками не достоверны.

Сравнение соотношения элементов для каждого вида и участка отдельно показало, что содержание и соотношение элементов статистически значимо изменяется. Например, особенностью *S. fuscum* на выгоревших участках оказалось снижение концентрации Mn и увеличение концентрации Cd и Pb, по сравнению с невыгоревшими участками. Особенностью *P. sylvestris* является повышение концентрации Fe, Cd и Cu на участке ПГ2. Содержание Cd в *C. calyculata* выше в 1,5-3 раза на постпирогенных участках.

Содержание элементов в растениях разных видов, независимо от степени антропогенной нагрузки, достоверно отличается. Так, *S. fuscum* на всех исследованных участках характеризуется более высоким, чем у других видов, содержанием Na и Pb. Превышение составляет от 8 до 28 раз по концентрации Na, и от 7 до 34 раз по концентрации Pb. Наоборот, самое низкое содержание элементов P и Ca наблюдается в *S. fuscum*, по сравнению с *C. calyculata* и *P. sylvestris*. Особенностью *C. calyculata*, по сравнению с

двумя другими рассмотренными видами, оказалось содержание в тканях повышенной концентрации Mn и Ca. Повышение составляет от 3 до 11 раз для Mn и от 1,3 до 6 раз для Ca. В тканях *P. sylvestris* содержание Zn выше от 2,3 до 6 раз, чем в других видах.

Помимо сравнения абсолютных значений содержания элементов в торфе и растениях, рассмотрены коэффициенты биологического поглощения (КБП). Уровень КБП варьирует как между видами, так и между участками с различной пирогенной нагрузкой.

Степень поглощения элементов выше на выгоревших участках, но межвидовые различия КБП превышают эти различия. Например, у *C. calyculata*, по сравнению с другими видами, оказались наиболее высокими КБП Mn и Ca, но их величина не зависит от пирогенной нагрузки и максимальна на участке РГ, наиболее удалённом от пожара, и является специфичностью данного вида. Увеличение КБП Mn и Ca на невыгоревшем участке происходит благодаря дополнительному поступлению Mn и Ca, высвободившихся в результате пожара и поступившего с выгоревших участков, что компенсировало недостаток данных элементов в торфе для растения, покрывая повышенную, по сравнению с другими видами, потребность *C. calyculata* в Mn и Ca.

*P. sylvestris* накапливает Zn на всех рассмотренных объектах. КБП Zn у сосны достоверно выше, чем у других видов, причём максимум накопления наблюдается на участке ПГ1. Аналогично изменяется КБП Pb и Na у *S. fuscum*. Увеличение КБП Pb у *S. fuscum*, по сравнению с другими видами, составляет от 8 до 48 раз, а КБП Na от 11 до 45 раз, увеличение КБП Pb и Na положительно коррелирует с пирогенной нагрузкой на участке.

Особенностью постпирогенных участков оказалось увеличение КБП Cd у *C. calyculata* и *S. fuscum*, а также КБП Fe и Cu у *P. sylvestris* и *S. fuscum*.

Таким образом, обнаружена видоспецифичность растений болот по отношению к некоторым элементам. Активнее других видов *P. sylvestris* поглощает Zn, *C. calyculata* накапливает Mn и Ca, а *S. fuscum* концентрирует Pb и Na. У всех рассмотренных видов на постпирогенных участках повышается содержание Cd. На выгоревших участках, с увеличением количества доступных для растений элементов, интенсивность их поглощения растёт.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гашкова Л. П. Оценка влияния выгорания растительности на распределение элементов в торфяной залежи верхового болота // Геосферные исследования. 2022. № 1. С. 118–125. doi: 10.17223/25421379/22/9
2. Cruz-Paredes C., López-García Á., Rubæk G.H., Hovmand M.F., Sørensen P., Kjølter R. Risk assessment of replacing conventional P fertilizers with biomass ash: Residual effects on plant yield, nutrition, cadmium accumulation and mycorrhizal status // Science of The Total Environment. 2017. V. 575. P. 1168–1176. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.09.194.
3. Feurdean A., Florescu G., Tanțău I., Vannièrè B., Diaconu A.C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia, Quaternary Science Reviews, V. 244, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>.
4. Lamentowicz M., Slowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszán K., Lapshina E., Gilbert D., Buttlér A., Fiałkiewicz-Kozieł B., Jassey V.E.J., Laggoun-Defarge F., Kołaczek P. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive // Quaternary Research. 2015. V. 84 (3). P. 312–325. DOI:10.1016/j.yqres.2015.09.002.

## Spatial and temporal dynamics of swamp forest in the marginal part of Bakchar bog

Sinyutkina A.

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia  
E-mail: [ankalaeva@yandex.ru](mailto:ankalaeva@yandex.ru)

**A**ssessment of the state and temporal dynamics of swamp forests on the periphery of huge mires of Western Siberia, which are the most vulnerable to climate change, is now becoming increasingly relevant. The aim of the study is to assess the spatial heterogeneity, seasonal and annual dynamics of the swamp forest in the zone of influence of the bog. The object of the study is a key site with an area of about 0.5 km<sup>2</sup> in the Klyuch river basin (the right tributary of the Bakchar River, the Chaya River basin, the southern taiga



subzone of Western Siberia), including the marginal part of the Bakchar bog (the northeastern part of the Great Vasyugan Mire) and adjacent swamp and dry forests. The length of the swamp forest along the border of the bog varies within 1.5–4 km.

The assessment of spatial heterogeneity was carried out on the basis of data from field landscape studies conducted at 14 sites within the marginal part of the bog, swamp and dry forests. Field studies included geobotanical descriptions, determination of the peat deposit depth, measurement of the water table level. Based on the Landsat-8 satellite image and field research data, a map of the geosystems of the key site was drawn. The analysis of temporal dynamics was carried out using Sentinel-2 satellite data. A total of 22 images were used for the summer period 2016–2021. Normalized difference vegetation index NDVI and normalized difference water index NDWI were calculated for 14 field research plots (400 m<sup>2</sup>) and contours of 4 geosystems.

Forest with *Populus tremula*, *Betula pubescens* and *Pinus sibirica* (dry forest) was characterized by maximum NDVI July value (0.83). The minimum value of NDVI was noted within the birch-pine dwarf shrub grass-moss bog (0.73). The average NDVI values are higher within the *Pinus sibirica* and *Betula pubescens* swamp forest (0.82) in comparison with the *Pinus sylvestris* and *Betula pubescens* swamp forest (0.79). The NDWI July values is higher within the *Populus tremula*, *Betula pubescens* and *Pinus sibirica* forest (0.39) and *Pinus sibirica* and *Betula pubescens* swamp forest (0.38) in comparison with *Pinus sylvestris* and *Betula pubescens* swamp forest (0.36) and bog (0.34). Average values of the NDVI and NDWI for field research plots are directly related to the projective cover of trees, the height of the tree layer, the distance from the border of the bog, negative feedback is observed with the depth of the peat deposit. The analysis of the seasonal dynamics of the vegetation index showed large fluctuations in values within the dry forest in comparison with a swamp forest. This indicator can be used as one of the criteria for the identification of geosystems within the zone of influence of the bog.

For most plots under study and both contours of geosystems within the swamp forest, a decrease in July NDVI values relative to the dry forest was noted. It may reflect the degradation of vegetation cover as a result of increased moisture in the zone of influence of the bog. A positive trend of the NDWI index is observed at some plots within the *Pinus sibirica* and *Betula pubescens* swamp forest. On the contrary, a decrease in NDWI values relative to the dry forest is observed at some plots within the *Pinus sylvestris* and *Betula pubescens* swamp forest. The dynamics of the NDWI water index shows an increase in the moisture content in the vegetation cover in some areas of the swamp forest and, conversely, a decrease at other points, probably associated with a change in the ratio of coniferous and deciduous species in the species composition of the tree layer.

## Пространственно-временная динамика заболоченного леса в окраинной части Бакчарского болотного массива

**Синюткина А.А.**

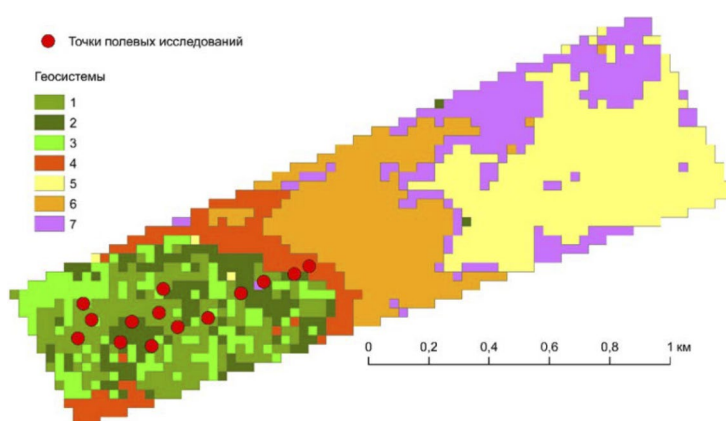
Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа, Томск, Россия  
E-mail: [ankalaeva@yandex.ru](mailto:ankalaeva@yandex.ru)

**П**роблема оценки состояния и динамики заболоченных лесов на периферии крупных болотных массивов Западной Сибири, являющихся наиболее уязвимыми к климатическим изменениям, в настоящее время становится все более актуальной. С одной стороны, в результате увеличения количества осадков может произойти активизация процессов заболачивания и накопления углерода (Бабиков, Кобак, 2016), с другой стороны увеличение температуры будет приводить к ускорению процессов разложения и деградации торфяной залежи. Поглощение CO<sub>2</sub> и накопление углерода в виде торфа в пределах заболоченных лесов является одним из неучтенных агентов глобального углеродного цикла. Это связано, в том числе, с отсутствием современных точных оценок площадей распространения мелкозалежных заболоченных лесов из-за схожести спектральных характеристик с окружающими их суходольными лесами, что обуславливает сложность их идентификации. Целью исследования является оценить пространственную неоднородность, сезонную и годовую динамику заболоченного леса в зоне влияния верхового болотного массива.

Объектом исследования является ключевой участок площадью около 0,5 км<sup>2</sup> в бассейне р. Ключ (правый приток р. Бакчар, бассейн р. Чая, подзона южной тайги Западной Сибири), включающий окраинную часть верхового Бакчарского болотного массива (северо-восточный отрог Большого Васюганского болота) и прилегающие к нему заболоченные и суходольные леса. Протяженность заболоченного леса вдоль границы болотного массива изменяется в пределах 1,5–4 км. Доминантом древесного яруса является береза (*Betula pubescens*), субдоминантами – кедр (*Pinus sibirica*), сосна (*Pinus sylvestris*), ель

(*Picea obovata*), осина (*Populus tremula*). Высота древесного яруса составляет 15–22 м, сомкнутость крон 20–60%. Крайняя часть болотного массива в пределах ключевого участка занята березово-сосново-кустарничково-осоково-сфагновым фитоценозом. Древесный ярус образован сосной (*P. silvestris*), березой (*B. pubescens*) и кедром (*P. sibirica*) с общей сомкнутостью крон 25%. Высота деревьев изменяется в пределах 8–16 м при средней высоте яруса 9,5 м. Средняя мощность торфяной залежи в пределах ключевого участка составляет 0,4 м, максимальные значения достигают в пределах болота 1,75 м, в пределах заболоченного леса – 1,5 м (Синюткина, Гашкова, 2018). За период 2016–2020 гг. среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции в с. Бакчар (30 км от ключевого участка) изменялась в пределах от - 0,8 °С в 2018 г. до 3,0 °С в 2020 г. со средним значением за 5 лет 1,03 °С. Среднее значение летних температур (июнь-август) составило 16,8 °С с максимумом в 2016 г. (17,7 °С) и минимумом в 2019 г. (16,3 °С). Максимальная сумма осадков за летний период была отмечена в 2018 г. – 322 мм, минимальная в 2020 г. – 177 мм со средним значением 249 мм.

Оценка пространственной неоднородности выполнена с использованием материалов полевых ландшафтных исследований, проведенных на 14 площадках в пределах крайней части болота, заболоченных и суходольных лесов вдоль границы болотного массива и спутниковых данных. Полевые исследования включали геоботанические описания, определение мощности торфяной залежи с использованием контактных измерений и метода георадиолокации, измерения уровня болотных вод. На основе космического снимка Landsat-8 и данных полевых исследований составлена карта геосистем ключевого участка (рисунок 1). Анализ временной динамики проведен с использованием спутниковых данных Sentinel-2. Всего использовано 22 снимка за летний период 2016–2021 гг. Количество снимков в год ограничивалось высокой облачностью, характерной для данной территории и составляло от 1 в 2016 г. и 9 в 2018 г. Для 14 точек полевых исследований (400 м<sup>2</sup>) и контуров 4 геосистем (рисунок 1, геосистемы 1–4) рассчитаны нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI и нормализованный разностный водный индекс NDWI. Выявление взаимосвязей между индексами NDVI и NDWI, показателями растительного покрова (сомкнутость и высота древесного яруса), мощностью торфяной залежи и расстоянием от болотного массива проведено с использованием метода главных компонент.



**Рис. 1.** Карта геосистем ключевого участка (составлена по данным дешифрирования Landsat8, дата съемки 17.07.2018): 1 – кедрово-березовый травяной заболоченный лес; 2 – сосново-березовый травяной заболоченный лес; 3 – осиново-березово-кедровый травяной лес; 4 – березово-сосново-кустарничковое травяно-моховое верховое болото; 5 – травяно-моховое верховое болото; 6 – сосново-кустарничково-моховое верховое болото; 7 – грядово-мочажинное верховое болото.

Территория ключевого участка отличается высокой пространственной неоднородностью мощности торфяной залежи и видового состава древесного яруса. Средняя площадь контура карты геосистем в пределах лесной части ключевого участка составила всего 0,004 км<sup>2</sup>. Лесные геосистемы (№1–3, рисунок 1) занимают примерно равные площади с некоторым преобладанием по площади кедрово-березового травяного заболоченного леса.

Для оценки пространственной неоднородности растительного и водного индексов использованы значения середины июля, когда индексы достигают максимальных значений. Максимальным многолетним средним значением NDVI (0,83) среди точек полевых исследований характеризовался осиново-березово-кедровый травяной лес со средней высотой древесного яруса 16,5 м и сомкнутостью крон 0,6. Минимальное значение NDVI отмечено в пределах березово-сосново-кустарничкового травяно-мохового верховое болото (0,73) с высотой древесного яруса 9,5 м и сомкнутостью крон 0,25. Средние значения NDVI выше в пределах кедрово-березового травяного заболоченного леса (0,82) в сравнении с сосново-березовым травяным заболоченным лесом (0,79). Средние значения NDWI выше в пределах осиново-березово-кедрового травяного леса (0,39) и кедрово-березового травяного заболоченного леса (0,38) в сравнении с сосново-березовым травяным заболоченным лесом (0,36) и болотом (0,34). В ре-

зультате факторного анализа получено, что средние значения индексов NDVI и NDWI для точек полевых исследований находятся в прямой зависимости с проективным покрытием крон, высотой древесного яруса, расстоянием от границы болотного массива, слабая обратная связь наблюдается с мощностью торфяной залежи.

Оценка сезонной динамики растительного и водного индексов проведена для 2018 года, характеризующимся максимальным количеством безоблачных снимков (8 за период 12.06-18.09). Максимальные значения NDVI на всех объектах исследования были отмечены 15 июля и достигали 0,85 в пределах суходольного леса, в кедрово-березовом травяном заболоченном лесу среднее значение составило 0,83, в сосново-березовом травяном заболоченном лесу – 0,80. Снижение значений наблюдается после 9 августа, достигая минимума к 18 сентября. Максимальная амплитуда сезонных колебаний характерна для суходольного осиново-березово-кедровый травяной леса (0,24), минимальные наблюдается на березово-сосново-кустарничковом травяно-моховом верховое болоте (0,10), а также на точках в пределах сосново-березового травяного заболоченного леса (0,10–0,13). Таким образом, амплитуда внутрисезонных колебаний вегетационного индекса может использоваться как показатель доли хвойных пород в составе древесного яруса и индикатор увлажнения растительного покрова. Сезонная динамика водного индекса NDWI несколько отличается от динамики NDVI. Отличия заключаются, во-первых, в отсутствие четкого максимума в середине вегетационного периода. Значительный рост индекса наблюдался в период с 12.06 по 23.06 во время интенсивного прироста листвы деревьев. Максимум среднего значения по всему ключевому участку был отмечен 25 июля, высокие значения сохранялись до начала августа, но на отдельных точках максимальные значения отмечались в разные даты с 23 июня по 9 августа. Во-вторых, наблюдались меньшие различия в амплитуде сезонных колебаний NDWI между разными точками и контурами геосистем. Меньшей амплитудой характеризуется только березово-сосново-кустарничковое травяно-моховое верховое болото (0,09), на остальных участках амплитуда составляет 0,11–0,13 со средним значением 0,12 и не отличается между геосистемами суходольного и заболоченного леса.

Для оценки годовой динамики индексов NDVI и NDWI для точек и контуров в заболоченном лесу было использовано отношение значений заболоченного леса к участку суходольного леса за период 2016–2021 гг. Для большинства точек и обоих контуров геосистем в пределах заболоченного леса было отмечено снижение июльских значений NDVI относительно суходольного леса, что может отражать деградацию растительного покрова в результате увеличения увлажнения в зоне влияния болотного массива. Динамика индекса NDWI заболоченного леса относительно суходольного оказалась менее однозначной. На четырех из семи точек в пределах кедрово-березового травяного заболоченного леса наблюдался положительный тренд индекса NDWI и на трех точках тренд отсутствовал. На отдельных точках в пределах сосново-березового травяного заболоченного леса, наоборот, было отмечено снижение значений NDWI относительно суходольного леса. Для контуров кедрово-березового травяного заболоченного леса наблюдалось увеличение значений NDWI, а для сосново-березового травяного заболоченного леса (№2) наоборот уменьшение. Увеличение значений может объясняться ростом увлажнения на данной территории, а снижение значений снижением меньшим запасом влаги, характерным для хвойных деревьев в сравнении с лиственными и, таким образом, может являться косвенным индикатором увеличения доли хвойных пород и усыхания лиственных в результате подтопления в зоне влияния болотного массива. Действительно, согласно полевым описаниям на точках, характеризующихся снижением и вегетационного и водного индексов, в составе яруса подроста отмечено преобладание хвойных пород (кедра, сосны, ели, пихты) над лиственными (береза) в отличие от древесного яруса, где хвойные породы занимают всего около 30 %, появление новых видов, отсутствующих в верхнем ярусе (пихта), и исчезновение осины. Для участка березово-сосново-кустарничковое травяно-моховое верховое болота характерно не значимое снижение вегетационного и водного индексов относительно суходольного леса.

В результате исследования выявлены закономерности пространственной и временной динамики растительного и водного индексов в пределах окраинной части Бакчарского болотного массива и прилегающих к ней заболоченных и суходольных лесов. Средние значения вегетационного индекса суходольного леса выше в сравнении с заболоченным, но в отдельные даты данная закономерность нарушается в связи со схожими спектральными характеристиками растительного покрова. Анализ сезонной динамики вегетационного индекса показал большие колебания значений в пределах суходольного леса в сравнении с заболоченным. Этот показатель может быть использован как один из критериев разделения геосистем в пределах зоны влияния болотного массива. На участках заболоченного леса и окраинной части болота наблюдается снижение значений вегетационного индекса NDVI относительно суходольного леса за период 2016–2021, что является индикатором увеличения гидроморфной трансформации данных геосистем. Динамика водного индекса NDWI отражает увеличение влагосодержания в растительном покрове на одних участках заболоченного леса и, наоборот, уменьшение на других, вероятно связанное со сменой соотношения хвойных и лиственных видов в составе древесного яруса.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Бабиков Б.В., Кобак К.И. Поглощение атмосферного углекислого газа болотными экосистемами территории России в голоцене. Проблемы заболачивания // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 1(349). С. 6–36.
2. Синюткина А.А., Гашикова Л.П. Оценка состояния окраинных частей Большого Васюганского болота (на примере Бакчарского болотного массива) // Почвы и окружающая среда. 2018. Том 1. № 4. С. 243-255.

## Effect of snow cover depth on the temperature sensitivity of soil respiration during the cold season

Khoroshaev D.A., Kurganova I.N., Lopes de Gerenuy V.O.

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS, Pushchino, Russia

E-mail: [d.khoroshaev@gmail.com](mailto:d.khoroshaev@gmail.com)

Temperature is considered the most significant factor that influences the soil respiration SR magnitude on a global scale as well as on local and ecosystem levels. Temperature sensitivity of SR (often termed as  $Q_{10}$ ) is a factor by which SR magnitude is multiplied when temperature increases by 10°C. Temperature sensitivity of SR is a principal parameter for evaluating the feedback intensity between soil carbon efflux and global warming. It is known that the  $Q_{10}$  value of SR is inversely related to the temperature. At the same time, the variation in estimates of the temperature sensitivity of soil respiration in the low-temperature range sharply increases. Observed climatic changes are expressed in a reduction in the duration of the winter period, an increase in the number of winter thaws and a decrease in snow cover depth. The reduction of the snow period and the deterioration of its thermal insulation properties as a result of winter thaws leads to soil cooling and an increase in the likelihood of more frequent cycles of freezing and thawing in some regions. Thus, the study was aimed on the assessment of the effect of different snow depths on the temperature sensitivity of SR in the cold period of the year under the field manipulation experiment.

The experimental plots are situated on Haplic Luvisols nearby the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Moscow region; 54° 50'N 37° 36'E). The experimental area (50 m<sup>2</sup>) was divided into 24 individual plots (1.8×1.8 m in size). 12 plots were planted with a mixture of legume and cereal seeds. The other 12 plots were bare and regularly weeded during vegetation season. For each land cover type, the following winter treatments were applied: (1) reference, with a natural depth of snow cover, (2) no-frost (simulation of deep snow cover by artificial heat insulation materials), and (3) snow-free (removal of the snow cover). The static closed chamber method was used for measuring of CO<sub>2</sub> flux from soil 1-7 times per week during the period from November to April. The temperature regime was monitored using automatic data loggers DS1921G (Dallas semiconductor, USA). Exponential relationship between the SR rate and the soil temperature at the depth of 1 cm was used for estimation of temperature coefficient  $Q_{10}$ .

We revealed that the variation in soil temperature at 1cm was responsible for 3–49% of SR-rate variability. During the cold season, the  $Q_{10}$  value of SR varied from 2.1 to 18.2. Temperature sensitivity of SR was higher for grassland plots than for bare fallow plots.  $Q_{10}$  values increased with the enhance soil freezing from 3.2 to 18.2 under the grassland and from 2.1 to 5.7 in the bare fallow plots. As a result of winter thaws, the snow cover was disturbed, and melt water formed ice crusts on the soil surface. These processes led to a disruption of gas exchange between the soil and the atmosphere, the accumulation of CO<sub>2</sub> in the soil profile and its release during the spring thawing of the soil (in addition to biological processes). The exclusion of the thawing periods from the calculations significantly reduced the  $Q_{10}$  values of SR: until 6.1 ( $R^2 = 0.7$ ) in the grassland plots and until 8.1 ( $R^2 = 0.8$ ) in the control and snow-free variants. The decrease in the  $Q_{10}$  values for microbial soil respiration in bare fallow plots also decreased and amounted to 3.3 ( $R^2 = 0.3$ ) and 5.0 ( $R^2 = 0.5$ ), respectively.

The results of the study show that the cooling of soils as a result of a decrease in the depth of snow cover is an important factor which effect strongly on the temperature sensitivity of soil respiration over the cold period. The influence of winter thaws on the gas exchange between soil and atmosphere is a significant confusing factor, which can lead to overestimation of the  $Q_{10}$  values.



# Влияние высоты снежного покрова на температурную чувствительность дыхания почв в зимний период

Хорошаев Д.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия  
E-mail: d.khoroshaev@gmail.com

## ВВЕДЕНИЕ

Дыхание почв (soil respiration, SR) представляет собой процесс выделения углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) с поверхности почвы в атмосферу за счет всей совокупности биологических (гетеротрофное и корневое дыхание) и небиологических (физических и/или-химических) источников. Температура считается наиболее значимым фактором, влияющим на величину SR как в глобальном масштабе, так и на локальном и экосистемном уровнях (Bahn et al. 2010; Kurganova et al., 2020). Температурная чувствительность SR является основным параметром для оценки обратной связи между интенсивностью потоков углерода в наземных экосистемах и глобальным потеплением (Zhou et al., 2009). Обычно температурную чувствительность SR выражают через величину  $Q_{10}$ , представляющую собой коэффициент, на который умножается величина SR при повышении температуры на  $10^\circ\text{C}$  (Kirschbaum, 1995). Известно, что величина коэффициента  $Q_{10}$  обратно связана с температурой (Schipper et al., 2014). При этом варьирование оценок температурной чувствительности почвенного дыхания в низкотемпературном диапазоне резко возрастает. Имеются сведения, что это связано как с сезонной сменой микробных сообществ (Monson et al., 2006), так и с процессами заморозки и оттаивания почвенной влаги, которые приводят к увеличению пула лабильного углерода в почве (Курганова, Типе, 2003).

Снежный покров за счет своих теплоизолирующих свойств прерывает прямую связь почвенных и атмосферных температур, обеспечивает постоянство зимнего климата почвы (Zhang, 2005). Наблюдаемые климатические изменения выражаются в сокращении продолжительности зимнего периода, увеличении числа зимних оттепелей и уменьшении снежного покрова (IPCC, 2021). Сокращение снежного периода и ухудшение теплоизоляционных свойств снега в результате зимних оттепелей приводит к охлаждению почв и росту вероятности более частых циклов заморозки и оттаивания почв в отдельных регионах (Hengy, 2008; Kreyling and Henry, 2011). Учитывая существенный вклад зимнего периода в формирование годовой эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв (Kurganova et al., 2020; Schindlbacher et al., 2007; Wang et al., 2010), важно понимать, как будет меняться температурная чувствительность зимнего дыхания почв в контексте наблюдаемых климатических изменений. Цель настоящей работы заключалась в оценке влияния высоты снежного покрова на температурную чувствительность дыхания почвы под луговой растительностью и паром в полевом имитационном эксперименте.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевой имитационный эксперимент проводился на опытных площадях Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Московская обл., г. Пушкино,  $54^\circ49'51.1''\text{N}$   $37^\circ36'18.4''\text{E}$ ). Участок ( $\sim 50\text{ м}^2$ ) с серой лесной среднесуглинистой почвой (Haplic Luvisol) был поделен на 12 квадратных делянок с длиной стороны 1.8 м. Половина делянок была засеяна бобово-злаковой травосмесью. На оставшихся — поддерживался чистый пар. Луговые и парующие делянки чередовались в шахматном порядке. В зимнюю фазу эксперимента (ЗФЭ) проводили имитацию разной высоты снежного покрова.

Схема ЗФЭ включала следующие варианты: (1) Контроль с естественными условиями формирования снежного покрова; (2) Дополнительное утепление почвы с использованием композиции нетканого материала и синтепона для имитации раннего образования стабильного снежного покрова (общая высота изолирующего покрытия около 15 см); (3) Отсутствие снежного покрова за счет его регулярного удаления в течение 1–3 дней после выпадения.

Измерение дыхания почвы проводили с помощью статического камерного метода 1–7 раз в неделю с ноября по апрель в 2014–2016 гг. В качестве камер использовали ПВХ трубы диаметром 11 см и высотой 45 см, которые врезались в почву на глубину 10 см. Определение концентрации  $\text{CO}_2$  в камерах-изолаторах проводили на инфракрасном газовом анализаторе Li-820 (LI-COR, США). Величину эмиссии  $\text{CO}_2$  рассчитывали по формуле:  $R = (C_0 - C_t) \cdot h / t$ , где  $C_0$  – начальная концентрация  $\text{CO}_2$  в камере ( $\text{мг C / м}^3$ ),  $C_t$  – концентрация  $\text{CO}_2$  в камере ( $\text{мг C / м}^3$ ) в момент времени  $t$  (ч),  $h$  – высота камеры (м). Мониторинг температурного режима проводили с помощью автоматических логгеров DS1921G (Dallas semiconductor, США). Расчёт коэффициента  $Q_{10}$  для дыхания почвы осуществляли на основе линейной зависимости логарифма этих величин от температуры почвы ( $T_n$ ) на глубине 1 см:  $\ln(R) = aT_n + b$ , где  $a$  и  $b$  – эмпирические константы. Величина  $Q_{10} = e^{10a}$  показывает во сколько раз увеличивается интенсивность дыхания почвы/экосистемы при увеличении температуры почвы на  $10^\circ\text{C}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Связь интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  из почвы под сеяным лугом и чистым паром с температурой почвы на глубине 1 см описывалась экспоненциальной функцией (Рис. 1.;  $R^2 = 0.03\text{--}0.49$ ), а её теснота зависела от состояния снежного покрова. Наиболее тесная связь наблюдалась в период, предшествующий образованию устойчивого снежного покрова. Так, в контрольном варианте и при удалении снега, которые находились в этот период в одинаковых условиях, величина  $R^2$  составила 0.33–0.85. Формирование стабильного снежного покрова ослабляло связь между эмиссией  $\text{CO}_2$  и температурой почвы как в результате стабилизации её температурного режима, так и образования ледяных корок на поверхности почвы и всплесков дыхания почвы при её оттаивании.

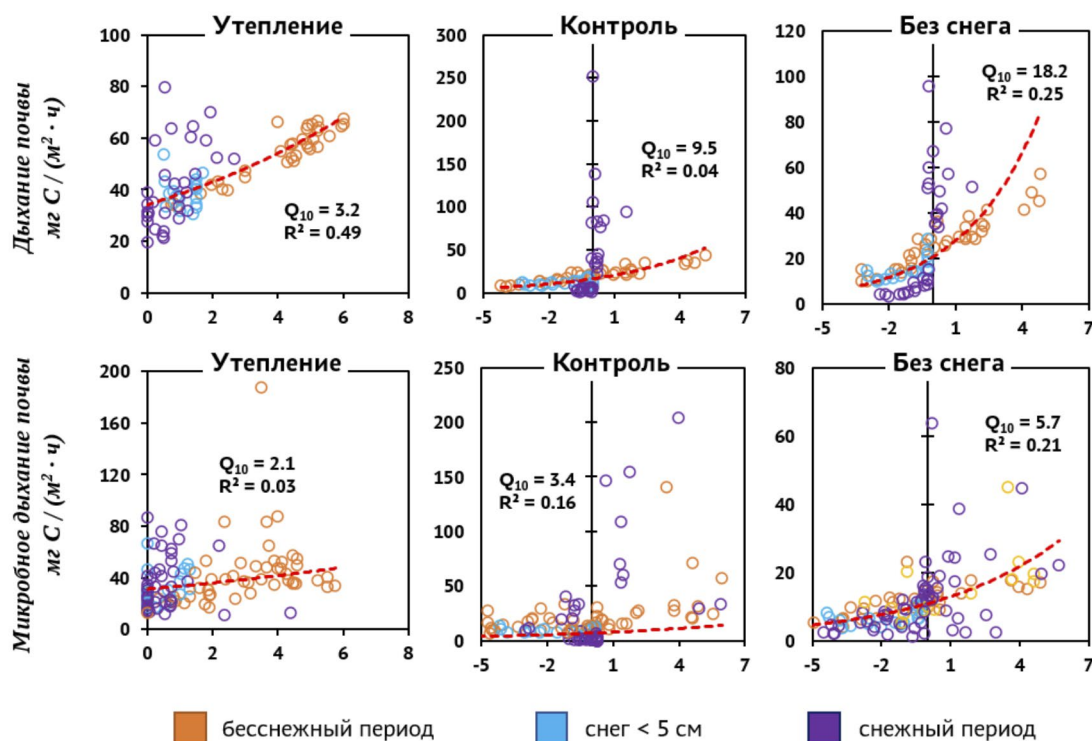


Рис. 1.

Диаграммы рассеяния зависимости дыхания почвы под чистым паром (микробное дыхание почвы) и сеяным лугом (общее дыхание почвы) от температуры почвы на глубине 1 см в 3-х вариантах опыта. На диаграммах представлены данные дыхания почвы за зимний период 2014–2015 гг. и микробного дыхания почвы за зимние периоды 2014–2016 гг.

Величина коэффициента  $Q_{10}$  для дыхания почвы варьировала от 2.1 до 18.2 (Рис. 1.). Температурная чувствительность SR была выше под луговой растительностью, чем под чистым паром, что может указывать на большую величину активного пула углерода в почве, который содержится в свежем органическом веществе, микробной биомассе и отмирающей корневой массе. При уменьшении температуры почвы мы наблюдали увеличение значений  $Q_{10}$  от 3.2 до 18.2 под лугом и от 2.1 до 5.7 — на парующих участках, что согласуется с данными лабораторных наблюдений. Однако, зимние оттепели нарушали целостность снежного покрова, талые воды образовывали на поверхности почвы ледяные корки, что нарушало газообмен между почвой и атмосферой, приводило к накоплению  $\text{CO}_2$  в почвенном профиле и его последующему высвобождению во время весеннего оттаивания почвы. Исключение периодов оттаивания из расчетов привело к снижению величины температурной чувствительности для почвенного дыхания под лугом до 6.1 ( $R^2 = 0.7$ ) в контрольном варианте и до 8.1 ( $R^2 = 0.8$ ) — при удалении снежного покрова. Снижение коэффициента  $Q_{10}$  для микробного почвенного дыхания на участках чистого пара снизилось незначительно и составило 3.3 ( $R^2 = 0.3$ ) и 5.0 ( $R^2 = 0.5$ ), соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показывают, что охлаждение почв в результате снижения высоты снежного покрова приводит к увеличению температурной чувствительности зимнего дыхания почвы, рассчитанного по данным натурных наблюдений. Однако, влияние зимних оттепелей на газообмен между почвой и атмосферой является существенным нарушающим фактором, который может приводить к завышенным оценкам температурного коэффициента  $Q_{10}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Курганова И.Н., Туне Р. Влияние процессов промерзания-оттаивания на дыхательную активность почв // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1095–110
2. Bahn, M., Reichstein, M., Davidson, E.A., Grünzweig, J., Jung, M., Carbone, M.S., Epron, D., Misson, L., Nouvellon, Y., Rouspard, O., Savage, K., Trumbore, S.E., Gimeno, C., Curiel Yuste, J., Tang, J., Vargas, R., Janssens, I.A. Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes // Biogeosciences. 2010. V. 7. № 7. С. 2147–2157. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2147-2010>
3. Henry H.A.L. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes // Clim. Change. 2008. V. 87. № 3–4. С. 421–434. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9322-8>
4. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. : Cambridge University Press, 2021. 3949 с.
5. Kirschbaum M.U.F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage // Soil Biology and Biochemistry. 1995. V. 27. № 6. С. 753–760. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)00242-S](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)00242-S)
6. Kreyling J., Henry H. Vanishing winters in Germany: soil frost dynamics and snow cover trends, and ecological implications // Clim. Res. 2011. V. 46. № 3. С. 269–276. <https://doi.org/10.3354/cr00996>
7. Kurganova, I.N., Lopes de Gerenu, V.O., Khoroshaev, D.A., Myakshina, T.N., Sapronov, D.V., Zhmurin, V.A., Kuddeyarov, V.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends // Eurasian Soil Sci. 2020. V. 53. № 10. С. 1421–1436. <https://doi.org/10.1134/s1064229320100117>
8. Monson, R.K., Lipson, D.L., Burns, S.P., Turnipseed, A.A., Delany, A.C., Williams, M.W., Schmidt, S.K. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition // Nature. 2006. V. 439. № 7077. С. 711–714. <https://doi.org/10.1038/nature04555>
9. Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Glatzel, G., Jandl, R. Winter soil respiration from an Austrian mountain forest // Agric. For. Meteorol. 2007. V. 146. № 3–4. С. 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.06.001>
10. Schipper, L.A., Hobbs, J.K., Rutledge, S., Arcus, V.L. Thermodynamic theory explains the temperature optima of soil microbial processes and high  $Q_{10}$  values at low temperatures // Glob. Change Biol. 2014. V. 20. № 11. С. 3578–3586. <https://doi.org/10.1111/gcb.12596>
11. Wang, W., Peng, S., Wang, T., Fang, J. Winter soil CO<sub>2</sub> efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China // Soil Biol. Biochem. 2010. V. 42. № 3. С. 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.028>
12. Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview // Rev. Geophys. 2005. T. 43. № 4. С. RG4002. <https://doi.org/10.1029/2004rg000157>
13. Zhou, T., Shi, P., Hui, D., Luo, Y. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration ( $Q_{10}$ ) and its implications for carbon-climate feedback // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2009. V. 114. № G2. <https://doi.org/10.1029/2008JG000850>

## Dynamics of decomposition of peat-forming plants in drained and pyrogenic peatlands

Nikonova L.G., Golovatskaya E.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [lili112358@mail.ru](mailto:lili112358@mail.ru)

Research of the processes of transformation of organic matter is importance at the present time. Peatlands are characterized by a low rate of decomposition of organic matter, due to there is a constant accumulation of carbon in the peat deposits. Climate change and anthropogenic impact can vary the rate of decomposition of organic matter. Drained bogs, often subject to fires, which can also affect the rate of decomposition of organic matter in peat deposits during pyrogenic succession of peatlands. The aim of the study was to estimate the dynamics of the rate of decomposition of the organic matter of peat-forming plants in the drained and pyrogenic peatlands.

The studies were conducted on two drained peatlands - "Vasyuganskoye" and "Iksinskoye" (Bakhcharsky district of the Tomsk region). Observation points are located in undisturbed pine-shrub-sphagnum phytocenoses – ryam (56°52'31.7" N 82°48'27.3" E) and on the Drained ryam (56°53'33.3" N 82°51'08.0" E). For the study, one site with a relatively developed degree of pyrogenic succession on the Iksinskoye peat bog was selected: a restored pine-shrub-sphagnum phytocenosis (56°51'42.1" N 83°17'53.0" E) The selected study points differ both in vegetation cover and are characterized by different hydrothermal conditions.

The next species of peat-forming plants were investigated: *Sphagnum fuscum* and *Chamaedaphne calyculata*. Also was investigated a mixed sample composed of *Sphagnum fuscum* (60%) and *Chamaedaphne calyculata* (40%). Determination of the rate of decomposition of plant residues was carried litter-bag method.

Research showed that the slowest decomposition rate has *Sphagnum fuscum* (22 % loss mass). The smallest role in the formation of peat influence *Chamaedaphne calyculata* (58% loss mass). At the first stages, the rate of decomposition under any conditions occurs most actively. In the conditions of a drained peat deposit, decomposition occurs more intensively. The study showed a change in the content of ash elements during the destruction of plant residues, lower losses are characteristic of *Sphagnum fuscum*.

In this way, the impact of anthropogenic activity (drainage) and post-pyrogenic recovery of peatlands leads to a change in dynamics of the process of decomposition of plant residues: accelerates decomposition under conditions of drainage and negative effect on the decomposition rate of *Sphagnum fuscum* and the mixed sample in post-pyrogenic conditions, reducing by 1.5-9%

## Динамика разложения растений-торфообразователей в осушенных и пирогенных торфяниках

Никонова Л.Г., Головацкая Е.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [lili112358@mail.ru](mailto:lili112358@mail.ru)

Изучение процессов трансформации органического вещества имеет особое значение в условиях современного состояния экосистем. Болотные экосистемы являются уникальными, за счет своей способности на долгое время исключать углерод из круговорота веществ, замедляя, таким образом, возврат CO<sub>2</sub> в атмосферу [1,2]. По площади заболоченных территорий Россия занимает первое место в мире. Снижение УБВ, повышение температуры торфяной залежи способствуют ускорению разложения растительных остатков, а следовательно, возврату углерода в круговорот веществ [3,4,5]. К таким последствиям может привести осушение болотных массивов, зачастую приводящее к возникновению пожаров, широко известных негативными последствиями.

Целью работы являлась оценка динамики разложения органического вещества растений-торфообразователей в условиях торфяной залежи осушенных и пирогенных торфяников.

Исследования проводились в Бакчарском районе Томской области на олиготрофных болотах территории стационара «Васюганье» (ИМКЭС СО РАН). Конкретными пунктами исследования послужили: ненарушенный сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз (Естественный рям - 56°52'31.7" N 82°48'27.3" E) и сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз, расположенный около осушительного канала (Осушенный рям – 56°53'33.3" N 82°51'08.0" E), данные фитоценозы расположены на территории участка № 5 «Васюганского» торфяного месторождения; а также исследования проводились в условиях сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза с хорошо выраженным подростом сосны (Восстановленный рям (Гарь) – 56°51'42.1" N 83°17'53.0" E) «Иксинского» торфяного месторождения. В 1998 году на осушенном участке Иксинского болота произошло выгорание значительной территории, в результате чего были полностью уничтожены растительный покров с приповерхностной толщи торфа на болотах, а также почвенный покров в заболоченных и автоморфных лесах [6].

Выбранные пункты исследования имеют ряд отличительных особенностей, которые с большой вероятностью могут повлиять на трансформацию органического вещества в торфяной залежи [7]. При помощи автономных измерителей профиля температуры АИПТ, ИМКЭС СО РАН [8] оснащенных датчиками уровня болотных вод (УБВ) было выявлено, что Осушенный рям характеризуется самым низким УБВ и самой низкой средней температурой на глубине 15 см среди изучаемых фитоценозов. Более прохладными и обводненными условиями отличалась Гарь.

Исследовали скорость разложения растительного опада основных растений-торфообразователей типичных для олиготрофных болот: листья кустарничка *Chamaedaphne calyculata* Moench. – кассандра обыкновенная, очес мха *Sphagnum fuscum* Klinggr. – сфагнум бурый. Кроме отдельных видов растений, подготавливался смешанный образец представляющий смесь исследуемых растений в соответствии с



долей каждого вида в растительном опаде наиболее типичного естественного фитоценоза, состоящий из *Sphagnum fuscum* (60%) и *Chamaedaphne calyculata* (40%).

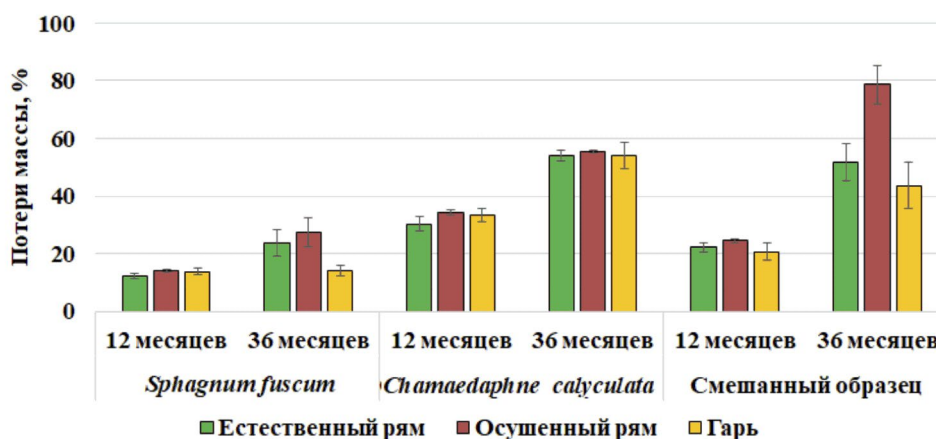
Для определения скорости разложения применялся метод закладки растительных остатков в торф [3]. Для этого в лабораторных условиях собранные растения высушивали до воздушно-сухого веса, и раскладывали в нейлоновые мешочки по 15 г. Приготовленный растительный материал закладывали в торфяную залежь в октябре 2018 года, на глубину 10 см от поверхности в трехкратной повторности. Образцы с растительным материалом извлекли через 12, 36 месяцев после начала эксперимента. В образцах определяли убыль массы растительного вещества весовым методом, содержание зольных элементов методом сухого озоления [9]. В исходных образцах также определяли содержание общего углерода и азота [10].

На скорость разложения растительного опада оказывает влияние множество факторов, однако согласно модельным исследованиям разложения органического вещества растительных остатков [11], наиболее сильное влияние оказывает химический состав самих растительных остатков. Исследуемые растения по химическому составу (табл. 1) можно разделить на 2 группы – наиболее благоприятными характеристиками для микроорганизмов-деструкторов, выраженные самым высоким содержанием углерода, азота, зольных элементов и наименьшим соотношением C/N характеризуются листья *Chamaedaphne calyculata*. Вторую группу образуют *Sphagnum fuscum*, олес которого обладает менее благоприятным для деятельности микроорганизмов химическим составом. Смешанный образец по химическому составу занимает промежуточное положение между его отдельными компонентами, но обладает достаточно высоким соотношением C/N, что также может замедлять активность микроорганизмов-деструкторов.

**Таблица 1.** Исходный химический состав растений-торфообразователей.

Растение	Содержание			
	Зольность, %	C, %	N, %	C/N
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	2,49	48,89	1,38	35
<i>Sphagnum fuscum</i>	1,77	43,77	0,75	58
Смешанный образец	1,89	45,83	0,81	56

В результате проведенных исследований по разложению опада основных растений-торфообразователей, выявлено, что наиболее интенсивно потери массы происходят в первый год разложения для всех образцов (в среднем 56% от потерь массы за 3 года) (рис 1.). Активное разложение для всех растительных образцов как через 12, так и через 36 месяцев после начала эксперимента фиксировалось в условиях Осушенного рья. Потери массы в течение трех лет в среднем для *Chamaedaphne calyculata*, *Sphagnum fuscum* и Смешанного образца составляют 58, 22, и 55% соответственно, что не противоречит проведенным ранее исследованиям – наиболее устойчивым к разложению является *Sphagnum fuscum*, наименее – *Chamaedaphne calyculata* [11].



**Рис. 1.**

Потери массы органического вещества растений-торфообразователей в торфяной залежи исследуемых болот за 12 и 36 месяцев разложения.

Как и в модельном эксперименте [11], при смешивании опада проявляется неаддитивный эффект – смешанный образец по потерям массы занимает промежуточное положение между показателями его отдельных компонент, как через 12, так и через 36 месяцев деструкции. В зависимости от условий (м-

ста закладки) эксперимента наблюдается разная скорость потери массы у разных растений. Максимальные потери массы получены для *Sphagnum fuscum* и Смешанного образца в условиях Естественного и Осушенного ярмов, по-видимому, это наиболее оптимальные условия для трансформации этих образцов. В тоже время для *Chamaedaphne calyculata* отличия условий не выражены так явно (рис. 1). Минимальная потеря массы *Sphagnum fuscum* получена в условиях Восстановленного ярма, как и для Смешанного образца на 60 % состоящего из *Sphagnum fuscum*.

В ходе процессов деструкции происходит изменение содержания зольных элементов. Наибольшие потери зольных элементов характерны для листьев *Chamaedaphne calyculata* в условиях Естественного ярма (потери составили 82% от исходного содержания зольных элементов). Наименьшие потери – *Sphagnum fuscum* (потери зольных элементов за три года составили не более 9% от исходного содержания), который известен своей способностью к биоаккумуляции [12, 13]

В целом влияние антропогенной деятельности (осушение и пирогенное воздействие) на фитоценозы приводит к изменениям в динамике деструкционных процессов: ускорению процесса трансформации растительных остатков в условиях осушенных болот, а также замедлению трансформации *Sphagnum fuscum* и Смешанного образца в условиях торфяных залежей болот подверженных пирогенному воздействию, снижая ее на 1,5-9%.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Тюремнов С.Н. Торфяные месторождения. М.: Недра. 1976. 487 с.
2. Inisheva L.I., Szajdak L., Sergeeva M.A. Dynamics of Biochemical Processes and Redox Conditions in Geochemically Linked Landscapes of Oligotrophic Bogs // *Eurasian Soil Science*. 2016. V. 49. №. 4. P. 466–474.
3. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л. : Наука ЛО, 1978. 172 с.
4. Hogg E. H., Lieffers V. J., Wein R. W. Potential Carbon losses from peat profiles: effects of temperature, drought cycles, and fir. *Ecological Applications*, 1992, Vol. 2, no 3, pp. 298-306
5. Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К. Продукционно-деструкционные процессы в болотных экосистемах Васюганья // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2013. Т. 4. №. 1. С. 1–9.
6. Базанов В.А., Егоров Б.А., Лыготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья Икса-Шегарка) // *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития*. /под ред. Чл-корр. РАН М.В. Кабанова. – Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. – Томск, 2002, С. 190-195.
7. Никонова Л. Г., Головацкая Е. А. Оценка скорости разложения растений-торфообразователей в осушенных и пирогенных торфяниках // *Enviromis 2020*. – 2020. – С. 227-230.
8. Кураков С.А., Крутиков В.А., Ушаков В.Г. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ // *Приборы и техника эксперимента*. 2008. № 5. С. 166-167.
9. Дурынина Е.П., Егоров В.С. *Агрохимический анализ почв, растений, удобрений*. М.: МГУ. 1998. 113 с.
10. Воробьева Л.А., Ладонин Д.В., Лопухина, О.В., Рудакова, Т.А., Кирюшин А.В. *Химический анализ почв. Вопросы и ответы*. М.: МГУ. 2012. 186 с.
11. Никонова Л.Г., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О. Жмурин В.А., Головацкая Е.А. Влияние абиотических факторов на разложение опада растений-торфообразователей в инкубационном эксперименте // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2019. № 46. С. 148-170. DOI: 10.17223/19988591/46/8
12. Говоруха В. В. Использование мхов для оценки загрязнения окружающей среды ртутью // *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина*. – Томск, 2017. – Т. 1. – С. 720–722.
13. Косых Н. П., Миронычева-Токарева Н. П., Вишнякова Е. К. Биогеохимический круговорот в болотных экосистемах // *Болота и биосфера: материалы Седьмой Всероссийской с междунар. участием Научной школы*. Томск, 13-15 сентября 2010 г. – Томск: изд-во ЦНТИ, 2010. – С. 52–57.

# Многолетняя пространственно-временная изменчивость потоков метана на примере южнотаежного черноольшаника в Тверской области

Ильясов Д.В.<sup>1</sup>, Глухова Т.В.<sup>2</sup>, Вомперский С.Э.<sup>2</sup>, Суворов Г.Г.<sup>2</sup>, Головченко А.В.<sup>3</sup>, Манучарова Н.А.<sup>3</sup>, Степанов А.Л.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>2</sup>Институт лесоведения РАН, Успенское, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: [d\\_ilyasov@ugrasu.ru](mailto:d_ilyasov@ugrasu.ru)

**П**отоки метана (1Q-медиана-3Q,  $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), измеренные в течение 8 лет (1995-1998, 2013-2016 гг.) в черноольшовом болоте «Петушиха» борео-неморальной зоны Европейской России составили 0.01–0.03–0.09, 0.02–0.06–0.19, 0.04–0.14–0.43 и 0.10–0.21–0.44 на сайтах EL (микрорывышения), FL (ровная поверхность), DEP (микроронизения) и STR (водные поверхности ручьев и протоки) соответственно. Наибольший вклад в изменчивость потоков вносила сезонная вариабельность (уровень относительной вариабельности потоков - непараметрический аналог коэффициента вариации), которая составила 144%, затем пространственная - 102% и наименьшая - межгодовая 75 %. Как пространственная, так и временная вариабельность потоков метана на различных элементах микро рельефа неоднородна: в наибольшей степени изменчивы «нестабильные» по гидрологическим условиям сообщества, такие как FL и DEP, а в наименьшей - наиболее дренированные EL и наиболее увлажненные STR. Полученные результаты величин потоков и их пространственной и временной изменчивости согласуются с литературными данными и могут быть использованы для оптимизации процесса планирования исследований бюджета метана спорадических источников, таких как заболоченные леса. Это особенно актуально для адекватной оценки роли потоков в формировании бюджета метана, особенно в условиях меняющегося климата.

## Spatio-temporal variability of methane fluxes in boreo-nemoral alder swamp (European Russia): results of eight years of observations

Ilyasov D.V.<sup>1</sup>, Glukhova T.V.<sup>2</sup>, Vompersky S.E.<sup>2</sup>, Suvorov G.G.<sup>2</sup>, Golovchenko A.V.<sup>3</sup>, Manucharova N.A.<sup>3</sup>, Stepanov A.L.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Forest Science RAS, Uspenskoe, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Russia

E-mail: [d\\_ilyasov@ugrasu.ru](mailto:d_ilyasov@ugrasu.ru)

**Introduction.** Methane is the second most important greenhouse gas [1]: its contribution to the increase in the average atmospheric temperature is 13–25%, considering the 100-year global warming potential [2]. The largest natural source of methane flux into the atmosphere, estimated at 110–170 Tg  $\text{CH}_4 \text{ yr}^{-1}$  [5], is wetlands.

The study of the mechanisms of functioning of wetlands as components of the atmospheric methane budget is necessary for a deeper understanding of their role in the process of climate change [10–12]. Different types of wetlands have not been studied with the same degree of detail, since attention was primarily paid to the most widespread wetlands, i.e., those that undoubtedly contribute the most to the methane budget of wetlands. However, for a full understanding of the role of wetlands in the global methane budget, it is also necessary to consider such ecosystems, that can be characterized by significant variability of  $\text{CH}_4$  fluxes in space or time, that is, a periodic spatial or temporal shift of methane uptake to its emission. Examples of such ecosystems are periodically flooded floodplains, waterlogged forests of the boreal zone, forests with periodic excessive moistening, etc. Swamps are characterized by extremely high heterogeneity of methane fluxes both in space and time, which makes it difficult to obtain adequate estimates of annual emissions. This is due to specific physicochemical (abundance of nutrients, acidity, redox conditions), hydrological (periodic flooding and drying), topological (microrelief and nanorelief) and other conditions, which significantly complicates their

study and leads to ambiguous results, especially for short-term field studies. Therefore, obtaining adequate estimates of methane fluxes in waterlogged and/or periodically waterlogged forests is impossible without considering their seasonal, interannual, and spatial variability.

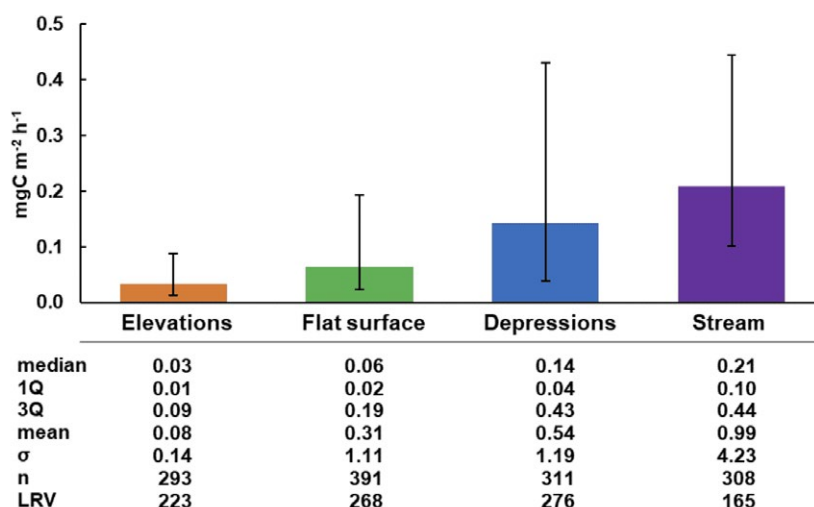
The aim of this work is the assessment of spatio-temporal variability of methane fluxes in a tall-herb and fern black alder forest located in the boreo-nemoral zone of European Russia [58].

**Materials and Methods.** The studies were carried out summer and autumn periods 1995–1998 and 2013–2016 on alder swamp "Petushikha" (N56°10'15", E32°08'16") in the southern taiga zone of European Russia. The period from June to October in the southern taiga corresponds to summer (June-August) and the first half of autumn (September-October). The composition of the stand is spruce-black alder forest with birch admixture, the average age of black alder is 100 years, spruce – 94 years. Four layers represent the vegetation: tree, shrub, herbaceous and mossy.

The soils of the black alder swamp "Petushikha" are *Fibric Histosols*, the thickness of peat deposits underlain by loams is from 2.0 to 3.7 m. The peat had a slightly acidic reaction; the pH of the salt extract varied from 5.3 to 5.6. The ash content differed significantly: in layers of 0–30, 30–150, and 150–370 cm, it was 13–19, 10–12, and 14–29%, respectively, which is explained by the conditions of the introduction of mineral particles. The carbon content in the studied peat soil reaches 51%. According to the botanical composition, the type of peat is identified as woody eutrophic.

Methane fluxes were measured from June to October in 1995–1997, from May to September in 1998, from August to October in 2013, from July to October in 2014, and from June to October in 2015 and 2016 on four key elements of the microrelief: 1) depressions (DEP, depth -5...-8 cm); 2) flat surface (FL; the average level of the flat surface was taken as the surface zero for the depth of depressions and the height of elevations); 3) micro-elevations (EL, h = 15-25 cm); 4) water surfaces (STR, streams and channels). In 1995–1998, the CH<sub>4</sub> concentration was measured on a Chrom-5 gas chromatograph (Laboratory instruments, Czech Republic) equipped with two flame ionization detectors (carrier gas – nitrogen, sorbent – Porapak Q). In 2013–2016, the measurements were carried out on a Kristall-2000 M gas chromatograph (Chromatec, Russia) equipped with two flame ionization detectors (carrier gas – helium, sorbent – Porapak Q).

**Results.** The results of statistical generalization of all obtained methane fluxes for 4 sites are shown in Figure 1. According to the Kruskal-Wallis test (total n=1172, p < 0.01), medians of fluxes differ significantly for relief elements (sites). The smallest fluxes (1Q-median-3Q, mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) are typical for elevations (0.01–0.03–0.09; EL), somewhat larger for a flat surface (0.02–0.06–0.19; FL) and the largest for depressions (0.04–0.14–0.43; DEP) and water surfaces (0.10–0.21–0.44; STR).



**Figure 1.** Medians (bars), 1Q and 3Q (lower and upper whiskers, respectively) of measured CH<sub>4</sub> fluxes (mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), and their basic statistics at 4 sites in alder swamp Petushikha. Statistic difference between medians was checked using the Kruskal-Wallis test (total n=1172); p < 0.01 for all cases. The level of relative variability (LRV) is defined as one half of interquartile range divided by median of methane flux sample and multiplied by 100% (a nonparametric analog of coefficient of variation).

The level of relative flux variability (LRV, %) was chosen as a non-parametric analogue of the coefficient of variation [65] and calculated by the formula:

$$LRV = \frac{IQR}{2 \times m} \times 100, (3)$$

where LRV – the relative flux variability in %; IQR – the interquartile range (mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); m – the median flux (mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). The level of relative flux variability (LRV) increases in the STR-EL-FL-DEP sequence and



comprises 165, 223, 268, and 276%, respectively. The smallest LRV is characteristic of STR: it turned out to be less than that observed at DEP which is the site closest in terms of moistening conditions. At the FL and DEP sites, the relative variability is almost identical and differs slightly from that at the EL site.

The spatial variability (spLRV – Table 1) was: i) high (~220%) when high precipitation combines with high temperature; ii) low (~50%) when high precipitation combines with low temperature; iii) medium (~70-120%) in other cases.

**Table 1.**

Medians of methane fluxes (mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), precipitation and air temperature for 1995-1998 and 2013-2016.

Year	1995	1996	1997	1998	2013	2014	2015	2016	Mean
spLRV, %	119	73	95	53	80	75	73	193	105
Median CH <sub>4</sub> flux, mgC m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	0.09	0.11	0.08	0.18	0.46	0.05	0.04	0.08	0.09
Precipitation, mm	706	593	739	917	682	532	543	803	689
Summer air temperature, °C	14.0	12.8	12.9	13.0	14.1	13.5	13.5	13.7	13.4

The average (by sites) relative seasonal flux variability (Table 2) increases in the STR-FL-EL-DEP sequence and comprises 105, 111, 168, and 190%, respectively. The average sLRV was 144%, which exceeds the mean spatial variability (spLRV) by almost one and a half times.

sLRV, %									Mean	Total mean
Site/Year	1995	1996	1997	1998	2013	2014	2015	2016	Mean	Total mean
EL	767	94	78	76	101	68	64	98	168	
FL	183	78	97	91	40	216	57	125	111	144
DEP	78	99	131	115	48	777	95	180	190	
STR	74	54	108	45	139	294	79	45	105	
Mean	275	81	104	82	82	338	74	112		

**Table 2.**

sLRV (level of relative variation, %) of methane fluxes during the season. Calculated for all sites (EL, FL, DEP, STR) within individual measurement years. The colors show the sLRV gradation: green - ≤100%, orange 100–200%, dark orange >200%.

The average annual variability aLRV across all sites was 75%, which is lower than the mean spatial variability spLRV (105%) and significantly lower than the intraseasonal sLRV (144%). However, for different sites, the strategy for planning field experiments and further spatio-temporal data interpretation may be different. For example, highly variable both during the season and over the years FL (111 and 93%, respectively) and DEP (190 and 113%, respectively) sites need to be studied in more detail (more flux measurements during the season and over the years for better data availability), in some cases sacrificing sites with more stable moisture conditions, such as EL and STR. In summary, it can be noted that hydrologically variable over time sites require more detailed study than the rest.

	aLRV, %				Mean	n (years)	years
	EL	FL	DEP	STR			
May	34	39	32	1	27	2	1996,1998
June	43	118	91	50	76	6	1995-1998, 2015,2016
July	20	132	63	112	82	7	1995-1998, 2014-2016
August	43	53	46	35	44	8	1995-1998, 2013-2016
September	82	141	183	46	113	8	1995-1998, 2013-2016
October	52	77	262	63	113	7	1995-1997, 2013-2016
Mean Total	46	93	113	51			
		75					

**Table 3.**

Interannual monthly variability of methane fluxes aLRV (level of relative annual variation, %) for 8 years of observations (1995–1998 and 2013–2016). Calculated with division by microrelief elements (sites EL, FL, DEP, STR). The colors show the aLRV gradation: green - ≤50%, orange 50–100%, dark orange >100%.



**Conclusion.** We suggest that the combination of high amount of precipitation and relatively low average temperature over the summer results in lower spatial variability because of “smoothing out” differences in moisture conditions among microrelief elements. A large amount of precipitation and a high average temperature over the summer lead to an increase in the spatial heterogeneity of methane fluxes to a greater extent than a small amount of precipitation and a low temperature over the summer. The seasonal variability of fluxes depends to the greatest extent on the number of extreme meteorological conditions: droughts or heavy precipitation can dramatically change the magnitude of methane fluxes in short periods of time, which significantly increases the variability of fluxes. Increasing the frequency of observations during weather extremes and adequate planning of the number and location of observation sites is necessary to obtain representative estimates of the magnitude and variability of methane fluxes from sporadic sources.

#### REFERENCES:

1. Hiraishi, T.; Krug, T.; Tanabe, K.; Srivastava, N.; Baasansuren, J.; Fukuda, M.; & Troxler, T. G. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC: Switzerland, 2014.
2. Rodhe, H.A. Comparison of the Contribution of Various Gases to the Greenhouse Effect. *Science* 1990, 248, 1217–1219. doi: 10.1126/science.248.4960.1217
3. Fung, I.; John, J.; Lerner, J.; Matthews, E.; Prather, M.; Steele, L. P.; & Fraser, P. J. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle. *J of Geophys Res–Atmospheres* 1991, 96(D7), 13033–13065. doi: 10.1029/91JD01247
4. Bartlett, K.B.; Harriss, R.C. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere* 1993, 26(1-4), 261–320. doi: [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90427-7](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90427-7)
5. Gedney, N.; Cox, P.M.; Huntingford, C. Climate feedback from wetland methane emissions. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31(20), 1–4. doi: 10.1029/2004GL020919
6. Zhang, Z.; Zimmermann, N.E.; Stenke, A.; Li, X.; Hodson, E.L.; Zhu, G.; Poulter, B. Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change. *P. Natl. A. Sci.* 2017, 114(36), 9647–9652. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1618765114>
7. Hytteborn, H.; Maslov A.A.; Nazimova, D.I.; Rysin, L.P. Boreal forests of Eurasia. In: *Ecosystems of the world*. Andersson F.A, Eds.; Elsevier: Amsterdam (NL), 2005; pp. 23–99.
8. Sabrekov, A.F.; Runkle, B.R.; Glagolev, M.V.; Kleptsova, I.E.; Maksyutov, S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH<sub>4</sub> flux upscaling. *Environ. Res. Lett.* 2014, 9(4), 045008. doi: 10.1088/1748-9326/9/4/045008

## Temporal variability of carbon dioxide, sensible and latent heat fluxes in forests and peatland ecosystems

Satosina E.M., Olchev A.V.

Lomonosov Moscow State University, Russia  
E-mail: [lisan.sat@gmail.com](mailto:lisan.sat@gmail.com)

Forest and moor ecosystems occupy large areas in the northern hemisphere, covering about 31% of the land surface. They perform many biospheric functions, in particular, by regulating the exchange of energy, water vapor, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and other greenhouse gases between the atmosphere and the earth's surface, thereby actively influencing the climate system (2). Any changes and disturbances in the structure and functioning of forest and moor ecosystems associated with both natural and anthropogenic factors lead to changes in their radiation, heat and water balance and, as a result, affect the atmosphere. It is obvious that such influence can change depending on weather and climatic conditions, landscape structure, terrain, vegetation and soil cover (3), (5).

Given the significant role of greenhouse gases in modern climate change, there is an urgent need to study the spatial and temporal variability of greenhouse gas fluxes in forest and moor ecosystems, as well as to analyze the possible consequences of the impact of anthropogenic disturbances of these ecosystems on the heat, water and carbon balance of the earth's surface (1),(4).

Currently, the network of permanent observation stations FLUXNET (<https://fluxnet.fluxdata.org/>) is used for global monitoring of greenhouse gas fluxes between the earth's surface and the atmosphere. The stations of this network operate according to a unified methodology and using standardized equipment, which ensures good comparability of the obtained experimental data around the world. The study of greenhouse gas fluxes in forest and peatland ecosystems in Russia until recently was mostly episodic (2). In this regard, the forest poly-

gon in the Central Forest State Nature Biosphere Reserve in the Tver region can be considered a unique experimental station, since four stations for monitoring greenhouse gas fluxes in different types of plant communities, including forest ones, are currently operating on a permanent basis. ecosystems, raised bogs and clearcut areas as an example of an anthropogenically disturbed forest ecosystem. This gives researchers a unique opportunity to conduct a comprehensive comparison of the contribution of different types of forest and wetland ecosystems, including anthropogenically disturbed ones, to greenhouse gas fluxes between the earth's surface and the atmosphere.

#### REFERENCES:

1. Olchev A.V., Avilov V.K., Baibar A.S., et al. *Forests of European Russia in a changing climate*. - Association of Scientific Publications KMK Moscow., 2017. - 270-276 p.
2. Olchev A.V. *Fluxes of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in forest ecosystems under changing climate conditions (assessment using mathematical models): Cand. ... dr. biol. Sciences: Moscow, 2015. - 306 p.*
3. Bonan G.B., Pollard D., Thompson S.L. *Effects of boreal forest vegetation on global climate // Nature*. - 1992. - Vol. 359.—P. 716–718.
4. Brovkin V., et al. *Global biogeophysical interactions between forest and climate // Geophysical Research Letters*. - 2009. - Vol. 36.- L07405
5. Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A.: *Energy and CO<sub>2</sub> exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga., Agricultural and Forest Meteorology 265 (2019) 252–268 P.*

## Временная изменчивость потоков диоксида углерода явного и скрытого тепла в лесных и болотных экосистемах

Сатосина Е.М., Ольчев А.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: [lisan.sat@gmail.com](mailto:lisan.sat@gmail.com)

В северном полушарии лесные и болотные экосистемы занимают обширные территории и покрывают 31% поверхности суши. Они выполняют множество биосферных функций, в частности регулируя процессы обмена энергией, водяным паром, диоксидом углерода (CO<sub>2</sub>) и другими парниковыми газами между атмосферой и земной поверхностью, тем самым активно воздействуя на климатическую систему [2]. Любые изменения и нарушения структуры и функционирования лесных и болотных экосистем, связанные как с природными, так и с антропогенными факторами приводят к изменению их радиационного, теплового и водного баланса и, как следствие, оказывают влияние на атмосферу. Очевидно, что подобное влияние может изменяться в зависимости от погодных и климатических условий, структуры ландшафта, рельефа местности, растительного и почвенного покрова [3], [5].

Учитывая значительную роль парниковых газов в современных изменениях климата, существует неотложная необходимость исследования пространственной и временной изменчивости потоков парниковых газов в лесных и болотных экосистемах, а также анализа возможных последствий влияния антропогенных нарушений этих экосистем на тепловой, водный и углеродный баланс земной поверхности [1], [4]

Целью данной работы является оценка и сопоставление временной изменчивости потоков диоксида углерода, явного (H) и скрытого тепла (LE) в различных типах лесных и болотных экосистем по результатам измерений методом турбулентных пульсаций (eddy covariance).

Объектами исследования для оценки временной изменчивости потоков были выбраны: свежая сплошная вырубка (рубка производилась в апреле 2016 г.), ненарушенный заболоченный еловый лес, ненарушенный смешанный лес, а также верховое болото Старосельский мох. Все объекты расположены в зоне рационального природопользования ЦГТПБЗ в Тверской области.

Результаты проведенного анализа показали, что внутригодовая изменчивость потоков H и LE на всех исследуемых объектах характеризуется хорошо выраженным сезонным ходом. Динамика потоков тепла в основном определялась различиями в радиационном балансе исследуемых участков, свойствами почвы, глубиной залегания грунтовых вод, и биофизическими свойствами растительного покрова, определяющими транспирационную потерю влаги растениями. После перехода среднесуточных значений температуры через 0°C с ростом радиационного баланса (конец марта – начало апреля) происходит

устойчивое увеличение  $H$  и  $LE$ , при этом среднесуточные значения  $LE$  в несколько раз превышают  $H$  для всех выбранных растительных сообществ.

В апреле - июне значения  $LE$  на болотном массиве существенно превосходят значения  $LE$  в обеих лесных экосистемах и на вырубке (рис. 1В) при близких значениях радиационного баланса, что прежде всего обусловлено значительной обводненностью болота в этот период. На фоне постепенного снижения уровня болотных вод к середине лета наблюдается постепенное уменьшение  $LE$  на болоте и рост  $H$ . Максимальные значения  $H$  в мае и первую половину лета наблюдались на сплошной вырубке главным образом из-за почти полного отсутствия растительности после проведения лесозаготовительных мероприятий. После начала активного возобновления растительности на вырубке во вторую половину лета величины  $H$  и  $LE$  на вырубке почти сравнялась со значениями потоков в ненарушенных лесных экосистемах. Отношение Боуэна ( $\beta=H/LE$ ) весной характеризуется устойчивой тенденцией к росту во всех растительных сообществах. Максимальные значения  $\beta$  отмечаются на вырубке ( $\beta=1,4$ ). Начиная с середины мая тенденция  $\beta$  к росту сменяется устойчивой тенденцией к снижению. С середины июля по конец сентября для всех объектов значения  $\beta$  меняются достаточно слабо, варьируя от 0,2 до 0,4. Таким образом,  $LE$  для всех типов исследуемых экосистем превышали  $H$  в летний период, благодаря большому количеству осадков, обеспечившему оптимальные условия почвенного увлажнения и высокую скорость транспирации древесной и травянистой растительности.

Сезонный ход потоков  $CO_2$  и его составляющих также характеризовался большой временной изменчивостью, определяемой изменением приходящей солнечной радиации, температурой воздуха, почвенным увлажнением, структурой и свойствами растительности, и т. д. В период с мая по сентябрь верховое болото и обе ненарушенные лесные экосистемы устойчиво поглощали  $CO_2$  из атмосферы, тогда как на сплошной вырубке преобладала эмиссия  $CO_2$  в атмосферу. Как во влажном еловом, так и в смешанном лесу максимальное поглощение  $CO_2$  наблюдалось в июне и составляло около  $-2,5$  гС/м<sup>2</sup> в день, тогда как в этот период на болоте поглощение  $CO_2$  не превышало  $1,0$  гС/м<sup>2</sup> в день. Во вторую половину лета на фоне постепенного снижения поглощения  $CO_2$  лесными экосистемами поток  $CO_2$  на болоте продолжал расти, достигнув максимума в июле - августе ( $-1,5$  гС/м<sup>2</sup> в день). Максимальные скорости эмиссии  $CO_2$  на сплошной вырубке приходились на начало августа, достигая  $4,3$  гС/м<sup>2</sup> в день. Начиная с октября, все исследуемые экосистемы на фоне снижения скорости фотосинтеза растительности служили источником  $CO_2$  для атмосферы. Максимальные интегральные значения эмиссии  $CO_2$  в атмосферу за весь период наблюдений отмечались на вырубке ( $614$  гС/м<sup>2</sup> за период), а максимальное интегральное поглощение  $CO_2$  - во влажном ельнике ( $-196$  гС/м<sup>2</sup> за период).

Что касается суточного хода потоков  $H$ ,  $LE$  и  $CO_2$ , то на исследуемых объектах он определялся главным образом дневным ходом радиационного баланса и отличался лишь по наблюдаемым максимальным значениям, и по времени наступления максимума. В июле при близких значениях радиационного баланса в лесных и болотных экосистемах, а также на вырубке, потоки  $LE$  имели достаточно высокие значения, что может быть связано с оптимальными условиями почвенного увлажнения в исследуемых экосистемах, и как следствие высокими значениями транспирации растительного покрова. Максимальные значения потоков  $LE$  наблюдались в послеполуденное время (около 15 часов), в то время как максимум  $H$  был сдвинут к полудню. В ночное время во всех исследуемых экосистемах при отсутствии фотосинтеза отмечалась устойчивая эмиссия  $CO_2$  в атмосферу. На сплошной вырубке наблюдались самые высокие значения эмиссии, достигающие максимальных значений около полуночи. Минимальные ночные потоки наблюдались на болоте. В дневное время на фоне увеличения приходящей солнечной радиации и температуры поглощение  $CO_2$  растительным покровом было максимальным, составляя во влажном ельнике в дневные часы в среднем за месяц около  $11$  мкмоль/(м<sup>2</sup>с). При солнечной погоде и высокой дневной температуре воздуха величина потока  $CO_2$  влажном ельнике достигала в дневные часы  $16,5$  мкмоль/(м<sup>2</sup>с). В смешанном лесу дневные потоки  $CO_2$  были несколько ниже, достигая  $13,7$  мкмоль/(м<sup>2</sup>с).

Проведенное исследование по определению пространственно-временной изменчивости потоков тепла и  $CO_2$  между подстилающей поверхностью и атмосферой в случае изменения структуры землепользования чрезвычайно важно для многих метеорологических и экологических задач, в том числе, для развития и улучшения точности климатического прогноза и прогноза погоды.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ольчев А.В., Авиллов В.К., Байбар А.С., и др. Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата. – Товарищество научных изданий КМК Москва., 2017. – 270-276 с.
2. Ольчев А.В. Потоки  $CO_2$  и  $H_2O$  в лесных экосистемах в условиях меняющегося климата (оценка с применением математических моделей): дис. ... д-р. биол. наук: Москва, 2015. - 306 с.
3. Bonan G.B., Pollard D., Thompson S.L. Effects of boreal forest vegetation on global climate // Nature. — 1992. — Vol. 359. — P. 716–718.
4. 4. Brovkin V., et al. Global biogeophysical interactions between forest and climate // Geophysical



5. Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A.: Energy and CO<sub>2</sub> exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga, Agricultural and Forest Meteorology 265 (2019) 252–268 P.

## Estimation of the of the cold period contribution to the annual CO<sub>2</sub> flux from soils in a temperate continental climate

Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A., Zhmurin V.A.

Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS, Pushchino, Russia

E-mail: vlopes@mail.ru

Cold CO<sub>2</sub> emission can contribute from 5 to 60% to the total annual CO<sub>2</sub> flux from soils indicating a significant role of the cold period in the carbon budget of the ecosystems in the boreal zone. Due to low absolute values of winter CO<sub>2</sub> fluxes from soils and the difficulties for the field measurements of soil CO<sub>2</sub> fluxes during the cold and snow season, the majority of the studies on soil CO<sub>2</sub> emissions are carried out during the growing season. The main goal of the ongoing study is to quantify the contribution of the cold period to the annual CO<sub>2</sub> flux from sandy Entic Podzol under forest and meadow vegetation, based on the year-round continuous 21-year observations.

The study was carried out on the territory of the Prioksko-Terrasny State Biosphere Reserve (PTSBR, Moscow oblast, 54°55' N, 37°34' E) in a quasi-climax mixed forest and in a mowing meadow. The soil was classified as a soddy weakly podzolic on sandy alluvial-fluvioglacial deposits (Entic Poszol Arenic). The total soil respiration (SR) was determined weekly in the morning (between 9 and 12 AM) continuously for 21 years (1998–2018) using the closed chamber method. The mean monthly SR-rate (g C/(m<sup>2</sup> day)) was calculated as the arithmetic mean of all measurements taken during the month. Monthly soil CO<sub>2</sub> fluxes (MoSR, g C/(m<sup>2</sup> month)) were calculated taking into account the duration of the corresponding month. Seasonal (SeSR, g C/(m<sup>2</sup> season)) and annual (AnSR, g C/(m<sup>2</sup> year)) CO<sub>2</sub> fluxes from soils were obtained by summing the corresponding monthly values. The calendar winter period (December–February) corresponded to the winter season, whereas the cold period fit a six-month period from November to April.

The SR-rate in the forest and meadow during the cold period varied from values close to zero (0.05–0.08 g C/m<sup>2</sup>/day) to large magnitudes (2.00–2.40 g C/m<sup>2</sup>/day), which were many times higher than the minimum summer SR-rate for years with prolonged droughts (0.43–0.50 g C/m<sup>2</sup>/day). The periods of soil thawing are accompanied by significant bursts of CO<sub>2</sub> emission, comparable with the average summer SR-rate in the soil studied. The monthly fluxes of CO<sub>2</sub> from the soil under forest and meadow vegetation in the cold season were characterized by significant coefficient of variation, exceeding 25–35%. Differences in MoSR values between forest and meadow cenoses were statistically significant only in April and December. The correlations between the MoSR values and meteorological characteristics for the study period were not significant. The total winter CO<sub>2</sub> fluxes from soils averaged 66–68 g C/m<sup>2</sup>/season and were 2.3–2.5 times less than the SeSR fluxes in the cold period. The coefficients of variation of winter SR fluxes were much higher than the variability of the cold SR fluxes: 39–44% vs 24–28%. The SeSR values for the cold and winter periods of the year did not show significant differences between the studied cenoses.

The study has displayed that the cold period (November–April) in the temperate continental climate zone plays a significant role in the formation of the annual CO<sub>2</sub> flux from soils, providing, on average, 1/4 part of its value. The share of the winter season (December–February) averages 9–12%, reaching 15–20% of the total annual CO<sub>2</sub> flux from soils in some years. Thus, the underestimation of soil respiration during the cold period of the year can lead to a distorted assessment of the carbon balance in terrestrial ecosystems of the boreal and temperate zones.

*The study was carried out under the project "Development of the Research and Educational Center for monitoring climate-active substances (Carbon in ecosystems: monitoring) within the framework of the Federal scientific and technological program in the field of environmental development of the Russian Federation and climate change for 2021–2030".*

## Оценка вклада холодного периода в формирование годового потока CO<sub>2</sub> из почв в условиях умеренно-континентального климата

Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А.,  
Жмурин В.А.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия  
E-mail: [vlopes@mail.ru](mailto:vlopes@mail.ru)

**В**ведение. В бореальных и умеренных регионах холодный период может длиться от 3 до 9 месяцев в году и существенно влиять на углеродный и другие биохимические циклы в наземных экосистемах [Brooks et al., 2011]. Холодный сезон с отрицательными температурами почвы, наличием снежного покрова, повторяющимися циклами замерзания-оттаивания оказывает заметное влияние на процессы взаимодействия растений с почвой, гидротермический и питательный режимы, почвенную микробиоту и эмиссию парниковых газов из почв [Kreyling et al., 2010; Schuerings et al., 2014; Kurganova et al., 2017]. Дыхание почв в холодное время года может составлять от 5 до 60% общего годового потока углекислого газа (CO<sub>2</sub>) из почв [Contosta et al., 2016; Kurganova et al., 2020], свидетельствуя о значительной роли холодного периода в формировании углеродного бюджета в экосистемах бореальной зоны. Однако из-за невысоких абсолютных значений зимних потоков CO<sub>2</sub> из почв и трудностей, возникающих при проведении экспериментальных наблюдений в холодное время года, большинство исследований по определению эмиссии CO<sub>2</sub> из почв проводят, как правило, в течение вегетационного сезона. Основная цель представляемой работы заключается в количественной оценке вклада холодного периода в формирование годового потока CO<sub>2</sub> из дерново-подзолистой почвы под лесной и луговой растительностью, выполненной на основе непрерывных 21-летних круглогодичных наблюдений.

**Объекты и методы.** Исследования проводили на территории Приокско-Тerrasного государственного биосферного заповедника (ПТГБЗ, Московская обл., 54°55' с.ш., 37°34' в.д.) в квази-климаксом смешанном лесу с хорошо развитым травянистым ярусом и на косимом разнотравно-злаковом лугу. Почва участка – дерново-слабоподзолистая на песчаных аллювиально-флювиогляциальных отложениях (Retisol Arenic). Климат в регионе исследований – умеренно-континентальный, со среднегодовой температурой воздуха 5.2°C (за 1973–2018 гг.) и среднегодовым количеством осадков – 667 мм за тот же период.

Общее дыхание почвы (soil respiration, SR) определяли в утренние часы (между 9 и 12 час) непрерывно в течение 21 года (1998–2018 гг.) с периодичностью 3–5 раз в месяц методом закрытых камер. В лесу измерительные камеры устанавливали на поверхность почвы между растениями. В луговом ценозе наземная растительность перед установкой камер срезалась. Скорость (интенсивность) дыхания почв вычисляли по формуле:

$$SR\text{-rate} = (C_2 - C_1) \times H \times t^{-1} \quad (1),$$

где *SR-Rate* – скорость дыхания почв, мг C/(м<sup>2</sup> час); *C*<sub>2</sub> и *C*<sub>1</sub> – конечная и начальная концентрации CO<sub>2</sub> внутри камеры-изолятора, мг C/м<sup>3</sup>; *H* – высота изолятора над поверхностью почвы, м; *t* – время экспозиции, час.

Величину среднемесячной скорости почвенного дыхания (г C/(м<sup>2</sup> сут)) вычисляли как арифметическое среднее из всех измерений, проведенных в течение месяца. Суммарные месячные потоки CO<sub>2</sub> почв (MoSR, г C/(м<sup>2</sup> мес)) рассчитывали с учетом продолжительности соответствующего месяца. Сезонные (SeSR, г C/(м<sup>2</sup> сезон)) и годовые (AnSR, г C/(м<sup>2</sup> год)) потоки CO<sub>2</sub> из почв были получены суммированием соответствующих месячных потоков. Календарная зима (декабрь–февраль) соответствовала зимнему сезону, а за холодный период года мы условно принимали шестимесячный период с ноября по апрель.

В рамках исследования был проведен анализ метеорологических данных, любезно предоставленных сотрудниками Станции Фонового Мониторинга, расположенного на территории ПТГБЗ. Он включал построение линейных временных трендов за 46-летний цикл метеонаблюдений (1973–2018 гг.) и за современный 21-летний период (1998–2016 гг.), сопряженный с многолетними непрерывными наблюдениями за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв лесного и лугового ценозов. Построение линейных трендов на годовом и сезонном уровнях осреднения было проведено для следующих метеорологических показателей: температура воздуха (T<sub>в</sub>), сумма осадков (Σос), продолжительность устойчивого снежного периода (ПснП) и максимальная высота снежного покрова (МВсн).

Статистическая обработка и визуализация данных проводилась в MS Excel 2016 и в программной среде R. Рассчитывали средние арифметические значения (Mean) месячных, сезонных и годовых потоков CO<sub>2</sub> из почв за весь период наблюдений (n = 21), величины стандартного отклонения (STD) и доверительные интервалы (CI; α = 5%). Значимость различий средних значений потоков CO<sub>2</sub> из почв лесно-

го и лугового ценозов на разновременных масштабах (месяц, сезон, год) оценивали с помощью парного критерия Стьюдента ( $\alpha = 5\%$ ). Вариабельность величины месячных, сезонных и годовых потоков  $\text{CO}_2$  из почв оценивали, используя коэффициент вариации  $CV = \text{STD}/\text{Mean} \cdot 100 (\%)$ .

**Результаты и обсуждение.** Анализ метеорологических данных позволил выявить в районе исследованной статистически значимое ( $p < 0.05$ ) увеличение среднегодовой и среднесезонных значений  $T_v$  за рассматриваемый 46-летний период. Наиболее значительное ее повышение было зарегистрировано в летний и зимний сезоны ( $a = 0.53 - 0.54 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$ ). В последние 2 декады был отмечен значимый тренд уменьшения ПснП со скоростью 18 дней/10 лет. Аномально коротким был снежный период в 2007, 2014, 2016 и 2018 гг., когда его продолжительность была на 25–70 дней короче, чем климатическая норма.

Интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  с поверхности дерново-подзолистой почвы под лесной и луговой растительностью в холодный период года варьировала от значений SR-rate, близких к нулевым ( $0.05 - 0.08 \text{ г C}/\text{м}^2/\text{сут}$ ), до весьма значительных величин ( $2.00 - 2.40 \text{ г C}/\text{м}^2/\text{сут}$ ), многократно превышающих минимальные летние значения SR-rate в годы с длительными засухами ( $0.43 - 0.50 \text{ г C}/\text{м}^2/\text{сут}$ ). Периоды оттаивания почв, которые приходились обычно на март-апрель, сопровождались существенными всплесками эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв, достигающими  $2.47 - 4.61 \text{ г C}/\text{м}^2/\text{сут}$ , что сравнимо со среднелетними значениями SR-rate, составляющими 2.80 и 3.64  $\text{г C}/\text{м}^2/\text{сут}$  в почвах лесного и лугового ценозов, соответственно.

Суммарные месячные потоки  $\text{CO}_2$  из почвы под лесной и луговой растительностью в холодное время года отличались значительной вариабельностью, превышающей 25–35%, а размах варьирования всегда превышал среднее значение (Табл. 1). Различия в величинах MoSR между лесным и луговым ценозами были статистически достоверны только в апреле и декабре. Значимых корреляций между величинами MoSR и метеорологическими характеристиками за изучаемый период не выявлено. Величина SeSR в холодный период года в 2.3–2.5 превосходила суммарные зимние потоки  $\text{CO}_2$  из почв, составляющие в среднем 66–68  $\text{г C}/\text{м}^2/\text{сезон}$ . Коэффициент вариации суммарных зимних потоков был существенно выше, чем вариабельность суммарного дыхания почв в холодный период года: 39–44% vs 24–28%. Величины SeSR не показали достоверных различий между изучаемыми ценозами в холодный и зимний периоды года.

Доля зимнего сезона в годовом потоке  $\text{CO}_2$  из почв (Рис. 1) составляла в среднем 9 и 12% для лугового и лесного ценозов, соответственно, иногда достигая 15–20%. Доля холодного периода в отдельные годы превышала 30–35%, в среднем составляя 23 и 27% для лугового и лесного ценозов, соответственно. Вариабельность доли холодного периода в годовом потоке  $\text{CO}_2$  из почв на 17% была обусловлена засушливостью летнего периода, а 18% вариабельности объяснялись суммарной длительностью снежного покрова ( $p = 0.056 - 0.063$ ).

**Таблица 1.**

Средние значения и показатели временной вариабельности месячных, сезонных и годовых потоков  $\text{CO}_2$  ( $\text{г C}/\text{м}^2$ ) из дерново-подзолистой почвы лесного и лугового ценозов (21 год наблюдений).

Месяц	Mean ± CI	Min	Max	CV, %	Mean ± CI	Min	Max	CV, %	p
	Лесной ценоз				Луговой ценоз				
Январь	23 ± 5	7	47	50	22 ± 6	7	52	56	ns
Февраль	21 ± 3	6	33	35	22 ± 6	6	55	55	ns
Март	23 ± 5	3	45	47	24 ± 6	5	60	51	ns
Апрель	33 ± 4	21	48	25	43 ± 7	22	90	37	**
Ноябрь	32 ± 5	11	54	35	31 ± 6	14	59	42	ns
Декабрь	25 ± 5	9	46	45	20 ± 3	9	33	35	*
Сезон									
Зимний	68 ± 12	30	116	39	66 ± 13	27	134	44	ns
Холодный	156 ± 17	101	218	24	163 ± 21	109	271	28	ns
Годовой	581 ± 54	417	877	20	727 ± 71	520	1124	22	***

*Mean — арифметическое среднее; CI — доверительный интервал ( $\alpha = 0,05$ ); Min, Max — минимальное и максимальное значения; CV — коэффициент вариации, %; p — уровень значимости различий между средними значениями потоков  $\text{CO}_2$  из почв в лесном и луговом ценозах: ns — различия не значимы, \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ .*

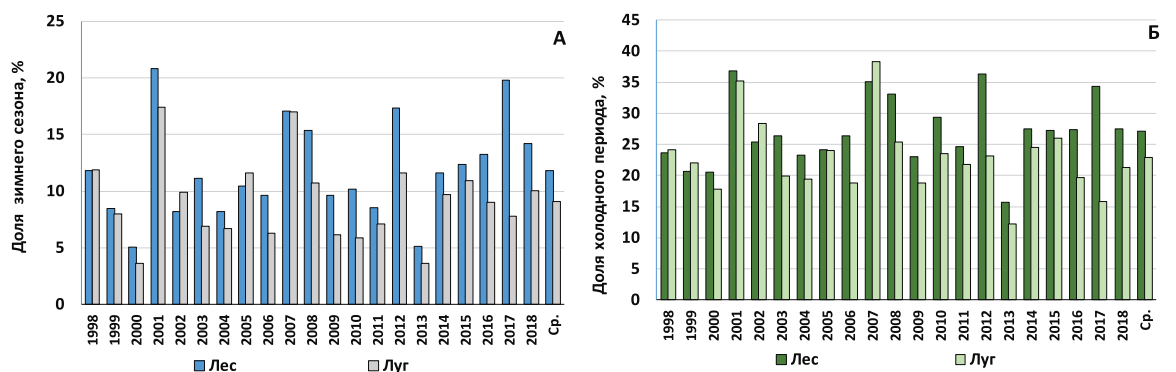


Рис. 1.

Доля зимнего (А) и холодного (Б) периодов в годовом потоке  $\text{CO}_2$  из дерново-подзолистой почвы под лесной и луговой растительностью.

**Закключение.** Холодный период (ноябрь–апрель) в зоне умеренно-континентального климата играет существенную роль в формировании годового потока  $\text{CO}_2$  из почв, обеспечивая в среднем  $\frac{1}{4}$  часть его величины. Доля зимнего сезона (декабрь–февраль) составляет в среднем 9–12%, достигая в отдельные годы 15–20% от суммарного годового потока  $\text{CO}_2$  из почв. Периоды оттаивания почв сопровождаются существенными всплесками эмиссии  $\text{CO}_2$ , сравнимыми со среднелетними значениями SR-rate. Таким образом, недоучет дыхания почв в холодный период года может привести к искаженной оценке углеродного баланса наземных экосистем в бореальной и умеренной зонах.

Исследование выполнено в рамках проекта "Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически-активных веществ (УГЛЕРОД В ЭКОСИСТЕМАХ: МОНИТОРИНГ) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы".

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Brooks P.D., Grogan P., Templer P.H., Groffman P., Oquist M.G., Schimel J. Carbon and nitrogen cycling in snow-covered environments // *Geogr. Compass*, 2011, Vol. 5. P. 682–699.
2. Kreyling J., Beierkuhnlein C., Jentsch A. Effects of soil freeze-thaw cycles differ between experimental plant communities // *Basic Appl. Ecol.* 2010. V. 11. P. 65–75.
3. Schuerings J., Jentsch A., Hammer V., Lenz K., Henry H.A. L., Malyshev A.V., Kreyling J., Increased winter soil temperature variability enhances nitrogen cycling and soil biotic activity in temperate heathland and grassland mesocosms // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. P. 7051–7060.
4. Contosta A.R., Burakowski E.A., Varner R.K., Frey S.D. Winter soil respiration in a humid temperate forest: The roles of moisture, temperature, and snowpack // *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2016. V. 121. P. 3072–3088. doi:10.1002/2016JG003450.
5. Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Khoroshaev D. A., Myakshina T. N., Sapronov D. V., Zhmurin V. A., and Kudryarov V. N. Analysis of the Long-Term Soil Respiration Dynamics in the Forest and Meadow Cenoses of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in the Perspective of Current Climate Trends // *Eurasian Soil Sci.* 2020. V. 53 (10). P. 1421–1436 doi: 10.1134/S1064229320100117/
6. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Blagodatskaya E. Effect of snowpack pattern on cold-season  $\text{CO}_2$  efflux from soils under temperate continental climate // *Geoderma*. 2017. V. 304. P. 28–39. doi:10.1016/j.geoderma.2016.09.009/



# Climatic and antropogenic changes of Don river flow

Grechushnikova M.G.<sup>1</sup>, Varencova N.A.<sup>2</sup>, Kireeva M.B.<sup>1</sup>, Frolova N.L.<sup>1</sup>, Povalishnikova E.S.<sup>1</sup>, Kharlamov M.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Central Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Moscow, Russia

E-mail: [allavis@mail.ru](mailto:allavis@mail.ru)

The analysis of hydrometeorological network observations data made it possible to come to the conclusion about the impact of ongoing climate changes on the conditions of the formation of runoff and its intra-annual redistribution since the late 1970s. The reason for the changes in the ETR can be considered an increase in surface air temperature, which reduced the freezing of soils, changed the conditions of migration and infiltration of moisture in the aeration zone, which led to an increase in groundwater supply. Predicted changes in the conditions for the formation of runoff in the catchment area of the Don can have negative consequences for fisheries in the estuarine region and for the stabilization of the salinity of the Azov Sea. The combined influence of climatic and anthropogenic factors on the degradation of high water on the vast majority of rivers of the Don basin has been revealed. The task of this work is to assess the changes in spring runoff and the role of anthropogenic factors.

To analyze the data series, a graphoanalytic method of constructing an integral flow curve was used. The allocation of the scale of the anthropogenic component of the flow changes was made on the basis of data on the useful capacity of reservoirs with a total volume of more than 1 million m<sup>3</sup> in the Don basin. Reservoirs redistribute runoff in order to accumulate it in high-water phases and develop reserves in low-water ones, which complements the climatically determined decrease in water runoff in high water. The calculation of water accumulation is based on the total useful capacity of reservoirs in the river basin – this is the value of the maximum possible reduction in flood runoff. The assessment was made for rivers with the availability of hydrological information in the channels close to the mouths. To assess the effectiveness of water resources management of river systems, an indicator of the technogenic potential of river flow regulation (TPRFR) was used: the ratio of the useful volume of reservoirs at a normal retaining level to the volume of river flow in the territory under consideration in high-water phases with average daily water consumption exceeding their average annual value.

The rivers of the Don basin can be divided into three groups: rivers with a decrease in spring flood runoff observed after 1980; for the second group, significant changes in the long-term dynamics of spring runoff were not observed until the beginning of the dry period 2006-2010; in the third group in which significant changes in the long-term dynamics of runoff were not detected. The spatial distribution of the types of long-term changes in spring flooding is closely related to the location of reservoirs and ponds within the Don basin: in the area of the highest density of small and medium-sized reservoirs in the basins of the Upper Don (including the Sosna and Bitug rivers), the Seversky Donets, almost everywhere on the rivers, a reduction in spring runoff was observed after 1980. The Don basin as a whole is characterized by a reduction in the flood runoff layer by 20-40%, which is about 50 mm. A statistically significant decrease in the mathematical expectation of the runoff layer for the flood was recorded at 60% of the posts, and a statistically significant increase in variance was recorded at 50%.

Taking into account the total area of reservoirs 519.4 km<sup>2</sup>, irretrievable flow losses amount to 0.09 km<sup>3</sup> per year, or 0.5% of the average annual flow of the Don, in the Kalach-on-Don formation. The decrease in runoff in high-water phases increases with the growth of the catchment area of the Don tributaries and depends on the number of reservoirs in their basin. The increase in the volume of runoff in low-water phases is directly proportional to the catchment area and the number of reservoirs. The results obtained indicate a significant contribution of reservoirs to the change in flow characteristics during its regulation. With an increase in the value of TPRFR for basins, an increase in the relative reduction of water runoff in high water is observed, which indicates a significant contribution of artificial reservoirs to the reduction of runoff in the spring period.

## Климатические и антропогенные изменения стока в бассейне р. Дон

Гречушникова М.Г.<sup>1</sup>, Варенцова Н.А.<sup>2</sup>, Киреева М.Б.<sup>1</sup>, Фролова Н.Л.<sup>1</sup>, Повалишникова Е.С.<sup>1</sup>, Харламов М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Центральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Москва, Россия

E-mail: allavis@mail.ru

Анализ материалов наблюдений гидрометеорологической сети позволил прийти к выводу о влиянии происходящих изменений климата на условия формирования стока и его внутригодовое перераспределение с конца 1970-х годов. Воздействия изменений климата на пресноводные ресурсы имеют огромное значение в отношении изменений не только речных и водоемных экосистем, но и окраинных морей, а также для экономического развития государств. Причиной изменений на ЕТР можно считать увеличение приземной температуры воздуха, из-за чего уменьшилась промерзаемость почв, изменились условия миграции и инфильтрации влаги в зоне аэрации, что привело к увеличению питания подземных вод [1]. На современном этапе для рек Донского бассейна характерна деградация половодья как фазы водного режима; для большинства рек наблюдается статистически достоверное сокращение слоя стока за половодье. Прогнозируемые изменения условий формирования стока на водосборе р. Дон могут иметь негативные последствия для рыбного хозяйства в устьевой области: критические условия воспроизводства рыбного населения создаются при годовом стоке 12-13 км<sup>3</sup> и весеннем 7-10 км<sup>3</sup> [2]. При меньших значениях воспроизводство проходных и полупроходных рыб не регистрируется. В 2008 и 2012 г. с объемом годового притока к Цимлянскому водохранилищу 19.2 и 19.81 км<sup>3</sup>, близком к среднегодовому значению 19.9 км<sup>3</sup> в створе Калач-на-Дону (по данным [3]), сбросы воды в марте-мае составили 1.0, 1.1, 1.2 и 0.8, 1.1, 1.1 км<sup>3</sup> соответственно, что недостаточно не только для эффективного размножения рыб, но и для стабилизации солености Азовского моря.

В работе [4] отмечено, что из-за регулирования, безвозвратных потерь и территориального перераспределения воды экосистема Азовского моря последние 50 лет функционировала в среднемаловодных условиях, а в весеннее время – в исключительно маловодных. Есть опасения, что сокращение стока в бассейне наиболее водоносного притока может повлечь дальнейшее ухудшение состояния этой экосистемы несмотря на положительный тренд в стоке р. Кубань, обусловленный климатическими причинами.

Согласно [5], на юге ЕТР ожидаются наиболее существенные изменения стока к концу XXI века. Для бассейна р. Волга снижение стока в восточной и южной части бассейна может компенсироваться увеличением стока на водосборе р. Камы, то для р. Дон сокращение стока ожидается однозначным, поскольку весь его бассейн, включая область формирования стока, попадает в зону сокращения модульных коэффициентов стока. На современном этапе отмечаемые изменения водного стока в бассейне Дона состоят в его увеличении в период межени и катастрофическом уменьшении в половодье, что опубликовано во множестве работ, например в [6]. Выявлено совместное влияние климатического и антропогенного факторов на деградацию половодья на подавляющем большинстве рек бассейна Дона [7]. Задача настоящей работы: оценка произошедших изменений весеннего стока, и роли антропогенных факторов. Используются опубликованные в изданиях Государственного водного кадастра данные о ежедневных расходах воды половодья в пределах российской части бассейна Дона, а также об объемах водопользования [8].

Для анализа рядов данных использован графоаналитический метод построения интегральной кривой стока (ИКС), поскольку изменение угла наклона графика наглядно отражает тенденцию изменения стока и их начало [9].

Выделение масштаба антропогенной составляющей изменений стока произведено на основании данных о полезной емкости водохранилищ с полным объемом более 1 млн м<sup>3</sup> в бассейне Дона с использованием данных из [10]. Водоохранилища перераспределяют сток с целью его накопления в многоводные фазы и сброски запасов в маловодные, что дополняет климатически обусловленное снижение стока воды в половодье. Расчет аккумуляции воды выполнен по суммарной полезной емкости водохранилищ в бассейне реки – это величина максимально возможного сокращения стока половодья. Оценка произведена для рек с наличием гидрологической информации в близких к устьям створах.

Для оценки эффективности управления водными ресурсами речных систем использован показатель техногенного потенциала регулирования (ТПР) речного стока [11]: отношение полезного объема водохранилищ при НПУ к объему стока рек рассматриваемой территории в многоводные фазы при среднесуточных расходах воды, превышающих их среднегодовое значение. Для расчета ТПР были использованы сведения о стоке за условно естественный период до 1970 г. В исследуемом бассейне находится 384 средних и больших водохранилищ объемом более 1 млн м<sup>3</sup> с суммарной площадью 408,4 км<sup>2</sup>,

а также 938 малых водохранилищ и прудов объемом 0,01–1 млн м<sup>3</sup> и суммарной площадью 111 км<sup>2</sup>. Суммарный объем всех искусственных сооружений оценивается в 1,6 км<sup>3</sup>.

Испарение с поверхности водоемов рассчитано различными методами: по данным атласа мирового водного баланса – 0,35 км<sup>3</sup>; по формуле Зайкова с использованием данных о температуре воды Воронежского водохранилища – 0,58 и 0,41 км<sup>3</sup>, Матырского водохранилища – 0,45 и 0,4 км<sup>3</sup> для 2016–2017 гг. соответственно; по методу Константинова в 2016–2017 гг. 0,37 и 0,34 км<sup>3</sup>, соответственно [12, 13].

По результатам анализа стока за половодье реки бассейна Дона могут быть разделены на три группы: реки, на которых сокращение стока весеннего половодья наблюдалось после 1980 г., например р. Дон на участке Задонск – Лиски и его притоки (Красивая Меча, Сосна, Девица), Савала, Иловля у с. Александровка, Северский Донец и его притоки, а также р. Кундрючья; для второй группы существенных изменений в многолетней динамике весеннего стока не наблюдалось вплоть до начала засушливого периода 2006–2010 гг.; в третьей реки, на которых значительных изменений многолетней динамики стока не диагностировано: Хопер на участке Пановка – Поворино, Карай (с. Подгорное), Кумылга (хут. Ярской), Медведица (с. Лысье Горы). Пространственное распределение типов многолетних изменений весеннего половодья тесно связано с расположением водохранилищ и прудов в пределах бассейна Дона: в области наибольшей плотности малых и средних водохранилищ в бассейнах Верхнего Дона (в т. ч. рек Сосна и Битюг), Северского Донца в верховьях и низовьях в пределах РФ практически повсеместно на реках сокращение весеннего стока наблюдалось после 1980 г.

Для бассейна Дона в целом характерно сокращение слоя стока половодья на 20–40%, что составляет около 50 мм. Самый высокий слой стока, близкий к условно естественному, формируется в бассейне Хопра (более 60 мм), относительно пониженный (30–40 мм) – в бассейне Медведицы, а наиболее низкий (20–30 мм) – в бассейнах рек Бузулука, Иловли и притоков Нижнего Дона. На 60% постов зафиксировано статистически значимое уменьшение математического ожидания слоя стока за половодье, на 50% – статистически значимое увеличение дисперсии. Сток половодья, близкий к условно-естественному, сохранился лишь в бассейнах рек Хопер, Медведица и в верховьях Воронежа. Изменение стока половодья компенсируется его ростом в другие фазы гидрологического режима в верховьях Дона (в бассейнах Сосны и Битюга), и не компенсируется в более сухих южных районах нижнего течения.

В среднем за многолетний период суммарные потери воды на испарение с поверхности водохранилищ в бассейне р. Дон выше Цимлянского водохранилища (включая водосбор р. Чир), составляют около 0,4 км<sup>3</sup>, что соответствует среднему слою испаряемости 770 мм. При слое осадков 600 мм по данным АМВБ видимое испарение составляет 170 мм. С учетом суммарной площади водоемов 519,4 км<sup>2</sup> безвозвратные потери стока – 0,09 км<sup>3</sup> в год, или 0,5% от среднегодового стока Дона, в створе Калач-на-Дону и 1,2% в маловодные годы. Уменьшение стока в многоводные фазы увеличивается с ростом площади водосбора притоков Дона и зависит от количества водохранилищ в их бассейне. Доля прироста стока за маловодные фазы составила 6–11,2% за исключением р. Чир, где не превысила 2,9%. Возможно, это связано с более интенсивным изъятием стока на орошение в южной части бассейна Дона. Увеличение объема стока в маловодные фазы прямо пропорционально площади водосбора и количеству водохранилищ.

Для всех изученных створов характерно более значительное сокращение стока за многоводные фазы, чем прирост за маловодные из-за потерь воды на орошение и водоснабжение в меженный период. Полученные результаты указывают на значительный вклад водохранилищ в изменение характеристик стока при его регулировании. Для большинства рек доля сокращения стока за многоводную фазу от его годовой величины составила более 10%, наиболее значительны изменения в бассейнах рек Битюг и Чир, где ТПР достиг 24,9 и 5,5% соответственно. Это говорит о том, что для водосбора р. Чир, расположенного южнее, большее значение в уменьшении стока за половодье имеют природные факторы, а не удержание стока в полезных емкостях водохранилищ. С увеличением значения ТПР для бассейнов наблюдается увеличение относительного сокращения стока воды в половодье, что указывает на существенный вклад искусственных водоемов в сокращении стока в весенний период.

*Работа выполнена в рамках темы АААА-А16-116032810054-3 «Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия».*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шикломанов И.А. и др. Проблемы изучения формирования и оценки изменений водных ресурсов и водообеспеченности России // Метеорология и гидрология, 2010, №1. С. 23-32.
2. Дубинина В.Г. Методические основы экологического нормирования безвозвратного изъятия речного стока и установления экологического стока (попуска). М.: «Экономика и информатика», 2001, 120 с.
3. Вода России. Водоохранилища. Екатеринбург: Изд-во «Аква-Пресс», 2001, 700 с.
4. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море // Г.Г. Матишов, Ю.М. Гаргона, С.В. Бердников, С.Л. Дженюк; Южн. науч. центр РАН. - М.: Наука, 2006, 304 с.



5. Кислов А.В. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс-Пресс, 2008. 292 с.
6. Киреева М.Б., Илич В.П., Гончаров А.В., Богачев А.Н., Фролова Н.Л., Пахомова О.М., Соловьева В.В. Влияние маловодья 2007–2015 гг. в бассейне р. Дон на состояние водных экосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 5. С. 3–13.
7. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.
8. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 1982–2008 гг. / Государственный водный кадастр: справочное издание. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2018 г. / Водный кадастр Российской Федерации: справочное издание. СПб.: Победа, 2019. 153 с.
9. Фролова Н.Л. Гидрология рек (антропогенные изменения речного стока): учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 112 с.
10. Каталог. Водохранилища СССР. М.: Союзводпроект, 1988. 276 с.
11. Эдельштейн К.К. Структурная гидрология суши. М.: ГЕОС, 2005. 316 с.
12. Атлас мирового водного баланса. М.; Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 65 с. Зайков Б.Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР // Труды ГГИ. 1949. Вып. 21(75). 54 с.
13. Константинов А.Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 532 с.

## Impact of long-term changes in hydrometeorological conditions of the Mozhaysk reservoir on the winter phytoplankton

**Kalenichenko V., Erina O., Goncharov A., Puklakov V.**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: lera\_kalenichenko@mail.ru

Global climatic changes are reflected not only in the seasonal dynamics of hydrological characteristics of rivers and lakes, but also in the hydrobiological characteristics of the aquatic ecosystem. The growth and seasonal succession patterns of phytoplankton are regulated by a variety of both external and internal drivers. And climate change significantly affects the seasonal dynamics of phytoplankton in water bodies.

During our research we analyzed trends in changes in abundance, composition of the phytoplankton community, and meteorological, hydrological, and ice parameters during the freeze-up period, using the Mozhaysk reservoir as an example from 1984 to 2020. We conducted a statistical evaluation of the significance of the total abundance and the current species composition of the phytoplankton community and the complex of abiotic factors of the Mozhaysk reservoir. The rates of the main algal divisions were identified, and the frequency of occurrence and intensity of under-ice growth outbreaks were determined. Monthly dynamics of changes in phytoplankton structure and abiotic factors during changing climatic conditions were also analyzed.

According to the results of the study, there is a statistically significant trend of increase in the duration of the period of positive air temperatures, increase in the average daily air temperature, as well as the sum of positive and negative air temperatures. The date of ice establishment is shifted to later dates, and ice breakup to earlier dates, duration of ice breakup, average and maximum ice thickness is reduced. Forming conditions of ice regime contribute to reduction of unregulated inflow to the reservoir during the period from the beginning of flooding to the date of ice breakup. Observed climatic changes have already led to a statistically significant increase in phytoplankton abundance in the deepest part of the reservoir, while no such changes have been found in shallower parts of the reservoir.

The results found were that diatom algae have been the dominant phytoplankton division in the subsurface water layer of the Mozhaysk Reservoir when covered in ice. In recent years, cases of winter blooms in the water of the Mozhaysk reservoir caused by blue-green algae, in particular representatives of the genus *A. flos-aquae*, have become more frequent. At the dam a significant contribution of blue-green algae to the general trend of phytoplankton cell increase in the interannual range is noticeable. Thus, a transformation of the perennial species structure of winter phytoplankton in the Mozhaysk reservoir is noticeable.

The highest winter abundance of algae in the Mozhaysk reservoir is observed before the ice breakup. For the period of ice-age 1984–2020, according to the results of correlation analysis, a moderate close relationship ( $0.25 < |r| < 0.75$ ) of parameters of the biological regime and abiotic components of the environment is detected.

According to the results of temporal clustering, the greatest heterogeneity in statistically significant parameter series is provided by the group of years with milder and warmer winters.



The results of factor analysis show that the influence of atmospheric circulation on ecosystem functions of the plain the Mozhaysk reservoir during periods of ice cover in the biological context is noted.

Thus, the relationship between long-term changes in abiotic factors and the structure of the algocenosis during the freeze-up period in the Mozhaysk reservoir in the subglacial layer leads to an increase in total phytoplankton abundance, an increase in the contribution of blue-green algae to the algal community structure, accelerated eutrophication and a decrease in the self-purification ability of the reservoir. Increased flowering is expected in the following spring-summer growing season.

## Влияние многолетних изменений гидрометеорологических условий Можайского водохранилища на зимнее фитопланктонное сообщество

Калениченко В.М., Ерина О.Н., Гончаров А.В., Пуклаков В.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: lera\_kalenichenko@mail.ru

**И**зучение гидроэкологических процессов в покрытых льдом водоемах является в настоящее время развивающейся областью лимнологических исследований ввиду значительной трансформации современного облика зимы за последние десятилетия (Hrucik et al., 2021; Nöges et al., 2010). Воздействие изменений условий окружающей среды на биотические параметры озер и водохранилищ приводит к заметным сдвигам в структуре межсезонного видового сообщества фитопланктона (Feuchtmayr et al., 2012). Изменения термических условий водных экосистем способны значительно сдвигать биогеографические границы видов (Buffagni et al., 2003), способствовать миграции организмов в ранее нетипичные для них ареалы (Mooij et al., 2005) и провоцировать вспышки зимнего цветения, которые могут превосходить показатели вегетационного сезона (Twiss et al., 2014). Поэтому целью настоящего исследования является изучение многолетней динамики гидрометеорологических факторов и их потенциальный вклад в трансформацию фитопланктонного сообщества в подледном слое водоема. Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что лучшее понимание механизмов развития альгоценоза в зимний период позволяет прогнозировать реакцию водоемов на глобальные климатические изменения, что представляет как научный, так и практический интерес.

Объектом настоящего исследования является Можайское водохранилище, расположенное в умеренных широтах, на западе Московской области, в верховьях р. Москвы (N 55°35', E 35°50'). Данный водоем является наиболее крупным из водохранилищ Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы и служит наиболее значительным многолетним регулятором стока для столичного региона. Приток к водохранилищу складывается из стока рек Москвы, Лусянки и Колочи, сток последней регулируется плотиной, и бокового притока, доля которого не превышает 10-15% (Комплексные..., 1985). Исследуемый стратифицированный водоем относится к слабо-эвтрофному типу с ежегодным цветением водорослей, возникающим в летний период (Гончаров, 2007).

Для оценки многолетних изменений зимнего режима нами были рассмотрены метеорологические характеристики за периоды ледостава 1962-2020 гг. по данным ближайшей к водоему метеостанции в г. Можайск. Перечень изучаемых показателей включал суммарное количество переходов температуры воздуха через 0 °С, продолжительность периода положительных температур воздуха (сут.), среднюю температуру воздуха (°С), сумму отрицательных температур воздуха (°С), сумму положительных температур воздуха (°С) и суммарное количество осадков (мм) за период ледостава и за каждый из месяцев с ноября по апрель. Ледовый режим анализировался на основе данных мониторинга Красновидовской УНБ МГУ, проводившегося с частотой 1-3 раза в месяц с 1972 по 2020 гг. в центральном районе водохранилища на станции Красновидово. Нами были рассмотрены дата установления (сут.), вскрытия (сут.) и продолжительность (сут.) ледостава, средняя и максимальная толщина льда (см) и снега на льду (см). Гидрологическая информация за периоды ледостава с 1962 по 2020 гг. включала среднесуточный незарегулированный приток (м<sup>3</sup>/с) к водохранилищу, среднесуточный уровень (м абс.), среднесуточный суммарный сброс (м<sup>3</sup>/с) воды в нижний бьеф.

Из биологических показателей рассматривалась общая численность фитопланктона (кл./мл) в подледном горизонте за период с 1971 по 2020 гг., численность отдельных таксономических групп (кл./мл) и их процентный вклад (%) в общую численность от начала образования льда в толще воды (ноябрь) до момента вскрытия ледостава (апрель) в верхнем, центральном и приплотинном районах водохранилища.

Статистические расчеты проводились в программном пакете Statistica 10 и среде R с использованием пакета *repair*. Уровень значимости  $\alpha$  составлял 5%. Для применения статистических методов ис-

пользовались непрерывные ряды наблюдений продолжительностью с 1984 по 2020 гг., при этом пропуски были восстановлены как средние значения рядов данных.

Для исследования изменений климатических характеристик последних десятилетий целесообразно сопоставлять два хронологических промежутка, соответствующих базовому климатическому периоду и периоду современного потепления. Так, в границах Можайского водохранилища после 90-х гг. отмечаются статистически значимые отличия средних значений абиотических параметров за периоды ледостава по сравнению с серией предыдущих лет. В январе наблюдаются наибольшие межсезонные изменения среднесуточной температуры воздуха, где до 90-х гг. среднемноголетнее значение составляло  $-9,9^{\circ}\text{C}$ , после увеличилось до  $-6,8^{\circ}\text{C}$ . В феврале отмечается рост количества переходов температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$ : с 90-х гг. – 120 раз, до периода современного потепления – 57 раз. Сумма положительных температур воздуха за последние декады лет увеличилась в среднем на  $70^{\circ}\text{C}$  в феврале и январе. За счет увеличения числа оттепелей и роста продолжительности периодов положительных температур воздуха в зимние месяцы, после 90-х гг. наблюдается уменьшения средней толщины льда до 9,4 см и снежного покрова до 1 см, а также сокращение продолжительности ледостава до 15,6 сут. При анализе гидрологического режима был обнаружен статистически значимый рост среднесуточного незарегулированного притока вод в период от начала половодья до момента схода льда, где среднее значение после 90-х гг. равно  $57,2\text{ м}^3/\text{с}$ , до 90-х гг. –  $39,5\text{ м}^3/\text{с}$ . Наиболее аномальным среди рассматриваемых лет стал зимний период 2020-2021 г., который характеризовался наиболее теплой зимой с экстремальными значениями компонентов окружающей среды за периоды ледостава, где отмечаются максимумы: среднесуточной температуры воздуха –  $0,7^{\circ}\text{C}$ , суммарного количества переходов температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  – 30 раз, суммы отрицательных температур воздуха –  $-59,4^{\circ}\text{C}$ , дата вскрытия ледостава – 133 сут.; и минимумы: продолжительности ледостава – 62 сут., суммы осадков – 86 мм, среднесуточного суммарного сброса –  $1,83\text{ м}^3/\text{с}$ .

По результатам исследования наблюдается статистически значимая тенденция роста продолжительности периода положительных температур воздуха – 3 сут. в 10 лет, увеличение среднесуточной температуры воздуха –  $0,6^{\circ}\text{C}$  в 10 лет, а также суммы положительных и отрицательных температур воздуха –  $7^{\circ}\text{C}$  и  $95^{\circ}\text{C}$  в 10 лет. Дата установления ледостава смещается на более поздние сроки, при тенденции 4,2 сут. в 10 лет, а вскрытие – на более ранние, при 2 сут. в 10 лет, уменьшается продолжительность ледостава – 6 сут. в 10 лет и средняя и максимальная толщина льда – 4 см и 5 см в 10 лет. Формирующиеся условия ледового режима способствуют уменьшению незарегулированного притока к водоему в период от начала половодья до даты вскрытия ледостава, при положительной тенденции –  $7\text{ м}^3/\text{с}$  в 10 лет.

Изменение доступности света в водной толще ввиду трансформации межгодовых снеговых и ледовых условий воздействует на межгодовую и пространственную вариабельность общей и групповой численности фитопланктона в зимний период. Наибольший диапазон изменения численности фитопланктона отмечается в наиболее глубоководной части водохранилища, в то время как в более мелководных частях таких изменений обнаружено не было.

В многолетнем разрезе доминирующей группой водорослей в подледной слое являются диатомовые водоросли – 65 % от общей численности фитопланктона, что связано с их холодолюбивостью и устойчивостью к низким температурам воды.

За период ледостава 1984-2020 гг., согласно результатам корреляционного анализа, обнаруживается умеренная теснота связи ( $0,25 < |r| < 0,75$ ) параметров биологического режима и абиотических компонентов окружающей среды. Стоит отметить, что отмечается наибольшая когерентность параметров гидрометеорологической и ледовой обстановки в зимнее время с группой диатомовых водорослей.

По результатам временной кластеризации в границах Можайского водохранилища были сгруппированы года по отличным условиям в зимний период времени. Наибольшая неоднородность в статистически значимых рядах параметров обеспечивается группой лет с более мягкой и теплой зимой, в которой отмечаются более высокие значения среднемесячной температуры воздуха, меньшая сумма отрицательных температур воздуха, более ранняя дата вскрытия ледостава, меньшая продолжительность ледостава, наименьшая максимальная и средняя толщина снега и льда.

В соответствии с результатами факторного анализа, отмечается влияние атмосферной циркуляции на экосистемные функции Можайского водохранилища в периоды ледостава в биологическом контексте, где наибольшее влияние прослеживается на структуру группы диатомей в подледном слое.

Таким образом, взаимосвязь многолетних изменений абиотических факторов и структуры альгоценоза в период ледостава в подледном слое Можайского водохранилища приводит к росту общей численности фитопланктона, увеличению вклада синезеленых водорослей в структуру водорослевого сообщества преимущественно на глубоководной станции мониторинга, ускорению эвтрофикации и снижению способности водоема к самоочищению. Ввиду того, что зимние условия оказывают сильное влияние на весеннюю фенологию планктонного сообщества, ожидается интенсификация цветения в последующий период весенне-летней вегетации.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Гончаров А. В. Сравнение водохранилищ Москворецко-Вазузской водной системы по количественному развитию фитопланктона и степени евтрофирования//Водные ресурсы. — 2007. — Т. 34, № 1. — С. 78–82.
2. Ерина О.Н., Пуклаков В.В., Соколов Д.И., Гончаров А. В. Подледное цветение фитопланктона в Можайском водохранилище//Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. — 2019. — Т. 15, № 2. — С. 49–54.
3. Комплексные исследования водохранилищ. Вып. IV. Водохранилища Москворецкой системы. — М.: Изд-во МГУ, 1985.- 239 с.
4. Buffagni, A., Belfiore, C., Kemp, J. L., & Cazzola, M. (2003). A review of Ephemeroptera species distribution in Italy : Gains from recent studies and areas for future focus. *Ecology*.
5. Feuchtmayr, H., Thackeray, S. J., Jones, I. D., de Ville, M., Fletcher, J., James, B., & Kelly, J. (2012). Spring phytoplankton phenology - are patterns and drivers of change consistent among lakes in the same climatological region? *Freshwater Biology*, 57(2). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02671.x>
6. Hrycik, A. R., Isles, P. D. F., Adrian, R., Albright, M., Bacon, L. C., Berger, S. A., Bhattacharya, R., Grossart, H. P., Hejzlar, J., Hetherington, A. L., Knoll, L. B., Laas, A., McDonald, C. P., Merrell, K., Nejtgaard, J. C., Nelson, K., Nöges, P., Paterson, A. M., Pilla, R. M., ... Pierson, D. C. (2021). Earlier winter/spring runoff and snowmelt during warmer winters lead to lower summer chlorophyll-a in north temperate lakes. *Global Change Biology*, 27(19). <https://doi.org/10.1111/gcb.15797>
7. Mooij, W. M., Hülsmann, S., De Senerpont Domis, L. N., Nolet, B. A., Bodelier, P. L. E., Boers, P. C. M., Dionisio Pires, L. M., Gons, H. J., Ibelings, B. W., Noordhuis, R., Portielje, R., Wolfstein, K., & Lammens, E. H. R. R. (2005). The impact of climate change on lakes in the Netherlands: A review. *In Aquatic Ecology (Vol. 39, Issue 4)*. <https://doi.org/10.1007/s10452-005-9008-0>
8. Nöges, P., Adrian, R., Anneville, O., Arvola, L., Blenckner, T., George, G., Jankowski, T., Järvinen, M., Maberly, S., Padisák, J., Straile, D., Teubner, K., & Weyhenmeyer, G. (2010). The Impact of Variations in the Climate on Seasonal Dynamics of Phytoplankton. *In The Impact of Climate Change on European Lakes*. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4_14)
9. Twiss, M. R., Smith, D. E., Cafferty, E. M., & Carrick, H. J. (2014). Phytoplankton growth dynamics in offshore Lake Erie during mid-winter. *Journal of Great Lakes Research*, 40(2). <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.03.010>

## Peculiarities of tree-ring series in larch affected by the ground fire of 1908

Sapozhnikova V.A.<sup>1</sup>, Ageev B.G.<sup>1</sup>, Gruzdev A.N.<sup>2</sup>, Savchuk D.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Physics, RAS, Moscow, Russia

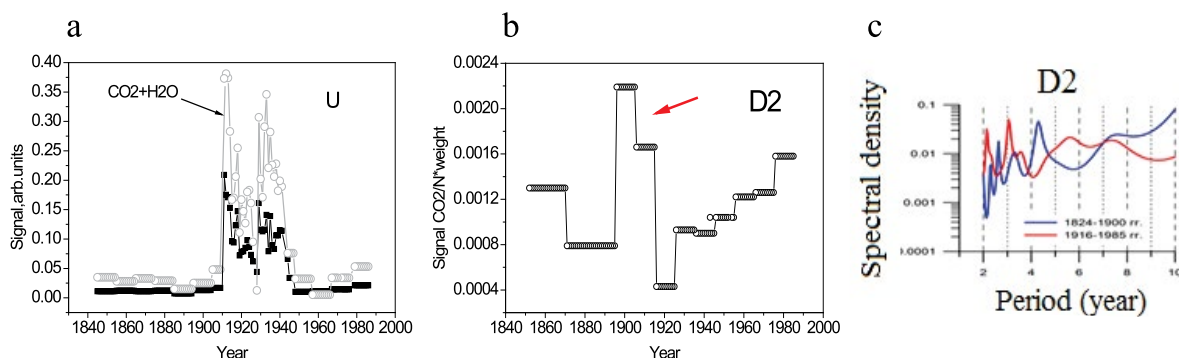
<sup>3</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [sapo@iao.ru](mailto:sapo@iao.ru)

Nowadays a special attention is paid to the estimation of all sources of the CO<sub>2</sub> released into the atmosphere. It is well – known that heavy forest fires are one of the sources of the atmosphere pollution. However, ground fires also make their contribution to the problem. If the volume of the CO<sub>2</sub> emission caused by the fires in Russia is, on the average, 230 mln tons a year, then 41% of it is due to the ground fires [1]. The method of the analysis of the residual gases in the tree discs developed by the authors has allowed making a number of conclusions on the effect of the ground fire in the region of the Podkamennaya Tunguska river in 1908. It is known that in 1908 a space object exploded there, which resulted in the trees knocked down in an area of 2150 ±25km<sup>2</sup> followed by a ground fire that damaged the vegetation in an area exceeding 100km<sup>2</sup>[2]. The investigation was carried out based on the discs of the Gmelin larch (*Larix gmelinit* (Rupr.) Kuzen.) presented by the participants of the Complex independent expedition (CIE Novosibirsk, Tomsk) V.D. Yashkov (U) and I.K. Doroshin (D). The analysis of the residual gases vacuum – desorbed from the wood of the disc rings was performed using a photoacoustic spectrometer with a tunable CO<sub>2</sub> laser. A special procedure was used to investigate very thin rings [3]. The cyclic recurrence in the obtained results was revealed by means of the high – resolution spectral and cross - spectral analyses based on the maximum entropy method. It was found that the event of 1908 in the region of the Podkamennaya Tunguska river had induced the CO<sub>2</sub> (and H<sub>2</sub>O) accumulation retained for 30 years in the stem wood in most of the trees that survived the catastrophe (Fig. 1). It is highly



probable that the excess  $\text{CO}_2$  content could diffuse from the stems into the atmosphere. The analysis of the behavior of the  $\text{CO}_2$  chronologies and the ring width has shown the 1908 catastrophe to cause a change of the 4 – year cyclicality in the chronologies for a 3 – year one in the post – catastrophe period. This work increases the list of the experimental materials on the above region and can be of interest for specialists dealing with the atmosphere – biosphere exchange in ecologically unfriendly regions.



**Fig. 1.** Annual variations of the desorbed gases in the discs with wide (**U**) and narrow (**D2**) rings (a, b); change of the cycles in the width spectrum after 1908 (c).

**REFERENCES:**

1. Korotkov V.N. Greenhouse gases and black carbon emissions from wildfires in Russia. Forest ecosystem of boreal zone: biodiversity, bioeconomy, ecological risks// Proceedings of the ALL – Russian Conference with International Participation. Krasnoyarsk, August 2019: IF SB RAS, 2019, p. 196 – 197.
2. Vasilyev N.V. The Tunguska meteorite problem today//Planet. Space Sci. 1998. V. 46, №213, p. 129 – 150 3. Ageev B.G., Sapozhnikova V.A., Gruzdev D.A. Variations of the radial increment and the gas components in the wood of the larches damaged by the fire in 1908[in press].

## Особенности серий колец лиственниц, пораженных низовым пожаром 1908 года

Сапожникова В.А.<sup>1</sup>, Агеев Б.Г.<sup>1</sup>, Груздев А.Н.<sup>2</sup>, Савчук Д.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [sapo@iao.ru](mailto:sapo@iao.ru)

Предложенный нами метод исследования хронологий остаточных газов в древесине колец спилов деревьев [1] позволяет найти ряд новых данных в кольцевых хронологиях. Так было установлено, что динамика содержания  $\text{CO}_2$  (и  $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ ) в древесине колец и радиальный прирост деревьев могут меняться при воздействии низовых пожаров. По официальным данным, в России ежегодно регистрируется от 10 до 33 тысяч лесных пожаров, Объем выбросов от пожаров, в среднем, составляет 230 млн. т  $\text{CO}_2$  в год и почти 41% выбросов приходится на низовые пожары [2]. В 1908 г в районе р. Подкаменная Тунгуска произошел взрыв космического тела (ТКТ), в результате которого был повален лес на площади  $2150 \pm 25 \text{ км}^2$ , а возникший низовой пожар повредил растительность на площади более  $100 \text{ км}^2$  [3]. Выжившие после катастрофы молодые деревья лиственниц сохранили следы пожарного поражения. Цель данной работы – исследовать хронологии содержания остаточных газов и вариации ширины годичных колец в до- и пост-катастрофный периоды деревьев, произраставших в зоне взрыва ТКТ.

Исследования проводились на основе спилов деревьев лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), представленных участниками Комплексной самодеятельной экспедиции (КСЭ, Новосибирск, Томск) В.Д. Яшковым (спил маркировки **U**) и И.К. Дорошиным (спилов маркировки **D**). В 1981-1991 годах экспедицией по программе «Лес» осуществлялся поиск деревьев, пораженных низовым пожаром, но выживших после катастрофы 1908 года. Низовой пожар в этом месте отличался одной особенностью: поваленные взрывом деревья нарушали непрерывность мохового покрова и подстилки так, что сплошного

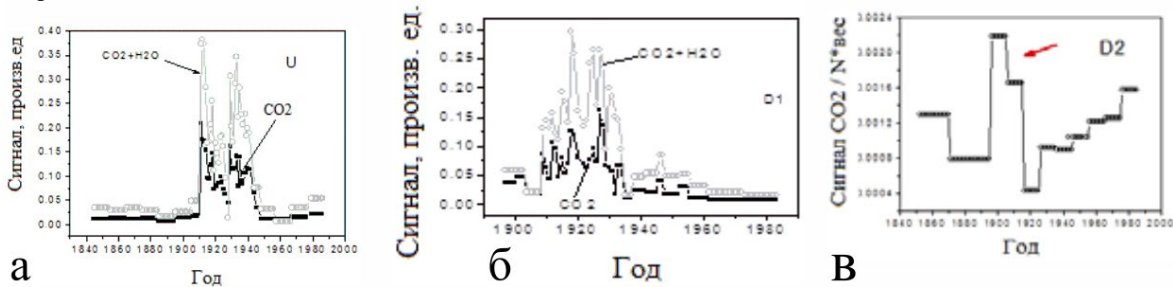


слоя проводников горения не было. Обычно низовой пожар повреждает кору и камбий на стволах деревьев с образованием пожарных подсушин. Именно с таких деревьев брались образцы (спилы).

Анализ десорбированных из древесины колец газов производился на оптико-акустическом спектрометре с перестраиваемым CO<sub>2</sub> лазером. Методика позволяла регистрировать вариации не только CO<sub>2</sub>, но и H<sub>2</sub>O. Полученные оптико-акустические сигналы на линиях генерации лазера с точностью до калибровочного множителя пропорциональны концентрации исследуемого газа. Ширина годичных колец (радиальный прирост) на спилах измерялась на полуавтоматическом измерительном комплексе LINTAB с точностью 0.01мм. Для выявления циклическостей в полученных результатах применялись спектральный и кросс-спектральный анализ высокого разрешения по методу максимальной энтропии.

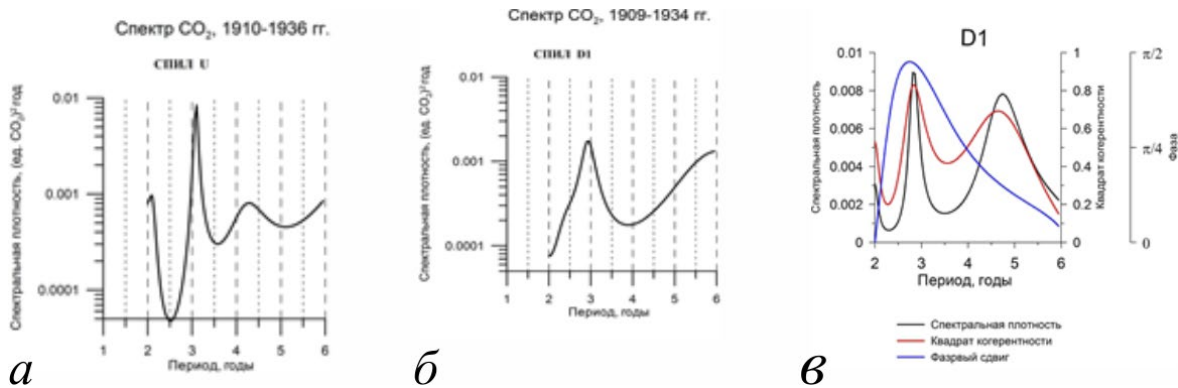
Исследования проводились по трем направлениям: 1. Исследование вариаций CO<sub>2</sub> в древесине колец спилов. Некоторые спилы имели участки с очень узкими кольцами. В этом случае фиксировался сигнал от суммы колец, и каждому кольцу приписывалось среднее значение содержания CO<sub>2</sub>. Удалось зафиксировать повышение содержания CO<sub>2</sub> после 1908 года, которое сохранялось в спиле приблизительно до 30 лет. На рис.1. приведены образцы полученных распределений CO<sub>2</sub> и (CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O).

2. Выяснение влияния события 1908 года на циклическое поведение хронологий CO<sub>2</sub> и ширины колец. Исследование было проведено для двух спилов **U** и **D1**, имеющих достаточно длинные до- и пост-катастрофные хронологии. Анализ спектров хронологий содержания CO<sub>2</sub> в древесине спилов **U** и **D1** за период после 1908 года показал, что в спектрах присутствуют 3-летние максимумы (Рис.2 а, б). Дополнительно для спила **D1** был проведен кросс-спектральный анализ высокого разрешения хронологий CO<sub>2</sub> и ширины годичных колец за 1911-1934 гг. Результат показал, что 3-летние вариации ширины колец запаздывают относительно 3-летних вариаций CO<sub>2</sub> примерно на четверть периода ( $\pi/2$ ) (рис. 2в). Это означает, что максимумы вариаций содержания CO<sub>2</sub>, в среднем, соответствуют ускоренному приросту ширины колец.



**Рис.1**

Погодичные вариации десорбированных газов в спилах с широкими (а, б) и узкими (в) кольцами.



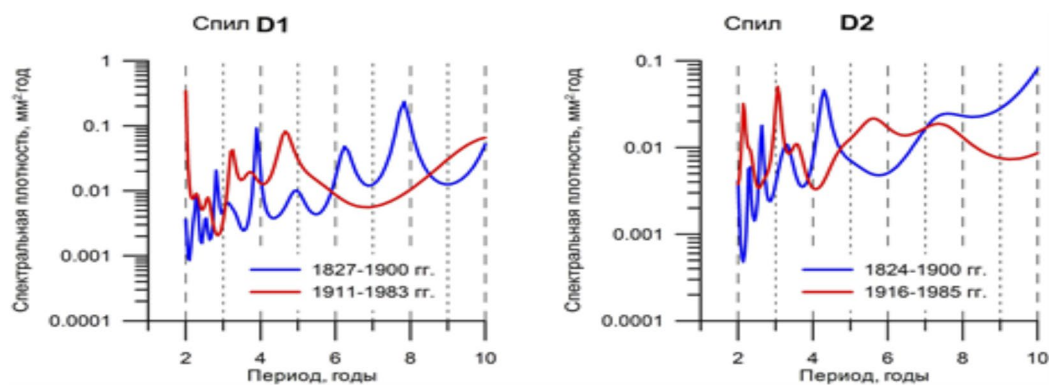
**Рис.2.**

3-летний цикл в хронологиях CO<sub>2</sub> в спилах **U** и **D1** в пост-катастрофный период (а, б); кросс-спектр между хронологиями CO<sub>2</sub> и шириной колец спила **D1** в пост-катастрофный период (1911-1934 гг.) (в).

Влияние события 1908 года на смену картины циклическости хорошо иллюстрируют спектры хронологий ширины колец спилов **D1** и **D2** (рис.3) в до-катастрофный и пост-катастрофный периоды. В до-катастрофный период в обоих спектрах видны вариации ширины колец с циклом около 4 лет. В пост-катастрофный период такие вариации отсутствуют, но проявились вариации с 2- и 3-летними циклами.

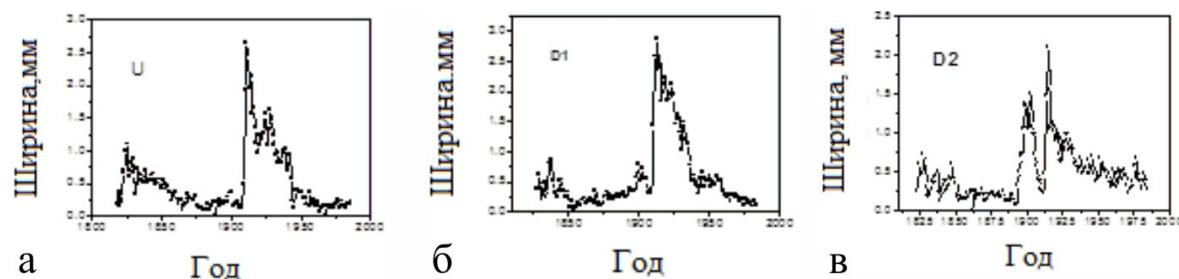
3. Анализ особенностей вариации ширины колец спилов катастрофного района. Тщательные измерения ширины показали, что увеличение ширины кольца в районе 1908 года начинается раньше 1908 года. Последнее особенно заметно в спиле **D2**, ширина колец которого имеет два ярко выраженных максимума: первый до- и второй - после катастрофы 1908 года. Отметим, что хронологии спилов **U**, **D1** и **D3** также имеют два максимума в районе 1908 года, при этом первые максимумы по величине значительно меньше вторых (Рис.4). Была сделана попытка связать появление дополнительных максимумов с

солнечной активностью. Фурье-анализ хронологий ширин (FFT, пакет программ ORIGIN) показал, что в хронологиях всех спилов можно найти цикл, близкий 11-летнему солнечному циклу. Кроме того, была проведена оценка коэффициентов корреляции между шириной годичных колец спилов и числом солнечных пятен, используя данные сайта [4]. Получилась детальная картина корреляции ширин годичных колец с количеством пятен на Солнце за период роста дерева. Значимая корреляция оказалась в 60% случаев (иногда при сдвиге рядов 2-3 года). Таким образом, можно считать, что на радиальный прирост деревьев района Подкаменной Тунгуски, вероятнее всего, влияет вариация солнечной активности, что сказывается на появлении дополнительных максимумов в погодичном распределении ширин. В результате, исследования поведения десорбированных из древесины колец газов и анализ древесно-кольцевых хронологий спилов района катастрофы ТКТ 1908 года показали:



**Рис.3.**

Спектры ширины годичных колец спилов **D1** и **D2** до и после катастрофы 1908 г.



**Рис.4.**

Вариации ширины колец спилов района катастрофы.

1. событие 1908 года в районе р. Подкаменная Тунгуска спровоцировало у большинства переживших катастрофу деревьев накопление  $\text{CO}_2$  (и  $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ ) в древесине стволов, длительность которого  $\sim 30$  лет; 2. накопление  $\text{CO}_2$  (и  $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ ), происходило с одновременным ростом ширины кольца; 3. анализ поведения хронологий  $\text{CO}_2$  и ширины колец показал, что катастрофа 1908 года вызвала смену 4-летней цикличности в хронологиях на 3-летнюю в пост-катастрофный период; 4. у деревьев, растущих в районе катастрофы, наблюдается значимая корреляция с солнечной активностью. Таким образом, работа расширяет список экспериментальных материалов по катастрофному району и может представлять интерес для специалистов, занимающихся проблемами атмосферно-биосферного обмена в экологически неблагоприятных районах

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ageev B.G., Gruzdev A.N., Sapozhnikova V.A. Cyclic variation of residual ( $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ ) and total pressure in conifer stem and woody root tree rings // *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* 2018. V. 11, N 3. P. 206-217. DOI: 10.17516/1997-1389-0066.
2. Korotkov V.N. Greenhouse gases and black carbon emissions from wildfires in Russia. Forest ecosystems of boreal zone: biodiversity, bioeconomy, ecological risks // *Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation. Krasnoyarsk, August 2019: IF SB RAS, 2019. C.196-197.*
3. Vasilyev N.V. The Tunguska Meteorite problem today // *Planet. Space Sci.* 1998. V. 46, N 2/3. P. 129-150.
4. Space Weather Service, WDC-SILSO, Королевская обсерватория Бельгии, Брюссель. [Электронный ресурс]. <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/2/3/1>

# Применение метода Blue Intensity для дендроклиматических исследований территории Сибири

Агапова В.В.<sup>1</sup>, Кирдянов А.В.<sup>1,2</sup>, Арсак А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

Реконструкции климатических условий прошлого в настоящий момент имеют большое значение для понимания изменчивости климата и оценки его возможных трендов в будущем. При проведении дендроклиматических реконструкций широко используются такие параметры древесных колец, как ширина годичных колец (ШГК) и максимальная плотность поздней древесины (МАКС). Blue intensity (BI) – это относительно новый параметр структуры годичных колец, основанный на измерении интенсивности отраженного или поглощенного синего света от поверхности образцов. Целью данного исследования является оценка возможности применения метода BI для реконструкции летних температур, а также сравнения параметров ШГК и BI для оценки климатической реакции каждого из показателей для территории хвойных лесов Алтая. В 2021 году был осуществлен сбор кернов у 30 деревьев лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), произрастающей в долине р. Актру в непосредственной близости от верхней границы леса (50°5' с.ш., 87°47' в.д.). Все образцы прошли стандартную процедуру экстракции смолы и были отсканированы для последующих измерений ШГК и BI. Измерения ШГК у 29 из 30 кернов были успешно перекрестно датированы, но керны только 26 были использованы для измерения BI из-за цветового искажения образцов. Таким образом, длина обобщенных хронологий составила 325 лет (1695–2020 гг.) для ШГК и 309 лет (1712–2020 гг.) для BI. Для анализа связи между климатическими показателями и древесными хронологиями были использованы метеорологические данные станции Барнаул из базы [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru). Оба параметра, BI и ШГК, показали положительную и значимую скользящую корреляцию со среднемесячной температурой мая за период (1846–2020 гг), с максимальным сигналом, достигнутым в день года 143 и 142 для ШГК и BI, соответственно. Однако скользящие ежемесячные корреляции показали разные ответы между обоими параметрами. В то время как ШГК продемонстрировала более сфокусированную реакцию на температурные условия текущего июня с увеличением чувствительности с течением времени с 0,2 до 0,6 в период с 1911–2020 гг, тогда как BI показала значимые связи с температурой за более длинное временное окно с мая по август, хотя интенсивность сигнала варьировалась между летними месяцами за период 1846–2020. Эти результаты показывают, что ряды BI более чувствительны к температуре, чем ряды ШГК, и являются более значимым показателем древесных колец для реконструкции климата. Оптимальное окно климатической реакции ШГК было найдено в период 23 мая – 24 июня, для BI этот период оказался намного больше 24 мая - 21 августа. Устойчивость климатического сигнала во времени (окно 30 лет с шагом 1 год) для ШГК колеблется в значениях 0,55-0,57, для BI находится в пределах 0,72-0,75. Однако для реконструкции мы были вынуждены убрать последние 30 лет хронологии, так как они недостаточно коррелировали с температурой. Такой низкий отклик может быть связан с обесцвечиванием последних лет в заболони образцов, что требует либо дополнительной предобработки кернов, либо использование параметра дельта BI. Согласно древесно-кольцевой реконструкции, самый холодный период охватывающий даты между 23 мая и 24 июня на Алтае за последние 308 лет был в 1826 г. Средняя температура была на 12,8 °C холоднее, чем за аналогичный промежуток в контрольный период (1959–2020 гг.). Согласно реконструкции BI самое холодное лето отмечено в 1833 г. (15,6°C). Самый теплый период по данным реконструкций BI (22 мая–6 августа) и ШГК(23 мая–24 июня) был выявлен в 1779 г. Несмотря на небольшой инструментальный период (30 лет), сравнение реконструированных и инструментальных данных BI показывает, что оба набора данных имеют одинаковую тенденцию. BI объясняет 51% общей дисперсии средней температуры мая-августа, когда ШГК только 33% общей дисперсии средней температура мая-июня. В результате отмечено, что BI является более подходящим параметром для дендроклиматических реконструкций условий вегетационного периода территории Алтая.

# Application of the Blue Intensity method for dendroclimatic studies of Siberia

Agapova V.V.<sup>1</sup>, Kirdeyanov A.V.<sup>1,2</sup>, Arzac A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

## INTRODUCTION

Dendrochronological studies are crucial for understanding the past climate variability and to reducing the uncertainty of the projected global climate change estimates. Blue intensity (BI) is a valuable tree-ring parameter currently used to create chronologies usually more sensitive to climate changes than other tree-ring parameters. BI measures either reflected or absorbed blue light from carefully prepared wood surfaces. It was initially thought that BI records the local abundance of high molecular weight lignin in wood, which in turn was assumed to be controlled by temperature in temperature-limited areas. That is why the maximum values of wood density and higher values of BI are observed in the latewood of growth rings. A recent study in Sweden [1] discusses various methods to improve the quality of BI chronologies and describes its advantages over tree-ring width (RW) in temperature reconstruction. In the Northern Hemisphere (NH), latewood BI parameters have provided temperature reconstructions comparable to X-ray maximum latewood density (MXD) – a tree-ring parameter that frequently to outperform RW but require a technically time-consuming, laborious and expensive generation process. The BI technique offers a solution to these limitations as a relatively inexpensive surrogate, rapidly gaining attention over the past decade. This study aims to compare the RW and BI parameters to assess their climate signal in Altai coniferous forest region.

## MATERIALS AND METHODS

Thirty uneven-aged *Larix sibirica* trees were sampled on the tree line near the Aktru glacier (50°05'N, 87°47' E) at 2109 m asl. on a west exposure slope in autumn 2021. The forest was dominated by *L. sibirica* trees with the presence of scattered *Pinus sibirica* trees. The site is characterized by a cold continental climate, with long cold winters and hot summers. According to the data from the Barnaul meteorological station, the average annual temperature for the period 1838–2021 was 1.3 °C, and the total annual precipitation was 428 mm, of which a third (163 mm) falling during the summer months. The trees were sampled with a 5 mm diameter borer, and tree height and diameter at breast height were measured.

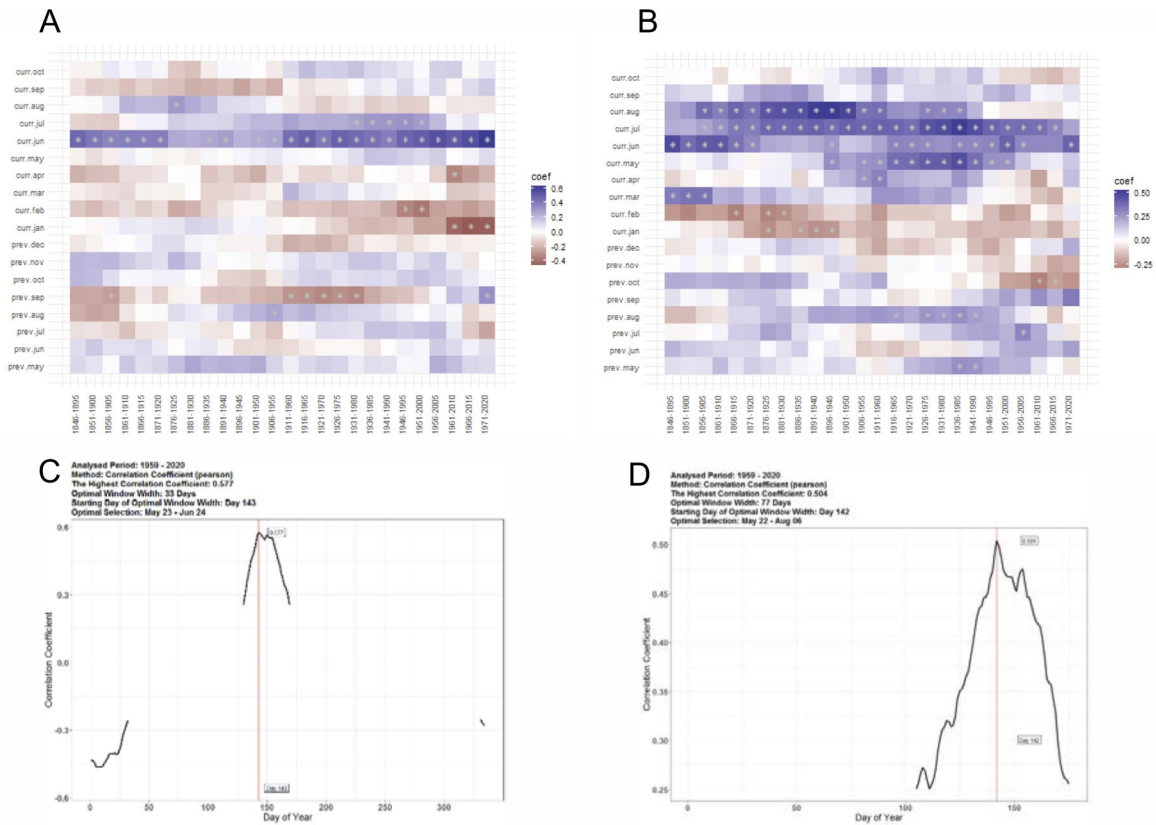
Larch cores were airdried in the laboratory, and due to the amount of resin contained in the wood, samples were placed in a Soxhlet apparatus with ethanol (96%) for 72 hours for resin extraction. In addition to resin extraction, the ethanol helps reduce fungus-related discoloration, which could affect BI measurements and improves the contrast between heartwood and sapwood [2]. After resin extraction, wood cores were glued into wooden supports and polished with a sanding machine (up to 1200 grit) until xylem structures were visible under magnification. Polished cores were scanned at 4800 dpi using an Epson Perfection V800 professional flat-bed scanner (Epson, Japan) interfaced with Silverfast SE (LaserSoft Imaging, USA). An IT8 Calibration Target color card (SilverFast Auto IT8 calibration software) was used for scanner calibration. While scanning, the scanner was covered with a dark box to avoid interference by external light sources. Tree-ring width and BI measurements were made using the Coorecorder software version 9.3 (Cybis Elektronik & Data AB, Sweden). Individual BI and RW data series were then transformed using CDendro to the standard Tucson decadal format. Cross-dating of RW and BI time-series was verified using COFECHA [3]. The BI and RW chronology standardization procedure was carried out using a smoothing spline function «Detrend» in R.

To determine climate-growth response, monthly and daily moving correlations were performed using two packages, «dendroTools» and «Treeclim» in R over the period 1959–2020 for daily correlations and over the 1846–2020 period for monthly correlations to evaluate temporal changes in the climate response. Correlations were performed from May of the previous year to October of the current growing year. Daily and monthly temperature and precipitation data were obtained from the Barnaul weather stations available at [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru). Temperature reconstructions over the 1712–1990 period and based on BI chronologies were done also using the package «dendroTools».

## RESULTS AND DISCUSSION

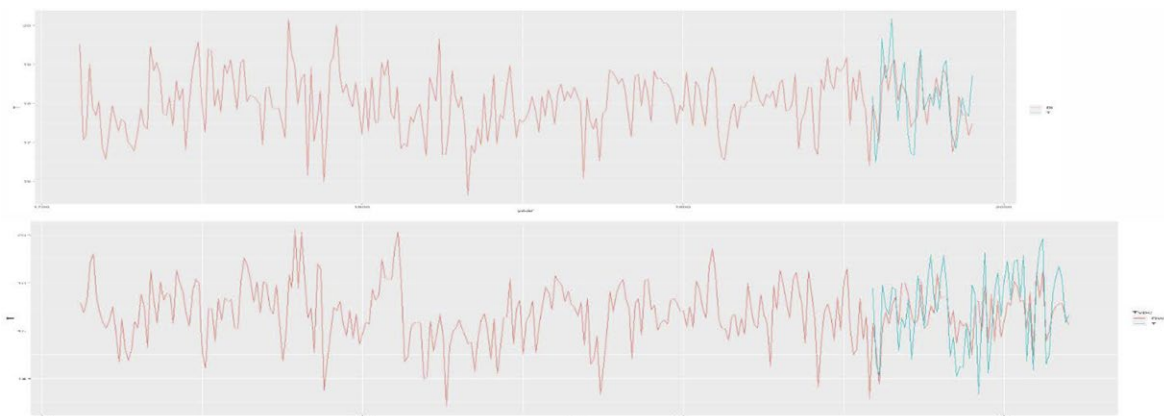
Twenty-nine out of the thirty cores were successfully crossdated and measured for RW, but only twenty-six were used for BI due to discoloration of the wood material. Tree age ranged from 138 to 326 years ( $190 \pm 74$  on average; mean  $\pm$  SD). Thus, chronologies length were 326 years (1695–2020) for RW and 309 years (1712–2020) for BI. The RW chronology achieved a mean EPS of 0.9. The EPS for BI was 0,87 higher than the generally accepted threshold 0,85. RW and BI series were positively and significantly correlated ( $r = 0.5$ ;  $P < 0.001$ ).





**Figure 1.** Moving correlations (50-year window) between climate variabilities and parameters RW(A) and BI(B). Daily RW(C) and BI(D) moving correlations for the 1959–2020 period. Red table cells with marks show the highest negative correlation and blue table cells with marks show the highest positive correlation.

Tree growth and blue intensity showed positive and significant correlations with the current late spring (May) temperature, with a maximal signal reached on the day of the year (DOY) 143 and DOY 142 for RW and BI, respectively (Fig. 1 C and D). However, moving monthly correlations showed different responses between both parameters. Thus, RW showed a more focused response to current June with increasing sensitivity over time (Fig. 1 A), whereas BI showed a longer temporal window from May to August (Fig. 1 B) although the intensity of the signal varied between months over the 1712–2020 period. These results suggest that BI series are more sensitive to temperature than RW series, being a useful proxy for climate reconstruction.



**Figure 2.** Reconstruction (top) based on BI (red line) and actual (blue line) May–August mean air temperatures ( $R^2 = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ). Reconstruction (bottom) based on RW (red line) and actual (blue line) May–June mean air temperatures ( $R^2 = 0.33$ ,  $p < 0.05$ ).

The optimal window for RW climate response was found in the period May 23–June 24. The signal was temporally stable with a correlation of 0,57 for the earlier period 1959–1989 and 0,55 for the latest period 1990–2020. For BI, the latest 30 years did not correlate high enough with temperature therefore this period was

excluded for climate reconstruction. The optimal window for daily correlations occurred between May 24 and August 21. For the earliest period correlation was 0,75 and 0,72 for the latest. According to the tree-ring reconstruction, the coldest summer in Altai during the last 308 years was in 1826. The May-June period was 12.8 °C colder than the mean in the reference period (1959–2020). The reconstruction suggests that 1779 was the warmest May-June during the investigated period. The magnitude of the anomaly increased to 20.2 °C in this case. BI reconstruction showed the coldest summer in 1833 (15,6 °C) and the warmest summer in the same year as indicated by the RW reconstruction in 1779 (20,2 °C). RW explained 33% of the total variance of the mean May-June temperature over the instrumental period, while BI explained 51% of the total variance of the mean May-August temperature. As a result, we can conclude that BI is a more appropriate parameter for dendroclimatic reconstructions of the growing season in Altai

*Acknowledgments.* This work was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation [FSRZ-2020-0014], the ERC project MONOSTAR (AdG 882727) and Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the framework of the Academic Mobility Project Competition (code 2022051708667)

#### REFERENCES:

1. Fuentes, M., Salo, R., Björklund, J., Seftigen, K., Zhang, P., Gunnarson, B., et al., 2018. A 970-year-long summer temperature reconstruction from Rogen, west-central Sweden, based on blue intensity from tree rings. *Holocene* 28 (2), 254–266.
2. J. Björklund, B.E. Gunnarson, K. Seftigen, J. Esper, H.W. Linderholm. Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to Improve summer temperature reconstructions with earlywood information *Clim. Past*, 10 (2014), pp. 877-885
3. Biondi, F. &. (2004). DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 303-311.

## Peculiarities of forming and functioning of Siberian stone pine forests of Altai

Timoshok E.N., Timoshok E.E., Raiskaia Yu.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [ten80@mail.ru](mailto:ten80@mail.ru)

Our long-term (more than 20 years) studies of Altai forests formed by Siberian stone pine (*Pinus sibirica* du Tour) allowed us to fetch out many peculiarities of forming of these forests and their functioning. The representativeness of the Aktru mountain glacier basin by hydroglacioclimatologic showings (Tronov, 1973) allowed us to assume the general trends and tendencies are common for the Altai, though influence of local factors still define the details (Timoshok et al., 2008).

We found almost all successions in mountain glacier basin Aktru is directed to the forming of Siberian stone forests. This forming may be direct, like transformation of tundra to stone pine forest during raising of treeline and forest line or during post-fire secondary succession in the larch forests of the Aktru river valley (Timoshok, 2020a) or be indirect as during primary successions at Malyi Aktru glacier forelands and glacionfluvial deposits of the Aktru river (Timoshok, 2020b,c). This common direction allow us to assume the siberian stone pine forests serve as kind of attractor, similar to F. Clements conception of ecosystem climax. Signs of similar changes in the past was confirmed by the data of spore and pollen analysis (Blyakharchuk T.A. et al., 2004). The analysis also confirms that changes of Altai forest composition occurred in the past: Siberian stone pine forest were much more common than now in the humid periods with lower impact of fire disturbances while larch was as common as now in dryer periods.

Siberian stone pine forests have high stability because of longevity of *Pinus sibirica* and its ability to produce cones and seeds until the moment of physical death of the stone pine individual. Their stability is proven by the fact these forests survived Little Ice Age without significant changes (Timoshok at al., 2016). These forests have complex mosaics of forest types. Each element of mosaic exist in its own cyclic succession. These elements of the forest changed when trees become older and die, but new Stone pine forest is forming on the place of the dead element. So entire forest remains existing, though trees in some element of its structure may die. Such shortened cyclic succession is untypical for the Siberian stone pine as in the Weat-Siberian plain such succession include a stage of deciduous forest, not existing in the Altai mountains.

# Особенности формирования и функционирования кедровых лесов Алтая

Тимошок Е.Н., Тимошок Е.Е., Райская Ю.Г.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: ten80@mail.ru

**И**сследование устойчивости экосистем и климатической обусловленности их существования и развития являются интересным и в целом перспективным направлением развития отечественной науки. Целью данной работы является обобщение наших более чем 20-летних исследований экологии наземных экосистем Алтая, особую роль среди которых занимают кедровые леса, сформированных кедром сибирским (*Pinus sibirica* du tour).

## ФОРМИРОВАНИЕ КЕДРОВЫХ ЛЕСОВ АЛТАЯ

Четвертичная активность ледников и множественные крупные оледенения неоднократно уничтожали растительность в горных долинах Алтая. Даже похолодание в Малый Ледниковый Период уничтожило значительную часть приледниковых лесов, включая кедровые. Однако, когда ледники отступали, на обнажившиеся постгляциальные поверхности, лишённые даже почвы, сорванной наступавшими ледниками в период похолодания, начинался занос зачатков растений и включались сукцессионные процессы. В ходе первичных сукцессий происходило формирование новых лесов. Исследования Е.Е. Тимошок и соавторов (2008) показали, что сукцессии на моренных комплексах долинных ледников Алтая, находящихся в пределах лесного пояса, носят различный характер и зависят от местного климата, однако вместе с тем репрезентативность горноледникового бассейна р. Актру по гляциоидрометеорологическим показателям, установленная М.В. Троновым (1973) позволяет предположить что наиболее детально исследованные сукцессии на молодых моренах ледника Малый Актру и флювиогляциальных отложениях р. Актру являются в значительной степени типичными для Алтая в целом.

Первичные сукцессии протекающие на моренных комплексах ледника Малый Актру включают **пионерную стадию**, для которой характерно заселение первых растений, **ивово-мирикариево-дриадово-разнотравную стадию**, во время которой идет формирование полноценного травянистого наземного покрова и активное развитие почвы, и заселение **лиственницы**, и **мохово-ивово-березковую стадию**, на которой происходит формирование развитого кустарникового яруса и рост деревьев лиственницы. (Тимошок и др., 2008, Timoshok et al., 2020a) Стадия молодого лиственничного леса, на которой происходит переход зарослей березки в молодой лиственничный лес еще не отмечено, но со временем эта стадия неизбежно наступит.

Первичные сукцессии на флювиогляциальных отложениях протекают по сходной схеме - имеет место длительная **пионерная стадия**, на которой формирование сомкнутой растительности невозможно из-за влияния режима нарушений, в первую очередь наледей, **мохово-кустарниковая стадия** на которой протекает развитие почвы, растительности и кустарникового яруса и заселение лиственницы и **стадия лиственничного леса**, которая здесь успешно достигнута юных террасах р. Актру, в зоне с наименьшим уровнем нарушений. (Timoshok et al. 2020b).

Очевидным является тот факт, что обе эти сукцессии направлены на формирование лиственничных лесов, однако, как показали наши исследования, проведенные в послепожарных лесах (Тимошок, 2020), лиственничные леса не являются финальным результатом сукцессии. Было установлено, что такая сукцессия протекает по **пути ингибирования**, приостанавливаясь после формирования лиственничного леса на период равный сроку жизни лиственницы – около 600 лет, после чего лиственница сменяется кедром. Это предположение подтверждается исследованием особенностей лесов на современных флювиогляциальных отложениях (Тимошок Е.Е. и др., 2021), проведенным при участии авторов – в наиболее старых из них лиственница все еще остается основным эдификатором, однако в основном поколении кроме нее участвует и кедр, при этом подрост этих лесов состоит исключительно из кедра, что говорит о протекании в них смены. Таким образом в современный период все первичные сукцессии бассейна Актру направлены на формирование кедровых лесов через стадию лиственничного леса. Палеоэкологические данные (Blyakharchuk et al., 2004) показывают что подобные смены уже имели место в прошлом.

Другим путем формирования кедровых лесов является еще не завершённая вторичная сукцессия в лесотундровом экотоне долины р. Актру – трансформация тундровых экосистем в лесотундровые и, впоследствии, лесные. В настоящий момент отмечена только первая часть этой сукцессии: на первой стадии: **стадии одиночных деревьев** происходит заселение первых особей кедра. Эти сильно угнетённые, но адаптировавшиеся к холоду деревья создают фитополе, делающее возможным дальнейшую колонизацию кедра и захват им местообитания. На второй стадии: **стадии**

**групп деревьев**, кедр заселяется вблизи этих деревьев, фитополе группы кедров вызывает возникновения микроэкологического эффекта, обеспечивая ускорение колонизации и расширение групп. Следующая стадия – **трансформации**, является гипотетической, т.к. еще не наступила, но можно предположить что в ходе нее нижние группы кедров будут разрастаться и сливаться друг с другом и нижележащими лесами, создавая продвижение вверх не только границы дерева, но и границы леса.

Последним путем формирования кедровых лесов является их формирования в ходе завершения послепожарных вторичных сукцессий. настоящий момент послепожарные лиственничные леса являются основным типом экосистем долины р. Актру и высокогорий Алтая в целом, однако исторически преобладание этих лесов связано с снижением уровня осадков и ростом числа лесных пожаров. Данные Т.А. Бляхарчук (2004) свидетельствуют, что в периоды, для которых была характерна более высокая влажность кедр играл несравненно большую роль в сложении лесного покрова Алтая. Эта сукцессия, реконструированная нами (Тимошок, 2020) при помощи методики, построенной на таком подходе как IFC (McCormic, 1968), включает в себя **стадию гари**, когда за счет почвенного банка семян начинается восстановление растительности, **кустарниковой стадии**, следующей за ней **стадии молодого лиственничного леса**, на которой формируется лиственничный лес; **стадию плато**, то есть существования лиственничного леса без больших изменений. и **стадию материнского полога** на которой из подростка формируется полностью кедровое основное поколение деревьев, а старовозрастная лиственница сохраняется только в материнском пологе.

Таким образом **кедровый лес выступает своего рода аттрактором на формирование которого направлены все сукцессии**, протекающие в лесном поясе бассейна Актру и на его верхней границе, однако **формирование обширных кедровых лесов в высокогорьях Алтая невозможно из за существующего режима пожаров.**

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КЕДРОВЫХ ЛЕСОВ АЛТАЯ

Исследования сотрудников нашей лаборатории (Тимошок и др. 2016) показали, что существующие в долине Актру небольшие фрагменты кедровых лесов сформировались более 600 лет назад. Благодаря широкому диапазону толерантности кедра сибирского по большинству экологических факторов эти леса без существенных изменений пережили Малую Ледниковую Эпоху. Это указывает на очень высокую стабильность кедровых лесов в условиях колебаний климата. Даже сравнительно короткий благоприятный для заселения кедра период может обеспечить их восстановление и существование (Тимошок Е.Е. и др., 2016). Факторами, обеспечивающим эту стабильность являются высокая продолжительность жизни кедра (500 и более лет) и его способность размножения, сохраняющаяся до момента физической гибели особи.

Кедровые леса долины р. Актру имеют достаточно большую неоднородность и состоят из парцелл, формирование которых определяется почвой: в более влажных местообитаниях формируются бруснично-зеленомошные парцеллы, в более сухих - бруснично-разнотравные, на каменистых участках формируются баданово-разнотравные парцеллы. В результате нарушений, приводящих к гибели ряда деревьев возможно формирование березковых парцелл, представляющих собой временный тип, существующих лишь до момента замещения погибших деревьев подростом. Важной особенностью этих лесов является их существование в режиме непрерывной циклической сукцессии в смысле Уотта протекающей не на уровне леса в целом, а на уровне отдельных парцелл. В ходе своего развития парцелла достигает финальной стадии - **мертвопокровного леса**, в котором она пребывает до начала массовой гибели деревьев кедра от старости. С гибелью значительного числа особей кедра парцелла входит в **стадию окна возобновления**. В окне возобновления происходит заселение кедра и его рост, по мере роста кедра, парцелла переходит в **стадию редины**, затем - на **стадию молодого кедрового леса**. Впоследствии парцелла окончательно приобретает черты своего основного типа - к примеру бруснично-разнотравного, и входит на стадию **зрелого леса**. Следует отметить, что во первых для равнинных кедровых лесах такая сукцессия включает стадию лиственных деревьев (Данченко, Бех, 2010), в условиях же высокогорий Алтая ее не наблюдается, а во вторых цикл практически не затрагивает соседние парцеллы, в силу чего леса продолжают существовать без существенных изменений. Именно эта особенность обеспечивает долговременность существования кедровых лесов.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Данченко А.М., Бех И.А. Кедровые леса Западной Сибири. - Томск. Изд-во ТГУ, 2010 - 424 с.
2. Тимошок, Е.Е., Нарожный Ю.К., Диркс М.Н. и др. Динамика ледников и формирование растительности на молодых моренах Центрального Алтая. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 208 с.
3. Тимошок Е.Е., Николаева С.А., Савчук Д.А., Райская Ю.Г., Тимошок Е.Н. Лиственничники на водно-ледниковых отложениях в Северо-Чуйском центре оледенения (Русский Алтай) // *Успехи современного естествознания*. 2021. № 9. С. 20–25.



4. Тимошок Е.Н. Особенности формирования и функционирования высокогорных лесов Северо-Чуйского хребта (Центральный Алтай) // Международная конференция посвященная 135-летию Гербария им. П.Н. Крылова Томского государственного университета и 170-летию со дня рождения П.Н. Крылова 2020 с. 121-123.
5. Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S. van der Klaap W.O., Ammann B. Late glacial and Holocene vegetational changes on the Ulagan high-mountain plateau, Altai mountains, southern Siberia. // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004. №209. pp. 259-279
6. Timoshok E.E., Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Filimonova E.O., Skorokhodov S.N., Bocharov A.Yu., Timoshok E.N. Monitoring of high altitudinal terrestrial ecosystems in the Altai Mountains // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 48. Режим доступа: <http://iop-science.iop.org/article/10.1088/1755-1315/48/1/012008/pdf> (12.06.2022).
7. Timoshok E.E., Timoshok E.N., Gureyeva I.I., Skorokhodov S.N. Primary successions on the young moraines in the Severo-Chuiskiy Center of glaciation (Central Altai) // *Contemporary Problems of Ecology*. 2020. Vol.13. № 1. P. 36-47.
8. McCormic J. Succession // *Via*. 1968. №1. P. 22-35
9. Timoshok E. E., Timoshok E.N., Raikaya Yu.G. Colonization of the young glaciofluvial deposits at the period of the modern climate warming in the North-Chuya glaciation center // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 548 (2020) 062045 IOP Publishing P. 1-6.

## Changes in climate and vegetation of the Nomto-Nur lake basin (East Sayan) over the past 700 years

**Volchatova E.V., Bezrukova E.V.**

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia  
E-mail: [volchatova@igc.irk.ru](mailto:volchatova@igc.irk.ru)

Despite the fact that there are a large number of lakes on the territory of the Eastern Sayan that formed in the Holocene and store valuable archives of the evolution of vegetation and climate in the region, the results of studying the dynamics of the ecosystems of the Eastern Sayan mountains remain extremely scarce [1, 2]. The high mountainous position of the lakes makes their ecosystems very sensitive to warming, since temperatures change faster in high mountain areas than in lower ones. Registration of such climate changes in various regions of the Eastern Sayan helps to understand the formation of the modern natural environment and predict its changes in the future.

Lake Nomto-Nur is located in the central part of the Eastern Sayan (1386 m above sea level), in the Okinsky district of the Republic of Buryatia. The lake is hydrologically connected with the Sentsa River, located in its valley [3].

To study the bottom sediments of the lake, we used the palynological method, the method of X-ray fluorescence analysis (XRF), the method of radiocarbon dating, as well as statistical and stratigraphic methods for interpreting and presenting the results.

Tilia software version 1.7.16 [4] was used to calculate the percentage of taxa, construct a diagram, and perform cluster analysis. Using the CONISS cluster analysis, three local pollen zones and four main zones of element distribution in the core were identified.

According to the age model, about 700 years ago, the shores of the lake were quite swampy, as evidenced by the high abundance of sedge and willow pollen. At that time, in the lake conditions were calm, favorable for the development of desmid algae of the genus *Cosmarium*, which are typical for phytoplankton of slowly flowing rivers, lakes, and sphagnum habitats [5]. The composition of grass pollen makes it possible to reconstruct the wide distribution in the river valley and around the lake of sagebrush-grass-forb groups of meadow-steppe appearance in well-heated elevated habitats in warm summer seasons.

Sharp changes in the parameters of SPA and XRF by 62-68 cm of the core testify to a major event in the history of the development of the lake. We hypothesize that these processes may be related to an incident such as an increase in the water level in the lake, possibly as a result of a flood / series of floods, which led to an expansion of its surface area and changing the shorelines of Lake Nomto-Nur. In this case, thickets of alder, which even today grow close to the water line in many parts of the lake shore, could be flooded or ended up right at the water's edge. Along with pollen, such macroelements as Na, Al, Si, K, Ca, Ti, contained in the soil, also entered the waters of the lake from coastal soils. A little earlier than this period, approximately 72 cm from the surface of the core, a sharp increase in the concentration of coal microparticles was recorded, followed by a sharp decline in the concentration of it. This could be a consequence of fires and also affect a sharp change in the elemental composition of bottom sediments and the content of spores and pollen in them.

Based on the data obtained, we assume that there was a gradual change in climate from more humid to more arid, which is also confirmed by the growth of coal microparticles in the upper horizons of the core, probably introduced into bottom sediments as a result of forest fires caused by the formation of an arid climate.

## Изменения климата и растительности бассейна озера Номто-Нур (Восточный Саян) за последние 700 лет

Волчатова Е.В., Безрукова Е.В.

Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия  
E-mail: volchatova@igc.irk.ru

Результаты изучения динамики экосистем гор Восточного Саяна остаются крайне малочисленными [1, 2], в то время как на их территории располагается большое количество озер, образовавшихся в голоцене и хранящих ценные архивы эволюции растительности и климата региона. Высокогорное положение озер делает их экосистемы очень чувствительными к потеплению, поскольку в высокогорных районах температура меняется быстрее, чем в более низких. Регистрация подобных изменений климата в различных районах Восточного Саяна помогает пониманию становления современной природной среды и прогнозированию ее изменения.

Озеро Номто-Нур расположено в центральной части Восточного Саяна (1386 м над уровнем моря), в Окинском районе Республики Бурятия. Площадь озера составляет 0,5 км<sup>2</sup>, глубина достигает 3,5 м. Котловина озера имеет неправильную форму, берега сильно изрезаны и заболочены. Озеро гидрологически связано с рекой Сенца, располагаясь в ее долине [3].

Для исследования донных отложений озера использованы палинологический метод, рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), радиоуглеродного датирования, а также статистические и стратиграфические методы для интерпретации и представления результатов.

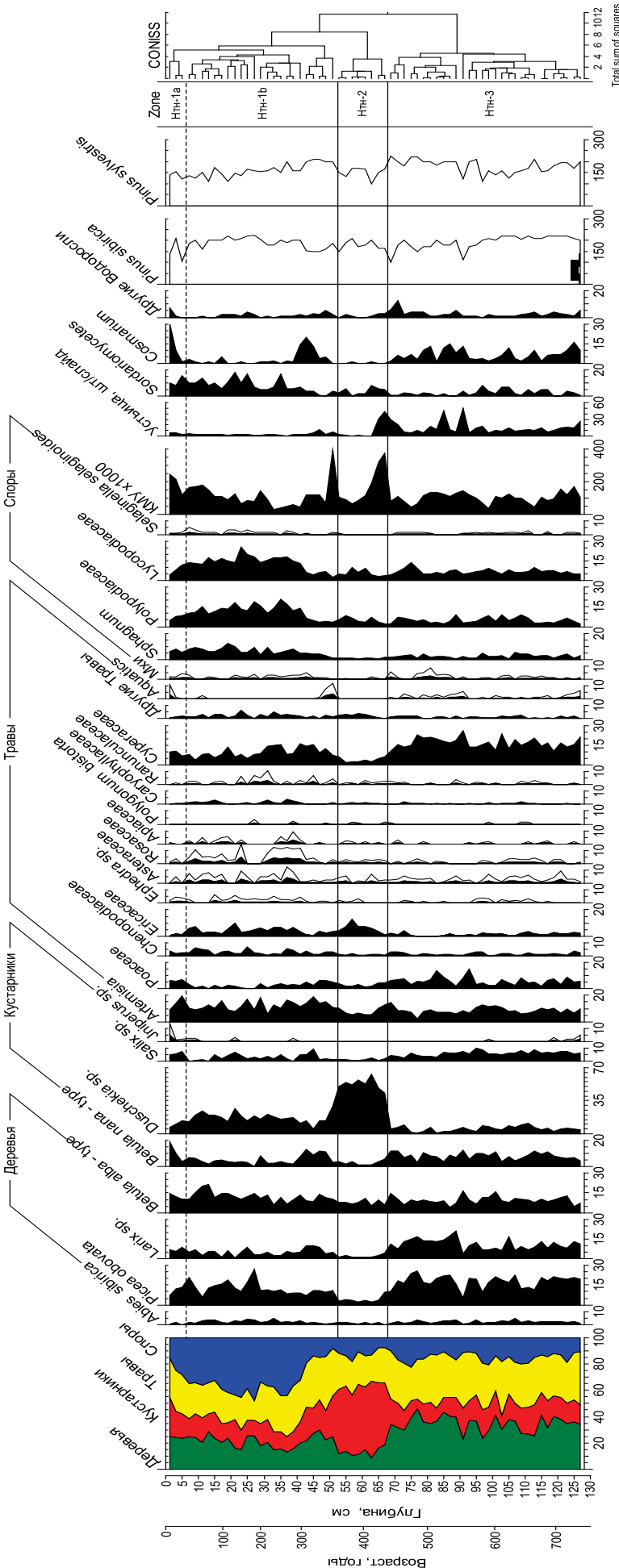
Результаты спорово-пыльцевого анализа приведены на рисунке 1.

Для расчета процентного содержания таксонов, построения диаграммы и проведения кластерного анализа использовалось программное обеспечение Tilia версии 1.7.16 [4]. При помощи кластерного анализа CONISS было выделено три локальных пыльцевых зоны, где первая зона также делится на две подзоны, и четыре основных зоны распределения элементов в керне.

В отложениях озера Номто-Нур встречено большое количество пыльцевых зерен сосны сибирской и сосны обыкновенной. Однако в настоящее время эти древесные встречаются на расстоянии 80 - 100 км от котловины оз. Номто-Нур. Это позволяет нам сделать вывод о том, что пыльца данных пород – заносная. На основе такого вывода мы приняли решение исключить пыльцу сосны сибирской и сосны обыкновенной из статистического анализа для более объективной интерпретации результатов. Однако в крайней левой части диаграммы приведено относительное обилие пыльцы сосен для понимания их вклада в состав СПС.

Согласно возрастной модели, ок. 700 л.н. берега озера были довольно сильно заболочены, о чем свидетельствует высокое обилие пыльцы осок и ивы. В озере в это время существовали спокойные условия, благоприятные для развития десмидиевых водорослей рода *Cosmarium*, характерных для фитопланктона медленно текущих рек, озер, сфагновых обитаний [5]. Состав пыльцы трав позволяет реконструировать широкое распространение в долине реки и вокруг озера полынно-злаково-разнотравных группировок лугово-степного облика на хорошо прогреваемых повышенных местах обитания в теплые летние сезоны.

Согласно данным РФА, зона Ннт-2, 62-68 см керна, характеризуется резким изменением показателей почти по всем элементам. Растет содержание всех элементов, кроме P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MnO. На спорово-пыльцевой диаграмме также наблюдаются резкие изменения в составе спорово-пыльцевых спектров: пыльца древесных растений, а также многих трав, уменьшается в процентном содержании, тогда как возрастает доля пыльцы ольховника и верескоцветных. Значения гидролизатного модуля (ГМ) снижаются, что свидетельствует о понижении уровня гидролиза, а также выветривания. Мы предполагаем, что эти процессы могут быть связаны с таким событием, как повышение уровня воды в озере, возможно, в результате паводка/серии паводков, что привело к расширению площади его поверхности и, соответственно, изменению береговой линии оз. Номто-Нур. В таком случае, заросли ольховника, которые и сегодня на многих участках берега озера растут близко к линии воды, могли быть подтоплены или оказались непосредственно у уреза воды. Тогда, в сезон (-ы) цветения ольховника, гораздо большее, чем ранее, количество его пыльцы могло оседать на поверхности воды в озере, попадая затем в его донные отложения.



**Рис. 1.**  
Спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений озера Номто-Нур.

После прекращения интервала экстремальных паводков уровень озера понизился, заросли ольховника могли снова оказаться дальше от берега, что снизило количество поступающей на поверхность озера пыли.

Вместе с пылью, в воды озера из прибрежных почв поступили также такие макроэлементы, как Na, Al, Si, K, Ca, Ti, содержащиеся в почве. Чуть ранее этого периода, примерно на 72 см от поверхности керна был зафиксирован резкий рост, а следом спад концентрации микрочастиц углей, что могло быть следствием пожаров и также повлиять на резкое изменение элементного состава донных отложений и содержание в них спор и пыли.

Отложения озера характеризуются значениями индекса химического выветривания (CIA), изменяющимися от 54 до 74 ед., что позволяет предположить существование скорее гумидного климата в период формирования изученных нами осадков, а выше 40 см и по направлению к настоящему времени влажность климата увеличилась, и он приобрел скорее переходный характер, при этом степень выветрелости пород существенно не менялась.

Сокращение обилия пыли осок к настоящему времени одновременно с повышением обилия пыли верескоцветных и спор сфагнома позволяет реконструировать понижение уровня грунтовых вод, затухание процесса заболачивания вокруг оз. Номто-Нур, а также хорошо соотносится с данными индекса CIA и свидетельствует о смене климата к несколько более ариднему. Более аридные условия могли способствовать усилению пожарных явлений в регионе, что косвенно подтверждается резким возрастанием значений микрочастиц углей в верхних слоях керна, близких к современности (Рис. 1.).

*Благодарности. Проведенные исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ-Лондонское королевское общество № 21-55-10001) и выполнены в соответствии с государственным заданием Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (проект № № 0350-2019-0004).*

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Bezrukova E.V., Vershinin K.E., Orlova L.A., Letunova P.P., Krapivina S.M., Chepinoga V.V., Verkhovzina A.V., Dudareva N.V., Abzaeva A.A. Late Holocene vegetation and climate in the East Sayan Mountains // *Russian Geology and Geophysics*. 2003. V. 44(4). P. 380–384.
2. Mackay A.W., Bezrukova E.V., Leng M.J., Meaney M., Nunes A., Piotrowska N., Self A., Shchetnikov A., Shilland E., Tarasov P., Luo Wang, White D. Aquatic ecosystem responses to Holocene climate change and biome development in boreal, central Asia // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 41. P. 119–131.
3. Щетников А.А., Безрукова Е.В., Филинов И.А., Иванов Е.В., Кербер Е.В. Озерный морфолитогенез в Долине вулканов (Восточный Саян) // *География и природные ресурсы*. 2016. № 3 С. 37–48. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-3(37-48)
4. Grimm, E.C., 2011. Программное обеспечение Tilia 1.7.16. Springfield, IL: Illinois State Museum. Research and Collection Center.
5. Жизнь растений. Том 3. Водоросли. Лишайники / Под ред. проф. М. М. Голлербаха. Москва: Просвещение. 1977. 487 с.

## The effect of pyrogenic influence on the temperature sensitivity of soil organic matter mineralization

Filimonenko E.<sup>1</sup>, Uprova M.<sup>1</sup>, Kolmakov A.<sup>1</sup>, Soromotin A.<sup>1</sup>, Kurganova I.<sup>2</sup>, Lopes-De-Gerenyu V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Tyumen, Russia

<sup>2</sup>Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS, Pushchino, Russia

E-mail: eafilimonenko@mail.ru

Fires in tundra lead to a decrease in the albedo of burned areas, which affects changes in the climatic conditions, vegetation patterns, and the carbon cycle. Tundra soils contain significant reserves of organic matter. An important role in the process of global climate change is the generation of CO<sub>2</sub> as a result of mineralization of soil organic matter (SOM). Temperature sensitivity (Q<sub>10</sub>) is one of the main indicators of mineralization of soil organic matter.

To investigate the influence of the pyrogenic factor on the temperature sensitivity of SOM mineralization, an area in the Tazovsky district of the YNAO was selected. A five-year tundra fire site (67°11'17011 N, 78°53'25017 E) and a control site (67°11'111241 N, 78°53'4257 E) were treated. The soils of these sites are sandy loam. On each of the two sites 5 soil samples were taken from the organic horizon (litter) and soil samples from the upper 5-cm layer. The total number of collected samples was 20 units. In all samples the content of organic carbon (C), total nitrogen (TN) pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, the lowest moisture capacity were determined. The rate of mineralization (BR) of SOM was determined at 0, 5, 10, 15 and 20°C and moisture content of 85-90% of full field moisture capacity of the samples to calculate Q<sub>10</sub>.

5 years after the fire in the soils there are no statistically significant changes in the contents of C and TN in the organic horizon (litter) and in the layer 0-5 cm. The ratio of the contents of C in the organic layer to the contents in the layer 0-5 cm for the fire site is 6,4 times, for the control site is 8,9 times. Similar ratios for TN for burnt area is 4.7, for the control site is 7.3. Changes in pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> manifested in an increase in the acidity of the organic layer and reduce the acidity of the layer 0-5 cm for soils cinders compared with the control plot. The SOM value in the organic layer of the fire area is reduced relative to the control area, which is due to the transformation of SOM as a result of an increase in the hydrophobicity of SOM during their pyrogenic transformation.

The rate of SOM mineralization increases with increasing soil temperature. For the investigated sites the curve of dependence of mineralization rate (BR) of soil organic matter on temperature (t) has an exponential character and is approximated by regression equation:  $\ln BR = kt + b$  (R<sup>2</sup> from 0.97 to 0.99). Q<sub>10</sub> for the organic soil layer at the fire site is 3.09 and at the control site is 2.96. For soils of the 0-5 cm layer the Q<sub>10</sub> for the fire site and the control site are 2.64 and 2.75, respectively.

Organic layer (litter) on the pyrogenically transformed site has greater temperature sensitivity compared to the control site, while for the 5-cm soil layer the temperature sensitivity of OM mineralization on the control site is higher relative to the burnt area.

*This research was funded by the Tyumen Oblast Government, as part of the West-Siberian Interregional Science and Education Center's project No. 89-DON (1) and CarboRus project (075-15-2021-610).*



# Оценка влияния пирогенного воздействия на температурную чувствительность минерализации органического вещества почв

Филимоненко Е.А.<sup>1</sup>, Упорова М.А.<sup>1</sup>, Колмаков А.А.<sup>1</sup>, Соромотин А.В.<sup>1</sup>, Курганова И.Н.<sup>2</sup>, Лопес-Де-Гереню В.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

E-mail: eafilimonenko@mail.ru

За период 1985-2018 гг. воздействию пожаров подверглось 10,5% территории лесотундры Западной Сибири [1]. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) нарушенные пожарами экосистемы составляют 1,7% площади [2]. Пожары в тундре приводят к уменьшению альbedo выгоревших территорий, что влияет на изменение климатической обстановки, характер растительности и круговорот углерода.

Почвы тундры содержат значительные запасы органического вещества (ОВ). Важную роль в контексте глобального изменения климата играет образование CO<sub>2</sub> в результате минерализации ОВ почв. Минерализация ОВ почв определяется главным образом микробиологическим фактором, увеличиваясь с повышением температуры, а также зависит от физико-химических свойств почвы. Одним из ключевых индикаторов минерализации органического вещества почв является параметр температурной чувствительности (Q<sub>10</sub>).

Для оценки влияния пирогенного фактора на температурную чувствительность минерализации ОВ почв была выбрана территория в Тазовском районе ЯНАО. В пределах территории рассматривался участок тундровой гари (67°11'17011 N, 78°53'25017 E), пожар на котором был в 2016 году, и контрольный участок (67°11'111241 N, 78°53'4257 E), не затронутый пирогенной трансформацией. Почвы данных участков являются супесчаными. На каждом из двух участков было заложено по 5 прикопок из которых отбирались образцы из органического горизонта (подстилки) и образцы почвы из верхнего 5-см слоя. Работы по опробованию участков проводились летом 2021 года, общее количество отобранных проб составило 20 образцов массой по 150-350 г. Все отобранные образцы просушивались до воздушно-сухого состояния и просеивались через сито с размером ячеек 2 мм.

Содержание органического углерода (C<sub>орг</sub>) и общего азота (N<sub>общ</sub>) определяли в образцах, растертых до состояния пудры на CN-анализаторе vario MAX cube (Elementar, Германия) в двухкратной повторности. Определение величины рНН<sub>2</sub>O проводили в образцах почв, дополнительно просеянных через сито 1 мм, соотношение почва : H<sub>2</sub>O<sub>дист</sub> 1 : 25 для проб органического слоя и 1 : 2,5 для проб из слоя 0-5 см на рН-метре Анион-4100. Для определения наименьшей влагоемкости (НВ) образцов использовали пластиковые трубочки с перфорированным дном. Увлажнение почв проводили методом капиллярного насыщения до появления водного слоя на поверхности почвы и вытеснения пузырьков воздуха. Величина НВ соответствовала влажности почвы нарушенного сложения после полного насыщения образца влагой при свободном оттоке гравитационной воды [3]. Для расчета Q<sub>10</sub> почв с участка гари и контрольного участка определяли скорость минерализации (BR) органического вещества почв при разных температурах (0, 5, 10, 15 и 20°C) и увлажненности 85-90% от полной полевой влагоемкости образцов. В лабораторном эксперименте по определению BR использовали навески воздушно-сухой почвы (10 г для почв из слоя 0-5 см и 2 г для проб органического горизонта), для этого навески помещали во флаконы объемом 100 мл, увлажняли и закрывали пленками, пропускающими воздух, но препятствующими испарению влаги. После предварительного инкубирования при t = 10°C в течение 7 суток, флаконы герметично закрывали резиновыми пробками и выдерживали в термостате при заданных температурах от 14 (при температуре 20°C) до 48 часов (при температуре 0°C). Затем определяли концентрации выделившегося из почвы CO<sub>2</sub> с помощью газового анализатора LI-Cor-830 и рассчитывали величины BR (мг C/кг почвы/сут). Результаты аналитических исследований проб почв и результаты измерения скоростей минерализации органического вещества почв при разных температурах представлены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1.** Физико-химические характеристики почв участка гари и контрольного участка.

Параметр	участок гари (пожар 2016 года)		контрольный участок	
	органический слой (подстилка)	слой 0-5 см	органический слой (подстилка)	слой 0-5 см
pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , ед	5,44 (5,13 – 5,53)	5,68 (5,30 – 6,36)	6,33 (5,59 – 6,66)	4,20 (3,90 – 4,58)



НВ, %	197 (143 – 377)	73 (39 – 99)	252 (133 – 454)	46 (39 – 76)
C <sub>орг</sub> , %	23,1 (14,5 – 26,6)	3,6 (1,9 – 6,5)	20,4 (8,7 – 42,0)	2,3 (0,9 – 4,9)
N <sub>общ</sub> , %	0,71 (0,50 – 0,81)	0,15 (0,07 – 0,20)	0,58 (0,27 – 1,22)	0,08 (0,04 – 0,20)
C/N	32,9 (28,7 – 34,0)	28,1 (23,5 – 33,4)	35,0 (31,8 – 35,7)	26,0 (21,7 – 28,0)
<i>Примечание: среднее (минимум – максимум)</i>				

**Таблица 2.**

Скорости минерализации органического вещества при различных температурах в почвах участка гари и контрольного участка.

Скорость минерализации ОБ почв, мг С/кг почвы/сут	участок гари (пожар 2016 года)		контрольный участок	
	органический слой (подстилка)	слой 0-5 см	органический слой (подстилка)	слой 0-5 см
BR <sub>0°C</sub>	26,0 ± 4,5	4,08 ± 0,50	34,6 ± 7,4	3,98 ± 1,15
BR <sub>5°C</sub>	24,8 ± 6,4	4,22 ± 0,87	35,1 ± 9,2	4,29 ± 1,16
BR <sub>10°C</sub>	52,9 ± 9,1	7,89 ± 1,54	68,2 ± 15,7	6,58 ± 1,11
BR <sub>15°C</sub>	104,3 ± 20,6	14,8 ± 3,1	137,1 ± 28,8	17,2 ± 4,1
BR <sub>20°C</sub>	214,7 ± 40,8	24,8 ± 5,8	261,2 ± 57,4	24,8 ± 5,2
<i>Примечание: среднее ± стандартная ошибка (SE)</i>				

Установлено, что по прошествии 5-ти лет после пожара в почвах не наблюдается статистически значимых изменений содержаний Сорг и N<sub>общ</sub> в органическом горизонте (подстилке) и в слое 0-5 см. Отношение содержаний Сорг в органическом слое к содержанию в слое 0-5 см для участка гари составляет 6,4 раза, для контрольного участка – 8,9 раз. Аналогичные отношения по концентрации N<sub>общ</sub> для гари равно 4,7, для контрольного участка – 7,3. Изменения рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> проявляются в увеличении кислотности органического слоя и снижении кислотности в слое 0-5 см для почв гари по сравнению с контрольным участком. Величина НВ образцов органического слоя участка гари снижена относительно контрольного участка, что обусловлено трансформацией ОБ в результате увеличения гидрофобности ОБ при их пирогенной трансформации.

Скорость минерализации ОБ увеличивается с повышением температуры почвы. Для изученных участков кривая зависимости скорости минерализации (BR) органического вещества почв от температуры (t) имеет экспоненциальный характер и аппроксимируется уравнением регрессии первого порядка:  $\ln BR = kt + b$  (при R<sup>2</sup> от 0,97 до 0,99). Температурный коэффициент (Q<sub>10</sub>) для органического слоя почвы на участке гари составляет 3,09, а на контрольном участке – 2,96. Для почв слоя 0-5 см температурные коэффициенты для участка гари и контроля равны 2,64 и 2,75 соответственно.

Таким образом, установлено, что органический слой (подстилка) на пирогенно трансформированном участке имеет большую температурную чувствительность по сравнению с контрольным участком, тогда как для почвенного слоя с глубины 0-5 см температурная чувствительность минерализации ОБ на контрольном участке выше относительно участка гари.

*Исследование было проведено при финансовой поддержке Проекта TerrArctic (Тюменская область Правительственный проект № 89-ДОН и CarboRus (075-15-2021-610)*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Московченко Д.В., Арефьев С.П., Московченко М.Д., Юртаев А.А. Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири / Сибирский экологический журнал. – 2020. – Т. 27. – № 2. – С. 243-255. – DOI 10.15372/SEJ20200210.
2. Московченко Д.В., Московченко М.Д., Тигеев А.А. Оценка площади природных пожаров на территории Ямало-Ненецкого автономного округа с помощью данных дистанционного зондирования / Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2019. – № 2(103). – С. 41-46. – DOI 10.26110/ARCTIC.2019.103.2.005.
3. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A., Semenova M.P. Influence of land use on the physical properties of chernozems in the forest-steppe zone of Western Siberia / Eurasian Soil Science. 2021. Т. 54. № 9. С. 1337-1349.

## СЕКЦИЯ 7

Процессы  
на поверхности суши:  
наблюдения, модели  
и усвоение данных

## SESSION 7

Processes  
on the land surface:  
observations, models  
and data assimilation

### Nonlinear wave diffusion of heat into soils according to the Bakchar swamp and the Badar sand deposit massif (Tunka basin)

Lapina L.E.<sup>1</sup>, Dyukarev E.A.<sup>2</sup>, Voropay N.N.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems  
SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

The temperature regime of the soils at the Bakchar Bog (Tomsk region) and at the Badar sand massif (Buryatia Republic) is studied. Only daily fluctuations in soil temperature during the growing season were considered. The data were averaged monthly. It is shown that the coefficient of effective thermal conductivity is approximated by functions of different types. For forest soils, a polynomial of the third degree is sufficient, for peat soils, the function for the coefficient has the following form:

$$k_T = \begin{cases} a_1 T^2 + a_2 T + a_3, & \text{up to 5 cm depth} \\ C e^{-\gamma T}, & \text{below 5 cm} \end{cases}$$

During the growing season, the pumping effect (nonlinear wave diffusion) associated with daily fluctuations plays a positive role, i.e., heat is "pumped" and the greater the amplitude of daily fluctuations, the more heat is pumped into the soil. Soil cooling occurs in September, and the greater the amplitude of the oscillations, the stronger cooling.

### Нелинейная волновая диффузия тепла в почву по данным Бакхарского болота и массива песчаных отложений Бадар (Тункинская котловина)

Лапина Л.Э.<sup>1</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>2</sup>,  
Воропай Н.Н.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических  
систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск,  
Россия

Нелинейная волновая диффузия тепла (пампинг-эффект) возникает в краевых задачах для нелинейного параболического уравнения типа теплопроводности с периодическими граничными условиями [1],[2]. Этот эф-

фект заключается в том, что чисто гармоническое колебание изучаемой характеристики среды на границе области приводит к увеличению или уменьшению ее значения внутри области относительно ее среднего значения на границе. Обзор задач, в которых наблюдается этот эффект, можно найти в работе [3]. Для мерзлотных почв суть эффекта кратко можно выразить так: чем больше амплитуда колебаний на поверхности почвы, тем ниже температура на глубине затухания колебаний. Для южной части типичной тундры на северо-востоке европейской части России была сделана оценка данного эффекта в работе [4]. Для других типов почв может быть другая ситуация в зависимости от характера функции теплопроводности. Пампинг-эффект связан с колебаниями температуры и поэтому будет на масштабе как суточных колебаний, так и годовых. В данной работе изучаются только суточные колебания в вегетационный период и дается оценка рассматриваемого механизма передачи тепла. Изучение этого механизма передачи тепла, связанного с годовыми колебаниями, требует или изменения методики расчета коэффициента теплопроводности или расчета коэффициента только вблизи поверхности почвы и поэтому в данной работе не рассматривается.

## ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точка	Описание
<b>Бакчарское болото</b>	
1	Зарастающая после торфяного пожара гари на окраине Иксинского болотного массива. Колебания уровня болотных вод больше, чем на других площадках. Толщина торфа около 100 см. Осушенный участок.
2	Осушенный рям Иксинского болота на расстоянии 50 м от осушительного канала и 100 м от окраины болота, мощность торфа около 120 см
3	Осушенный низкий рям на расстоянии 40 м от осушительного канала на окраине болота, мощность торфа около 100 см
4	500 м от окраины олиготрофного болотного массива, мощность торфа около 240 см. Уровень болотных вод располагается на глубине около 30 см.
<b>Тункинская котловина</b>	
5	Сосновый лес с подлеском из рододендрона даурского (возраст древостоя 50-70 лет) с рыхлыми песчаными древне-золотыми отложениями. Мощность почвенной толщи не превышает 30 см.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Рассматривается дифференциальное уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( F(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $T$  – температура почвы ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $F(T)$  – функция теплопроводности, зависящая только от температуры почвы, ось  $z$  направлена вниз по вертикали,  $z = 0$  – поверхность почвы. Заметим, что знание функции  $F(T)$  существенное условие для изучения диффузии тепла. Эту функцию всегда можно оценить с той или иной степенью точности по экспериментальным измерениям. Если функция  $F(T)$  является константой, то рассматриваемого механизма передачи тепла не возникает. Этот механизм связан с нелинейностью уравнения (1) и периодическими колебаниями на поверхности. Рассматривается периодическая задача на полупрямой  $z > 0$  с граничными условиями:

$$T|_{z=0} = f(t), T|_{z \rightarrow \infty} = C < \infty. \quad (2)$$

$f(t)$  – периодическая функция с периодом  $\tau$ . Обычно  $f(t)$  имеет вид:

$$f(t) = T_0 + T_1 \cos(\omega t). \quad (3)$$

Как доказано в работе [1] периодическое решение уравнения (1) с граничными условиями (2),(3) стремится при  $z \rightarrow \infty$  к константе  $T^{\infty}$ , которая находится следующим образом:

$$T^{\infty} = \Psi^{-1} [\langle \Psi(f(t)) \rangle], \quad (4) \text{ где}$$

$$\Psi(T) = \int F(T) dT \quad (5)$$

Количественной оценкой пампинг-эффекта является разность  $T^{\infty} - T_0$ . Если разность больше нуля, то говорят, что пампинг-эффект имеет положительное значение и происходит «закачка тепла», в противном случае – отрицательное и происходит «откачка тепла». Смысл величины  $T^{\infty}$  можно определить как значение асимптоты, к которому стремится решение такой задачи. В граничном условии (3) могут быть и другие функции, например, синусы, главное, чтобы функция была периодической.

Обработку данных измерений начали с расчета амплитуд годовых колебаний и среднегодовых значений температуры почвы, которые показали, что для осушенных участков болота чем меньше амплитуда годовых колебаний температуры, тем выше среднегодовая температура на глубине затухания температурных колебаний, на участке в естественном состоянии оказалась и самая большая амплитуда и



самая высокая температура на той же глубине. Для оценки пампинг-эффекта использовали только данные, полученные в вегетационный период, так как в этот период отмечаются наибольшие амплитуды суточных колебаний. По данным измерений температуры почвы на всех глубинах сначала считали среднемесячные значения до глубины 60 см, т.к. глубже суточные колебания не проникают и полученные величины на каждой глубине аппроксимировали функцией следующего вида:

$$T(z, t) = A(z) \sin(\omega t + \varphi(z)) + B(z), \quad (6)$$

где  $T(z, t)$  – среднемесячное значение температуры почвы на глубине  $z$  (см) в момент времени  $t$  (час),  $A(z)$  – амплитуда суточных колебаний ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $B(z)$  – среднее значение в месяц среднесуточной температуры почвы на глубине  $z$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\omega$  – частота суточных колебаний ( $\text{рад час}^{-1}$ ),  $\varphi(z)$  – сдвиг фазы. Реально были использованы данные лишь до 30 см, ниже амплитуды оказались достаточно низкими. В качестве параметров граничного условия (3) для оценки значения  $T^{\infty}$  использовались значения  $A(0)$  и  $B(0)$ , Формула (6) также использовалась для расчета амплитуд годовых колебаний. Параметр сдвига фаз  $\varphi(z)$  является оптимизационным параметром. Для нахождения параметров, описывающих данные наилучшим образом по формуле (6) сначала фиксировали  $\varphi(z)$ , затем считали параметры  $A$  и  $B$  методом Крамера и считали ошибку аппроксимации  $\varepsilon$  как среднеквадратическую. Затем меняли параметр сдвига фаз на постоянную величину небольшую, снова считали параметры  $A$  и  $B$  и т.д. Получали некоторый набор величин ( $A, B, \varphi, \varepsilon$ ). Из этого набора выбирали параметры аппроксимации с наименьшей ошибкой аппроксимации  $\varepsilon$ . Кроме того, среднегодовые температуры почв аппроксимировались функцией вида:

$$T_{\text{сredyear}}(z) = C_{\text{exp}}(-\gamma z) + D \quad (7)$$

Параметр  $D$  описывает среднегодовую температуру почвы на достаточно большой глубине, когда можно пренебречь первым слагаемым. Значения этого параметра оказались ниже на осушенных участках болот.

Далее по амплитуде колебаний считали коэффициент температуропроводности [5]:

$$K_T(z_1) = \frac{\pi(z_2 - z_1)^2}{24 \ln^2 \left( \frac{A(z_2)}{A(z_1)} \right)} \quad (8)$$

где  $K_T(z_1)$  – коэффициент температуропроводности в точке  $z_1$  ( $\text{см}^2 \text{час}^{-1}$ ),  $z_1, z_2$  – две соседние точки по вертикали ( $z_2 > z_1$ ). К полученному значению коэффициента температуропроводности ставилось в соответствие температура почвы в точке  $z_1$ . Таким образом, получили некоторый набор значений температур и коэффициента температуропроводности. Обзор методов определения температуропроводности, например, можно найти в работе [5], для мерзлотных почв результаты экспериментов по определению теплофизических свойств можно найти в работе [6].

## КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

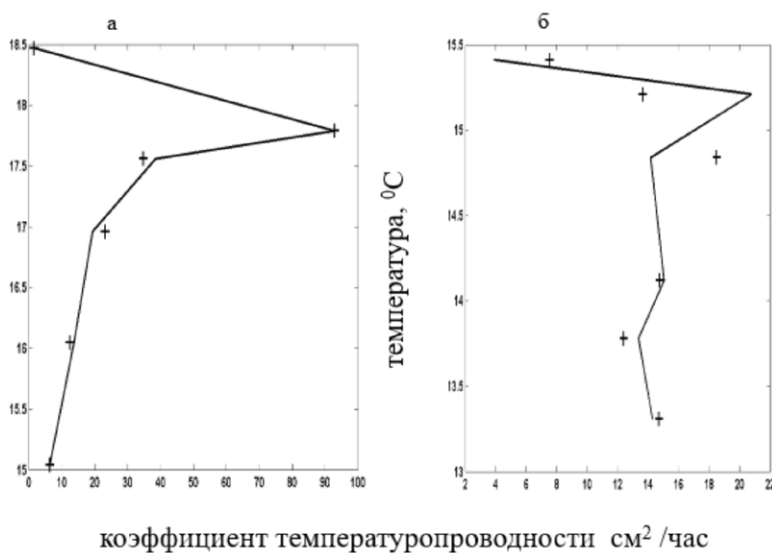
В результате расчетов по формуле (8) получены наборы значений коэффициента по глубине. В свою очередь, температура почвы также зависит от глубины, поэтому смогли найти зависимость коэффициента от температуры почвы, знание которой требуется для расчета пампинг-эффекта (см. вид уравнения (1)). Оказалось, что данные по Бакчарскому болоту в целом описывается следующей зависимостью

$$k_T = \begin{cases} a_1 T^2 + a_2 T + a_3, & \text{до 5 см глубины} \\ C e^{-\gamma T}, & \text{ниже} \end{cases} \quad (9)$$

Для лесных почв аппроксимировали данные полиномом второй и третьей степени, полином третьей степени показал чуть лучше результаты. Для лесных почв отношение амплитуды колебаний к среднемесячной температуре на поверхности почвы оказывается малым параметром практически всегда в каждый месяц вегетационного периода, поэтому в дальнейшем полученные результаты можно использовать для нахождения аналитического решения нелинейного уравнения теплопроводности (1). Результаты представлены на рис. 1.

## ВЫВОДЫ:

1. В вегетационный период пампинг-эффект, связанный с суточными колебаниями, играет положительную роль, т.е. происходит «закачка» тепла и чем больше амплитуда суточных колебаний, тем больше тепла закачивается в почву.
2. Уже в сентябре может происходить охлаждение почвы и чем больше амплитуда колебаний, тем сильнее охлаждение.
3. Вид функции  $F(T)$  существенно влияет на значение величины  $T^{\infty}$ .
4. Как показали расчеты коэффициента температуропроводности для точки 2 август 2015 года, месяц является слишком большим периодом осреднения, вследствие которого вертикальное распределение температуры практически не менялось по глубине, что привело к неадекватным результатам, по всей видимости, связанным с чувствительностью метода расчета к вертикальному профилю температуры, там была потеряна даже однозначность коэффициента температуропроводности.

**Рис. 1.**

Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры среды: а) Бакчарское болото, точка 4, июль 2015; б) Тункинская котловина, июль 2013.

- Для лесных почв отношение амплитуды колебаний к среднемесячной температуре на поверхности почвы оказывается малым параметром практически всегда в каждый месяц вегетационного периода, поэтому в дальнейшем полученные результаты можно использовать для нахождения аналитического решения нелинейного уравнения теплопроводности (1).

Работа выполнена в рамках темы N FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН

#### ЛИТЕРАТУРА:

- Зырянов В.Н., Хубларян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // Доклады Академии наук, 2006, т. 408, N4, с. 535-538
- Зырянов В.Н. Нелинейный пампинг-эффект в колебательных процессах в геофизике // Водные ресурсы, 2013, т. 40, N3, с. 227-239.
- Зырянов В.Н. Нелинейная волновая диффузия в геосредах: пампинг-эффект // Избранные труды Института водных проблем РАН, т. 2., с. 125-161.
- Лапина Л.Э., Каверин Д.А., Пастухов А.В. Оценка пампинг-эффекта в мерзлотных почвах типичной тундры Европейского северо-востока России // Экологический мониторинг и моделирование экосистем, 2021, т. 32, N3-4, с. 100-111
- Микайылов Ф.Д., Шеин Е.В. Теоретические основы экспериментальных методов определения температуропроводности почв // Почвоведение, 2010, N5, с. 595-605.
- Гаврильев Р.И., Кузьмин Г.П. Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом // Наука и образование, 2009, N4, с. 51-54

## On the ratio of the amplitudes of annual fluctuations in air temperature and soil surface temperature

Lapina L.E.<sup>1</sup>, Uspensky I.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IvNIS IVP RAS, Konakovo, Russia

<sup>2</sup>Branch of Rosseti FGC UES, Syktyvkar, Russia

The data of air temperature at 19 meteorological stations in the period from 1970-2019 are analyzed. It is shown that the ratio of the amplitudes of annual fluctuation are in different intervals at different meteorological station and are in the range from 0.53 to 2.01. At each weather station separately, this attitude changes little over time, with the exception of Onega and Arkhangelsk, possibly related to the location of the weather station near the sea. Each weather station is characterized by its phase shift, which varies little in time, both for the surface air temperature and for the soil surface, between which there is a close connection. Correlation analysis of the data showed that there is a negative relationship between the amplitude of annual fluctuations in air temperature and its average annual temperature, i.e. the greater the amplitude of fluctuations, the lower the average annual air temperature.

# О соотношении амплитуд годовых колебаний температуры воздуха и температуры поверхности почвы

Лапина Л.Э.<sup>1</sup>, Успенский И.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИвНИС ИВП РАН, Конаково, Россия

<sup>2</sup>Филиал «Россети ФСК ЕЭС», Сыктывкар, Россия

Данные были получены из открытых источников информации [1]. Полученные данные аппроксимировались функцией вида:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi) + B, (1)$$

где  $y$  – данные наблюдений,  $A$  – амплитуда годовых колебаний температуры воздуха ( $A_1$ ) и температуры поверхности почвы ( $A_2$ ),  $\omega$  – частота годовых колебаний (рад час<sup>-1</sup>),  $\varphi$  – сдвиг фазы для температуры воздуха ( $\varphi_1$ ) и поверхности почвы ( $\varphi_2$ ),  $B$  – среднегодовая температура ( $B_1$  – температура воздуха,  $B_2$  – температура поверхности почвы). Расчеты проводились следующим образом: при фиксированном  $\varphi$  параметры  $A$  и  $B$  рассчитывались методом наименьших квадратов, который сводится к решению системы двух уравнений, решаемая методом Крамера. Затем среди всех рассчитанных вариантов выбирался вариант с наименьшей среднеквадратической ошибкой. Начало года брался в качестве начала расчета годовых колебаний. Также рассчитывалась простейшая статистика отношений сдвига фаз, амплитуд колебаний и среднегодовых значений температур воздуха, часть результатов которых представлена в табл. 1.

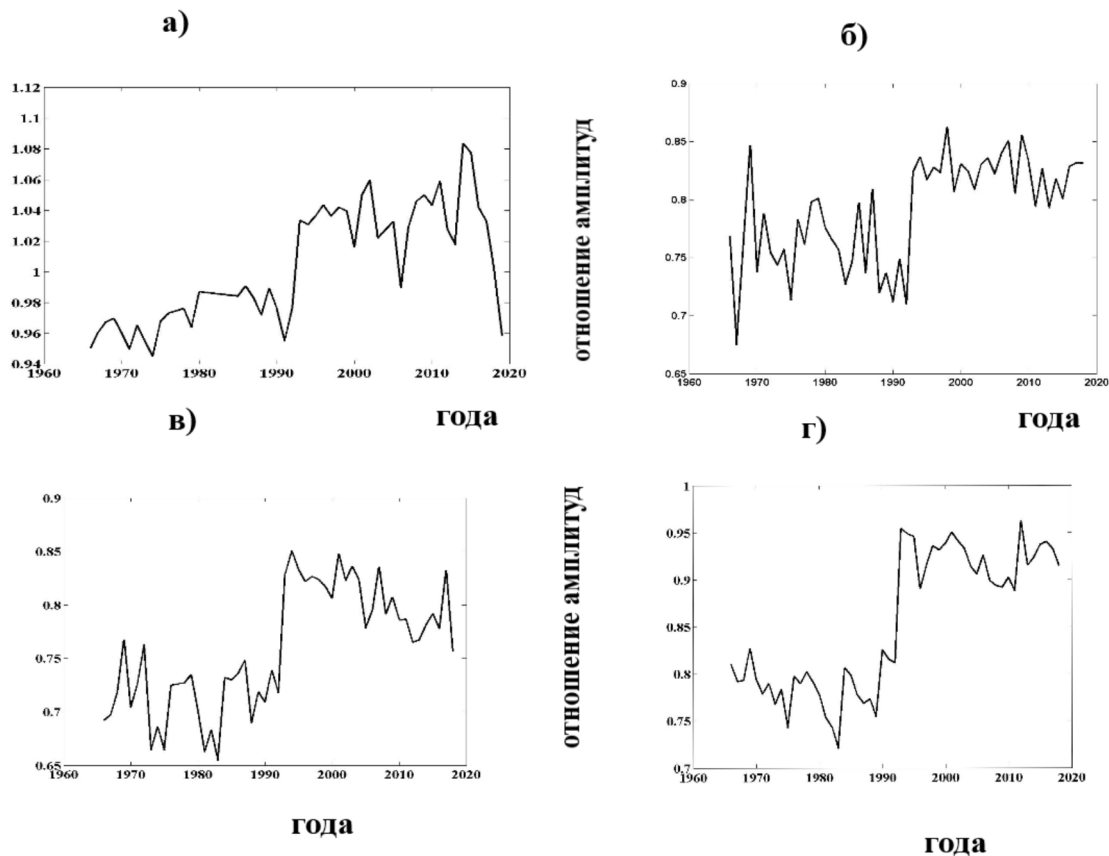
**Таблица 1.**

Статистические характеристики отношения амплитуды колебаний приземной температуры воздуха ( $A_1$ ) и поверхности почвы ( $A_2$ ).

Код ВМО	Метеостанция	min	Max	среднее	медиана	Станд. отклонение
20674	Диксон	0.84	0.99	0.91	0.91	0.03
22471	Мезень	0.64	0.84	0.75	0.76	0.05
22550	Архангельск	0.64	2.01	0.79	0.75	0.23
22641	Онега	0.62	1.94	0.77	0.74	0.21
23205	Нарьян-Мар	0.70	0.87	0.79	0.80	0.05
23324	Петрунь	0.69	0.88	0.81	0.83	0.06
23405	Усть-Цильма	0.73	0.92	0.83	0.83	0.04
23412	Усть-Уса	0.69	0.89	0.80	0.81	0.06
23711	Троицко-Печорск	0.73	0.90	0.81	0.81	0.05
23804	Сыктывкар	0.67	0.86	0.79	0.80	0.05
23933	Ханты-Мансийск	0.75	0.96	0.86	0.85	0.06
24959	Якутск	0.94	1.08	1.00	0.99	0.04
28224	Пермь	0.65	0.85	0.76	0.76	0.06
29328	Бакчар	0.70	0.97	0.86	0.82	0.09
29430	Томск	0.72	0.96	0.85	0.82	0.07
30811	Тунка	0.98	1.01	0.91	0.89	0.06
34009	Курск	0.55	0.74	0.67	0.69	0.05
34123	Воронеж	0.54	1.18	0.64	0.61	0.14
34646	Цимлянск	0.53	1.12	0.71	0.71	0.13

Как видно из табл.1, большинство метеостанций, кроме Архангельска и Онеги, характеризуются достаточно небольшим стандартным отклонением этого отношения, что говорит о малой изменчивости этого отношения во времени.

Рис.1 показывает динамику рассматриваемого соотношения с 1970-2019гг для ряда метеостанций. Небольшие колебания есть, видна тенденция к росту значения этого соотношения, а для г.Томск видно, что в 90г произошел относительно резкий скачок в значении этого соотношения. Для других метеостанций, список которых в табл.1., картинки похожие. Кроме того, анализировали попутно отношение среднегодовых температур и сдвига фазы. Оказалось, что сдвиг фазы величина практически постоянная для



**Рис. 1.**

Динамика отношения амплитуд годовых колебаний температуры воздуха и температуры поверхности почвы для следующих метеостанций: а) – Якутск; б) – Сыктывкар; в) –Пермь; г) –Томск.

каждой метеостанции своя, а по отношению среднегодовых температур воздуха и поверхности почвы закономерностей не обнаружено.

Кроме того, рассчитывались корреляционные матрицы между рассчитанными параметрами, она получилась в данном случае матрицей размера 6 на 6. Также рассчитывались коэффициенты тренда как для отношений амплитуд и среднегодовых значений, так и в отдельности для температуры воздуха и температуры поверхности почвы. Ввиду громоздкости корреляционных матриц приведем только наиболее значимые коэффициенты корреляции для изученных метеостанций

Введем обозначения:

R1 – коэффициент корреляции между  $\phi_1$  и  $\phi_2$ ; R2 – коэффициент корреляции между  $A_1$  и  $B_1$ ; R3 – коэффициент корреляции между  $A_1$  и  $A_2$ ; R4 – коэффициент корреляции между  $B_1$  и  $A_2$ ; R5 – коэффициент корреляции между  $A_2$  и  $B_2$ .

**Таблица 2.**

Некоторые коэффициенты корреляции для разных метеостанций.

Код ВМО	Метеостанция	R1	R2	R3	R4	R5
20674	Диксон	0.94	-0.52	0.92	-0.68	-0.62
22471	Мезень	0.96	-0.50	0.79	-0.41	0.13
22550	Архангельск	0.89	-0.57	0.53	-0.24	0.17
22641	Онега	0.92	-0.57	0.56	-0.22	0.12
23205	Нарьян-Мар	0.94	-0.51	0.88	-0.56	-0.08
23324	Петрунь	0.92	-0.50	0.72	-0.49	0.13
23405	Усть-Цильма	0.95	-0.49	0.83	-0.39	0.06
23412	Усть-Уса	0.96	-0.46	0.71	-0.48	0.07
23711	Троицко-Печорск	0.95	-0.46	0.75	-0.44	0.23
23804	Сыктывкар	0.91	-0.47	0.81	-0.38	0.42
23933	Ханты-Мансийск	0.85	-0.50	0.64	-0.53	0.27



Код ВМО	Метеостанция	R1	R2	R3	R4	R5
24959	Якутск	0.56	-0.70	0.85	0.82	-0.31
28224	Пермь	0.89	-0.36	0.71	-0.33	0.61
29328	Бакчар	0.70	-0.77	0.59	-0.68	0.43
29430	Томск	0.61	-0.79	0.70	-0.81	0.26
30811	Тунка	0.54	-0.61	0.55	-0.76	0.59
34009	Курск	0.93	-0.23	0.68	-0.18	0.62
34123	Воронеж	0.82	-0.29	0.31	0.13	0.79
34646	Цимлянск	0.73	-0.22	0.20	-0.20	0.85
34880	Астрахань	0.84	-0.35	0.25	-0.38	0.89

Данные коэффициента корреляции R2 всюду отрицательные, т.е. чем больше амплитуда годовых колебаний температуры воздуха, тем меньше среднегодовая температура воздуха. Данные коэффициента корреляции R3 говорят о тесной связи амплитуд колебаний температуры воздуха и температуры почвы, за исключением метеостанций Воронеж, Цимлянск, Астрахань.

### ВЫВОДЫ:

1. Показано, что отношение амплитуд годовых колебаний температуры воздуха и температуры поверхности почвы меняются от 0,53 до 2,01 на различных метеостанциях.
2. На каждой метеостанции в отдельности отношение это мало меняется во времени, за исключением Онеги и Архангельска, возможно связанного с месторасположением метеостанции вблизи моря.
3. Каждая метеостанция характеризуется своим маломеняющимся во времени сдвигом фаз, как для приземной температуры воздуха, так и для поверхности почвы, между которыми тесная связь (коэффициент R1 в табл.2)
4. Анализ отношения среднегодовых температур воздуха и поверхности почвы не выявил каких-либо закономерностей.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН

### ЛИТЕРАТУРА:

1. <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> Специализированные массивы для климатических исследований

## A spatio-temporal river water level model based on satellite altimetry data (Kolyma River case study)

Semenova N.K.<sup>1,2</sup>, Zakharova E.A.<sup>1,3</sup>, Krylenko I.N.<sup>1,2</sup>, Sazonov A.A.<sup>1,2</sup>, Lisina A.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>EOLA, Toulouse, France

E-mail: [snkone132@mail.ru](mailto:snkone132@mail.ru)

Since 1990th, space altimetry has being widely used in continental hydrology for observation of water level in ungauged rivers and lakes. Now, thanks to new SAR altimetry instrument and to development of advanced algorithms of radar signal processing, the rivers of small size (up to 100 m wide) could be successfully monitored [2]. However, the frequency of the satellite sampling in high latitudes is still a limiting factor for hydrology. This drawback can be solved via construction of spatio-temporal 2D model from sparse altimetry observations [1].

**Region of study.** A lower reach of the Kolyma River (Siberia) was chosen for the study. The Kolyma River basin is located in the Arctic in zone of continuous permafrost. The selected river reach is situated near the gauging station Kolymaskoye.

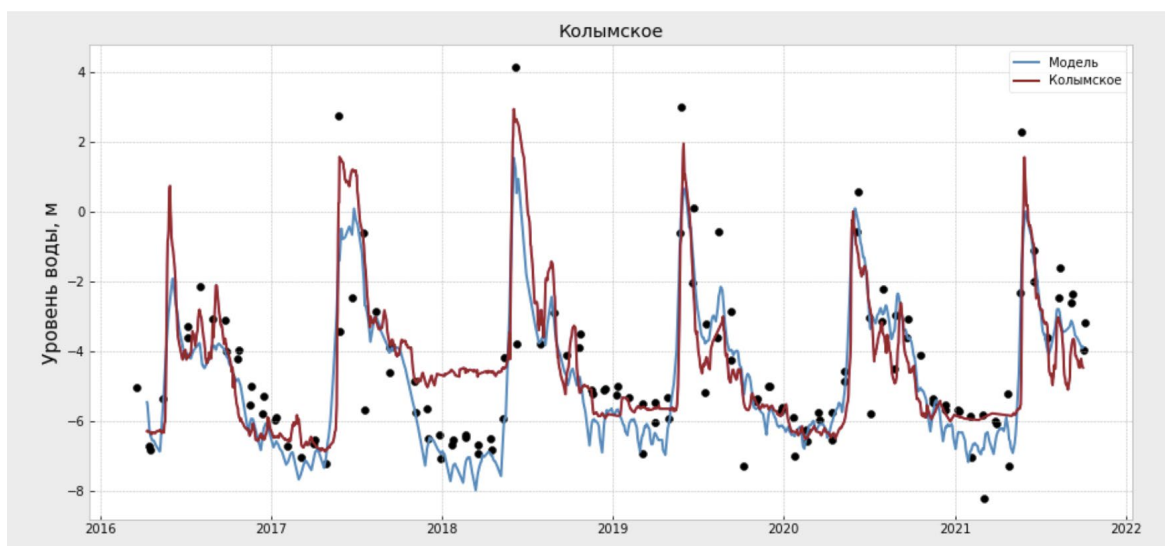
**Data.** Sentinel-3A and 3B 20Hz SAR satellite data for 2016-2021 were used. The satellite sampling frequency was 27 days. Six virtual stations were identified in the vicinity of Kolyma station. Data from the gauging station for 2016-2021 was used for verification of results.

**Methods.** Due to the specifics of fluvial geomorphology, the altimetric measurements contained large amounts of outliers. Two classical statistical methods ( $3\sigma$  and Mahalanobis distance) and two machine learning

methods (Isolation Forest, DBSCAN and local outlier factor- LOF) were chosen to detect the outliers. After filtering the water level time series (TS) were used to construct a spatio-temporal water level model of the river section of 80 km length. A nonparametric Bayesian model - Gaussian regression - was chosen for this purpose [3].

**Results.** The 2D water level model allows for extraction of the water level time series at any place within studied reach. For verification of the model, the water level time series was extracted at location of Kolymskoe gauging station (Fig. 1). After outliers' filtering the RMSE between in situ and altimetry TS reduced from 79 cm to 70 cm. The Nash-Sutcliffe coefficient for the final model was 0.82.

*Acknowledgement.* This work was supported by Russian Science Foundation grant No 22-27-00633.



**Figure 1.**

In situ (red) and modelled (blue) water levels for location of Kolymskoye station. Black dots are the altimetric measurements at 6 nearest satellite tracks.

#### REFERENCES:

1. Nielsen K., E Zakharova, A Tarpanelli, OB Andersen, J Benveniste, River levels from multi mission altimetry, a statistical approach. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 270, 112876
2. Zakharova, K Nielsen, G Kamenev, A Kouraev, River discharge estimation from radar altimetry: Assessment of satellite performance, river scales and methods. *Journal of Hydrology*, 2020, 583, 124561
3. Grbic R., Kurtagic, D., Sliskovic, D., 2013. Stream water temperature prediction based on Gaussian process regression. *Expert Systems with Applications*, 40(18), 7404– 7414.

## Построение пространственно-временной модели уровня воды на основе альтиметрических данных (на примере реки Колыма)

Семенова Н.К.<sup>1,2</sup>, Захарова Е.А.<sup>1,3</sup>, Крыленко И.Н.<sup>1,2</sup>, Сазонов А.А.<sup>1,2</sup>, Лисина А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>EOLA, Тулуза, Франция

E-mail: [snkone132@mail.ru](mailto:snkone132@mail.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

Начиная с середины 70-х годов прошлого века спутниковая альтиметрия применяется в науках о Земле. Применение альтиметрических спутниковых данных позволило изучать гидрологический режим рек и озер непокрытых сетью наблюдений, выявлять влияние климатических изменений и т.д. Помимо вышеперечисленного получение информации о высотной отметке водной поверхности позволяет оценить расход воды. Изначально применение альтиметрии было возможно только для крупных рек,

ширина которых превышала 1 км [2], однако развитие алгоритмов обработки радиолокационной съемки позволила измерять высоту поверхности на реках шириной до 100 м с точностью сопоставимой для крупных рек [3]. Тем не менее, частота спутниковых измерений в высоких широтах все еще является ограничивающим фактором для их широкого использования в арктической гидрологии. Этот недостаток может быть решен путем построения пространственно-временной 2D модели на основе разреженных альтиметрических наблюдений [1].

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования был выбран участок в нижнем течении реки Колымы. Бассейн Колымы – крупнейший в России речной бассейн, полностью расположенный в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Несмотря на большую площадь водосбора (643 тыс. км<sup>2</sup>), в бассейне реки Колыма в настоящее время функционирует всего 35 гидрологических постов, причем расход воды измеряют только на 14. Выбранный участок реки расположен в нижнем течении реки вблизи села Колымское, напротив устья реки Омолон, недалеко от урвненного гидрологического поста. С одной стороны, это дает возможность получить информацию об уровне воды и сравнить ее со спутниковыми данными, а с другой стороны, положение участка позволяет получить наиболее полную картину о пространственной неоднородности уровней.

## ДААННЫЕ

В качестве спутниковых данных были выбраны данные спутников Sentinel-3A и 3B за 2016-2021 гг. Частота измерения спутников составила 27 дней. Было идентифицировано 6 виртуальных станций вблизи с. Колымское, расположенных выше и ниже по течению. В качестве фактических данных были использованы данные урвненного гидрологического поста с. Колымское за 2016-2021 гг.

## МЕТОДЫ

### 1. Работа с выбросами

В силу особенностей конфигурации берегов Колымы, наличия большого количества озер, полученные альтиметрические данные некоторых виртуальных станций, содержали большое количество выбросов. Их удаление из рассмотрения при построении пространственно-временной модели позволяет сильно улучшить качество временных серий. Поэтому первым подготовительным этапом была разработка алгоритма, позволяющего улавливать выбросы.

Для обнаружения выбросов были выбраны классические статистические методы и методы машинного обучения, решающие задачи кластеризации. В качестве статистических методов реализованы следующие алгоритмы: правило  $3\sigma$  и расстояние Махаланобиса [4]. Указанные методы являются эффективными и простыми в реализации при первичном анализе данных на выбросы. В свою очередь, в качестве методов кластеризации были реализованы следующие алгоритмы: изолированный лес (Isolation Forest) [7] и алгоритмы на основе плотности DBSCAN [5] и LOF (local outlier factor) [6]. Для более стабильной и эффективной работы алгоритма были использованы ансамбли. Результат работы построенного алгоритма представлен на рис. 1.

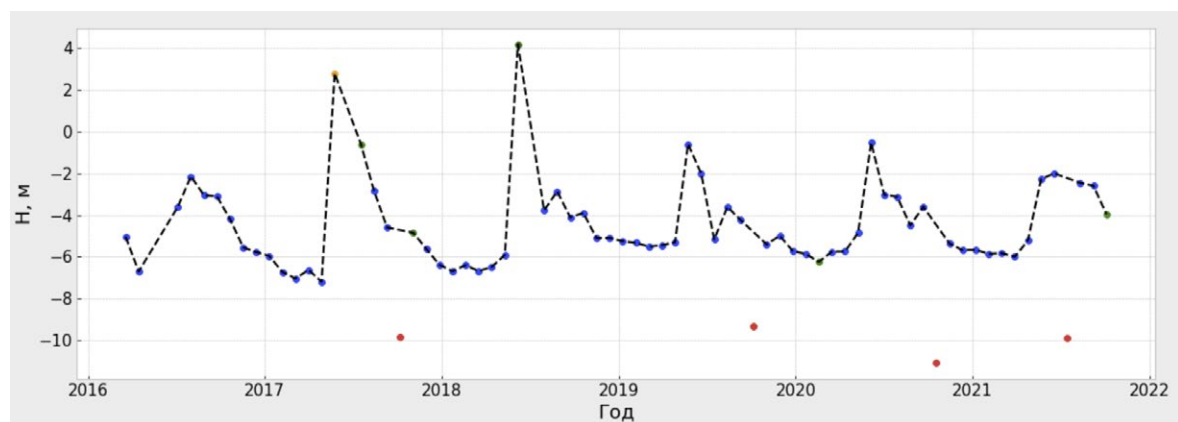
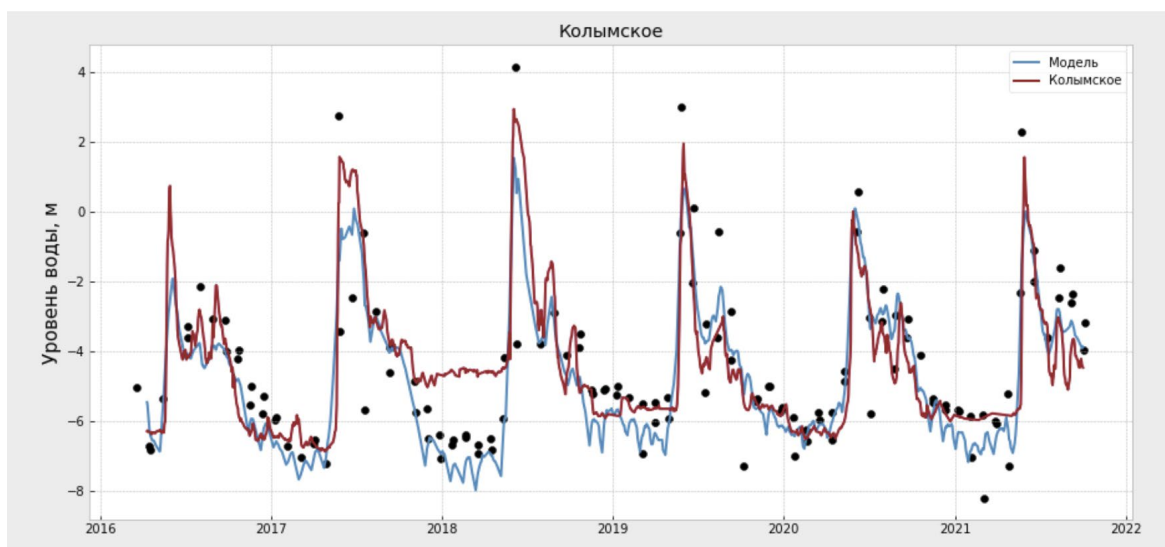


Рис. 1.

Временной ход альтиметрического уровня воды на виртуальной станции S3A88. Красные точки – изменения, которые алгоритм отнес к выбросам.

## 2. Пространственно-временная модель

Полученные после отбраковки выбросов данные использовались для построения пространственно-временной модели уровня воды на участке реки. В качестве алгоритма была выбрана регрессия на основе гауссовских процессов [8]. Регрессия на основе гауссовских процессов – непараметрический байесовский метод машинного обучения, относящийся к вероятностным моделям. Данный алгоритм является одним из эффективных алгоритмов машинного обучения и, благодаря вероятностной трактовке, находит применение во многих задачах. В основе алгоритма лежит идея, что целевая функция (ход уровня воды) – случайная величина, распределение которой в точках наблюдений является двумерным нормальным распределением.



**Рис.2.**

Ход фактического (красный) и смоделированного (синий) уровней для створа Колымское. Черные точки – альтиметрические данные на ближайших треках.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результат работы построенной модели представлен на рис. 2. Использование алгоритма нахождения выбросов позволило уменьшить среднеквадратическое отклонение с 79 см до 70 см для поста Колымское. Коэффициент Нэша-Сатклиффа для модели после удаления выбросов составил 0.82.

*Благодарность. Работы выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 22-27-00633.*

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Nielsen K., E. Zakharova, A. Tarpanelli, O.B. Andersen, J. Benveniste, *River levels from multi mission altimetry, a statistical approach. Remote Sensing of Environment*, 2022, 270, 112876
2. Troitskaya Yu., Rybushkina G., Soustova I. et al. *Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir // Int. J. Rem. Sens.* 2012. V. 33. No. 23. P. 7559–7578
3. Zakharova E., K. Nielsen, G. Kamenev, A. Kouraev, *River discharge estimation from radar altimetry: Assessment of satellite performance, river scales and methods. Journal of Hydrology* 2020, 583, 124561
4. Julius T. Tou, Rafael C. Gonzalez. *“Pattern Recognition Principles”*, Addison-Wesley, 1974;
5. Ester M., H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, 1996. *A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD'96, Pp. 226–231, Portland, Oregon. AAAI Press.*
6. Breunig, M. M., H.-P. Kriegel, R. T. Ng, and J. Sander; 2000. *LOF: identifying densitybased local outliers. ACM SIGMOD Record*, 29(2):93–104.
7. Liu F.T., K. M. Ting, and Z. Zhou, 2008. *Isolation Forest. In 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining.*
8. Grbic R., Kurtagic, D., Sliskovic, D., 2013. *Stream water temperature prediction based on Gaussian process regression. Expert Systems with Applications*, 40(18), 7404–7414.



# Influence of meteorological conditions on the maximum spring floods of mountain rivers

Kirsta Y.B.<sup>1</sup>, Troshkova I.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

E-mail: [kirsta@iwep.ru](mailto:kirsta@iwep.ru), [egorka\\_iren@mail.ru](mailto:egorka_iren@mail.ru)

The problem of timely forecasting of spring river floods becomes more and more acute due to changing climate and accompanying destabilization of meteorological processes. To solve this problem, it is necessary to develop predictive models that adequately characterize the influence of air temperatures and precipitation on hydrological processes in river watersheds.

We analyzed the influence of main environmental factors on the annual extreme values of spring runoff (SR) of mountain rivers. To do this successfully, we used a universal model of average seasonal river runoff, which allowed to quantify the influence of landscape structure of river watersheds, monthly precipitation, mean monthly air temperatures, as well as areas and heights of landscapes [Kirsta and Puzanov, 2020]. The influence was estimated by solving the inverse mathematical problem for a system of hydrological equations with the help of MATLAB optimization methods. The annual highest SR observed at 34 rivers of the Altai-Sayan mountain country in 1951–2019 were substituted into the system to establish 36 parameters that characterize the relationship of these SR with environmental factors.

*Established relationship of maximum SR with winter conditions.* The annual values of maximum SR naturally increase with precipitation  $P_1$  for December-March. After cold winters at air temperatures for December-March below their average  $T_1 < \bar{T}_1$  and precipitation  $P_1 < \bar{P}_1$ , maximum SR rises with  $T_1$ . This dependence can be explained by faster melting of snow cover under the influence of  $T_1$  and spring solar radiation, accompanied by the rolling of meltwater from frozen soils into rivers. After warm winters at  $T_1 > \bar{T}_1$  and  $P_1 < \bar{P}_1$ , maximum SR decreases with the growth of  $T_1$  because of the loss of meltwater for soaking soils that thaw quickly in spring. The same effect takes place after cold winters at  $T_1 < \bar{T}_1$  and  $P_1 > \bar{P}_1$ , i.e., winters with a significant snow cover preventing deep freezing of soils. After warm winters at  $T_1 > \bar{T}_1$  and  $P_1 > \bar{P}_1$ , maximum SR increases with  $T_1$  due to the rolling of meltwater from soils (well moistened during the winter) into rivers.

*Established relationship of maximum SR with spring conditions.* The dependence of annual maximum SR on spring meteorological conditions differs from the above case. At air temperatures for April near their average  $T_2 \sim \bar{T}_2$  and low precipitation  $P_2 < \bar{P}_2$ , the annual values of maximum SR decrease with the growth of  $T_2$  due to the loss of meltwater for soaking of thawing soils. At high temperatures  $T_2 > \bar{T}_2$  and  $P_2 < \bar{P}_2$ , maximum SR increases with  $T_2$  owing to more active snowmelt prevailing over soil soaking. We also detected that maximum SR rises with  $T_2$  if  $T_2 \sim \bar{T}_2$  and  $P_2 > \bar{P}_2$ , because heavy snowfall  $P_2$  prevents soil thawing and meltwater loss to soil soaking. At high temperatures  $T_2 > \bar{T}_2$  and  $P_2 > \bar{P}_2$ , SR values, on the contrary, decrease with the growth of  $T_2$  due to active thawing of soils and their soaking by meltwater.

During the investigation, we normalized all variables of the applied river runoff model. This made it possible to create a single sample of annual maximum SR of 34 rivers over 70 years. Using this sample, we solved the inverse mathematical problem that helped to determine all the parameters of the model and found out the dependencies of extreme SR on environmental factors. We analyzed SR formation at 34 different rivers located throughout the Altai-Sayan mountain country. Their basins differ significantly in areas, orographic features and meteorological conditions. Therefore, we can consider the found dependences of extreme SR on meteorological factors as universal and applicable for various mountainous areas with negative winter temperatures.

*The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-27-00058.*

## REFERENCES:

1. Kirsta YB, Puzanov AV (2020) System-analytical modelling: 1. Development of regional models for mountain river runoff. *EJMCA* 8(2):69–85. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2020-8-2-69-85>

# Влияние метеорологических условий на максимумы весенних половодий горных рек

Кирста Ю.Б.<sup>1</sup>, Трошкова И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия  
E-mail: kirsta@iwep.ru, egorka\_iren@mail.ru

**П**роблема своевременного прогноза весенних наводнений рек становится все более острой из-за меняющегося климата и сопутствующей дестабилизации метеорологических процессов [1]. Для решения этой проблемы требуется разработка прогнозных моделей, адекватно характеризующих влияние температур воздуха и осадков на гидрологические процессы в водосборных бассейнах рек [2].

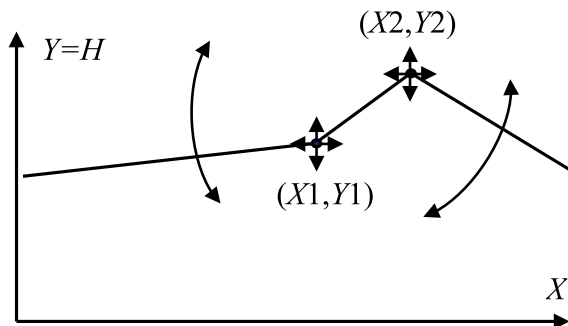
Нами проанализировано влияние основных факторов среды на ежегодные экстремальные значения весеннего стока (ВС) горных рек. Для этого использована универсальная модель среднесезонных речных стоков, позволяющая количественно охарактеризовать влияние на них ландшафтной структуры речных бассейнов, месячных осадков, среднемесячных температур воздуха, площадей и высот расположения ландшафтов [3, 4].

Применяемый метод системно-аналитического моделирования обеспечивает построение различных имитационных моделей с адекватным описанием физических, химических, биологических и гидрологических процессов [3–6]. Метод реализован в программной среде MATLAB. Мы также использовали геоинформационную платформу ArcGIS 10.2 для обработки картографических данных о рельефе и ландшафтной структуре речных бассейнов. Влияние факторов среды оценивалось путем решения обратной математической задачи для системы из ~2000 уравнений с помощью оптимизационных методов MATLAB. В систему подставлялись ежегодные наибольшие (или наименьшие) значения ВС, наблюдаемые на 34 реках в 1951–2019 гг., а неизвестными переменными являлись параметры, характеризующие зависимость этих ВС от условий среды. Уравнения имели вид [3]:

$$ESR^i = \sum_k \{a_k S_k^i P_1 H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, T_1) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + \sum_k \{b_k S_k^i P_2 H(c_7, c_7, 1, 1, c_8, c_9, T_2) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + c_{10}, \quad (1)$$

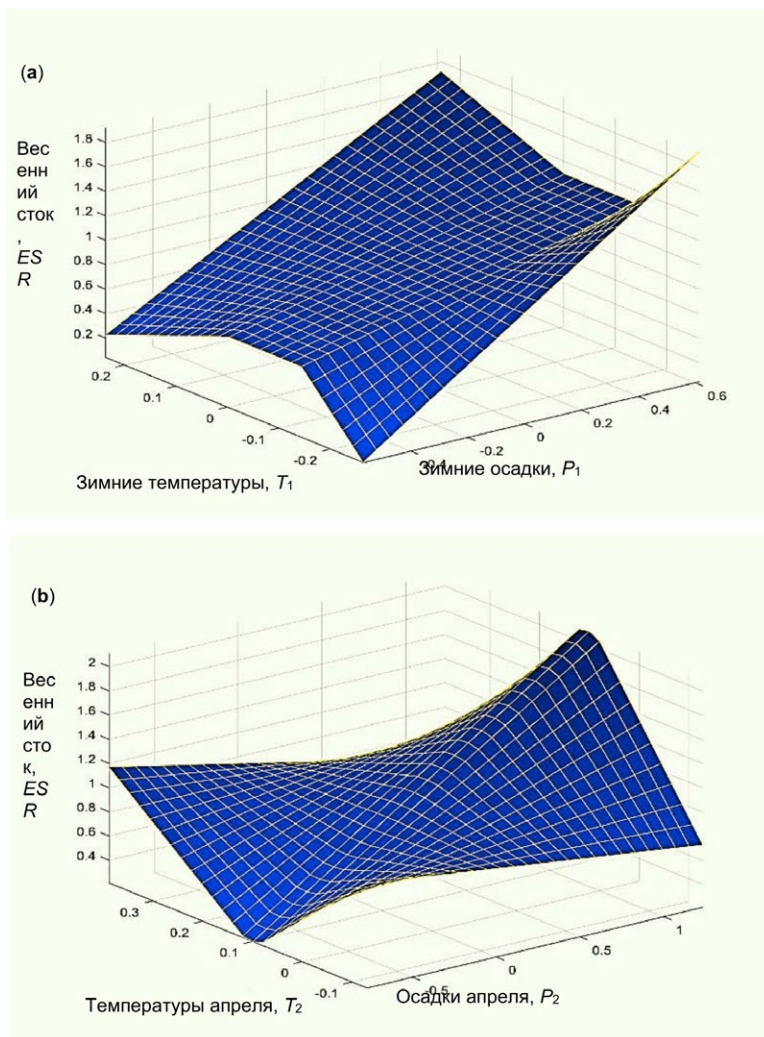
где  $ESR^i$  – наблюдаемый экстремальный ВС за конкретный год, нормированный на свою среднегодовую величину в бассейне  $i$ ,  $i = 1-34$ ; первое и второе слагаемые в (1) отвечают вкладам в  $ESR^i$  от осадков за декабрь-март и апрель соответственно; параметры  $a_k, b_k$  определяют вклады, формируемые ландшафтом  $k$ ,  $k = 1-13$ ;  $S_k^i$  – площадь ландшафта  $k$ , нормированная на площадь бассейна  $i$ ;  $h_k^i$  – средняя высота этого же ландшафта, м a.s.l.;  $P_1, P_2$  – отклонения месячных осадков (нормированных на свои среднегодовые значения) соответственно за декабрь-март и апрель от их среднего;  $T_1, T_2$  – аналогичные отклонения для среднемесячных температур воздуха (нормированных на свои среднегодовые значения) за те же периоды;  $c_1, \dots, c_9$  – параметры, характеризующие влияние температур  $T_1, T_2$  и высот  $h_k^i$  на  $ESR^i$ ;  $c_{10}$  отвечает постоянному дополнению ( $c_{10} > 0$ ) или уменьшению ( $c_{10} < 0$ ) величины  $ESR^i$  за счет подземных вод и вод трещиноватых пород;  $H$  – непрерывная кусочно-линейная функция (рис. 1), аппроксимирующая различные формы зависимостей при разных значениях своих параметров [3].

Путем решения обратной математической задачи для системы (1) были получены 36 параметров (13  $a_k$ , 13  $b_k$ , и 10  $c_1, c_2, \dots, c_{10}$ ), которые определяли влияние ландшафтов, температур воздуха и осадков на экстремальные значения ВС. Зависимости ежегодных максимальных значений ВС от метеорологических факторов оказались разными (рис. 2).



**Рис. 1.** Функция  $H(X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2, X)$  из трех линейных фрагментов с произвольно меняемыми параметрами.

Обсудим связь ежегодных максимальных значений ВС с метеоусловиями зимы (рис. 2а). Мы видим естественное возрастание  $ESR$  с осадками  $P_1$ . Зависимость  $ESR$  от температур воздуха  $T_1$  более сложна. После холодных зим ( $0.25 < T_1 < 0$ ) и малых осадков  $P_1 < 0$   $ESR$  растет с температурами  $T_1$  за счет более быстрого таяния снежного покрова под действием весенней солнечной радиации и скатывания



**Рис. 2.** Зависимость максимума ВС горных рек ( $ESR$  в (1)) от температур воздуха  $T_1$ ,  $T_2$  и осадков  $P_1$ ,  $P_2$ . **a** – влияние метеоусловий декабря-марта, **b** – влияние метеоусловий апреля.

талых вод с промерзших почв в реки. После теплых зим ( $0 < T_1 < 0.25$ ) и  $P_1 < 0$  величина  $ESR$  уменьшается с ростом  $T_1$  из-за потерь талых вод на промачивание быстро оттаивающих весной почв. Этот же эффект имеет место после холодных зим ( $0.25 < T_1 < 0$ ) и  $P_1 > 0$ , то есть при значительном снежном покрове, препятствующему глубокому промерзанию почв. В теплые зимы ( $0 < T_1 < 0.25$ ) и  $P_1 > 0$  значение  $ESR$  увеличивается с ростом  $T_1$  из-за скатывания талых вод с увлажненных за зиму почв в реки.

Зависимость ежегодных максимальных значений ВС (рис. 2b) от весенних метеоусловий отличается от рис. 2a. При невысоких весенних температурах  $0.1 < T_2 < 0.1$  и малых осадках  $P_2 < 0$  величина  $ESR$  падает с увеличением  $T_2$  из-за потерь талых вод на промачивание оттаивающих почв. При высоких температурах  $0.1 < T_2 < 0.4$  и  $P_2 < 0$   $ESR$  увеличивается с  $T_2$  вследствие более активного таяния снежного покрова, преобладающего над промачиванием почв. Увеличение  $ESR$  с  $T_2$  мы видим также при  $0.1 < T_2 < 0.1$  и больших осадках  $P_2 > 0$ , которые препятствуют оттаиванию почв и потере талых вод на их промачивание. При высоких температурах  $0.1 < T_2 < 0.4$  и больших осадках  $P_2 > 0$  величина  $ESR$ , наоборот, падает с ростом  $T_2$  из-за активного оттаивания почв и их промачивания талыми водами.

Мы проанализировали формирование ВС на 34 горных реках, бассейны которых значительно различаются по площадям, орографическим особенностям и метеорологическим условиям. Это позволяет рассматривать полученные зависимости экстремальных ВС от факторов среды как универсальные и применимые для различных горных территорий с отрицательными температурами воздуха зимой.

Универсальность результатов обусловлена тремя аспектами исследования. Во-первых, адекватным выделением 13 групп ландшафтов по особенностям гидрологических режимов и обработкой их картографических характеристик с помощью ГИС. Во-вторых, нормировкой среднемесячных температур воздуха и месячных осадков на среднеголетние значения и их пространственным усреднением по территории Алтае-Саянской горной страны. Это позволило адекватно отразить помесечную динамику факторов за 70 лет, единообразную для всей страны и не зависящую от высоты местности. В-третьих, применяемым методом системно-аналитического моделирования, обеспечившим определение искомым зависимостей через решение обратной математической задачи для систем имитационных гидрологических уравнений большой размерности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-27-00058*

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Medvedkov KS, Shtripling LO (2018) Degradation of flooding situation related to anthropogenic effects on the example of Tyukalinsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University: Geo Assets Engineering* 329(9):143–152. <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/51021>
2. Brinkerhoff CB, Gleason CJ, Feng D, Lin P (2020) Constraining remote river discharge estimation using reach-scale geomorphology. *Water Resour Res* 56(11):e2020WR027949. <https://doi.org/10.1029/2020WR027949>
3. Kirsta YB, Puzanov AV (2020) System-analytical modelling: 1. Development of regional models for mountain river runoff. *EJMCA* 8(2):69–85. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2020-8-2-69-85>
4. Kirsta YB (2020) System-analytical modelling: 2. Assessment of runoff model sensitivity to environmental factor variations. *EJMCA* 8(3):67–77. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2020-8-3-67-77>
5. Kirsta YB (2006). System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. *Soil-moisture exchange in agroecosystems. Ecol. Modelling* 191:315–330. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.05.028>
6. Kirsta YB, Puzanov AV (2021) System-Analytical Modeling of Water Quality for Mountain River Runoff. In: Pandey BW, Anand S (eds) *Water Science and Sustainability: Chapter 7. Springer, Nature. Sustainable Development Goals Series*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57488-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57488-8_7)

## Climate-driven changes in the inflow to the Mozhaysk reservoir

Akhmerova N.<sup>1</sup>, Ayzel G.<sup>2</sup>, Erina O.<sup>1</sup>, Sokolov D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute for Environmental Sciences and Geography, University of Potsdam, Germany

E-mail: [akhmerova.natali@gmail.com](mailto:akhmerova.natali@gmail.com)

Changes in streamflow were proven to be an important area of ongoing research in the hydrologic sciences. The purpose of this work was to assess changes in Mozhaysk reservoir total inflow in the XXI century, which was associated with changes in the climatic conditions of the region. The dynamic evaluation was based on climate modeling data taken from the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). The conceptual model of the hydrological runoff HBV was used to obtain the values of the runoff for the forecasted period. Also the grwat package implemented in the R programming language was used for isolating the phases of the water regime. The results of our study show the average annual inflow volume to the Mozhaysk reservoir is expected to increase by 7% by the end of XXI century. In addition to that, the intra-annual Runoff distribution is likely to change: the inflow during fresh-periods will decrease by 4-7%, but the inflow during floods (primarily winter ones) will increase by 7-11%. The variability of the annual runoff will increase by about a third (the coefficient of variation will increase from 0.26 to 0.32-0.41). Extreme inflow values are also expected to increase.

The observed and expected changes in the structure of the water balance of the Mozhaysk reservoir necessitate changes in the dispatch schedule of the Mozhaysk hydroelectric complex, which hasn't changed since 1968. In addition, changes in the volume and flow regime will affect the hydrodynamic regime of the reservoir, the conditions of all intra-reservoir processes, the intra-annual distribution of suspensions, nutrient and organic substances, which will inevitably lead to permanent changes in the ecosystem of the Mozhaysk reservoir and its self-purification capacity. These issues require close attention and further research.



# Климатически обусловленные изменения притока воды в Можайское водохранилище

Ахмерова Н.Д.<sup>1</sup>, Айзель Г.В.<sup>2</sup>, Ерина О.Н.<sup>1</sup>, Соколов Д.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московской Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Россия

<sup>2</sup>Потсдамский университет, Потсдам, Германия

E-mail: [akhmerova.natali@gmail.com](mailto:akhmerova.natali@gmail.com)

## ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление на данный момент – одна из самых серьезных и исследуемых проблем в мире. Потепление климата влечет за собой изменение количества выпадающих осадков и таяние ледников, что вызывает изменения в гидрологических системах, оказывая влияние на количество и качество водных ресурсов [7]. Во всем северном полушарии, в том числе на обширной территории России, в зонах избыточного и нормального увлажнения (около  $\frac{3}{4}$  территории РФ) отмечается увеличение годового стока рек.

Особое значение имеет изучение и прогноз изменения стока для систем водоснабжения крупных городов, где крайне важно обеспечение гарантированной водоподачи. К таким городам, несомненно, относится г. Москва – столица Российской Федерации, входящая в 25 крупнейших мегаполисов мира и крупнейший город в России. Вопрос водоснабжения города Москвы является насущной проблемой на протяжении нескольких веков. Более 65% питьевой воды поступает благодаря Москворецкой системе, в которой важную роль играет Можайское водохранилище, созданное в 1961 году для обеспечения бесперебойного водоснабжения города Москвы и многолетнего регулирования стока реки Москвы [2]. При этом ранее модельных прогнозных оценок изменения притока воды в Можайское водохранилище при потеплении климата не проводилось.

Исследования по оценке возможных изменений водного режима и объема стока в 21 веке при реализации климатических сценариев уже выполнялись для различных объектов, как отечественными [3, 5], так и зарубежными учеными [4, 6, 8]. Для моделирования стока в работах применяются различные модели гидрологического стока, такие как SWAP, GR4J, HBV, в отечественных работах – ECOMAG. В качестве возможных сценариев изменения климата в перечисленных выше работах рассматриваются сценарии RCP, тогда как оценки на основе сценариев SSP, опубликованных в последнем докладе МГЭИК, на данный момент встречаются крайне редко.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы оценить изменения притока воды в Можайское водохранилище в XXI веке, связанные с вероятными изменениями климатических условий региона, основываясь на данных моделирования климата, взятых из пятой фазы Проекта взаимного сравнения связанных моделей (CMIP5) [5].

**Для достижения этой цели были решены следующие задачи:**

- обоснование выбора расчетных водосборов и подготовка их цифровых контуров;
- обоснование выбора климатических сценариев для прогнозирования изменения стока;
- подготовка массивов ежесуточных данных о поверхностном притоке в Можайское водохранилище за исторический и прогнозируемый периоды;
- выполнение статистического анализа массивов данных за оба периода, выявление наблюдаемых и прогнозируемых трендов изменений режима речного стока.

В качестве исходных данных в работе использовались данные реанализа EWEMBI и расходы воды р. Москва в верхнем течении в створе г/п Барсуки (площадь водосбора – 755 км<sup>2</sup>). Для моделирования стока на основе сценариев RCP 26, 60, 85 применялась модель HBV. Результаты валидации, произведенной по данным суточных расходов воды р. Москва (г/п Барсуки) за 1979-2000 и 2010-2015, показали удовлетворительные и хорошие результаты (NSE – 0,613-0,773; |BIAS| – 3,19-5,73%). Для выделения фаз водного режима и расчета различных характеристик – автоматизированный алгоритм расчленения гидрографа GrWat.

**Тенденции изменения притока в водохранилище в исторический период**

За полвека существования Можайского водохранилища климат Русской равнины претерпел значительные изменения, характеризующиеся увеличением притока теплых и влажных атлантических воздушных масс, что обусловило уменьшение континентальности климата региона. Климатические изменения проявляются в том числе в изменении значимости источников питания водохранилища: уменьшается доля снегового и увеличивается доля дождевого питания, иными словами, величина половодья на реках Можайского водосбора уменьшается, а величина паводков наоборот увеличивается. Так, в 1960-е гг. доля притока в водохранилище в половодье составляла 70%, а в последнее десятилетие всего 42%, тогда как доля притока воды в паводки увеличилась с 17 до 40%. [1].

## ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИТОКА В ВОДОХРАНИЛИЩЕ В XXI ВЕКЕ

### Изменения расходов различной обеспеченности

При реализации сценариев изменения климата в верховье р.Москвы расходы воды обеспеченностью 60-10% увеличатся в среднем примерно на  $2,8 \text{ м}^3/\text{с}$  (40,5%); в области максимальных расходов изменения аналогичны: при обеспеченности менее 5% прогнозируемое увеличение достигает  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  (40,3%).

Средняя величина годового притока в прогнозном периоде увеличивается: если в историческом периоде она составляла 392 млн  $\text{м}^3$ , то по самому негативному сценарию RCP8.5 составит 415 млн  $\text{м}^3$  (больше на 5,9%), а по наиболее благоприятному сценарию RCP2.6 – 422 млн  $\text{м}^3$  (больше на 7,7%).

Также следует ожидать увеличение изменчивости годового стока в прогнозном периоде по сравнению с историческим: в исторический период коэффициент вариации расходов воды  $C_v$  составлял 0,26, а согласно сценарию RCP2.6 составит 0,32; RCP6.0 – 0,41; RCP8.5 – 0,33; т.е. в среднем возрастет на 0,09, что говорит об увеличении изменчивости характера питания Можайского водохранилища речными водами различного генезиса как в межгодовом, так и во внутригодовом разрезе.

### Изменения генетической структуры речного стока

В XXI веке также ожидается внутригодовое перераспределение притока воды в Можайское водохранилище в соответствии со сценариями изменения климата. Основные изменения коснутся увеличения доли притока воды в паводки в суммарном годовом стоке в XXI веке, а также снижения, хотя и более низкими темпами, вклада половодья в годовой сток воды в р.Москве.

Доля стока за период половодья уменьшится на 6% (от 4% согласно сценарию RCP2.6 до 7% согласно RCP8.5). Доля паводков увеличится на 9%: с 24% до 31% (RCP2.6) – 35% (RCP8.5). При этом более значительные изменения могут коснуться доли зимних паводков, которая за счет увеличения частоты зимних оттепелей может увеличиться на 6–10%, тогда как летне-осенних – менее значительно (на 0,3–1%). Увеличение доли зимних паводков особенно заметно во второй половине прогнозного периода (2053–2098 гг.): если в исторический период она составляет порядка 7%, то во второй половине XXI века — от 13% (RCP2.6) до 21% (RCP8.5).

Согласно всем сценариям RCP в прогнозном периоде увеличивается количество лет, когда доля паводочного стока превышает приток воды в половодье. Также во вторую половину прогнозного периода (особенно ярко согласно сценариям RCP6.0 и RCP8.5) величина максимальных расходов в паводки может достичь величины максимальных расходов в половодье, а в некоторые годы - даже превысить их.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования показывают, что в XXI веке ожидается увеличение среднегогодового объема притока воды в Можайское водохранилище на 7%. Ожидается внутригодовое перераспределение стока: на 4-7% может снизиться приток воды во время половодья, но при этом на 7-11% увеличится приток во время паводков, прежде всего зимних. Изменчивость годового стока возрастет примерно на треть (коэффициент вариации увеличится с 0,26 до 0,32-0,41). Вероятно увеличение значений экстремальных расходов воды в реке.

Наблюдаемые и ожидаемые изменения в структуре водного баланса Можайского водохранилища обуславливают необходимость изменения диспетчерского графика работы Можайского гидроузла, остающегося неизменным с 1968 г. Снижение доли и объема весеннего притока, вероятно, повлечет за собой уменьшение степени предвесенней сработки водохранилища. Учащение зимних и летних паводков потребует более регулярных повышенных сбросов гидроузла, в связи с чем уменьшатся периоды минимальных санитарных попусков, что может благоприятно сказаться на речной экосистеме р. Москвы в нижнем бьефе Можайского гидроузла. Паводки в зимний период могут сказаться на ледовом режиме водоема (усилится деформация ледяного покрова).

Изменения объема и режима притока скажутся на проточности водохранилища, его гидродинамическом режиме, условиях протекания всех внутриводоемных процессов, внутригодовом распределении поступления взвесей, биогенных и органических веществ, что неизбежно приведет к изменениям в экосистеме Можайского водохранилища и ее самоочищающей способности. Эти вопросы требуют пристального внимания и дальнейших исследований.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья.* – Москва, 2015. – 288 с.
2. *Годовые отчеты Акционерного Общества «Мосводоканал» за 2011–2019 гг.*
3. *Миллионщикова Т.Д. Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги: дис. ... кандидата географических наук: 25.00.27 / Миллионщикова Татьяна Дмитриевна; [Место защиты: Ин-т вод. проблем РАН]. - Москва, 2019. – 133 с.*
4. *Ahmad B., Usman M., Bukhari S.A.A., Sajjad H. Contribution of Glacier, Snow and Rain Components in Flow Regime Projected with HBV Under AR5 Based Climate Change Scenarios Over Chi-*

- tral River Basin (Hindukush Ranges, Pakistan) // *International Journal of Climate Research*. – 2020. – Vol. 4. – № 1. – P. 24-36. <https://doi.org/10.18488/journal.112.2020.41.24.36>.
5. Ayzel G., Izhitskiy A. Climate change impact assessment on freshwater inflow into the small Aral Sea // *Water (Switzerland)*. – 2019. – Vol. 11. – № 11. – P. 2-21. <https://doi.org/10.3390/w11112377>.
  6. Pervin L., Gan T.Y., Scheepers H., Islam M.S. Application of the hbv model for the future projections of water levels using dynamically downscaled global climate model data // *Journal of Water and Climate Change*. – 2021. – Vol. 12. – № 6. – P. 2364-2377. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.302>.
  7. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 93. – № 4. – P. 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
  8. Wang X., Yang T., Yong B., Krysanova V., Shi P., Li Z., Zhou X. Impacts of climate change on flow regime and sequential threats to riverine ecosystem in the source region of the Yellow River // *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 77. – № 12. – 14 p. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7628-7>.

## Influence of drainage on seasonal freezing depth of peat soils

Dyukarev E.A.<sup>1,2</sup>, Preis Yu.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

E-mail: [dekot@mail.ru](mailto:dekot@mail.ru)

Seasonally frozen depth of peat soils in Western Siberia at six oligotrophic forested bogs (ryams) with significantly different levels of bog water: low ryam, high ryam, drained ryam, drained low ryam and drained ryam recovering from fire.

The studies were conducted on the territory of the geophysical field station "Vasyuganye" (56°58'N, 82°36'E) of the Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems of the SB RAS. An autonomous temperature profile measurement complex was used for soil temperature observations. The measurement complex is designed to automatically record soil temperature at a given time and to accumulate measurement data over a long period of time. The measurement complex consists of the registration unit, temperature probe, interface unit and communication cables. The ground temperature profile probe is placed at a distance of more than 1 meter from other sensors and the case and contains digital temperature sensors at 0; 2; 5; 10; 20; 30; 40; 60; 80; 120; 160; 240 cm deep into the ground. Soil temperature data were obtained for the period from August 2014 to September 2021.

The maximum depth of freezing of the peat deposit is observed in the period from February to April. The date of maximal freezing and the value are influenced not only by the presence of snow cover, but also by the aggregate of the specific features of a particular year: the date of the first frost, air temperature, duration of the cold period with low or absent snow cover, snow cover depth and the features of its formation on different sites. The maximum frost depth on the drained areas is significantly (1.5-2 times) greater than on the natural forested bog. The maximum frost depth in the high ryam has the greatest variability and in some years approaches the values typical for the drained sites (2014-2015), or of the low ryam (2017-2018). The winter of 2014-2015 showed the least seasonal freezing for all sites over the entire study period, and the winter of 2020-2021 showed the greatest freezing. However, no significant trends in the time course of the maximum winter frost depth were found for the studied sites.

# Влияние осушения на глубину сезонного промерзания торфяных почв

Дюкарев Е.А.<sup>1,2</sup>, Прейс Ю.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

E-mail: dekot@mail.ru

В работе рассмотрен мерзлотный режим торфяных почв Западной Сибири на шести олиготрофных облесенных болотах (рямах) с существенно различными уровнями болотных вод (УБВ): низкий рям (НР), высокий рям (ВР), осушенный рям (ОР), осушенный низкий рям (ОНР) и осушенный рям восстанавливающийся после пожара (ОГР).

Исследования проводились на территории геофизического стационара «Васюганье» (56°58' с.ш. 82°36' в.д.) Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Васюганское болото, 2003). Для проведения наблюдений за температурой почвы использовался автономный измеритель профиля температур (АИПТ). АИПТ предназначен для автоматической регистрации температуры почвы в заданное время, накопления данных измерений за длительный промежуток времени. Измеритель состоит из блока регистрации, температурного зонда, интерфейсного блока и кабелей связи. Зонд профиля температуры грунта размещен от остальных датчиков и кейса на расстоянии более 1 метра и содержит цифровые датчики на уровнях 0; 2; 5; 10; 20, 30, 40; 60; 80; 120; 160; 240 см вглубь почвы. Данные о температура почвы получены за период с августа 2014 г. по сентябрь 2021 г.

Расчетная глубина промерзания определялась по глубине проникновения температуры 0 оС в почву [Методы климатологической ..., 1957]. Глубина промерзания рассчитывалась путем линейной интерполяции температур почвы между двумя соседними слоями, при условии, что в одном из слоев температура отрицательна. Для определения глубины промерзания использовались суточные данные о температуре почвы.

Уровни болотных вод на площадках в болотных комплексах подверженных осушению ниже, чем в нативных болотных комплексах). Так, в среднем за 2014-2017 гг. УБВ в низком ряме располагался на глубине 30,5 см относительно средней поверхности болота. В весенний период наблюдается рост (приближение к поверхности) УБВ вследствие поступления талых снеговых вод. Максимальные уровни в весенний период располагаются на глубине 11,7 см. К концу лета происходит постепенное снижение УБВ (удаление от поверхности) до средних месячных значений 45 см. Рослый рям относится так же к ненарушенным типам болотных экосистем, однако вследствие своего положения в ландшафте (на окраине болотного массива) и небольшой мощности торфяной залежи здесь формируется особый гидрологический режим. Среднее положение УБВ в рослом ряме ниже поверхности на 60,9 см. Осушенные низкие рьямы на Иксинском болоте и 5 участке т.м. Васюганское имеют средние значения УБВ немного ниже, чем в низком ряме не подверженному осушению. Однако, амплитуда колебаний УБВ на осушенных пунктах наблюдений гораздо выше. Так, на рьямах Иксинского болота наибольшие значения достигают 70-106 см, а в весенний период болотные воды могут находиться на 2-24 см выше средней поверхности болота. Осушенный рослый рям на 5 участке т.м. Васюганское является самой «сухой» исследованной точкой. Здесь среднее значение УБВ составляет 84,7 см, а минимальный уровень опускается до 146 см.

Площадка НР расположена в 500 м от окраины олиготрофного болотного массива в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе с угнетенным древесным ярусом или так называемым низким ярусом (Головацкая, 2005). Мощность торфяной залежи около 240 см. Высокий рям (ВР) представляет собой окраину верхового водораздельного массива. С одной стороны он граничит с заболоченным лесом, а по направлению к центру постепенно переходит в низкий рям. Торфяная залежь высокого рьяма глубиной 90 см смешанная лесо-топяная.

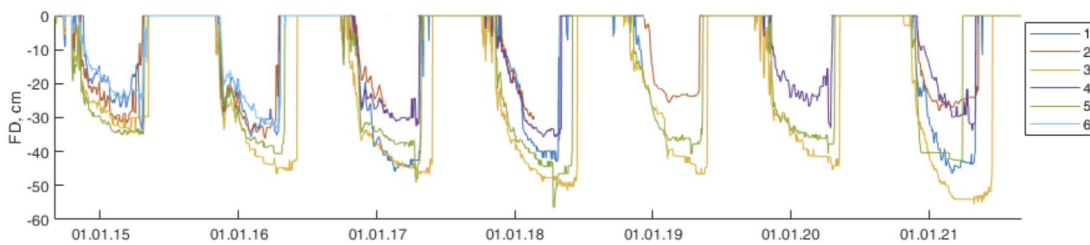
Площадка ОР расположена на осушенной части Бакчарского болотного массива на участке №5 т.м. Васюганское, где в 70 годы XX века создана сеть осушительных каналов, который к настоящему времени частично зарастают, заполняются торфом. Тем не менее эффект осушения сказывается сильно в непосредственной близости от каналов. За последние 40 лет вдоль каналов осушения сформировались полосы сосны и березы, и высота деревьев достигает 10-15 м. Мощность смешанной лесо-топяной торфяной залежи около 110 см.

Площадка ОНР расположена в осушенном ряме Иксинского болота на расстоянии около 50 метров от осушительного канала и 100 метров от окраины болотного массива. Растительность низкого рьяма типичная. Вероятно до пожара здесь был высокий рям. Влияние осушения и прошедших пожаров отразилось в структуре растительного покрова в большей степени, чем на площадке ОР. Мощность верховой пушицево-сфагновой залежи 120 см.

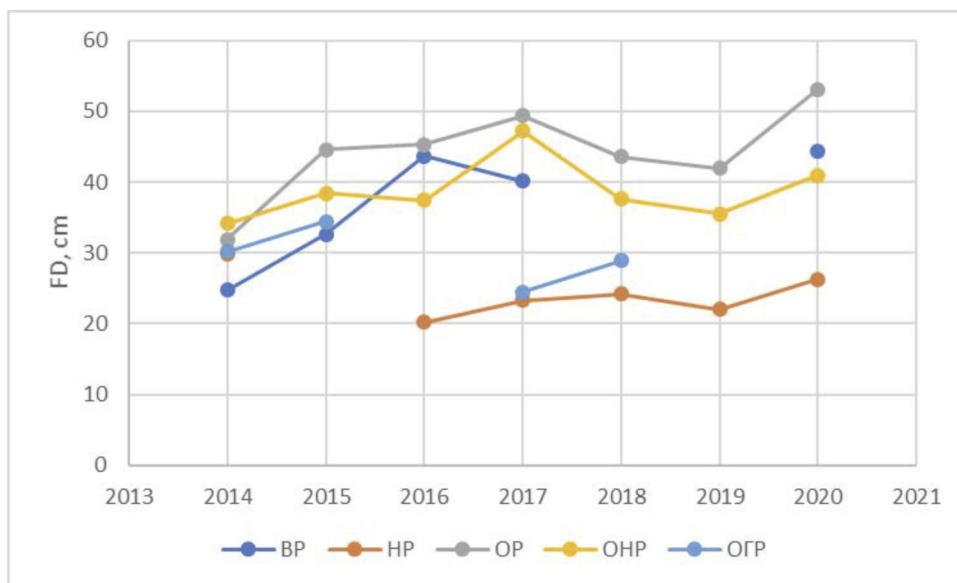


Площадка ОГР находится на зарастающей после торфяного пожара гари (восстанавливающийся горелый рям) на окраине болотного массива. Древесный ярус сильно разрежен и представлен сосной. На поверхности видны следы пожара и валежник из обгорелых деревьев толщиной до 20 см. Колебания уровня болотных вод здесь больше, чем на других площадках. УБВ опускается ниже 120 см, а мощность торфа около 70 см.

Формирование сезонно-мерзлого слоя в верхних слоях торфа начинается в октябре-ноябре на всех площадках. В эти месяцы происходит понижение температуры воздуха и выпадение осадков в виде снега, которые в последующий период формируют устойчивый снежный покров. Различия между датами перехода температуры на поверхности через 0°C в сторону отрицательных температур на площадках могут составлять несколько дней. В среднем за исследуемый период дата устойчивого перехода через 0°C приходится на 31 октября - 4 ноября. Время формирования устойчивого снежного покрова, его высота и уровень болотных вод в начале зимы существенно влияют на минимальные в годовом ходе температуры почвы. Наибольшее промерзание (до 50 см) за период исследования наблюдалось в осушенном ряме болоте в марте 2021 г. (Рис.1).



**Рис. 1.** Временной ход глубины промерзания на исследуемых площадках. 1 – ВР, 2 – НР, 3- ОР, 4- ОГР, 5,6 – ОНР.



**Рис.2.** Максимальная глубина промерзания за зиму.

Максимальная глубина промерзания торфяной залежи (Рис. 2) наблюдается в период с февраля по апрель. На дату ее достижения и величину влияет не только наличие снежного покрова, но и совокупность особенностей конкретного года: даты начала заморозков, температуры воздуха, продолжительности холодного периода с низким или отсутствующим снежным покровом, высоты снежного покрова и особенностей его формирования на различных площадках. Максимальная глубина промерзания на осушенных участках значительно (в 1.5-2 раза) больше, чем на естественном облесенном болоте. Максимальная глубина промерзания в высоком ряме имеет наибольшую вариабельность и в отдельные годы приближается к значениям характерным для осушенных площадок (2014-2015), или для низкого ряма (2017-2018). Зимой 2014-2015 гг для всех площадок отмечено наименьшее сезонное промерзание за весь исследованный период, а зимой 2020-2021 гг – наибольшее промерзание. Однако, значимых трендов о временном ходе максимальной за зиму глубины промерзания для исследованных площадок не обнаружено.

# Seasonal runoff forecasting using a combination of hydrological and weather forecasts

Moreido V.M., Gartsman B.I.

Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia  
E-mail: [vsevolod.moreido@iwp.ru](mailto:vsevolod.moreido@iwp.ru)

Presented is a technique for improvement of an operational ensemble forecasting system (EFS) currently applied to Ussuri river in Russia. The operational forecasting system is built with the ECOMAG semi-distributed hydrological model and has previously shown to produce reliable forecasts of spring snowmelt water inflow into the reservoir on lead-times up to four months ahead (Gelfan et al., 2018). We propose the improvement of the mean monthly streamflow forecast skill by constructing cumulative distributions (CDF) of the observed streamflow conditioned on the predicted streamflow from the EFS and the observed mean monthly air temperature and precipitation. We overcome the limitation of short time-series for the selected period (1966 – 2014) of the observed variables by multivariate modelling procedure allowing for the time-series extension. We applied the Monte-Carlo modelling procedure to the initial time-series transformed with Principal Component Analysis to produce sufficiently extended samples retaining the original statistical properties. The extended time-series are then classified into 27 categories each containing the unique combination of the predictors by their quantile values, and the observed monthly inflow CDFs are constructed. The improved operational forecast CDF is consequently picked from the obtained 27 CDF classes by defining the appropriate CDF class from the combination of the raw ensemble forecast and any weather prediction available. The proposed technique was assessed by using the SL-AV weather model (Khan, 2011; Tolstykh, 2017) monthly temperature and precipitation hindcasts for the evaluation period of 1982 – 2010. The forecasts were benchmarked against climate and observed (perfect) weather forecast and have shown improvement in terms of accuracy, reliability and resolution.

*This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no. FMWZ-2022-0003, project 3.7.*

## REFERENCES:

1. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D.P. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2018. – Vol. 22. – № 4. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2073-2018>.
2. Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G. Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: Dynamical core // *Geoscientific Model Development*. – 2017. – Vol. 10. – № 5. – P. 1961-1983. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1961-2017>
3. Khan V.M., Kryzhov V.N., Vil'fand R.M., Tishchenko V.A., Bundel' A.Y. Multimodel approach to seasonal prediction // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 2011. – Vol. 36. – № 1. <https://doi.org/10.3103/S106837391101002X>

## Прогнозирование речного стока на месяц и сезон путем совмещения гидрологических и метеорологических прогнозов

Морейдо В.М., Гарцман Б.И.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия  
E-mail: [vsevolod.moreido@iwp.ru](mailto:vsevolod.moreido@iwp.ru)

Разработка системы долгосрочного гидрологического прогнозирования высокой точности является сложной фундаментальной задачей современной гидрологии [Orth, Seneviratne, 2013; Gelfan et al., 2018]. Такие системы также востребованы для прогноза опасных гидрометеорологических явлений – наводнений и засух [Cloke, Pappenberger, 2009; Fundel, Jörg-Hess, Zappa, 2013; Bogner et al., 2018; Lanen Van et al., 2016; Schär et al., 2004; White et al., 2017], выработки электроэнергии гидроэлектростанциями [Beerli, Wernli, Grams, 2017; García-Morales, Dubus, 2007; Inman, Pedro, Coimbra, 2013; Demargne et al., 2011] и обеспечения судоходства [Meißner, Klein, Ionita, 2017]. Традиционные методы долгосрочного прогнозирования заключаются в использовании физико-статистических зависимостей,

основанных на уравнении водного баланса водосбора и учитывающих представления о формировании потерь талого стока, либо линейные уравнения множественной регрессии [Руководство..., 1989]. Наряду с этим, в последние десятилетия определенные успехи в области сезонного гидрологического прогнозирования были достигнуты при использовании подхода, называемого ансамблевым долгосрочным прогнозированием речного стока (Ensemble streamflow prediction – ESP; [Day, 1985]). Особенностью этого подхода является использование архивов ранее наблюдавшихся погодных условий для расчета сценариев речного стока по региональной физико-математической гидрологической модели на период заблаговременности. Исследования [Gelfan et al., 2018; Harrigan et al., 2018; Monhart et al., 2018] показали, что такие прогностические системы предоставляют собой эффективный инструмент гидрологического прогнозирования для речных систем различных пространственных масштабов. Причина этого заключается в зависимости сезонного речного стока от начальных условий на водосборе, таких как запасы влаги в почве и снежном покрове, которые воспроизводятся гидрологическими моделями, используемыми для ансамблевого прогнозирования [Orth, Seneviratne, 2013; Sinha, Sankarasubramanian, 2013; Jörg-Hess et al., 2015].

Для водосборов с наличием талого стока существенным является точность воспроизведения моделью запасов в снежном покрове, а для прогнозирования его стаивания в период весеннего половодья – процессов снеготаяния, которые, в свою очередь, зависят от воспроизведения температурного режима. Отмечено [Monhart et al., 2018], что сезонные метеорологические прогнозы температуры воздуха зачастую являются более точными, чем ансамбль предыдущих погодных условий, в связи с чем представляется актуальным исследование применимости таких прогнозов для водосборов крупных рек с сезонным снежным покровом. Также актуальным представляется исследование применимости и сезонных прогнозов сумм осадков для уточнения гидрологического прогноза в период весеннего половодья и дождевых паводков.

В настоящей работе описана методика долгосрочного прогноза среднемесячных расходов воды методом многомерного вероятностного моделирования, которая заключается в построении условных кривых обеспеченности прогнозируемой величины (среднемесячных расходов воды) при различных сочетаниях диапазонов значений предикторов. Предикторами в данном случае являются спрогнозированные с помощью ансамблевого подхода среднемесячные расходы воды и ожидаемые величины месячных сумм осадков и среднемесячной температуры воздуха, полученные из численного долгосрочного прогноза погоды. Таким образом, сочетание ансамблевого гидрологического и долгосрочного метеорологического прогноза позволяет повысить точность прогноза и уменьшить его доверительный интервал.

В ИВП РАН была разработана и используется в течение ряда лет система ансамблевого долгосрочного гидрологического прогноза [Gelfan et al., 2018; Gelfan et al., 2015; Морейдо, 2017]. Под ансамблевым прогнозом подразумевается создание на основе метеорологических данных за предыдущие годы наблюдений набора (ансамбля) гидрографов возможных расходов воды за период заблаговременности прогноза (сценариев) с их последующей обработкой для получения прогноза различных характеристик речного стока. Для получения прогноза расходов воды в детерминированной форме используется осреднение значений по всем членам ансамбля или построение вероятностных распределений характеристик всех сценариев для получения прогноза в вероятностной форме. Таким образом, прогноз дается на основании полного ансамбля сценариев (здесь и далее называемого ППА).

В качестве основы методики долгосрочного прогноза притока воды была взята физико-математическая гидрологическая модель формирования речного стока в бассейне с распределенными параметрами ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics) [Борщ и др., 2017; Мотовилов, 2016, 2017].

Для получения прогнозных значений температуры и осадков большой заблаговременности (от 1 до 4 месяцев) была использована численная модель циркуляции атмосферы ПЛАВ, разработанная в Гидрометцентре России и ИВМ РАН [Khan et al., 2011; Tolstykh et al., 2017]. Следует отметить, что в разработанной методике в принципе может быть использован любой метеорологический прогноз.

Объектом исследования были выбраны прогнозы среднемесячных расходов воды р. Уссури на г/п Кировский. Модель ECOMAG была адаптирована к условиям и информационному обеспечению на водосборе р. Уссури для расчетов формирования стока. Оценки долгосрочных гидрологических прогнозов велись на архивном материале гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 1966 по 2014 годы, а также ретроспективных метеорологических прогнозов за период с 1982 по 2010 годы.

Общий принцип разработанной методики прогноза заключается в построении условных кривых обеспеченности прогнозируемой величины (среднемесячных расходов воды р. Уссури) при различных сочетаниях диапазонов значений предикторов, которыми в данном случае являются прогнозные (по ППА) среднемесячные расходы и прогнозные величины месячных сумм осадков и среднемесячной температуры воздуха. Условные кривые распределения строятся общепринятыми методами, после разделения исходной совокупности фактических среднемесячных расходов на подвыборки, соответствующие различным сочетаниям предикторов. В данном случае используется сочетание предикторов «прогнозный расход ППА осадки температура», рассматриваемое в пределах трех категорий попадания в определенные кварталы распределения исходных величин, т.е. 0-33.3%, 33.3-66.6% и 66.6-100% вероятности (здесь и далее



обозначенные Q1, Q2, Q3, соответственно). Исходную совокупность среднемесячных расходов таким образом можно разделить на 27 подвыборок. Очевидно, что имеющиеся ряды исходных данных наблюдений недостаточно продолжительны, чтобы обеспечить такое построение непосредственно. Поэтому для построения условных кривых обеспеченности был применен метод многомерного (группового) вероятностного моделирования [Виноградов, 1988; Картвелишвили, 1975], с помощью которого генерировался набор модельных рядов достаточной продолжительности, сохраняющий все основные статистические свойства исходного набора рядов. Исходные ряды гидрометеорологических фактических и прогнозных величин подвергались стандартизации, проверке на нормальность распределения тестом Шапиро-Уилкса и нормализации при помощи трансформации Тьюки [Tukey, 1977]. Далее нормализованные ряды характеристик подвергались преобразованию методом главных компонент. По оценкам полученных рядов главных компонент и их ковариационной матрице производилось многомерное моделирование нормально распределенных случайных величин длиной 27000 значений. С полученными рядами смоделированных главных компонент производилось обратное преобразование, после чего характеристики исходных и полученных рядов были сопоставлены для проверки воспроизведения средних значений, дисперсий и сравнения функции плотности вероятности распределения.

Далее все полученные ряды снова разделялись на категории по заданным квантилям распределения и формировались все возможные комбинации этих категорий, в пределах которых с интегральной функции распределения определялись значения квантилей 5%, 50% и 95% обеспеченности фактических расходов воды по всем исследуемым месяцам для различной заблаговременности (от 1 до 4 месяцев), составляющие 90% доверительный интервал и медианное значение для прогноза.

Алгоритм группового вероятностного моделирования реализован с помощью языка программирования R [R Core Team, 2019] в среде разработки RStudio [RStudio, 2018]. Он основан на стандартных процедурах, имеющихся в большинстве пакетов математических вычислений и табличной обработки данных, в том числе MS Excel

Полученные вероятностные прогностические значения для каждого месяца с апреля по октябрь для заблаговременностей от 1 до 4 месяцев были сопоставлены с фактическими значениями притока за соответствующие месяцы и годы (с 1982 по 2010) и определены их средняя квадратическая ошибка и коэффициент корреляции с рядом фактического притока. Также были оценены попадания фактических значений притока в 90% доверительный интервал прогноза путем оценки величины интервала и оценки оправдаваемости, т.е. попадания в 90%-ный доверительный интервал.

В результате было показано, что разработанная методика применения совместных ансамблевых гидрологических и долгосрочных метеорологических прогнозов позволяет улучшить результат прогнозов по полному ансамблю и значительно опережает по качеству прогнозирования климатический прогноз. На 0.1 – 0.3 увеличиваются корреляции прогнозов на больших заблаговременностях, до 4 раз снижается диапазон доверительного интервала прогноза, на 20 – 50% увеличивается оправдаемость. Эти результаты позволяют говорить о увеличении точности и снижении неопределенности долгосрочных гидрологических прогнозов, выпускаемых с использованием данной методики.

*Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0003 Государственного задания ИВП РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Beerli R., Wernli H., Grams C.M. Does the lower stratosphere provide predictability for month-ahead wind electricity generation in Europe? // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2017. – Т. 143. – № 709. – С. 3025-3036. <https://doi.org/10.1002/qj.3158>.
2. Cloke H.L., Pappenberger F. Ensemble flood forecasting: A review // *Journal of Hydrology*. – 2009. – Т. 375. – № 3-4. – С. 613-626. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.005>.
3. Day G.N. Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 1985. – Т. 111. – № 2. – С. 157-170. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1985\)111:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1985)111:2(157)).
4. Fundel F., Jörg-Hess S., Zappa M. Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2013. – Т. 17. – № 1. – С. 395-407. <https://doi.org/10.5194/hess-17-395-2013>.
5. Garcia-Morales M.B., Dubus L. Forecasting precipitation for hydroelectric power management: How to exploit GCM's seasonal ensemble forecasts // *International Journal of Climatology*. – 2007. – Т. 27. – № 12. – С. 1691-1705. <https://doi.org/10.1002/joc.1608>.
6. Gelfan A.N., Motovilov Y.G., Moreido V.M. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. – 2015. – Т. 369. – С. 115-120. <https://doi.org/10.5194/piahs-369-115-2015>.
7. Inman R.H., Pedro H.T.C., Coimbra C.F.M. Solar forecasting methods for renewable energy integration // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2013. – Т. 39. – № 6. – С. 535-576. <https://doi.org/10.1016/j.pecc.2013.06.002>.



8. Meißner D., Klein B., Ionita M. Development of a monthly to seasonal forecast framework tailored to inland waterway transport in central Europe // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2017. – Т. 21. – № 12. – С. 6401-6423. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6401-2017>.
9. Orth R., Seneviratne S.I. Propagation of soil moisture memory to streamflow and evapotranspiration in Europe // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2013. – Т. 17. – № 10. – С. 3895-3911. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3895-2013>.
10. R Core Team R: *A Language and Environment for Statistical Computing*. – 2019.
11. RStudio Index @ [Www.Rstudio.Com](http://www.Rstudio.com). – 2018.
12. Sinha T., Sankarasubramanian A. Role of climate forecasts and initial conditions in developing streamflow and soil moisture forecasts in a rainfall-runoff regime // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2013. – Т. 17. – № 2. – С. 721-733. <https://doi.org/10.5194/hess-17-721-2013>.
13. Tukey J. *Exploratory data analysis*. – 1977.
14. Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // *Труды Гидрометцентра России*. – 2017. – № 366. – С. 68-86.
15. Виноградов Ю.Б. *Математическое моделирование процессов формирования стока*. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.
16. Картвелишвили Н.А. *Стохастическая гидрология*. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 162 с.
17. Морейдо В.М. Оценка предсказуемости притока воды в Чебоксарское водохранилище с помощью численных экспериментов // *Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения*. – 2017. – С. 241-247.
18. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое Моделирование Речных Бассейнов В Различных Пространственных Масштабах 1. Алгоритмы Генерализации И Осреднения // *Водные Ресурсы*. – 2016. – Т. 43. – № 3. – С. 243-253. <https://doi.org/10.7868/s0321059616030111>.
19. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна р. Лена) // *Метеорология и гидрология*. – 2017. – Т. 2. – С. 78-88.
20. *Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ*. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 358 с.
21. Bogner K., Liechti K., Bernhard L., Monhart S., Zappa M. Skill of Hydrological Extended Range Forecasts for Water Resources Management in Switzerland // *Water Resources Management*. – 2018. – Vol. 32. – № 3. – P. 969-984. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1849-5>.
22. Demargne J., Brown J., Adams T., Wood A., Wu A.L., Regonda S., He K., Schaake J., Seo D., Liu Y., Herr H., Fresch M., Wells E., Hartman R., Ostrowski J., Shed R., Werner K. Short- to Long-Term Hydrologic Ensemble Forecasting at the NWS River Forecast Centers Uncertainty sources. – 2011.
23. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D.P. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2018. – Vol. 22. – № 4. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2073-2018>.
24. Harrigan S., Prudhomme C., Parry S., Smith K., Tanguy M. Benchmarking ensemble streamflow prediction skill in the UK // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2018. – Vol. 22. – № 3. – P. 2023-2039. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2023-2018>.
25. Jörg-Hess S., Kempf S.B., Fundel F., Zappa M. The benefit of climatological and calibrated reforecast data for simulating hydrological droughts in Switzerland // *Meteorological Applications*. – 2015. – Vol. 22. – № 3. – P. 444-458. <https://doi.org/10.1002/met.1474>.
26. Khan V.M., Kryzhov V.N., Vil'fand R.M., Tishchenko V.A., Bundel' A.Y. Multimodel approach to seasonal prediction // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 2011. – Vol. 36. – № 1. <https://doi.org/10.3103/S106837391101002X>.
27. Lanen H.A.J. Van et al. Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case // *Hydrological Processes*. – 2016. – Vol. 30. – № 17. – P. 3097-3104. <https://doi.org/10.1002/hyp.10838>.
28. Monhart S., Spirig C., Bhend J., Bogner K., Schär C., Liniger M.A. Skill of Subseasonal Forecasts in Europe: Effect of Bias Correction and Downscaling Using Surface Observations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2018. – Vol. 123. – № 15. – P. 7999-8016. <https://doi.org/10.1029/2017JD027923>.
29. Schär C., Vasilina L., Pertziger F., Dirren S. Seasonal runoff forecasting using precipitation from meteorological data assimilation systems // *Journal of Hydrometeorology*. – 2004. – Vol. 5. – № 5. – P. 959-973. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0959:SRFUPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0959:SRFUPF>2.0.CO;2).
30. Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G. Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: Dynamical core // *Geoscientific Model Development*. – 2017. – Vol. 10. – № 5. – P. 1961-1983. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1961-2017>.

31. White, C.J., Carlsen, H., Robertson, A.W., Klein, R.J., Lazo, J.K., Kumar, A., Vitart, F., Coughlan de Perez, E., Ray, A.J., Murray, V., Bharwani, S., MacLeod, D., James, R., Fleming, L., Morse, A.P., Eggen, B., Graham, R., Kjellström, E., Becker, E., Pegion, K.V., Holbrook, N.J., McEvoy, D., Depledge, M., Perkins-Kirkpatrick, S., Brown, T.J., Street, R., Jones, L., Remenyi, T.A., Hodgson-Johnston, I., Buontempo, C., Lamb, R., Meinke, H., Arheimer, B. and Zebiak, S.E. (2017), *Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions*. *Met. Apps*, 24: 315-325. <https://doi.org/10.1002/met.1654>.

## Modelling the dynamics of snow cover formation in the field areas of the European territory of Russia

Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Shurkhno E.A.

Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: [sowaso@yandex.ru](mailto:sowaso@yandex.ru)

The technique for simulating various characteristics of snow cover formation, based on the use of the land surface model SWAP, was verified for field areas located on the European territory of Russia (ETR) for the historical period (1967–2019). Comparison of modeled snow water equivalent SWE with corresponding observations at the ETR snow measuring stations showed that the quality of reproduction of SWE corresponds to the quality of their reproduction at experimental sites by the world's best snow cover formation models participating in the international project ESM-SnowMIP. As such, it was concluded that the SWE values simulated with SWAP for field areas can serve as a basis for further analysis of their spatial distribution and temporal dynamics in the territory under consideration.

For this purpose, the climatic values of annual mean and maximum values of SWE as well as start and end dates of continuous seasonal snow cover and snow cover duration for two climatic periods T1 (1967–1992) and T2 (1993–2019) were calculated. Comparison of the obtained values for the periods T1 and T2 made it possible to reveal trends in these characteristics during the historical period. Figure 1 shows examples of spatial distribution of maximum SWE and snow cover duration over the ETR for the two historical periods.

It is shown that changes in snow cover formation projected by global climate models in the 21st century have already begun at the ETR field sites. In particular, an increase in climatic air temperature averaged over 68 stations and equaled to 1°C over the historical period led to later start of continuous snow cover (on the average, by 5 days).

At the same time, an increase in ETR-averaged climatic precipitation by about 11 mm/year (~2%) caused an increase in both winter-mean and maximum SWE (the latter increased by ~14 mm (~14%) on average in the ETR). The effect of an increase in the climatic air temperature, which shifts the date of the end of snow cover to an earlier date, was largely compensated by the effect of an increase in maximum SWE. As a result, the climatic date of snow cover disappearance, averaged over the stations, remained practically unchanged (moved to an earlier date by only 1 day).

This work is the first stage of the authors' research on modeling and projecting the dynamics of snow cover characteristics on the territory of Russia. Further stages will be associated with the study of the dynamics of these characteristics in the forest areas of the ETR, in the field and forest areas of Siberia and the Far East, as well as with the scenario projecting changes in snow cover formation in the territory of the Russian Federation in the 21st century.

# Моделирование динамики формирования снежного покрова на полевых участках Европейской территории России

Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия  
E-mail: sowaso@yandex.ru

Снег – важнейший компонент криосферы. Благодаря своим особым физическим свойствам (в первую очередь, высокому альбедо и, как правило, низкой теплопроводности) он играет существенную роль в формировании климата и гидрологического цикла планеты. Наличие снега увеличивает альбедо поверхности Земли, тем самым охлаждая планету в целом и особенно в средних и высоких широтах Северного полушария. Высокое альбедо снега определяет также положительную обратную связь изменения снеготаяния с климатическими изменениями, усиливая последние [5, 7]. Снежный покров осуществляет долговременную регуляцию составляющих водного баланса в средних и высоких широтах Северного полушария, являясь своеобразным буфером, накапливающим атмосферные осадки зимой и теряющим их в процессе весеннего снеготаяния, определяя при этом специфическую для данных широт годовую динамику составляющих водного баланса [2, 6]. От толщины снежного покрова зависит степень промерзания сезонно-промерзающих почв, их инфильтрационные свойства, а значит и разделение поступающих на их поверхность в период весеннего снеготаяния талых вод и осадков между поверхностным стоком и почвенными влагозапасами.

Изменения мощности снежного покрова и его сезонного хода влияют на климат, водные ресурсы, и соответственно на условия жизни человека. Поэтому в связи с прогнозируемым изменением климата в XXI веке важно оценить, насколько климатические изменения скажутся на продолжительности устойчивого залегания снежного покрова и величине снеготаяния. Особенно это актуально для такой холодной и «снежной» страны как Россия. В связи с этим все большее значение приобретает развитие методов прогнозирования динамики формирования снежного покрова в условиях изменяющегося климата. Поэтому стратегическая цель авторов настоящей работы связана с прогнозированием характеристик снежного покрова на территории России до конца XXI в. При этом первый этап, изложенный в данной работе, связан с апробацией методики расчета различных характеристик формирования снежного покрова на полевых участках Европейской территории России (ЕТР) для исторического периода (1967–2019 гг.) и анализом изменения климатических значений указанных характеристик на протяжении этого периода.

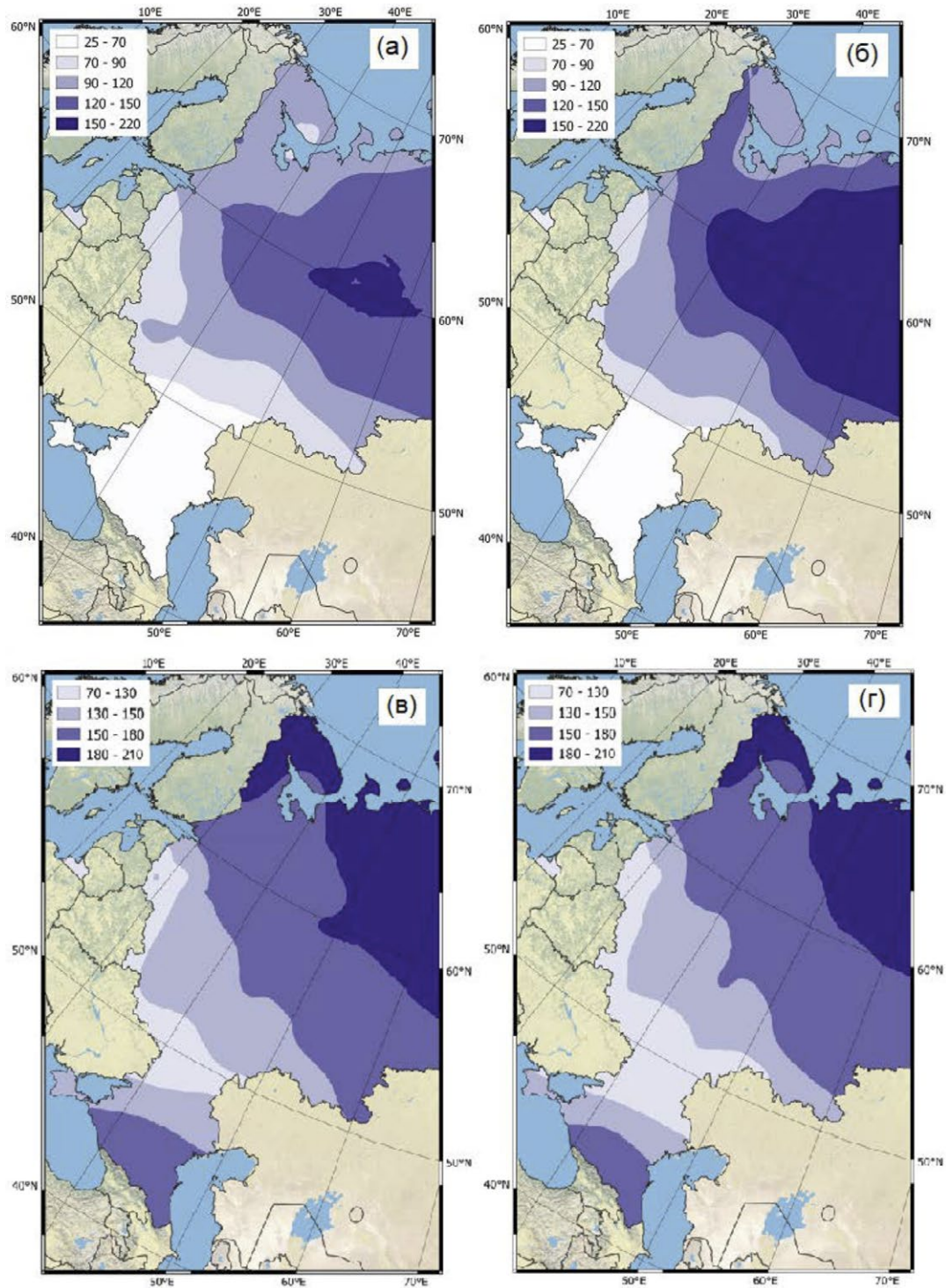
В качестве инструментария для расчета характеристик снежного покрова использовалась модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP [1], разработанная в Институте водных проблем РАН. В ее основу положено физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе грунтовые воды – почва – растительный/снежный покров – приземный слой атмосферы. "Снежный" блок модели SWAP описывает формирование снеготаяния на подстилающей поверхности суши как для случая низкой растительности (полевые участки), которая в зимнее время находится под снегом, так и для высокой растительности (лесные участки), когда снежный покров формируется под пологом леса.

Необходимое информационное обеспечение для расчетов по модели SWAP включает в себя следующую метеорологическую информацию: атмосферные осадки, температуру и влажность воздуха, интенсивность приходящих потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, скорость ветра и атмосферное давление. Указанные характеристики, за исключением радиации, были взяты из базы данных наблюдений ВНИИГМИ-МЦД за период 1966–2019 гг. для 68 снегомерных станций, расположенных на ЕТР. Приходящая радиация рассчитана по данным стандартных метеорологических наблюдений по методике, изложенной в [3]. Необходимые для расчетов параметры подстилающей поверхности подготовлены с использованием глобальной базы данных ECOLIMAP по методике, описанной в [4]. Для проверки результатов моделирования использовались результаты измерений снеготаяния  $SWE$ , высоты снежного покрова  $h_{sn}$  и его плотности  $\rho_{sn}$ , полученные для полевых участков при проведении маршрутных снегоисследований, взятые также из базы данных ВНИИГМИ-МЦД.

Подготовленное информационное обеспечение позволило провести расчеты по модели SWAP динамики различных характеристик снежного покрова на полевых участках ЕТР с трехчасовым временным шагом для периода 1966–2019 гг. Полученные результаты сопоставлены с данными натурных наблюдений на снегомерных станциях. Сопоставление показало, что качество воспроизведения снеготаяния соответствует качеству их воспроизведения на экспериментальных полигонах лучшими мировыми моделями формирования снежного покрова, участвовавшими в международном проекте ESM-



SnowMIP. Это позволило сделать вывод, что рассчитанные с помощью SWAP значения снегозапасов для полевых участков могут служить основой для последующего анализа их пространственного распределения и временной динамики на рассматриваемой территории.



**Рис. 1.** Распределение климатических значений максимальных за год снегозапасов  $SWE_{max}$ , мм, (а, б) и продолжительности залегания снежного покрова, сут, (в, г) на полевых участках ЕТР для периодов Т1 (а, в) и Т2 (б, г).

Для этого были рассчитаны климатические значения средних  $SWE_{mean}$  и максимальных  $SWE_{max}$  снегозапасов, дат начала и окончания устойчивого залегания снежного покрова и продолжительности залегания  $T_{snow}$  для двух климатических периодов Т1 (1967–1992 гг.) и Т2 (1993–2019 гг.). Сравнение полученных значений для периодов Т1 и Т2 позволило выявить тенденции изменения указанных характеристик в течение исторического периода. На рис. 1 приведены примеры пространственного распределения  $SWE_{max}$  и  $T_{snow}$  по ЕТР для двух указанных периодов.



Показано, что прогнозируемые глобальными климатическими моделями изменения режима формирования снежного покрова в XXI в. на полевых участках ЕТР уже начались. В частности, рост за исторический период средней по станциям климатической температуры воздуха на ЕТР на  $\sim 1^\circ\text{C}$  привел к сдвигу на более поздние сроки дат установления снежного покрова (в среднем на  $\sim 5$  сут). В то же время, приrost климатических осадков в среднем по ЕТР на  $\sim 11$  мм/год ( $\sim 2\%$ ) вызвал увеличение как средних за зиму так и максимальных значений снегозапасов (последние выросли в среднем по ЕТР на  $\sim 14$  мм ( $\sim 14\%$ )). Эффект влияния увеличения климатической температуры воздуха, сдвигающего дату схода снежного покрова на более ранние сроки, в значительной мере был скомпенсирован эффектом увеличения значений максимальных снегозапасов. В результате усредненная по станциям климатическая дата схода снежного покрова в среднем по ЕТР почти не изменилась (сдвинулась на более раннюю дату всего на 1 сут).

Настоящая работа является первым этапом исследований авторов по моделированию и прогнозированию динамики характеристик снежного покрова на территории РФ. Дальнейшая работа будет связана с изучением динамики указанных характеристик на лесных участках ЕТР, на полевых и лесных участках Сибири и Дальнего Востока, а также с получением сценарных прогнозов изменений характеристик снегозапасов на территории РФ в XXI в.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Расчеты формирования снежного покрова в различных природных условиях на основе модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 2. С. 167–181.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // *Водные ресурсы*. 2006а. Т. 33. № 2. С. 133–145.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А. Моделирование динамики характеристик режима формирования снежного покрова на территории Российской Федерации. 1. Полевые участки ЕТР в исторический период // *Водные ресурсы*. 2022 (в печати).
5. Bartlett P.A., MacKay M.D., Verseghy D.L. Modified snow algorithms in the Canadian land surface scheme: Model runs and sensitivity analysis at three boreal forest stands // *Atmosphere-Ocean*. 2006. V. 44. № 3. P. 207–222.
6. Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Aizel G.V. Modelling river runoff and estimating its weather-related uncertainty for 11 large-scale rivers located in different regions of the globe // *Hydrology Research*. 2018. V. 49. № 4. P.1072–1087.
7. Qu X., Hall A. On the persistent spread in snow-albedo feedback // *Clim. Dyn.* 2014. V. 42. P. 69–81.

## Scenario assessments of changes in terrestrial water balance components in the 21st century

**Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev E.E.**

Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia  
 E-mail: [olniknas@yandex.ru](mailto:olniknas@yandex.ru)

**G**lobal simulations of the water balance components for the entire land surface of the Earth (with the exception of Antarctica) were performed by a land surface model SWAP with a half-degree spatial resolution for the period of 1971–2099 with application of daily values of meteorological forcing data simulated by five global climate models (GCMs: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, and NorESM1-M) for each of four climate change scenarios of the RCP family (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5). The data were provided within the framework of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP). The results of the ensemble of 20 simulations provided the basis for calculating climatic values of annual precipitation, runoff, and evapotranspiration on a global scale for a historical and three projection periods (2006–2036, 2037–2067, and 2068–2099), which were used to assess possible changes in the water balance components during the 21st century and to evaluate their uncertainties sourced from differences in GCM structures and RCP scenarios.

Ensemble-averaged global estimates of changes in climatic precipitation, runoff, and evapotranspiration showed that all water balance components will increase in 2068–2099 compared to the historical period. Precipitation will increase by about 43 mm/year (5%), varying among 20 variants of simulations from 2 to 91 mm/year (from 0.3 to 11%); evapotranspiration by 31 mm/year (7%), ranging from 5 to 57 mm/year (from 1 to 13%); runoff by 17 mm/year (4%) with a spread from –3 to 43 mm/year (from –1 to 11%).

The world maps of ensemble-averaged estimates of changes in the climatic values of water balance components by the end of the 21st century, as well as maps of uncertainties of these estimates due to differences in the RCP scenarios and the structural features of GCMs were constructed. The analysis of the maps and the values of the above characteristics averaged over hydrological belts made it possible to reveal the geographical regularities of possible changes (and their uncertainties) in precipitation, runoff, and evapotranspiration.

## Сценарные оценки изменения составляющих водного баланса суши в XXI веке

Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

E-mail: [olniknas@yandex.ru](mailto:olniknas@yandex.ru)

Предполагаемые изменения климата нашей планеты неизбежно окажут влияние на окружающую среду и различные сферы человеческой деятельности. В связи с этим поиск ответа на вопрос, какими будут последствия климатических изменений, представляет собой весьма актуальную задачу в области наук о Земле. Актуальность указанной задачи подчеркивает организация в 2012 году международного проекта Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP) [9], изначально ориентированного на координацию усилий, направленных на моделирование в глобальном масштабе влияния изменения климата на три важнейших сектора: сельское хозяйство, водные ресурсы и экосистемы. Впоследствии набор секторов был расширен, а глобальные исследования дополнены региональными.

Данная работа выполнена по материалам международного проекта ISI-MIP с использованием разработанной в ИВП РАН модели SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants) [1]. Цель работы – моделирование изменений составляющих водного баланса всей поверхности суши земного шара (за исключением Антарктиды) вследствие возможного изменения климата в XXI в. с оценкой неопределенности полученных результатов, обусловленных использованием различных GCMs и климатических сценариев семейства RCP, а также исследование закономерностей пространственного распределения изменений составляющих водного баланса и их неопределенностей.

Для расчета составляющих водного баланса суши использовалась модель SWAP. SWAP – это физико-математическая модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой (Land Surface Model – LSM). Детальное описание модели и результаты ее проверок можно найти в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях, в значительной мере представленных в монографии [1]. Модель применялась для расчета характеристик тепло- и влагообмена для объектов суши, расположенных в различных физико-географических условиях и разных пространственных масштабах (от экспериментальной площадки до речных бассейнов разных размеров, а также для континентов и всей поверхности суши, за исключением Антарктиды). Смоделированные составляющие водного (сток и суммарное испарение), радиационного и теплового (потoki скрытого и явного тепла) балансов сопоставлялись с данными наблюдений и/или с соответствующими оценками, имеющимися в литературе. Результаты сопоставления позволили сделать вывод о возможности использования модели SWAP в разных масштабах, в том числе и для глобальных расчетов [2, 3, 8].

Для глобальных расчетов по модели SWAP поверхность суши Земного шара (за исключением Антарктиды) была представлена совокупностью ячеек регулярной сетки с пространственным разрешением по широте и долготе  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Общее количество расчетных ячеек составило 67177, каждая из которых была обеспечена исходной метеорологической информацией и параметрами подстилающей поверхности.

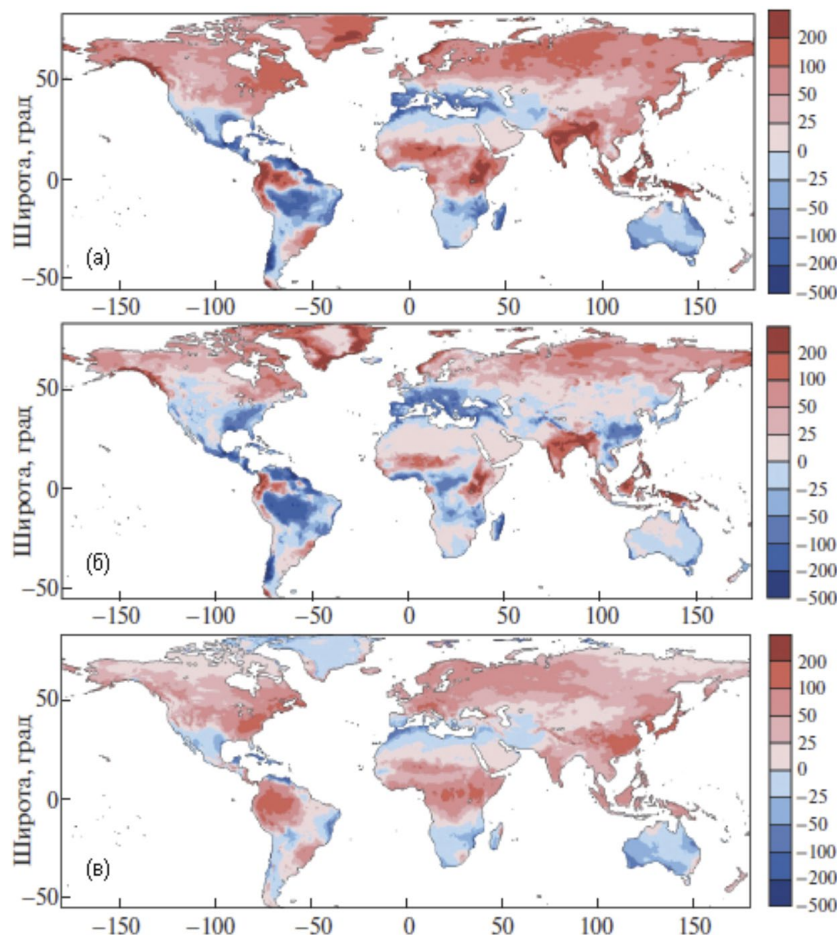
Метеорологическое обеспечение модели SWAP включает в себя атмосферные осадки, температуру и влажность воздуха, интенсивности приходящих потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, скорость ветра и атмосферное давление. Для исторических (базовых) расчетов для каждой ячейки расчетной сетки были подготовлены ряды суточных значений метеорологических элементов за период 1969–2001 гг. с использованием базы данных Water and Global Change (WATCH) [10], предоставленной организаторами проекта ISI-MIP. Для прогностических расчетов использовались суточные значения

метеорологических элементов за период 2006-2099 гг., рассчитанные по пяти глобальным климатическим моделям (Global Climate Models – GCMs: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM и NorESM1-M) для четырех климатических сценариев семейства Representative Concentration Pathway – RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5), подготовленные для 5-го оценочного доклада IPCC. RCP8.5 представляет собой наиболее агрессивный сценарий, обусловленный повышенной эмиссией парниковых газов в атмосферу и слабыми мерами по ограничению их выбросов. Помимо прогностических значений в работе использовались рассчитанные по пяти указанным GCMs значения метеорологических элементов для исторического периода (1971-2005 гг.). Поскольку расчеты по GCMs далеки от совершенства и могут содержать систематические ошибки, в рамках проекта ISI-MIP была проведена постпроцессинговая коррекция (bias-correction) смоделированных значений метеорологических характеристик по данным WATCH [6].

Параметры подстилающей поверхности для каждой расчетной ячейки были подготовлены с использованием экосистемной базы данных ECOCLIMAP [7]. Отсутствующие в ECOCLIMAP почвенные параметры были рассчитаны по данным о механическом составе почвы (CLAY и SAND) на основе уравнений, приведенных в [5].

Прежде чем переходить к прогностическим расчетам была исследована возможность использования в качестве форсингов для модели SWAP результатов расчета метеорологических характеристик по пяти вышеупомянутым GCMs на основе анализа смоделированных по модели SWAP гидрологических характеристик для исторического периода. Сопоставление смоделированных полей суммарного испарения и стока, а также глобально осредненных составляющих водного баланса с данными других авторов подтвердили способность SWAP адекватно воспроизводить указанные характеристики.

*Сценарные оценки изменений составляющих водного баланса в XXI веке и их неопределенности.* Скорректированные ряды метеорологических элементов были использованы для расчета стока и суммарного испарения по модели SWAP. В результате для каждой расчетной ячейки было получено 20 вариантов (5 GCMs × 4 сценария) динамики составляющих водного баланса за период с 1971 по 2099 гг. Результаты 20 вариантов расчетов послужили основой для вычисления в глобальном масштабе климатических значений годовых сумм атмосферных осадков, слоя стока и суммарного испарения для исторического и трех прогностических периодов (2006–2036, 2037–2067, 2068–2099), что позволило получить оценки возможных изменений составляющих водного баланса для каждого прогностического периода по отношению к историческому и оценить их неопределенности, обусловленные применением различных GCMs и RCP-сценариев. Более детально методика изложена в [4].



**Рис. 1.**

Пространственное распределение изменений в 2068-2099 гг. климатических значений (а) атмосферных осадков, (б) слоя стока, (в) суммарного испарения (мм/год).

В результате проведенных расчетов получены глобальные оценки изменения климатических осадков, стока и испарения в XXI в. В соответствии с ансамблевыми средними в 2068-2099 гг. ожидается увеличение всех составляющих водного баланса по сравнению с историческим периодом. При этом осадки в среднем увеличатся примерно на 43 мм/год (5%), варьируя по 20 вариантам расчета от 2 до 91 мм/год (от 0.3 до 11%); суммарное испарение на 31 мм/год (7%), варьируя от 5 до 57 мм/год (от 1 до 13%); слой стока на 17 мм/год (4%) при разбросе от -3 до 43 мм/год (от -1 до 11%). Помимо этого, проанализировано изменение составляющих водного баланса по гидрологическим поясам.

Для анализа пространственных закономерностей были построены мировые карты средних по ансамблю из 20 вариантов изменений к концу XXI в. климатических значений составляющих водного баланса, а также неопределенностей этих оценок, обусловленных различиями в использованных климатических сценариях и структурными особенностями GCMs. В качестве примера на Рис. 1 показано пространственное распределение изменений в 2068-2099 гг. климатических значений атмосферных осадков, слоя стока и суммарного испарения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // *Водные ресурсы*. 2006. Т. 33. № 6. С. 664–676.
3. Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. Глобальные оценки составляющих теплового и водного балансов суши // *Изв. РАН. Серия географическая*. 2008. № 1. С. 8–19.
4. Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А. Глобальные оценки изменения составляющих водного баланса суши в связи с возможным изменением климата // *Водные ресурсы*. 2021. Т. 48, № 4, с. 361–377.
5. Cosby B., Hornberger G., Clapp R., Ginn T. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils // *Water Resour. Res.* 1984. № 20. P. 682–690.
6. Hempel S., Frieler K., Warszawski L., Schewe J. Piontek F. A trend-preserving bias correction — the ISI-MIP approach // *Earth Syst. Dynam.* 2013. V. 4. № 2. P. 219–236.
7. Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., and Lacaze R. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models // *J. Clim.* 2003. V. 16. P. 1261–1282.
8. Nasonova O.N., Gusev Y.M., Kovalev Y.E. Impact of uncertainties in meteorological forcing data and land surface parameters on global estimates of terrestrial water balance components // *Hydrological Processes*. 2011. V. 25. № 7. P. 1074–1090.
9. Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework // *PNAS*. 2014. V. 111. № 9. P. 3228–3232.
10. Weedon G.P., Gomes S., Viterbo P., Shuttleworth W.J., Blyth E., Österle H., Adam J.C., Bellouin O., and Best M. Creation of the WATCH Forcing Data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century // *J. Hydrometeorology*. 2011. V. 12. P. 823–848.

## Spatio-temporal variability of statistical characteristics of atmospheric turbulence in urban conditions

Drozd I.D.<sup>1,2,5</sup>, Gavrikov A.V.<sup>2,5</sup>, Stepanenko V.M.<sup>4,1,3,5</sup>, Repina I.A.<sup>5,3,4</sup>, Artamonov A.Yu.<sup>5</sup>, Pashkin A.D.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>5</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: drozdil.msu@gmail.com

The main exchange of energy and mass between the atmosphere and the surface occurs through the means of turbulent processes in the boundary layer of the atmosphere. A modern atmospheric dynamics models use simplified schemes for calculating energy exchange with the surface, based on the Monin-Obukhov similarity theory (MOST). The main requirement of MOST is the uniformity of the underlying surface. This



simplification reduces the accuracy of the forecast, especially in regions with complex (heterogeneous) orography, such as in urban conditions. The obtained regularities in the future may allow us to choose the most accurate parameterization for better use of MOST in conditions of a geometrically complex surface and increasing the accuracy of the forecast for urbanized territories.

This paper presents the result of the analysis of the data series for period from 2020 to 2022 obtained from the eddy covariance tower installed in the Meteorological observatory of Moscow State University (MO MSU) in 2019. The 21-meter micrometeorological mast is equipped with three measuring levels at altitudes of 2.2 m, 11.1 m and 18.8 m. At each level, acoustic anemometers manufactured by METEK are installed, at the two lower levels – uSonic-3 Scientific, at the upper – uSonic-3 class A. Acoustic anemometers with a frequency of 20 Hz record three components of wind speed with an accuracy of 0.1 m/s and acoustic temperature with an accuracy of 0.1 °C. The paper also uses data from hourly observations of humidity and pressure at altitudes of 2 m above the surface, provided by MO MSU. For processing high-frequency mast data and calculating the static characteristics of turbulence, a set of programs implemented by the authors is used. As part of the primary processing, the data is sorted, the instrument axes are rotated and correction constants are introduced, ripples exceeding three standard deviations are filtered. Gaps are filled by a new algorithm that generates data based on the Gaussian distribution of the filled value before and after the gap, taking into account the correlation with other values (Drozd et al, 2022).

Based on a long series of measurements, the seasonal and daily variability of heat and momentum fluxes over an urbanized surface was analyzed. The detailed statistical analysis of the influence of eddy structures was carried out on the formation of turbulent fluxes in the city. The method proposed in (Barskov et al., 2019) was used to identify coherent vortices. The method is based on the hypothesis of the relationship of third and second moments, described by the ratio:

$$\overline{w'w'c'} = CS_w (\overline{w'w'})^2 \overline{w'c'},$$

where  $C \sim 1$  is non-dimensional constant, and  $S_w$  is skewness of vertical velocity (Abdella, McFarlane, 1997; Zilitinkevich, 1999). The compliance of third moments with theoretical values was established for various stratification conditions in 80% of cases. The result indicates a significant contribution of coherent structures to the formation of vertical fluxes over a geometrically complex surface, which is consistent with the estimates received earlier for natural (Barskov et al, 2019) and city landscapes (Pashkin et al, 2019). A footprint was analyzed for various directions of wind and stratification conditions to assess the influence of an urbanized surface on the formation of heat and momentum fluxes. The calculation of footprints was carried out based on two-dimensional parameterisation (Kljun et al, 2015).

*Acknowledgements.* The work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, contracts 075-15-2019-1621, 2020-220-08-5835. Statistical data processing was supported by the RSF grant 21-17-00249.

## REFERENCES:

1. Abdella K., McFarlane N. A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer // *Journal of the atmospheric sciences*. – 1997. – T. 54. – №. 14. – С. 1850-1867.
2. Barskov K. V., Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Yu. and Gavrikov A. A. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2019. – T. 173. – №. 3. – С. 311-320.
3. Drozd I. D., Gavrikov A. V., Stepanenko V. M. Comparative characteristics of gap filling methods in high-frequency data of micrometeorological measurements // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2022. – T. 1023. – №. 1. – С. 012009.
4. Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., and Schmid, H. P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP) // *Geoscientific Model Development*. – 2015. – T. 8. – №. 11. – С. 3695-3713.
5. Pashkin A. D., Repina I. A., Stepanenko V. M., Bogomolov V. Yu., Smirnov S. V., and Telminov A. E. An experimental study of atmospheric turbulence characteristics in an urban canyon // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2019. – T. 386. – №. 1. – С. 012035.
6. Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. Third-order transport and nonlocal turbulence closures for convective boundary layers. – *J. Atmos. Sci.*, 1999. – V. 56. – P. 3463–3477.

# Пространственно-временная изменчивость статистических характеристик турбулентности в условиях городской застройки

Дрозд И.Д.<sup>1,2,5</sup>, Гавриков А.В.<sup>2,5</sup>, Степаненко В.М.<sup>4,1,3,5</sup>, Репина И.А.<sup>5,3,4</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>5</sup>, Пашкин А.Д.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>4</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: drozdil.msu@gmail.com

Основной обмен энергией и массой между атмосферой и поверхностью происходит по средствам турбулентных процессов в пограничном слое атмосферы. Описание данного обмена является нетривиальной задачей, для решения которой в численных моделях прогноза погоды используются упрощенные схемы расчета, основанные на теории подобия Монина-Обухова (ТПМО). Основным требованием ТПМО является однородность подстилающей поверхности. Такое упрощение снижает точность прогноза в городских условиях, где подстилающая поверхность отличается резкой неоднородностью. Полученные в настоящей работе закономерности в перспективе могут позволить подобрать более точные параметризации для более качественного использования ТПМО в условиях геометрически сложной поверхности и повышения точности прогноза для урбанизированных территорий.

В работе используются данные, полученные с микрометеорологической мачты, установленной в метеорологической лаборатории МГУ (МО МГУ) в 2019 году, за период с 2020 по 2022 года. 21-метровая мачта имеет три измерительных уровня - 2.2, 11.1, 18.8 м, на которых акустические анемометры компании МЕТЕК измеряют три компонента скорости ветра и акустическую температуру с частотой 20 Гц и точностью 0.1 м/с и 0.1 С, соответственно. Также в работе используются данные часовых наблюдений влажности и давления на высоте 2 м над поверхностью, предоставленные МО МГУ. Для обработки высокочастотных данных мачты и расчёта статистических характеристик турбулентности используется реализованный авторами работы комплекс программ. В рамках первичной обработки данные сортируются и приводятся к общему виду, осуществляется поворот осей прибора и вносятся поправочные константы, фильтруются выбросы в значениях, превышающие три стандартных отклонения, заполнение пропусков осуществляется алгоритмом генерирующим данные на основе скоррелированного стандартного распределения (Drozd et al, 2022).

На основе длительного ряда измерений была проанализирована сезонная и суточная изменчивость турбулентных потоков тепла и импульса над урбанизированной поверхностью. Был проведен подробный статистический анализ влияния крупных вихревых структур на формирование турбулентных потоков в условиях города. Для идентификации когерентных вихрей использовался метод, предложенный в (Barskov et al., 2019). В основе метода лежит гипотеза взаимосвязи третьих и вторых моментов, описываемая соотношением:

$$\overline{w' w' c'} = C S_w (\overline{w' w'})^{1/2} \overline{w' c'},$$

где  $S_w = (\overline{w' w' w'}) / (\overline{w' w'})^{3/2}$  – коэффициент асимметрии,  $c$  – переносимая величина, а  $C$  – безразмерная постоянная, примерно равная единице (Abdella, McFarlane, 1997; Zilitinkevich, 1999). В 80% случаев для различных условий стратификации было установлено соответствие третьих моментов с теоретическими значениями. Полученный результат говорит о большом вкладе когерентных структур в формирование вертикальных потоков над геометрически сложной поверхностью, что согласуется с оценками, полученными ранее для природных (Barskov et al, 2019) и городских ландшафтов (Pashkin et al, 2019). Для оценки влияния урбанизированной подстилающей поверхности на формирование потоков тепла и импульса был проведен анализ футпринтов для различных направлений ветра и условий стратификации, расчет футпринтов осуществлялся на основе двумерной параметризации (Kljun et al, 2015).

*Благодарности. Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования России, договоры 075-15-2019-1621, 2020-220-08-5835. Статистическая обработка данных поддержана грантом РФФ 21-17-00249.*

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Abdella K., McFarlane N. A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer // *Journal of the atmospheric sciences*. – 1997. – Т. 54. – №. 14. – С. 1850-1867.

2. Barskov K. V., Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Yu. and Gavrikov A. A. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2019. – T. 173. – №. 3. – С. 311-320.
3. Drozd I. D., Gavrikov A. V., Stepanenko V. M. Comparative characteristics of gap filling methods in high-frequency data of micrometeorological measurements // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2022. – T. 1023. – №. 1. – С. 012009.
4. Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., and Schmid, H. P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP) // *Geoscientific Model Development*. – 2015. – T. 8. – №. 11. – С. 3695-3713.
5. Pashkin A. D., Repina I. A., Stepanenko V. M., Bogomolov V. Yu., Smirnov S. V., and Telminov A. E. An experimental study of atmospheric turbulence characteristics in an urban canyon // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2019. – T. 386. – №. 1. – С. 012035.
6. Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. Third-order transport and nonlocal turbulence closures for convective boundary layers. – *J. Atmos. Sci.*, 1999. – V. 56. – P. 3463–3477.

## CN composition of the soils at the southern part of Priobskoye field

**Belkova D.D., Kaverin A.A., Zarov E.A.**

Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia  
E-mail: [belkova2019@bk.ru](mailto:belkova2019@bk.ru)

The aim of this project was to study the CN content in the organic soils associated with the high organic matter content at the disturbed peat soils at the Priobskoye oil area and compare them with similar background soils.

The object of this study was the license area located within the boundaries of the southern part of the Priobskoye oil field at the right-bank valley of the Irtysh River, including a complex of river terraces

Typical biotopes forming a large part of the territory of the license area and its disturbance were chosen for the analysis. Data on similar undisturbed background biotopes were taken at the Mukhrino field station (Table 1).

Samples of the studied soils were taken from the upper horizon by weighing bottle at depths of 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm. Soil analysis for CHN was performed using EA-3000 Elemental Analyzer.

The results of the studies showed that the total carbon content varies between 42.36 and 46.65%. The hydrogen content varies – from 5.20 to 5.92%, nitrogen – from 0.51 to 1.04%. The qualitative indicators of organic matter content as C/N and C/H are 43.02-85.49 and 7.88-8.37, respectively (Table 2).

The low C/N ratio show the high potential for the further mineralization. This is feature of the fresh, slightly transformed organic matter. The high C/N ratios are associated with the slow mineralization rate due to nitrogen limit [3]. The C/N ratio in the study area varies from 43.02 on disturbed soils of sphagnum oligotrophic bogs and open ridge-hollow complex to 85.49 on flooding in low-level pine-shrub-cottongrass sphagnum bogs with the ridge-hollow complex. All values of C/N in the disturbed areas significantly exceed the background values, which indicates a decrease in the rate of mineralization as a result of nitrogen removal.

Thus, the conducted studies allow us to conclude that the content of chemical elements in peat bog soils at the Khanty-Mansi Autonomous Okrug varies widely and is associated with the properties of organic matter. For more detailed assessment of the elemental composition features of peat oligotrophic soils and identification of their impact on the the territory conditions more detailed studies are required.

# Содержание углерода и азота в почвах территории южной части Приобского месторождения

Белькова Д.Д., Каверин А.А., Заров Е.А.

Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия  
E-mail: [belkova2019@bk.ru](mailto:belkova2019@bk.ru)

Связующим звеном биологического и геологического круговоротов веществ Земли является почва – своеобразная буферная система, обеспечивающая развитие всех компонентов экосистем и биосферы в целом. Информация о фоновом содержании различных форм элементов в почвах является обязательным условием рационального природопользования, необходима для регионального и локального мониторинга [1].

Целью исследования стало изучение особенностей распределения углерода и азота, органического вещества в нарушенных торфяных болотных почвах на территории Приобского месторождения и их сравнение с аналогичными фоновыми почвами.

Объектом данного исследования является лицензионный участок, который расположен в границах южной части Приобского месторождения и охватывает правобережную долину р. Иртыш, включающий комплекс речных террас, регулярно заливаемую современную пойму р. Иртыш и междуречное пространство Оби и Иртыша. Территория представляет собой типичный комплекс экосистем, привязанных к основным элементам ландшафта – водораздельной части, террасам и пойменным участкам.

Торфяные болотные верховые почвы приурочены к водораздельным пространствам и террасам с небольшими уклонами и слаборасчлененной поверхностью. Они развиваются в условиях застойного увлажнения под воздействием пресных или очень слабо минерализованных вод атмосферных осадков без влияния грунтовых вод. Растительный покров характеризуется господством сфагновых мхов, вересковых кустарничков (багульник, голубика, подбел, клюква, кассандра), пушиц, некоторых видов осок (*Carex limosa*). Древесные породы (в основном сосна) произрастают на верховых болотах в угнетенном состоянии или образуют особые болотные экологические формы — рямы и гряды [2].

В качестве объектов были выбраны типичные биотопы, формирующие большую часть территории лицензионного участка, и характерные антропогенные нарушения. В качестве сравнительных фоновых значений взяты данные по аналогичным ненарушенным биотопам с территории международного научного стационара Мухрино (таблица 1).

**Таблица 1.** Фоновые значения, отобранные на стационаре Мухрино.

Тип биотопа	N(фон) %	C(фон) %	H(фон) %	C/N (фон)	C/H (фон)
Низкий рямы сосново кустарничково-пушицево сфагновые болота с ГМК	1.10	46.07	5.54	42.02	8.31
Высокий рямы (сосново-кустарничково-сфагновое болото)	1.25	46.31	5.89	37.04	7.87
Низкий рямы кустарничково-пушицево сфагновые болота с ГМК	1.10	46.07	5.54	42.02	8.31
Сфагновые олиготрофные топи и открытые ГМК	1.10	46.07	5.54	42.02	8.31

Образцы исследуемых почв отбирались с верхнего горизонта бюксами по глубинам 0-10 см, 10-20 см и 20-30 см. Анализ почвы на содержание CHNS производился с помощью газового хроматографа EA-3000 Elemental Analyzer.

Результаты исследований показали, что содержание общего углерода варьирует в пределах – от 42.36 до 46.65 %. Содержание водорода изменяется – от 5.20 до 5.92%, азота – от 0.51 до 1.04 %. Такие качественные показатели содержания органического вещества, как C/N и C/H составляют 43,02-85,49 и 7,88-8,37 соответственно (таблица 2).

Низкое отношение C/N, свидетельствует о более высокой скорости процесса минерализации. Это в наибольшей степени относится к свежему, слабо трансформированному органическому веществу. При более высоких значениях C/N, минерализация проходит медленнее, из-за лимита азота[3]. Соотношение C/N на исследуемом участке варьируется от 43.02 на нарушенных верхних почвенных слоях сфагновых олиготрофных топах и открытых ГМК до 85.49 на подтоплениях в низком ряме сосново кустарничково-пушицево сфагновых болотах с ГМК. Все значения C/N на нарушенных участках значительно превышают фоновые показатели, что свидетельствует об уменьшении скорости минерализации в следствии потерь азота.

Отношение C/H менее изменчивая величина, четкая зависимость между фоном и нарушениями не выявлена.



**Таблица 2.** Средние значения основных химических свойств почв.

Участок	Тип биотопа	Тип нарушения	C%	N%	H%	C/N	C/H
s1	Низкий рям (сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые болота с ГМК)	Подтопление (вдоль дорог постоянных и временных)	46.64	0.78	5.80	59.95	8.04
s2		Подтопление (вдоль дорог постоянных и временных)	43.50	0.55	5.65	78.84	7.70
s5		Подтопление (вдоль дорог постоянных и временных)	43.43	0.51	5.50	85.49	7.90
s14		Осушение (вдоль дорог постоянных и временных)	42.59	0.77	5.25	54.99	8.12
s3	Высокий рям (сосново-кустарничково-сфагновое болото)	Подтопление (вдоль дорог постоянных и временных)	44.99	0.68	5.67	66.43	7.94
s4		Подтопление (вдоль дорог постоянных и временных)	46.65	0.62	5.92	75.61	7.88
s15	Низкий рям кустарничково-пушицево-сфагновые болота с ГМК	Насыпь (насыпной грунт на местах строительства кустов)	46.49	0.62	5.86	75.17	7.93
s16		Загрязнение (места разливов углеводов или загрязняющих веществ)	44.50	0.57	5.31	78.59	8.37
s17		Нарушение верхнего почвенного слоя	42.36	0.86	5.20	49.29	8.14
s18		Нарушение верхнего почвенного слоя	46.04	0.59	5.73	78.68	8.03
s19		Нарушение верхнего почвенного слоя	43.94	0.68	5.44	64.33	8.07
s20		Подтопление (вдоль дорог постоянных и временных)	43.65	0.69	5.66	62.87	7.71
s21	Сфагновые олиготрофные топи и открытые ГМК.	Нарушение растительного покрова	45.78	1.04	5.63	44.08	8.13
s22		Нарушение верхнего почвенного слоя	43.63	1.01	5.50	43.02	7.93

\* выделены ячейки с меньшей концентрацией элементов по сравнению с фоном (таблица 1)

Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что содержание химических элементов в торфяных почвах Ханты-Мансийского автономного округа варьирует в широких пределах и связано со свойствами органического вещества. Для более детальной оценки специфики элементного состава торфяных болотных почв ХМАО и выявления их влияния на состояние территории требуются более детальные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. С.В. Денева, Е.В. Шамрикова, С.В. Бакашкин Сравнительный анализ методов определения элементного состава маршевых почв // Почва как компонент биосферы: эволюция, функционирование и экологические аспекты. - Москва: кмк, 2020. - с. 42-44.
2. Н.Г. Федюрин, О. Н. Бахмет Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. - Петрозаводск: 2003. - 240 с.
3. Суханова Н.И., Трофимов С.Я., Полянская Л.М., Ларин Н.В., Ларин В.Н. // Изменение гумусного состояния и структуры микробной биомассы в местах водородной эксгалляции. - 2013. - №2. - с. 152.
4. Д. Н. Замолодчиков Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Лес и климат. - 2011. - №4 (29). - с. 15-22.
5. О.А. Некрасова Методы анализа органического вещества почв. - 1 изд. - Екатеринбург: руководство к лабораторным занятиям, 2008. - 107 с.
6. О.А. Краснов, Ш.Ш. Максвотов, А.Ф. Сабреков, М.В. Глаголев, Д.В. Ильясов, И.Е. Терентьева Потоки метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // оптика атмосферы и океана. - 2017. - №4. - с. 301-309.
7. Сабреков А.Ф., Глаголев М.В. о диссертации Н.А. Шнырева: Микрометеорология и другие замечания // динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. - 2016. - №2. - с. 26-37.
8. Е.А. Зауэр Современные автоматические CHNS-анализаторы органических соединений // Аналитика и контроль. - 2018. - №1. - с. 6-19.
9. Е.В. Миляева, В.А. Степанова, Е.К. Вишнякова Запасы углерода и азота в болотных экосистемах средней тайги западной сибирей // интерэкспо гео-сибирь. - 2012. - №8. - с. 6-11.
10. Д.А. Соколов, И.С. Иванова, Т.И. Сиромля Элементный состав торфяных олиготрофных почв ЯНАО // западно-сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. - Томск: удк, 2021. - с. 139-141.

# Applicability of the description of the hydrophysical characteristics of soils by various pedotransfer functions

Ryazanova A.A.<sup>1,2</sup>, Bogomolov V.Yu.<sup>1,2,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>4</sup>Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: [r.ann.1194@gmail.com](mailto:r.ann.1194@gmail.com)

Pedotransfer functions are used to describe the hydrophysical characteristics of soils. There are a large number of different pedotransfer functions. Thus, the task was to determine how well various pedotransfer functions describe the hydrophysical characteristics for various types of soils. There are several different methods for classifying soils according to particle size distribution. The USDA soil classification developed by the US Department of Agriculture and the National Soil Research Association is often used in the world.

Pedotransfer functions (PTFs) are empirical dependencies that make it possible to restore the main hydrophysical functions of soils, including the WRC (the main hydrophysical characteristic), according to traditional, known from the materials of the Soil Surveys, or traditionally determined basic soil properties (Shein and Karpachevsky, 2003).

To calculate such characteristics as saturated suction and a dimensionless coefficient for the Clapp-Hornberger parameterization, the following PTFs are often used: Saxton (1986), Campbell and Shiosawa (1992), Rawls and Brakensiek (1989), Williams et al. (1992), Oosterveld and Chang (1980), Mayr and Jarvice (1999), Cosby et al. (1984), Saxton and Rawls (2006). The following PTFs are often used to calculate hydraulic conductivity: Campbell and Shiosawa (1992), Rawls and Brakensiek (1989), Cosby et al. (1984), Saxton and Rawls (2006), Wosten (1997), Jabro (1992), Ottoni (2019), Shwetha-Prasanna (2018), Nemes (2005), Patil (2009), Tomassela (1997).

Despite the fact that all considered pedotransfer functions calculate the same characteristic, the obtained values are quite different for different pedotransfer functions with the same granulometric composition. Thus, the use of any one pedotransfer function in the climate model for calculating the hydrophysical characteristics for the entire variety of soils is not correct. One option is to use global databases of hydrophysical characteristics. Such a base is a high-resolution global dataset of hydraulic and thermal soil properties for land surface modeling (Dai, Y et al., 2019)

## Применимость описания различными педотрансферными функциями гидрофизических характеристик почвогрунтов

Рязанова А.А.<sup>1,2</sup>, Богомолов В.Ю.<sup>1,2,3,4,5</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

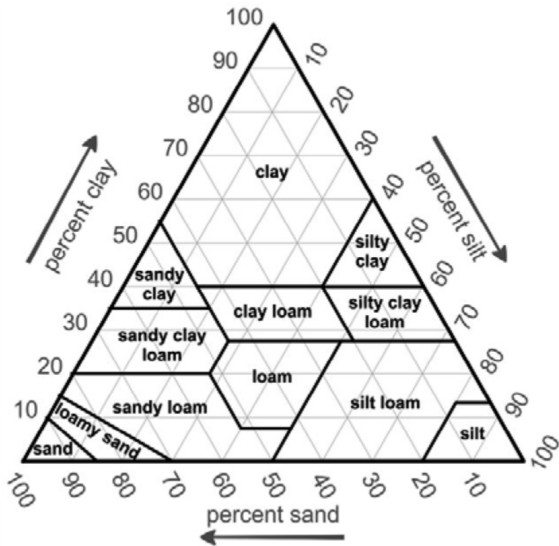
<sup>4</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр, Московский государственный университет, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

E-mail: [r.ann.1194@gmail.com](mailto:r.ann.1194@gmail.com)

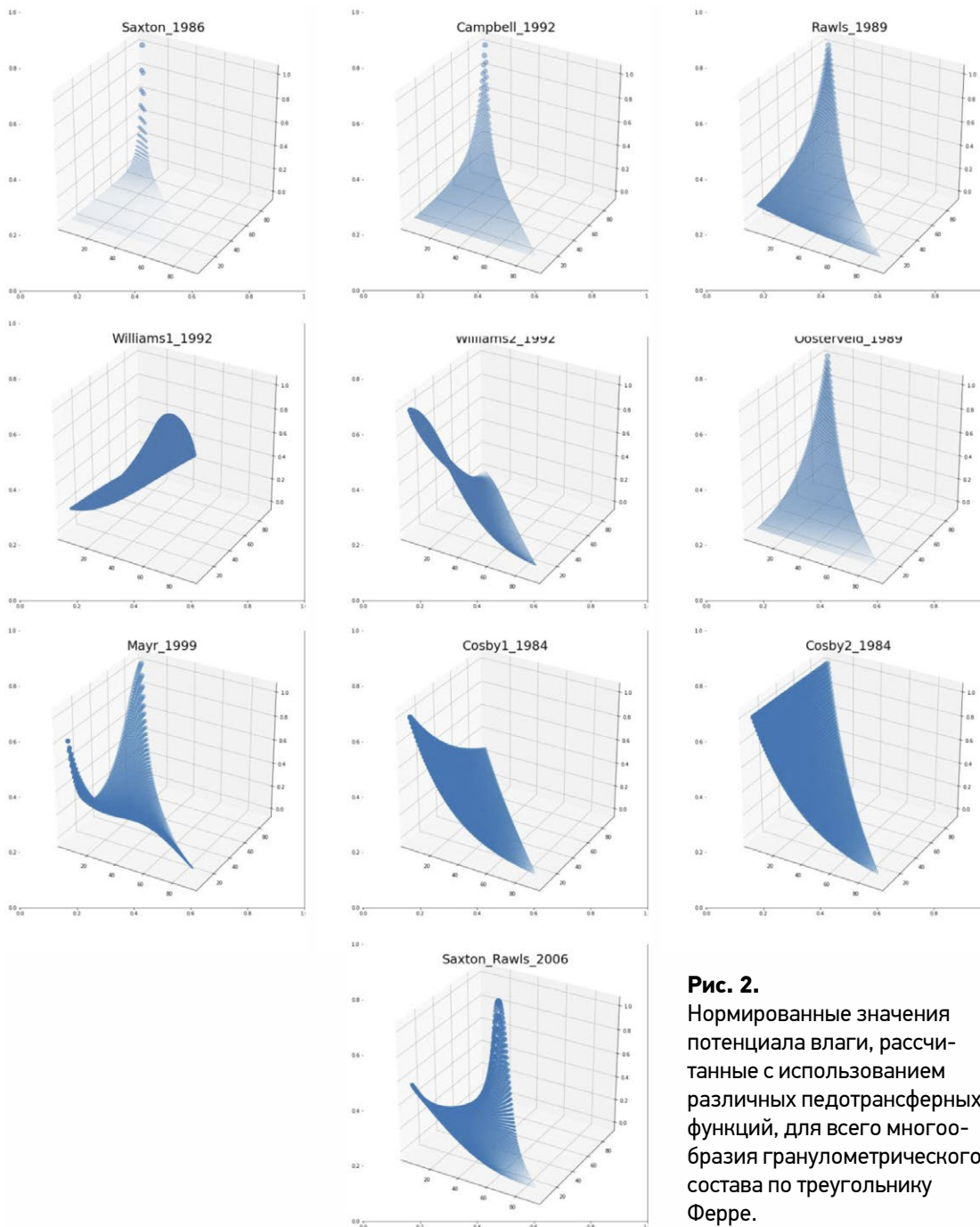
Педотрансферные функции используются для описания гидрофизических характеристик почвогрунтов. Существует большое количество различных педотрансферных функций. Таким образом, была поставлена задача определить, как хорошо различные педотрансферные функции описывают гидрофизические характеристики для различных типов почвогрунтов.

Для классификации почвогрунтов в соответствии с размером частиц по гранулометрическому составу существует несколько различных методик. В России и в ряде других стран принята методика, разработанная Н.А. Качинским (Качинский, 1958). Данная методика позволяет проводить классификацию на основании содержания физической глины с учётом доминирующей фракции и типа почвообра-



зования. Также достаточно часто в мире используется классификация почв USDA, разработанная Министерством сельского хозяйства США и Национальным объединением для исследования почв (Soil Science Division Staff, 2017). Для определения наименования почвы используются треугольник Ферре (Soil Survey Division Staff, 1993). Далее в нашей работе будем придерживаться данной классификации.

**Рис. 1.** Треугольник Ферре для классификации почвы по USDA.



**Рис. 2.** Нормированные значения потенциала влаги, рассчитанные с использованием различных педотрансферных функций, для всего многообразия гранулометрического состава по треугольнику Ферре.

Педотрасферные функции (ПТФ) – это эмпирические зависимости, позволяющие восстанавливать основные гидрофизические функции почв, в том числе и ОГХ (основную гидрофизическую характеристику), по традиционным, известным из материалов Почвенных служб или традиционно определяемым базовым свойствам почв (Шеин, Карпачевский, 2007). Этот термин был введен в 1987 году Боумом и ван Ланеном.

Для расчёта таких характеристик как потенциала влаги при её максимальном значении и безразмерного показателя для параметризации Клаппа-Хорнбергера часто используются следующие ПТФ: Saxton (1986), Campbell и Shiosawa (1992), Rawls и Brakensiek (1989), Williams и др. (1992), Oosterveld и Chang (1980), Mayr и Jarvice (1999), Cosby и др. (1984), Saxton и Rawls (2006).

Для расчёта гидравлической проводимости часто используются следующие ПТФ: Campbell и Shiosawa (1992), Rawls и Brakensiek (1989), Cosby и др. (1984), Saxton и Rawls (2006), Wosten (1997), Jabro (1992), Ottoni (2019), Shwetha-Prasanna (2018), Nemes (2005), Patil (2009), Tomassela (1997).

Для того чтобы понять, как правильно педотрасферные функции воспроизводят гидрофизические характеристики для разных типов почвы, необходимо для каждого типа почв, который определяется процентным содержанием песка, глины и ила, произвести расчёт этих характеристик. Для упрощения задачи будем использовать не реальные значения процентного содержания фракций из какой-либо почвенной базы, а программно смоделированные, что позволит нам полностью охватить весь треугольник Ферре (рис. 1).

В результате, полученные значения потенциала влаги (рис. 2) достаточно сильно отличаются для разных педотрасферных функций при одном и том же гранулометрическом составе. Таким образом, использование какой-либо одной педотрасферной функции в модели климата для расчёта гидрофизических характеристик для всего многообразия почвогрунтов является некорректным. Одно из решений – использование глобальных баз гидрофизических характеристик, например, глобальный набор данных высокого разрешения о гидравлических и тепловых свойствах почвы для моделирования земной поверхности (Dai, Y и др., 2019), авторы которого используют специальные методики ансамблевого осреднения и минимизации для получения глобального поля гидрофизических характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Качинский Н.А. *Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения.* — Москва: Изд-во АН СССР, 1958. — С. 25. — 191 с.
2. Шеин Е.В., Карпачевский Л.О. *Теории и методы физики почвы,* Москва «Гриф и К», 2007, 616 с.
3. Soil Science Division Staff. 2017. *Soil survey sand.* C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). *USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.*
4. Soil Survey Division Staff (1993). *Soil survey manual.* United States Department of Agriculture. pp. 63–65. Retrieved 30 August 2014.
5. Dai, Y., Xin, Q., Wei, N., Zhang, Y., Shangguan, W., Yuan, H., et al. (2019). *A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling.* *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, <https://doi.org/10.1029/2019MS001784>

## Калибровка речного стока в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ с использованием искусственных нейронных сетей

Чернышев Р.В.<sup>1,2</sup>, Криницкий М.А.<sup>3,1</sup>, Степаненко В.М.<sup>1,2,4</sup>, Медведев А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

E-mail: ruscherol@gmail.com

Приложения искусственного интеллекта (ИИ) стремительно развиваются во всех сферах человеческой деятельности, и наука о климате не является исключением. Одной из наиболее эффективных моделей ИИ являются нейронные сети. Их можно разделить на два класса: нейронные сети с физическими ограничениями, где нейронная сеть обычно дополняет физико-математическую модель, и нейронные сети, обучаемые только на данных, такие модели могут использоваться в том числе и для калибровки моделей Земной системы [1][2].

Модель Земной системы включает параметризации физических процессов со множеством настраиваемых параметров. Часть этих параметров известна с хорошей точностью, другие могут принимать



значения в широких пределах. Во втором случае обычно используется калибровка параметров для минимизации метрик ошибки модели. Преимуществом использования нейронной сети для калибровки является возможность эффективного использования графических ускорителей, в отличие от многих других методов; кроме того, нейронная сеть может хорошо аппроксимировать сложные поверхности, основываясь на относительно небольшом наборе данных. В данной работе представлены результаты калибровки модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ для повышения качества воспроизведения речного стока.

Разработана однонаправленная нейронная сеть из 6 слоёв с функцией активации Mish, оптимизируемая с использованием метрики качества MSE. С помощью нейронной сети по небольшому набору данных восстанавливается среднеквадратическая ошибка (RMSE) расчетов устьевого стока моделью ИВМ РАН-МГУ как функция скалярных констант модели. Далее, находится минимум восстановленной функции.

Для решения задачи в модели ИВМ РАН-МГУ были отобраны 6 параметров, участвующих в расчете речного стока: минимальная и максимальная скорость горизонтальной фильтрации, пороговая влажность почвы, при которой начинается быстрый боковой сток, льдистость почвы, блокирующая гравитационное просачивание жидкой влаги, толщина слоя почвы, состояние которого определяет поверхностный сток, и угол наклона бортов речной долины. Первые исследования показали, что угол наклона бортов речной долины и толщина почвенных вод слабо влияют на речной сток. Дальнейшие эксперименты проводятся с участием оставшихся четырёх параметров. Сложность задачи состоит в том, что из-за затратных по времени численных экспериментов с моделью деятельного слоя, создание большой выборки данных для обучения нейронной сети заняло бы неоправданно большое время. Поэтому перед обучением нейронной сети с моделью ИВМ РАН-МГУ были произведены 100 экспериментов со значениями калибруемых параметров, сгенерированных равномерным распределением. Перед использованием этих данных была проведена проверка нейросетевого алгоритма на известной аналитической гладкой функции с одним известным минимумом в начале координат. По итогам проверки было получено, что нейронная сеть справляется с приближением истинного минимума лучше, чем базовый стандартный метод определения минимума, как лучшее сочетание параметров из базового равномерного распределения.

Первые расчёты с модельными данными были осуществлены на основе двух параметров: максимальной скорости горизонтальной фильтрации и безразмерной характеристики уровня грунтовых вод. Данные для обучения нейронной сети предварительно были нормированы в диапазоне  $[-1, +1]$ . К данным был добавлен нормально распределенный шум для повышения обобщающей способности нейронной сети. Результаты расчётов в пространстве двух параметров показали хороший результат: минимум аппроксимированной нейросетью функции RMSE был найден методом градиентного спуска. В настоящее время производятся численные эксперименты по оптимизации в модели деятельного слоя суши >2 параметров.

*Работа выполнена при частичной поддержке междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Nathaniel W Chaney et al. "Deriving global parameter estimates for the Noah land surface model using FLUXNET and machine learning". In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121.22 (Nov. 2016)
2. Katherine Dagon et al. "A machine learning approach to emulation and biophysical parameter estimation with the Community Land Model, version 5". In: *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography* 6.2 (Dec. 2020)
3. Diederik P. Kingma and Jimmy Ba. Adam: A Method for Stochastic Optimization. 2017. arXiv:1412.6980 [cs.LG].
4. Diganta Misra. "Mish: A Self Regularized Non-Monotonic Activation Function". In: arXiv:1908.08681[cs, stat] (Aug. 13, 2020). arXiv: 1908.08681. url: <http://arxiv.org/abs/1908.08681>

# Calibration of river runoff in the INM RAS-MSU land surface model using artificial neural networks

Chernyshev R.<sup>1,2</sup>, Krinitskiy M.<sup>1,3</sup>, Stepanenko V.<sup>1,2,4</sup>, Medvedev A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

E-mail: [ruscherol@gmail.com](mailto:ruscherol@gmail.com)

Applications of artificial intelligence (AI) rapidly develop in climate science. One of the most effective AI models are artificial neural networks (NN). NN models are mostly constructed in modes: physical-ly-informed neural networks, where AI complements the physical model, and data-driven neural networks, where the NN coefficients are optimized using factual data only.

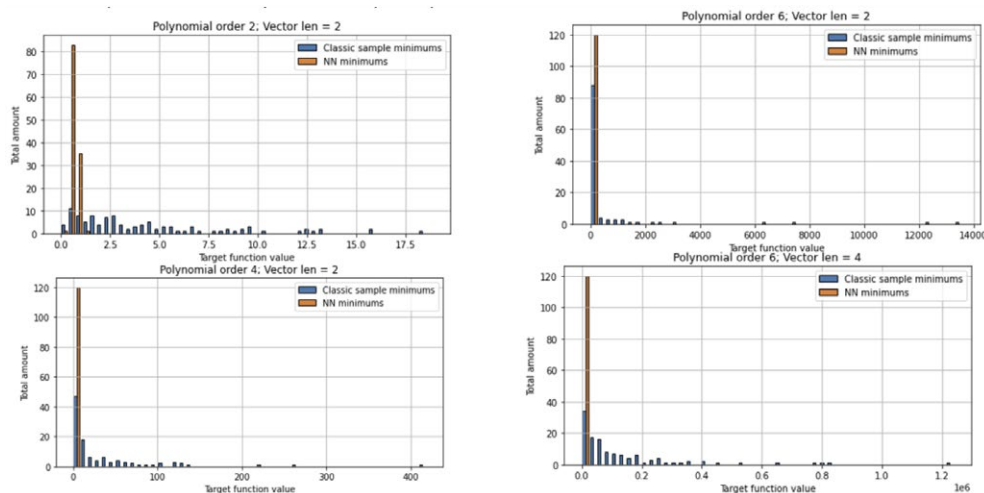
Earth system model is a system with complex interaction links inside, sophisticated parametrizations with dozens of adjustable parameters. Many of these parameters are well constrained, the others are loosely defined. For the latter, optimization techniques are an appropriate tool to improve the model performance metrics. NN may be used as an optimization method. Advantages of using NN is ability to use parallel computations for data, unlike most of other methods, and NN can well approximate complex surfaces based on data from limited set of points on the surface [1][2]. In this work, we present the results of calibrating the INM RAS-MSU land surface model to better reproduce the river runoff.

Our experiment is with neural network approximate RMSE function of modeled river runoff depended on several parameters: minimum and maximum horizontal filtration speed (DMIN, DMAX), relative soil wetness at which the fast horizontal drainage begins (WSDG), soil ice content blocking the gravitational infiltration (WIINF), the thickness of top soil defining the surface runoff (HR), slope angle of the river valley (beta0). These parameters all are constant on the whole modeling cycle and are given before model start.

A unidirectional neural network of 6 layers with Mish activation function [4], dropout and batch normalization, optimized by Adam optimizer [3] using the MSE quality metric, is developed. Using the neural network, the root mean square error (RMSE) of river mouth runoff calculations by the INM RAS-MSU model as a function of model scalar constants is recovered from a small data set. Further, the minimum of the restored function is found.

Further experiments were carried out with the remaining four parameters.

The complexity of the problem is that due to time-consuming numerical experiments with the land surface model, creating a large sample of data for training the neural network would take an unreasonably long time. Therefore, before training the neural network with the INM RAS-MSU model, 100 experiments were performed with the values of the calibrated parameters generated by the uniform distribution.



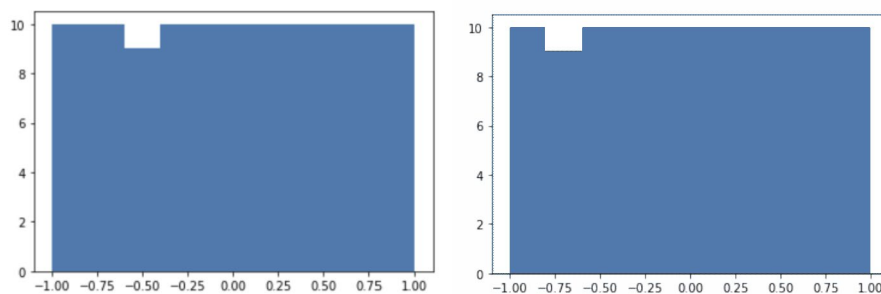
**Figure 1.**

The frequency of different minimum target function values computed by the base method and neural network during statistical experiments. The neural network's minimum was found with the Monte-Carlo method. Y-axis: number of experiments, x-axis: value of minimum found. Upper left: Polynomial function order 2 of 2 arguments; Upper right: Polynomial function order 6 of 2 arguments; Lower left: Polynomial function order 4 of 2 arguments; Lower right: Polynomial function order 6 of 2 arguments.

Also, we tested our neural network on even polynomial function with known in advance position of the minimum in origin. We found the minimum of the approximated RMSE function using the Monte-Carlo method. For this validation we identified 120 distinct neural networks, trained each on their own sample. As a result, on Figure 1 we can conclude that neural network works better than base method (where the best combination of parameters is chosen from the basic uniform distribution) at least on the analytical function with known position minimum.

For the experiments on real data we used Severnaya Dvina river's runoff measurements in mouth and computed the INM RAS-MSU model's RMSE of this variable. We used land surface model parameters as predictor data and RMSE values as target data. As we have small amount of train data (100 pairs "predictors-RMSE"), we decided to make validation of the NN on data interpolated between train parameters. Validation set doesn't take part on training and is only needed to control training process.

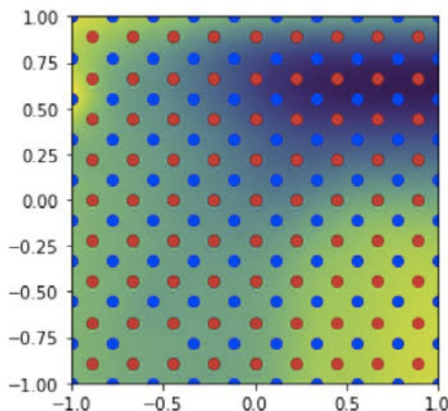
For the first step neural network was identified for two predicting parameters (DMIN and WSDG), which has previously demonstrated the largest impact on the land surface model runoff. On Figure 2, the initial distribution of parameters is presented. For the best performance and normalized both parameters to fit in [-1, 1] interval and assumed uniform distribution for WSDG and  $\log_{10}(\text{DMIN})$ , as the latter varies over orders of magnitude. Also, normal distributed noise was added to predictor data and predictor's target data. This data augmentation can increase generalizing of the model.



**Figure 2.** Initial distribution of neural network normalized arguments WSDG (left) and  $\log_{10}(\text{DMIN})$  (right).

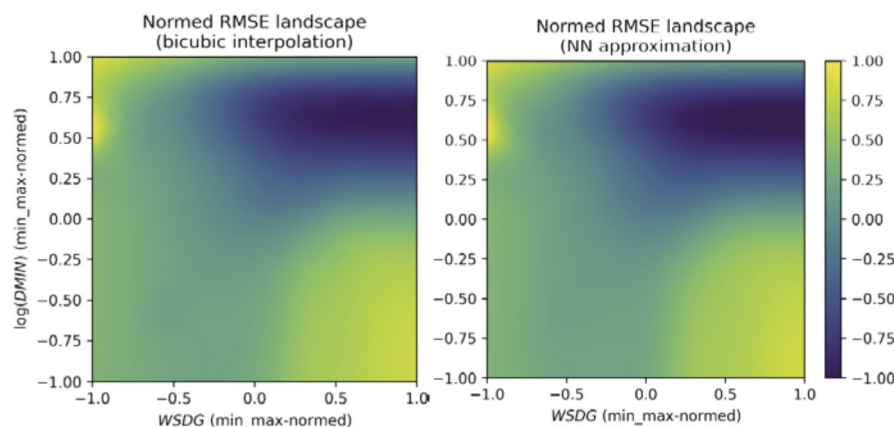
On y-axis, the total number, and on x-axis the value of parameters are given.

On Figure 3, training and validation data distribution on 2D surface with interpolated colored RMSE surface are presented.

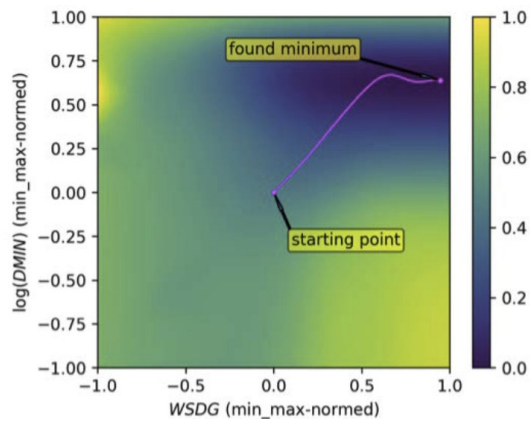


**Figure 3.** Location of training (blue) and validation (red) data in the space of predictors (pairwise distribution). Y-axis:  $\log_{10}(\text{DMIN})$ , y-axis: WSDG. Colorscale: cubic interpolated RMSE function value.

Results of the neural network compared with cubic interpolation of RMSE are presented on figure 4. As seen on figure, neural network demonstrates a very good quality of approximation.



**Figure 4.** Comparison of cubic interpolation's and neural network's approximation of INM RAS-MSU model RMSE. Y-axis:  $\log_{10}(\text{DMIN})$ , y-axis: WSDG. Colorscale: RMSE as function of model parameters DMIN and WSDG.



Minimum of the RMSE function approximated by neural network has been calculated using gradient descent method. From random starting point each step gradient descent approaches the minimum (Figure 5).

**Figure 5.** The route of seeking the RMSE minimum basing on the neural network approximation of the land surface model RMSE. Y-axis:  $\log_{10}$  (DMIN), y-axis: WSDG. Colorscale: RMSE of the INM RAS-MSU land surface model as function of two parameters, approximated by the neural network.

The work is continued in direction of scaling the presented solution to larger number of parameter sets. In conclusion is important to notice that neural network solution has comparable quality with cubic interpolation on current step.

*This work was partially supported by the interdisciplinary scientific and educational school "Brain, Cognitive Systems, Artificial Intelligence" at Moscow University.*

#### REFERENCES:

1. Nathaniel W Chaney et al. "Deriving global parameter estimates for the Noah land surface model using FLUXNET and machine learning". In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121.22 (Nov. 2016)
2. Katherine Dagon et al. "A machine learning approach to emulation and biophysical parameter estimation with the Community Land Model, version 5". In: *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography* 6.2 (Dec. 2020)
3. Diederik P. Kingma and Jimmy Ba. *Adam: A Method for Stochastic Optimization*. 2017. *arXiv:1412.6980 [cs.LG]*.
4. Diganta Misra. "Mish: A Self Regularized Non-Monotonic Activation Function". In: *arXiv:1908.08681 [cs, stat]* (Aug. 13, 2020). *arXiv: 1908.08681*. url: <http://arxiv.org/abs/1908.08681>

## Sampling methods for dissolved methane in Arctic lakes

**Shornikova A.V., Fedorova I.V.**

St Petersburg University, Russia  
E-mail: [anna.shornikova99@mail.ru](mailto:anna.shornikova99@mail.ru)

According to Roshydromet data, over the past thirty years (1990-2019), the overall annual average temperature increase in the North Polar Area was about 2.43 °C (or 0.81 °C over ten years) (Feature Report..., 2020). Similar data were obtained by an international team of researchers, where the resulting temperature increase in the Arctic over the last fifty years was 2-3 °C, compared to an overall average increase of 0.75 °C (Post et al., 2019).

One important indicator and accelerating factor of warming in the Arctic is the thawing of permafrost. It covers about 65% of Russia's territory, accounting for about 30% of the total permafrost area in the world. Thawing permafrost releases greenhouse gases, particularly carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>), which have accumulated in frozen organic matter (Global Climate..., 2020). According to the International Energy Agency (IEA), global methane emissions are estimated at 570 million tonnes (795 bcm), including about 40% from natural sources and 60% from anthropogenic sources (McGlade et al., 2020). Taking these data into account, the share of thermokarst lake gas is 3.3-8.5% of the total emission, or 8.25-21.25% of the emission from natural sources (Bogoyavlensky, Sizov et al., 2020).

There are several ways in which methane forms in lakes - natural and anthropogenic. Natural ones include thermokarst (melting of underground ice), pockmarks (powerful gas releases), and frost bumps (high-pressure areas of the Earth's surface). Anthropogenic includes methane emissions associated with anthropogenic gas leaks.

Based on the above, different methods of methane sampling are distinguished: from bottom sediments (Didenkulov et al., 2011; RD 52.24.511-2013; Methodology of determination..., KRC RAS 2021), dissolved in



water (Bussmann et al., 2021), during emission from water surface (Mahov, 1997; Glagolev et al., 2010; Ivakhov et al., 2020).

It is assumed that 'boiling' in the Arctic zone is the main natural emission pathway of thermokarst lakes with an expected emission of  $4.1 \pm 2.2$  Tg of methane per year, which is 17-26% of the  $24.2 \pm 1.5$  Tg of methane per year emitted from all northern lakes (Zandt et al., 2020). The contribution of gas hydrate deposits and frost bumps to natural methane degassing has not been assessed. Anthropogenic gas emissions from wellheads are difficult to estimate and are not currently accounted for in any gas emission inventories. However, rough estimates for Pennsylvania (Kanga et al, 2014) have shown that they are as high as 4-7% of total anthropogenic methane emissions.

## Методы отбора проб метана в арктических озерах

Шорникова А.В., Федорова И.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия  
E-mail: [anna.shornikova99@mail.ru](mailto:anna.shornikova99@mail.ru)

**В** последние годы в мире стали чаще сталкиваются с проявлениями изменения климата. Особенно интенсивно процесс потепления проявляется в Арктической зоне, которую Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) относит к одному из наиболее уязвимых в отношении изменений климата региону. По данным Росгидромета, в течение последних тридцати лет (1990–2019) в целом в Северной полярной области рост среднегодовой температуры составил около  $2,43$  °C (или  $0,81$  °C за десять лет) (Доклад об особенностях..., 2020). Сходные данные были получены международной группой исследователей, где в результате температура в Арктике за последние пятьдесят лет повысилась на  $2-3$  °C по сравнению с общим средним увеличением на  $0,75$  °C (Post et al, 2019).

Одним из важных индикаторов и фактором ускорения потепления в Арктике является таяние многолетней мерзлоты. Она покрывает примерно 65% территории России, и это составляет около 30% от общей площади зоны многолетней мерзлоты в мире. В процессе таяния многолетней мерзлоты высвобождаются накопившиеся в замерзшей органике парниковые газы, в частности углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и метан ( $\text{CH}_4$ ) (Глобальная климатическая..., 2020). Согласно данным Международного энергетического агентства IEA (International Energy Agency) глобальная эмиссия метана оценивается в 570 млн. тонн (795 млрд. м), включая около 40% из природных источников и 60% из антропогенных (McGlade et al., 2020). С учетом этих данных доля газа термокарстовых озер составляет 3,3-8,5% общей эмиссии, или 8,25-21,25% эмиссии из природных источников (Богоявленский, Сизов и др., 2020).

На несколько детально изученных площадях по данным сейсморазведки и бурения доказано существование многочисленных глубинных разломов и зон дробления (месторождения Новопортовское, Нейтинское, Бованенковское и др.) (Скоробогатов, 2003). В центральной части Ямала выделяется группа из крупных термокарстовых озер, включая Нейто-Малто, Ямбуто, Ясавэйто, Яррото 1-е, Яррото 2-е. Глубины этих озер по данным эхолокации в основном небольшие (до 5-20 м), однако выделяются локальные (горизонтальные размеры до 100-1000 м) «воронки» – углубления до 50-63,7 м с максимальным значением в северной части озера Ямбуто. Их «происхождение пока не изучено», хотя предполагается, что они «связаны с вытаиванием ледяных образований» (т. е. термокарст) (Эдельштейн и др., 2017).

Размеры выявленных «воронки» и исследования озер Ямала по данным дистанционного зондирования Земли позволяют предположить, что часть из них является кратерами мощных выбросов газа – покмарками (округлые углубления в рельефе дна) (Judd et al, 2007; Богоявленский, 2014; Богоявленский, Сизов и др., 2018; Bogoyavlensky et al, 2020). Впервые подобные кратеры – покмарки в Арктике были выявлены и исследованы И. Л. Кузиным и Н. М. Кругликовым в 1971-1972 гг. в озерах в районе Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения и охарактеризованы как «воронки взрыва – газового прорыва» (Кругликов и Кузин, 1973; Кузин, 1992).

К природным источникам выхода метана также относят бугры пучения (высокольдистые участки поверхности Земли). В зоне развития многолетнемерзлых пород широко распространена трансформация криолитосферы и природных ландшафтов в виде растущих или деградирующих бугров морозного (криогенного) пучения и термокарстовых впадин (часто водоемов – озер), образующихся на просевших за счет протаивания пластовых льдов (Богоявленский, Сизов и др., 2019). Многолетние бугры пучения с ледяным ядром формируются при промерзании поступающих через талики (участок незамерзающей породы среди вечной мерзлоты) артезианских вод (гидродинамический напор — открытая гидравлическая система) или промерзания талых высыхающих котловин бывших озер – хасырсеев (закрытая гидростатическая система) (Маскау, 1998).

Большинство экспертов признает, что активное природопользование (антропогенный фактор) вносит значительный вклад в происходящие климатические изменения и многочисленные катаклизмы (Сергиенко и др., 2012; Богоявленский, 2014; Лаверов и др., 2016; Jacob et al, 2016; Andreassen et al, 2017; Семенов и др., 2018;). Антропогенный фактор также выражается в возрастающей эмиссии парниковых газов, в первую очередь углекислого газа и метана. В 2014- 2017 гг. на севере Ямало-Ненецкого автономного округа и Красноярского края было выявлено около 10 крупных кратеров (воронок) выбросов газа. При этом некоторые из них расположены вблизи инфраструктуры Бованенковского нефтегазо-конденсатного месторождения. В частности, самый известный кратер С1 (индексация согласно ГИС «АМО») расположен в 30 км южнее этого месторождения и всего в 3,5 км к востоку от магистрального газопровода высокого давления «Бованенково – Ухта», а кратер С9 — в 1,6 км от железной дороги на Ямале «Обская — Карская».

А работе (Богоявленский, 2020) была установлена связь значительной концентрацией метана с техногенными утечками метана (месторождения Новопортовское, Бованенковское). Особенно велика эмиссия газа в старых районах добычи нефти, так как первоначально в XIX в. скважины бурились без обсадных колонн или за 100-150 лет имеющиеся колонны подверглись сильной коррозии. За счет межколонных перетоков (кольцевое пространство между обсадными колоннами, спущенными в скважину), возникающих из-за низкого качества строительства скважин, в верхней части разреза «над многими месторождениями сформировались крупные техногенные залежи, угрожающие экосистемам осваиваемых регионов и экономической безопасности страны» (Богоявленский, 2014; Богоявленский, 2020).

Исходя из выше сказанного, существует несколько способов отбора проб метана.

*Отбор проб растворенного метана в донных отложениях. Метод 1.* В работе И.Н. Диденкулова с соавторами (2011) рассматривается метод определения эмиссии метана из донных отсадков мелководных водоемов с помощью эхолокатора (Диденкулов и др., 2011). Для эхолокационной съемки в работе используются портативные эхолоты промышленного производства «Hydrobox» (фирма «SyQwest Inc.», США) и «Humminbird 798 с combi» (фирма «Humminbird», США). Оба эхолота подключены к системе GPS для определения расстояния, времени и местоположения и имели два вертикальных канала зондирования, работающих на разных частотах. Оба эхолота позволяют регистрировать эхосигналы в цифровой форме, а затем воспроизводить их. На эхограммах пузырьки метана проявляются в виде хорошо различимых визуально наклонных траекторий. Этот признак позволяет отличить их от рыб, которые оставляют на эхограмме характерные дугообразные отметки.

*Метод 2.* Методика, предложенная Федеральным исследовательским центром «Карельский научный центр Российской академии наук» (КарНЦ РАН), помогает определить содержание метана в донных отложениях и в надилловой воде. Отбор проб донных производится из гравитационной трубки или при помощи стратометра. Предварительно в ней делаются отверстия с шагом 10 см, которые герметично заклеиваются монтажной лентой. При отборе осадка из трубки пробоотборника ленту, закрывающую отверстия, аккуратно надрезают, осадок (1 мл для глинистых фракций, 2 мл для песчаных) отбирается шприцами с обрезанными носиками в виалы объемом 30 мл, заполненные дистиллированной водой, оставляя 5 см<sup>3</sup> воздушного пространства, и добавляется в них консервант (2-3 капли 50% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Шприц, которым отбирают пробу, необходимо обратно вставить в отверстие, используя его как заглушку (Методика определения..., 2021).

*Отбор проб растворенного метана в озерах. Метод 3.* В работе И. Буссмана (Bussmann et al, 2021) описывается отбор проб метана в открытой воде в зимнее и летнее время года. Зимой пробы воды на границе лед–вода отбирали с помощью пробоотборника объемом 1 л (Uwitec, Австрия) и переносили в бутылки Nalgene емкостью 0,5 л. В полевом лагере воду шприцем на 60 мл переливали в стеклянные бутылки, закрывали бутиловыми пробками и обжимными кольцами, отравляли 0,2 мл 25% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, и хранили в перевернутом виде на 4°C. Летом пробы воды переносили непосредственно из пробоотборника в стеклянные бутылки и далее обрабатывали, как описано выше. Зимой 2017 г. из-за проблем с замерзанием 40 мл пробы воды встряхивали в течение 2 мин с 20 мл азота в шприце на 60 мл. Затем это свободное пространство переносили в стеклянные бутылки, наполненные насыщенным раствором NaCl. Сравнительные измерения не показали существенной разницы между этими двумя стратегиями отбора проб. Концентрации метана в свободном пространстве анализировали в домашней лаборатории с помощью газового хроматографа (GC 2014, Shimadzu), оснащенного пламенно-ионизационным детектором и колонкой ShinCarbon (Restek, США). Для калибровки использовали газовые стандарты (Air Liquide) с концентрацией метана 10 и 100 ppm. Точность калибровочной линии была  $r^2 = 0.99$ , а воспроизводимость образцов была < 5%.

*Отбор проб эмиссии метана в озерах. Метод 4.* Метод, описанный в работе В.М. Ивахова с соавторами (2020) помимо отбора проб метана, позволяет провести отбор проб диоксида углерода. Измерения потоков CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> проводятся с помощью камеры, собранной из поликарбоната и пенополистирола, размером 0,5×0,5×0,26 м. В камере установлен вентилятор для равномерного перемешивания воздуха внутри камеры. Пробы отбираются с помощью пластикового шприца. Объем одной пробы составляет 250 мл. Пробы перекачиваются в герметично закрытые резиновой септой стеклянные сосуды емкостью

50 мл. Объем пробы в шприце обеспечивает пятикратный продув сосуда. Пробы воздуха из камеры отбираются, как правило, с десятиминутным интервалом спустя 10 минут после начала экспозиции (Ивахов, 2020). В зоне осушки камера ставится на поверхность водоема. Граница камеры и воды, служит естественным гидрозатвором. Наблюдения с помощью плавающих камер проводятся в 1-10 м от берега на глубинах до 1 м. Чтобы камеры не сносило ветром, они прилепляются к натянутому шнуру или лодке (которая закрепляется на шнуре). Определение концентрации метана и диоксида углерода в пробах воздуха проводятся на газовом хроматографе «Кристалл 5000» в соответствии с РД 52.04.875-2019 (2020).

Предполагается, что «вскипание» в Арктической зоне является основным естественным путем выбросов термокарстовых озер с ожидаемым выбросом  $4,1 \pm 2,2$  Тг метана в год, что составляет 17–26% от  $24,2 \pm 1,5$  Тг метана в год, который выбрасывается из всех северных озер (Zandt et al., 2020). Вклад газогидратных залежей и бугров пучения в естественную дегазацию метана не оценен. Антропогенные выбросы в атмосферу газа с устьев скважин трудно оценить, и в настоящее время они не учитываются ни в каких кадастрах выбросов газа. Однако примерные оценки для штата Пенсильвания (Kanga et al., 2014) показали, что они достигают 4-7% общей эмиссии антропогенного метана.

Выделяют различные методики отбора проб метана: из донных отложений (Диденкулов и др., 2011; РД 52.24.511-2013; Методика определения..., КарНЦ РАН 2021), растворенного в воде (Bussmann et al., 2021), при эмиссии с поверхности водоема (Махов, 1997; Глаголев и др., 2010; Ивахов и др., 2020).

## Approximation of the soil temperature by piecewise-continuous function

Lapina L.J.<sup>1</sup>, Kaverin D.A.<sup>2</sup>, Pastuhov A.V.<sup>2</sup>, Chebanova M.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Biology UB RAS, Syktyvkar, Russia

E-mail: [l.e.lapina@yandex.ru](mailto:l.e.lapina@yandex.ru)

Soil temperature measurements obtained at the site in the Bolshezemelskaya tundra with different landscape conditions are considered. One method of analytical description is considered: with a breakdown into two periods - winter and summer (two piecemeal-continuous functions with different vibration amplitudes for each period separately). The amplitude of the oscillations for each method and period is calculated by least squares. It has been established that in winter and summer periods the amplitude of fluctuations is significantly different for all the considered landscape conditions. Disclosed is a method of describing the temperature regime of soils taking into account this division, which is compared with average values for each period separately. Comparison of calculated and observed values for winter period shows almost complete coincidence. Accordingly, this method of description can be used to recover data over a small missed time interval of the order of a month, as confirmed by the results of calculations for the summer period. The smallest difference between winter and summer oscillation amplitudes is noted for peat soils.

## Аппроксимация температуры почв кусочно-непрерывными функциями

Лапина Л.Э.<sup>1</sup>, Каверин Д.А.<sup>2</sup>, Пастухов А.В.<sup>2</sup>, Чебанова М.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт биологии УрО РАН, Сыктывкар, Россия

E-mail: [l.e.lapina@yandex.ru](mailto:l.e.lapina@yandex.ru)

При исследовании температурных режимов почв часто возникает необходимость аппроксимации данных в случае перерывов мониторинговых наблюдений, обусловленных различными причинами. Данные измерений температуры почв часто аппроксимируются за период колебаний (год или сутки) одной гармонической функцией с постоянной амплитудой за выбранный период наблюдений. Аппроксимация на поверхности почвы используется для задания верхнего граничного условия для решения уравнения теплопроводности [1]. Но данные измерений температуры почв показывают, что такое задание функции на поверхности недостаточно точно описывает температурный режим почв. Факторы, существенно влияющие на температурный режим почвогрунтов различаются в зимний и летний период, поэтому эти различия необходимо учитывать путем описания кусочно-непрерывными

функциями с различными амплитудами колебаний в отдельности. Цель работы – предложить этот способ описания температурного режима почвогрунтов и показать его адекватность на примере реальных измерений.

Полевые работы велись с 20 августа 2014 г. по 20 июля 2015 г. на ключевом участке, расположенном в Ненецком автономном округе на территории Северо-Хоседаюсского нефтяного месторождения. Ключевой участок исследований локализован в пределах урочища Изьямыльк в заболоченной долине р. Изьямылькшор (левый приток р. Колва). Участок исследований находится в южной части типичной тундры, в 55 км к северо-востоку от метеостанции Хорей-Вер. Среднегодовая температура по данным метеостанции в 2014 г. составила  $-4,5$  °С, сумма атмосферных осадков  $-361$  мм. На участке исследований зимняя дорога пересекает ландшафты с мохово-кустарничковыми и крупнокустарничковыми тундрами на суглинистых и торфяных мерзлотных почвах. Зимник пересекает тундровые геосистемы на песчаных (1, 2-й участки) и суглинистых почвах (4, 5-й участки) и плоскобугристое болото на торфяных мерзлотных почвах (3-ий участок). Более подробное описание участка исследований опубликовано в работе [2]. Эти же данные были использованы для расчета пампинг эффекта, обусловленного колебаниями температуры и опубликованными в работе [3].

Полученные данные измерений на 5 профилях, включающих два типа участков (антропогенно-нарушенный и фоновый (ненарушенный)) аппроксимировались функцией вида:

$$y = A \sin(\omega t + \theta) + B, (1)$$

где  $A$  – амплитуда годовых колебаний (°С),  $\omega$  – частота годовых колебаний (рад час<sup>-1</sup>),  $\varphi$  – фаза (рад),  $B$  – среднегодовая температура (°С).

Расчеты проводились следующим образом: при фиксированном  $\varphi$  параметры  $A$  и  $B$  вычислялись методом наименьших квадратов с использованием метода Крамера, при этом каждый раз считалась среднеквадратическая ошибка аппроксимации. Для поиска оптимального значения параметра  $\varphi$  использовали 1500 вариантов с разными равномерно распределенными значениями. В качестве результата расчета брали значения параметров варианта с наименьшей ошибкой.

Данные измерений были разбиты на два периода: зимний (с 15 октября 2014 г. по 14 мая 2015 г.) и летний (остальной период календарного года). Несмотря на то, что мониторинговые измерения температуры охватывали всего 11 месяцев, тем не менее, удалось восстановить годовой ход температуры. Для оценки ошибки аппроксимации использовали среднее значение температуры за период как рассчитанное, так и вычисленное по данным наблюдений.

Добавим к рассмотрению параметр, описывающий среднепериодное значение температуры, под которым понимается среднее значение функции на некотором интервале, которое определяется как значение определенного интеграла от аналитического выражения, деленное на интервал интегрирования (в случае дискретного набора корректных измерений с равными промежутками времени равен средней арифметической). При разделении полученных температурных массивов данных на два периода физического смысла переменная  $B$  в формуле (1) не имеет, но используется для расчета среднего значения за период (зимний и летний). Введем обозначение:  $B_z$  – среднее значение функции для зимнего периода,  $B_l$  – для летнего. Для зимнего периода параметр  $\omega t$  меняется от 0 до  $7/6\pi$ , для летнего от 0 до  $5/6\pi$ .

Среднепериодные значения температур, исходя из аналитического представления температуры в виде (1) и с учетом времени периода, вычисляются следующим образом:

а) для зимнего периода:

$$T_{\text{сред,з}} = B_z + \frac{6A}{7\pi} \left( \cos(\varphi) - \cos\left(\varphi + \frac{7\pi}{6}\right) \right); (2)$$

б) для летнего периода

$$T_{\text{сред,л}} = B_l + \frac{6A}{5\pi} \left( \cos(\varphi) - \cos\left(\varphi + \frac{5\pi}{6}\right) \right), (3)$$

где  $A$  и  $\varphi$  в формулах (2) и (3) соответствуют разным значениям в различные периоды.

Поскольку в летних наблюдениях не хватает одного месяца измерений (от середины июля до середины августа), то рассчитанное по летнему периоду среднее значение выше среднеарифметического значения летних наблюдений, но практическое совпадение рассчитанных и мониторинговых данных в зимний период позволяет предположить, что разница в значениях среднепериодных значений по данным наблюдений и по аналитическому выражению (6) обусловлено только отсутствием данных. Для наглядности представим в виде рисунков 1-2 полученные результаты.

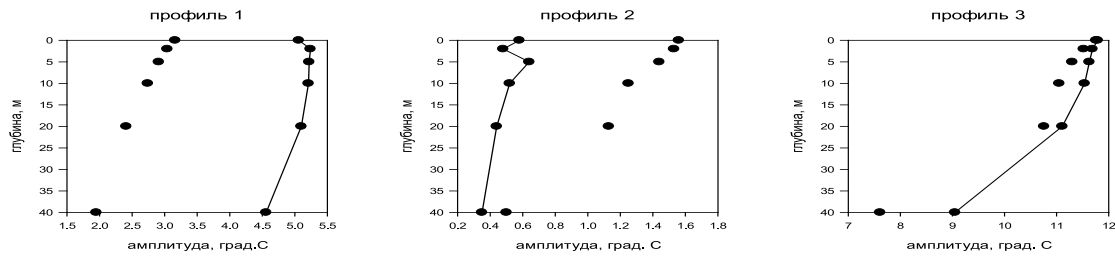
На рис.1 показаны амплитуды колебаний в зимний период по профилям 1–5. В зависимости от ландшафтных условий и типа почвы на естественных участках амплитуда колебаний по всей глубине измерений (от 0 до 40 см) больше (1-й, 3-й, 4-й профили) или меньше (2-й, 5-й) по сравнению с антропогенно-нарушенными. На рис.2 показано, что в летний период на всех фоновых участках и по всей глубине амплитуда колебаний температуры почвы выше по сравнению с антропогенно-нарушенными, быстрее всех затухают колебания на третьем профиле, а медленнее всех — на профиле 5.



**Выводы:**

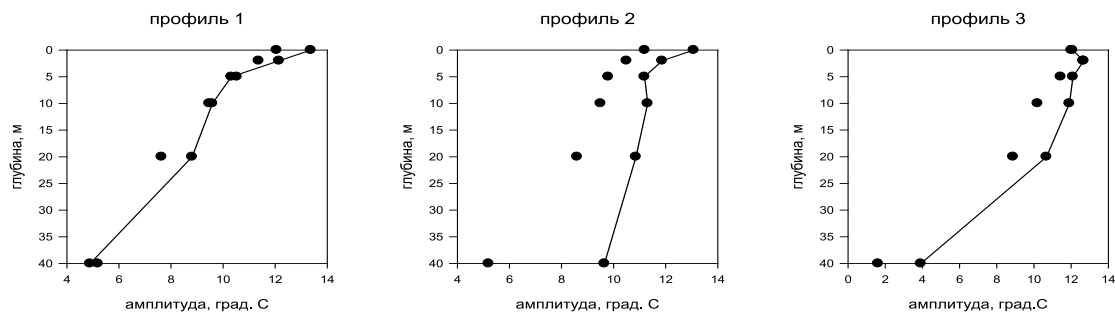
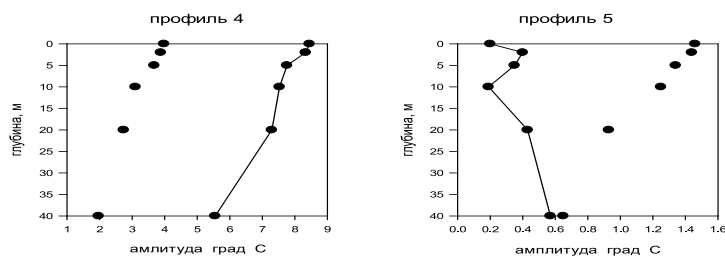
Предложенный подход к анализу данных более корректно описывает годовой ход температуры почвогрунтов по сравнению с описанием с помощью лишь одного гармонического колебания с постоянной амплитудой колебаний за год. Такой подход позволяет более точно задавать верхнее граничное условие при решении задач теплопереноса в почвогрунтах. Также такое представление данных с разделением периодов позволяет более точно описать годовой ход температуры и при отсутствии небольшого числа данных восстановить его.

Выявлены существенные различия в амплитудах колебаний для зимнего и летнего периода для данного географического объекта. Наименьшая разница между амплитудами в разные периоды отмечается для торфяных почв.



● фоновый участок  
● антропогенно-нарушенный участок

**Рис. 1.**  
Амплитуда зимних колебаний температуры на фоновых и антропогенно-нарушенных участках на профилях 1 – 5.



● фоновый участок  
● антропогенно-нарушенный участок

**Рис. 2.**  
Амплитуда летних колебаний температуры на фоновых и антропогенно-нарушенных участках на профилях 1 – 5.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Зырянов В.Н., Хублярян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложения в геофизике // Доклады Академии наук, 2006, т.408, N4, с.535-538
2. Каверин Д.А., Лапина Л.Э., Пастухов А.В., Новаковский А.Б. Влияние трансформации растительного и почвенного покровов на температуру почв при эксплуатации зимней дороги в Большеземельской тундре // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, N1, с.17-27.
3. Лапина Л.Э., Каверин Д.А., Пастухов А.В. Оценка пампинг-эффекта в мерзлотных почвах типичной тундры Европейского северо-востока России // Экологический мониторинг и моделирования экосистем, 2021, т.32, N3-4, с.100-111.

# Geo-information cartographic analysis of forest landscape dynamics in the mountainous framing of the Kurai depression (Southeast Altai)

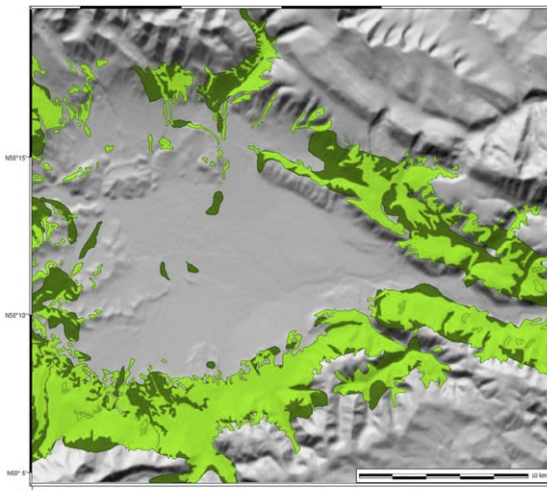
Karabatov D.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [vogak88@gmail.com](mailto:vogak88@gmail.com)

Forest is one of the main vegetation types on the globe, a combination of woody, shrubby and herbaceous plants. It plays an important role in the formation of the surface layer of the atmosphere and its regime, regulates subsurface and surface runoff, and protects the soil from damaging fluvial and aeolian processes. Today, the scale of human consumption of forest resources significantly exceeds their natural reproduction, which makes the monitoring of spatial changes in the forest fund especially relevant.

The dynamics of forest landscapes is primarily a change in the quantitative and qualitative characteristics of the forest fund, occurring in time and space as a result of forest growth and development, as well as under the influence of various natural and anthropogenic impacts. In the process of dynamics, first of all, the ratio of covered and uncovered areas changes. Trends in the dynamics of forest geosystems can be both positive and negative. Positive trends include an increase in the area covered by forest vegetation and negative trends include a decrease in the area covered by forest vegetation.

The aim of this work was to investigate the dynamics of forest landscapes by creating a mapping framework using retrospective and contemporary mapping materials. Cartographic visualization of changes in the area of land covered by forest vegetation was carried out using the territory of the mountainous framing of the Kurai intermountain trough as an example.



**Fig. 1.**

Dynamics of forest landscapes of the mountain frame of the Kurai intermountain depression. Dark green indicates the area of forests in 1910-1911, light green - in 2000.

Microdem/Terrabase V16.00 was used as the main software, and Global Mapper V14 was used as an additional software for cartographic analysis of forest area changes over a century. The material for the retrospective analysis of the earliest period was sheets X-6 (1911) and X-7 (1910) of medium-scale military topographic map "three versta" (one English inch on it is equal to three Russian versts on the ground, i.e. 1 centimeter on the map equals 1 kilometre 260 meters on the ground). Experts consider maps

of this type to be an authoritative source for analyzing changes in natural and anthropogenic landscapes. GGC topographic map sheets at a scale of 1:200000 were used as a time point.

All available cartographic materials were reduced to a single coordinate system (WGS84) and converted to a universal Mercator projection (45 UTM zone). The areas of forested areas were calculated taking into account 3D terrain features, based on Aster GDEM third generation matrices. Forest boundary mapping was carried out with Microdem/TerraBase tools in Stream mode on a raster substrate with a situationally selectable scaling mode.

The forest areas mapped on the modern maps were digitised according to the contours of the characteristic colour tone set for forest mapping. On the 1911 maps, by the boundaries of the groups of off-scale symbols denoting forest vegetation. In order to identify the dynamics of the area of forest landscapes in Microdem/Terra-base GIS, overlay of vector layers was carried out and the resulting maps were compared, followed by determining the direction of the changes that occurred. The cartometric work allowed obtaining data on the areas of forest landscapes in the Kurai Trough for the time periods 1910-1911 and 2000.

While at the beginning of the last century, forest landscapes occupied 329.61 sq km of the study area, by the beginning of the 21st century, they are reduced to 274.38 sq km. This significant reduction in forest area can be attributed to deforestation and death during fires.

## REFERENCES:

1. Varfolomeev A. F., Kovalenko A. K., Manukhov V. F. GIS for the assessment of natural and anthropogenic factors in territorial nature management // *InterCarto 9: GIS for sustainable development of the territory: materials of the International Conference – Novorossiysk; Sevastopol, 2003.* – pp. 173-179
2. eslenok K. S. The possibilities of geoinformation systems in the management of innovations, resources and environmental management // *Vestn. Kazakh. University of Economics, Finance and International Relations. trade.* - 2014. – No. 3. – pp. 135-138.

# Геоинформационно-картографический анализ динамики лесных ландшафтов горного обрамления Курайской впадины (юго-восточный Алтай)

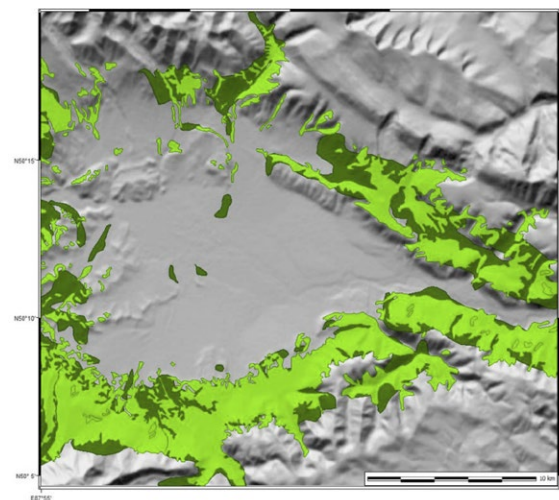
Карабатов Д.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: vogak88@gmail.com

Лес является одним из основных типов растительности земного шара, представляющий совокупность древесных, кустарниковых и травянистых растений. Лес выполняет важную роль в формировании приземного слоя атмосферы и его режима, регулирует подземный и поверхностный сток, предохраняет почву от деструктивных флювиальных и эоловых процессов. К настоящему времени, размеры потребления человеком лесных ресурсов значительно превышают его естественное воспроизводство, исходя из чего, особенно актуальным является вопрос мониторинга пространственных изменений лесного фонда.

Динамика лесных ландшафтов – это, в первую очередь, изменение количественных и качественных характеристик лесного фонда, происходящее во времени и пространстве в результате роста и развития леса, а также под влиянием различных природных и антропогенных воздействий. В процессе динамики, в первую очередь изменяется соотношение площадей лесопокрытых и свободных от лесной растительности земель. Тенденции динамики лесных геосистем могут быть как положительными, так и отрицательными. К положительным относят увеличение площадей земель, покрытых лесной растительностью, а к отрицательным - их сокращение.

Цель данной работы заключалась в изучении динамики лесных ландшафтов на основе создания картографической основы с использованием ретроспективных и актуальных картографических материалов. Картографическая визуализация изменений площади земель, занятых лесной растительностью, проведена на примере территории горного обрамления Курайской межгорной впадины.



**Рис. 1.**

Динамика лесных ландшафтов горного обрамления Курайской межгорной впадины. Темно-зеленым цветом обозначены площади лесов в 1910-1911 гг, светло-зеленым – в 2000 г.

Для выполнения картографического анализа изменений лесного фонда за вековой период в качестве основного программного обеспечения использовался Microdem/Terrabase V16.00, а в качестве дополнительного – Global Mapper V14. Материал для ретроспективного анализа самого раннего периода времени был представлен листами X-6 (1911 г.) и X-7 (1910 г.) среднемасштабной «трехверстной» военно-топографической карты (один английский дюйм на ней равен трем русским верстам на местности, т.е. 1 сантиметр на карте равен 1 километру 260 метрам на местности). По мнению специалистов, данный вид карт является авторитетным источником для анализа изменений естественных и антропогенных ландшафтов. В качестве конечного временного рубежа использованы листы топографической карты ГГЦ масштаба 1:200000.

Все имеющиеся картографические материалы были введены в единую систему координат (WGS84) и трансформированы в универсальную проекцию Меркатора (45 зона UTM). Площади лесных массивов рассчитывались с учетом 3D особенностей рельефа, на основе матриц Aster GDEM треть-

его поколения. Картирование границ лесных массивов производилось оцифровкой инструментами Microdem/TerraBase в режиме “Stream” по растровой подложке с ситуационно выбираемым режимом масштабирования.

Оцифровка лесных массивов, отображенных на современных картах осуществлялась по контурам характерного цветотона, установленного для отображения лесов. На картах 1911 года - по границам групп внесмасштабных условных знаков, обозначающих лесную растительность. С целью выявления динамики площади лесных ландшафтов в ГИС Microdem/Terrabase были выполнены оверлей векторных слоев и сравнение полученных карт с последующим выявлением направленности произошедших изменений. Проведение картометрических работ позволило получить данные о площадях лесных ландшафтов горного обрамления Курайской впадины для временных срезов 1910 - 1911 и 2000 гг.

В начале прошлого века лесные ландшафты занимали 329,61 кв.км изучаемой территории, к началу XXI века их площадь сократилась до 274,38 кв.км. (Рис 1). Столь значительное Уменьшение площади лесов может быть связано с их вырубкой и гибелью во время пожаров.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Варфоломеев А. Ф., Коваленко А. К., Манухов В. Ф. ГИС для оценки природных и антропогенных факторов при территориальном природопользовании // *ИнтерКарто 9: ГИС для устойчивого развития территории: материалы Междунар. конф. – Новороссийск; Севастополь, 2003. – С. 173–179*
2. Тесленок К. С. Возможности геоинформационных систем в управлении инновациями, ресурсами и природопользованием // *Вестн. Казах. ун-та экономики, финансов и междунар. торговли. – 2014. – № 3. – С. 135–138.*

## The influence of external parameters on the evapotranspiration in the INM RAS – MSU land surface model

Medvedev A.<sup>1,2</sup>, Stepanenko V.<sup>3,4,5</sup>, Bogomolov V.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>6</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [medvedev\\_ai@geogr.msu.ru](mailto:medvedev_ai@geogr.msu.ru)

One of the priority directions in the development of models of the land surface layer in general and the INM RAS – MSU model in particular is the improvement of the parameterization of hydrological processes, since they largely determine the predictability of the land-atmosphere system on a seasonal scale, and also significantly control the processes of the carbon cycle. Studies of the representativeness of the INM RAS – MSU model at the territory of Northern Eurasia have shown that, despite the successful reproduction of the temporal and spatial variability of river runoff and basin moisture reserves, its absolute errors are significant for the correct reproduction of the hydrological cycle. This work is devoted to the validation of the long-term average evapotranspiration in the INM RAS – MSU model. For validation, monthly estimates of total evapotranspiration from the catchment surface were calculated using the water balance equation for the period 2002-2012 for four medium-sized watersheds in the boreal forest zone of the European part of Russia. The calculation was carried out using data from ground-based weather stations on the amount of precipitation with the eliminated systematic errors of the precipitation gauges, data from hydrological stations on channel discharge, and GRACE satellite data on anomalies in basin moisture reserves. To assess the accuracy of the GRACE data on small spatial scales, the change in the anomalies of the basin moisture reserves was compared with the change in the moisture content in the snow cover, which demonstrated the presence of a correct signal in the data of the CNES/GRGS processing center. The noise was filtered using long-term averaging.

In this work, we analyze the sensitivity of the INM RAS – MSU model to changes in the values of two external parameters — cell averaging weights (within the framework of the mosaic approach) and the leaf area index (LAI). To assess the effect of adjusting the values of the parameters, numerical experiments were performed to calculate evapotranspiration using the INM RAS – MSU model, replacing the initial values of these parameters with alternative ones obtained from some representative observational data. For all watersheds,



the main impact on the evapotranspiration was in the change in LAI values, mainly due to an increase in the integral stomatal resistance. The effect of changes in areal averaging weights turned out to be small due to small differences in land cover maps within the watersheds under study. The results of the study indicate the need to revise the values of the external parameters of evapotranspiration in the INM RAS – MSU land surface model. To generalize the findings, it is necessary to refine the methodology for calculating evapotranspiration estimates and perform an error analysis, increase the sample of the studied watersheds and expand the range of analyzed geographical conditions.

*The work was supported by the scientific and educational interdisciplinary school of Moscow University "COS-MOS" (in terms of using satellite data), RSF grant 21-17-00254 (in terms of improving the parameterization of total evapotranspiration), RFBR grant 20-05-00773 (in terms of specification of the parameters of the underlying surface), and Agreement with the Ministry of Higher Education and Science No. 075-15-2019-1621 (in terms of statistical data processing).*

## Влияние внешних параметров на величину эвапотранспирации в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ

**Медведев А.И.<sup>1,2</sup>, Степаненко В.М.<sup>3,4,5</sup>, Богомолов В.Ю.<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометцентр России, Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>5</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>6</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: medvedev\_ai@geogr.msu.ru

**В** настоящем докладе рассматривается модель деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ, используемая в составе модели Земной системы ИВМ РАН [15] и модели атмосферы ПЛАВ [10]. Одним из приоритетных направлений развития моделей деятельного слоя суши в целом и модели ИВМ РАН – МГУ в частности является усовершенствование параметризаций гидрологических процессов, так как они в значительной степени определяют предсказуемость системы суша – атмосфера на сезонном масштабе, а также существенно контролируют процессы углеродного цикла [8]. Исследования репрезентативности модели ИВМ РАН – МГУ на территории Северной Евразии показали, что, несмотря на успешное воспроизведение характера временной и пространственной изменчивости речного стока [12] и бассейновых влагозапасов, ее абсолютные ошибки представляются значительными для корректного воспроизведения гидрологического цикла. Настоящая работа посвящена валидации величины среднесуточной эвапотранспирации в модели ИВМ РАН – МГУ.

Для валидации были использованы оценки суммарной эвапотранспирации с поверхности водосбора  $E$ , м, полученные с помощью уравнения водного баланса:

$$E = P - Y - \Delta W \quad (1)$$

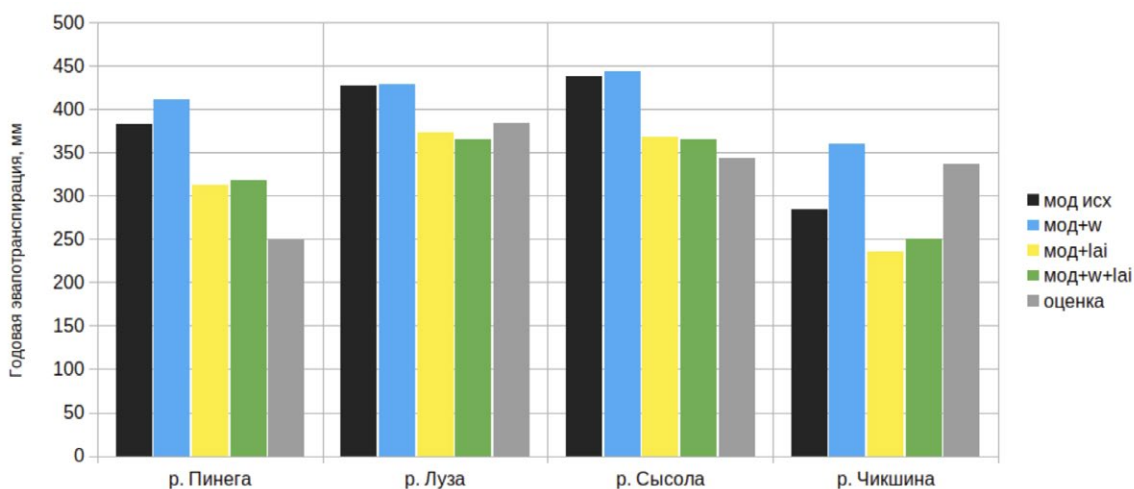
где  $P$  – слой осадков, м;  $Y$  – слой поверхностного и подземного стока, м;  $\Delta W$  – изменение бассейновых влагозапасов, м. Расчет оценок выполнялся для средних по площади водосборов бореальной лесной зоны Европейской части России. Такие водосборы являются достаточно маленькими для возможности использования данных одной метеостанции для оценки слоя осадков на всей его площади и достаточно большими для возможности расчета стока по климатическим закономерностям [5]. Критериями отбора водосборов, обуславливающими корректность сопоставления оценок эвапотранспирации с результатами моделирования, являлись наличие данных, отсутствие крупных водных объектов, отсутствие активного сельского и водного хозяйства, простые геологические условия, близкое соответствие конфигурации водосбора в реальности и на сетке модели. Дополнительным критерием, обуславливающим валидационную репрезентативность выбранных водосборов, являлась высокая степень однородности растительного покрова. Было выбрано четыре водосбора: р. Пинега – д. Засурье (сомкнутый еловый древостой), р. Луза – с. Объячево (сомкнутый елово-березовый древостой), р. Сысола – с. Койгородок (сомкнутый березово-сосновый древостой), р. Чикшина – ст. Чикшино (разреженный сосновый древостой, болота).

Расчет оценок эвапотранспирации был выполнен с месячным разрешением за период 2002–2012 гг. по данным наземных метеостанций о количестве осадков с устраненными систематическими погрешностями осадкомера [3], данным гидрологических постов о руловом расходе [1,6] и спутниковым дан-

ным GRACE об аномалиях бассейновых влагозапасов. Известно, что данные GRACE содержат высокочастотный пространственный шум и потому имеют пониженную точность на пространственных масштабах, анализируемых в настоящей работе [13]. Для оценки отношения сигнал/шум в данных GRACE в работе было выполнено сравнение изменения аномалий бассейновых влагозапасов с изменением влагосодержания в снежном покрове (в зоне формирования устойчивого снежного покрова в течение холодного периода динамикой прочих компонентов водного баланса можно пренебречь: эвапотранспирация мала, а речной сток изменяется незначительно). Данные о влагосодержании снежного покрова были выбраны за период 2002–2010 гг. для 26 метеостанций, расположенных в бассейнах рек Северная Двина, Мезень и Печора и выполняющих снегомерные наблюдения на маршруте типа «поле» [4]. В качестве данных об среднемесячных аномалиях бассейновых влагозапасов были выбраны данные 5 разных центров обработки данных GRACE (CSR RL06, GFZ RL06, JPL RL06, ITSG18, CNES/GRGS RL05) [14], билинейно интерполированные с сетки  $1 \times 1^\circ$  в точки станций. Для каждого продукта были проанализированы диаграммы рассеяния значений накопленного прироста влагозапасов в снежном покрове и по данным GRACE в течение периода снегонакопления. Диаграммы продемонстрировали положительную статистическую связь, что дало возможность рассчитать уравнения линейной регрессии, однако, только данные центра обработки CNES/GRGS продемонстрировали наличие корректного сигнала: наклон линии регрессии при нулевом свободном члене оказался близок к единице (1.01), а стандартная ошибка (42.8 мм) оказалась меньше стандартного отклонения самих значений (47.2 мм). Это свидетельствует о невозможности физической интерпретации отдельных месячных значений эвапотранспирации, рассчитанных для средних водосборов с помощью уравнения (1). Однако, в случае использования данных GRACE CNES/GRGS оказывается возможным выделение из рядов значений корректного сезонного (а также, вероятно, многолетнего) сигнала. В настоящей работе для фильтрации шума использовалось среднепогодное осреднение. Предполагая случайность ошибок других слагаемых уравнения (1) – ошибки определения слоя осадков на поверхности водосбора по данным одной станции [7] и ошибки определения стока по русловому расходу из-за несовпадения в плане поверхностного и подземного водосборов [5], — можно считать среднепогодные оценки эвапотранспирации лишены систематической ошибки.

В настоящей работе анализируется чувствительность модели ИВМ РАН – МГУ к изменению значений двух внешних параметров (определяющихся из сторонних данных наблюдений) — весов осреднения в ячейке (в рамках мозаичного подхода) и индекса листовой поверхности. Выбор параметров обусловлен высокой чувствительностью эвапотранспирации к их величине и в то же время неудовлетворительной точностью используемых в исходной версии модели значений. Для оценки эффекта от корректировки значений параметров были выполнены численные эксперименты по расчету эвапотранспирации с помощью модели ИВМ РАН – МГУ с заменой исходных значений указанных параметров на альтернативные, полученные из некоторых репрезентативных данных наблюдений. Площадные веса осреднения в базовой версии модели задаются на основе карты земного покрова [16]. Исходная карта имеет разрешение  $1 \times 1^\circ$  и построена на основе обобщения географических карт, выпущенных в 1950–1970 гг. Ввиду грубого разрешения и недостаточной точности данных предполагается, что значения параметров могут содержать значительные ошибки. Альтернативные значения параметров были рассчитаны на основе Карты растительности России [2], построенной по данным съемки спектрорадиометром MODIS с разрешением 500 м за 2013 год и на сегодняшний день являющейся одним из наиболее точных источников информации о состоянии земного покрова на территории России. Ее преимуществом по сравнению с альтернативными картами является использование относительно большого числа классов земного покрова (23 класса) с критериями выделения, позволяющими в большинстве случаев без дополнительных предположений соотнести их с классами, используемыми в ИВМ РАН – МГУ. Значения LAI в базовой версии модели задаются для каждого класса растительности как максимальные из 12 среднемесячных значений, используемых в модели SiB1 [9]. При таком подходе не учитывается сезонный ход LAI и различия между LAI растительности одного класса в разных климатических и эдафических условиях, поэтому предполагается, что такая параметризация может приводить к значительным ошибкам. В качестве альтернативы использовались географически распределенные среднемесячные значения LAI, полученные в результате обработки данных NASA MOD15A2H [11] – 4-дневных композитов значений LAI, полученных по данным съемки MODIS с разрешением 500 м за 2014 год.

Результаты расчетов среднепогодной эвапотранспирации приведены на рис. 1. Для всех водосборов основное влияние на величину эвапотранспирации оказало изменение значений LAI — главным образом за счет увеличения интегрального устьичного сопротивления. Эффект от изменения площадных весов осреднения оказался небольшим ввиду небольших различий карт земного покрова в пределах исследуемых водосборов; исключения составляют результаты для р. Чикшина, однако, как следует из графика, основной эффект в данном случае был также связан с изменением LAI. Результаты для р. Луза и р. Сысола (итоговая ошибка 4.6% и 6.5% соответственно) можно интерпретировать следующим образом: в текущей версии модели параметры класса растительности «леса смешанные» являются репрезентативными для слово-березового и березово-соснового леса, а параметры класса «леса хвойные»



**Рис. 1.**

Средняя годовая эвапотранспирация с поверхности исследуемых водосборов, мм («мод исх» — расчет в исходной версии модели, «мод+w» — расчет с изменением площадных весов осреднения, «мод+lai» — расчет с изменением LAI, «мод+w+lai» — расчет с изменением площадных весов осреднения и LAI, «оценка» — эмпирическая оценка).

– для сомкнутого соснового леса в северной части Восточно-Европейской равнины. Соответственно, неполное устранение ошибки в случае р. Пинега (итоговая 27.0%) может свидетельствовать о нерепрезентативности параметров класса «леса хвойные» для елового леса (предполагаются параметры устьичного сопротивления). Сохранение ошибки в случае р. Чикшина (итоговая 25.9%) может свидетельствовать о нерепрезентативности параметров класса «леса хвойные» для разреженного древостоя (предполагаются параметры аэродинамического сопротивления), однако значительный вклад также может вносить выбранный метод осреднения данных [11] о листовом индексе на сетку модели, некорректный в случае несомкнутых древостоев. На последнее, возможно, указывает близкое соответствие оценке эвапотранспирации результатов эксперимента с изменением только площадных весов осреднения оценке эвапотранспирации. С другой стороны, наблюдаемый эффект может быть связан с отсутствием учета болот в модели.

В настоящей работе продемонстрирована возможность получения надежных оценок эвапотранспирации для небольших (средних по площади) водосборов, что открывает значительные возможности для валидации моделей деятельного слоя суши. Результаты исследования свидетельствуют о необходимости пересмотра значений внешних параметров эвапотранспирации в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ. Для обобщения полученных выводов требуется уточнение методики расчета оценок эвапотранспирации и выполнение анализа погрешностей, увеличение выборки исследуемых водосборов и расширение спектра анализируемых географических условий.

*Работа выполнена при поддержке научно-образовательной междисциплинарной школы Московского университета «КОСМОС» (в части использования спутниковых данных), гранта РФФИ № 21-17-00254 (в части совершенствования параметризации суммарной эвапотранспирации), гранта РФФИ № 20-05-00773 (в части уточнения параметров подстилающей поверхности), и Соглашения с Министерством высшего образования и науки № 075-15-2019-1621 (в части статистической обработки данных).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru>.
2. Барталев С. А. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. — 2016.
3. Богданова Э. Г. и др. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России // Метеорология и гидрология. — 2002. — №. 10. — С. 68-94.
4. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Маршрутные снегомерные съемки [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys>.
5. Евстигнеев В. М., Магрицкий Д. В. Речной сток. Методические основы современной практики гидрологических расчетов // М.: Триумф. — 2016.
6. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши // Государственный водный кадастр. — 2002-2007. — Ч. 1. — Т. 1. — Вып. 5, 8, 9, 25.

7. Каган П. Л. *Осреднение метеорологических полей //Л.: Гидрометеоиздат. — 1979.*
8. Clark M. P. et al. *Improving the representation of hydrologic processes in Earth System Models // Water Resources Research. — 2015. — Т. 51. — №. 8. — С. 5929-5956.*
9. Dorman J. L., Sellers P. J. *A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the simple biosphere model (SiB) // Journal of Applied Meteorology and Climatology. — 1989. — Т. 28. — №. 9. — С. 833-855.*
10. Fadeev R. Y. et al. *Design and development of the SLAV-INMIO-CICE coupled model for seasonal prediction and climate research //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling. — 2018. — Т. 33. — №. 6. — С. 333-340.*
11. LP DAAC - MOD15A2H [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod15a2hv006/>.
12. Nasonova O. N. et al. *Application of the land surface model SWAP and global climate model INMCM4.0 for projecting runoff of northern Russian rivers. 1. Historical simulations //Water resources. — 2018. — Т. 45. — №. 2. — С. 73-84.*
13. Sakumura C., Bettadpur S., Bruinsma S. *Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models //Geophysical Research Letters. — 2014. — Т. 41. — №. 5. — С. 1389-1397.*
14. The GRACE Plotter [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://thegraceplotter.com/>.
15. Volodin E. M., Gritsun A. S. *Simulation of possible future climate changes in the 21st century in the INM-CM5 climate model //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2020. — Т. 56. — №. 3. — С. 218-228.*
16. Wilson M. F., Henderson-Sellers A. *A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models //Journal of Climatology. — 1985. — Т. 5. — №. 2. — С. 119-143.*

## Validation of the temperature of sandy soil in the block of the active layer of the land of the INM RAS-MSU model according to field observations

Shuklina E.S.<sup>1,2</sup>, Voropay N.N.<sup>2,3</sup>, Dyukarev E.A.<sup>2,4,5</sup>, Bogomolov V.Yu.<sup>1,2,5,6,7</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

<sup>5</sup>A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, Russia

<sup>6</sup>Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>7</sup>Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: [ekaterinakot99@gmail.com](mailto:ekaterinakot99@gmail.com)

The soil temperature is one of the most important characteristics of climatic, soil-forming, permafrost and engineering-geological conditions. It determines the functioning of terrestrial ecosystems, allowing us to determine the sensitivity of landscapes to anthropogenic impact, changes in the natural environment and climate fluctuations.

The study of real natural processes, phenomena and objects using the methods of mathematical modeling is topical. Interest is dictated by the growing attention of the scientific community to the problem of global warming.

The reproduction of the temperature regime in the soil is an important problem for further research. Particularly, studying the thermodynamic processes in soils and the assessment of their reproduction in models are important objectives. This work is aimed at comparing the results of modeling the temperature regime of soils with data from field observations. The block of models of the active layer of land is used in the INM RAS-MSU climate model.

Computational experiments require information on atmospheric forcing (ERA-5 reanalysis), as well as soil and hydrophysical characteristics, which, to fully support the model, were taken from the Global Soil Dataset for Earth System Models).

The temperature data of sandy soil obtained with the help of atmospheric-soil measuring complexes [5] installed by the employees of the V. B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in different landscapes of the Tunkinskaya depression (Republic of Buryatia) were used



as reference information. The measurements are carried out from October 13, 2011 to the present with an hourly interval.

Checking the adequacy of the constructed model to the initial data, the following statistical characteristics were analyzed: the average error, the average error modulus, the root mean square error, the correlation coefficient, and the Kling-Gupta complex efficiency.

The first result of calculations of sandy soil temperature simulations recorded a large difference from field measurements. The error could be associated with an overestimated amount of incoming precipitation in winter. The developers corrected the work of the model, rewrote the code.

The results of the second experiment (after correcting the model) on average for the year showed a decrease in the average calculation error (from 2 to 1.4), the error modulus (from 10.1 to 4.2), the root mean square error (from 11.1 to 4, 9) and an increase in the correlation coefficient (from 0.3 to 0.7). The KGE coefficient on average for the year changed from -1.4 to -0.2. The most significant improvement in the simulation result is in the winter season at all depths.

## Валидация температуры песчаной почвы в блоке деятельного слоя суши модели ИВМ РАН-МГУ по данным натурных наблюдений

Шуклина Е.С.<sup>1,2</sup>, Воропай Н.Н.<sup>2,3</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>2,4,5</sup>, Богомолов В.Ю.<sup>1,2,5,6,7</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>5</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>6</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>7</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

E-mail: [ekaterinakot99@gmail.com](mailto:ekaterinakot99@gmail.com)

**П**ервостепенное значение для прикладных, теоретических задач, связанных с оценкой отклика земной поверхности на изменения климата имеет температура почвы – важнейшая характеристика климатических, почвообразовательных, мерзлотных и инженерно-геологических условий.

Актуально изучение реальных природных процессов, явлений и объектов с использованием методов математического моделирования. Этому способствуют развитие и распространение средств вычислительной техники, повышение квалификации исследователей, создание и совершенствование математических моделей. Также особый интерес диктуется растущим вниманием научной общественности к проблеме глобального потепления [1].

Данная работа направлена на сравнение результатов моделирования температурного режима почв с данными натурных наблюдений. Используется блок моделей деятельного слоя суши в климатической модели ИВМ РАН [2]. Это детерминированная модель расчета составляющих теплового, водного баланса и углеродного цикла деятельного слоя суши. Под понятием «деятельный слой суши» в модели понимается верхняя часть почвы, снежный и растительный покров, водоемы, реки, а также приземный слой атмосферы.

Для вычислительных экспериментов необходима информация об атмосферном форсинге (реанализ ERA-5), а также почвенные и гидрофизические характеристики, которые для полного обеспечения модели [3] были взяты из глобальной базы данных гранулометрического состава почв и грунтов (Global Soil Dataset for Earth System Models [4]).

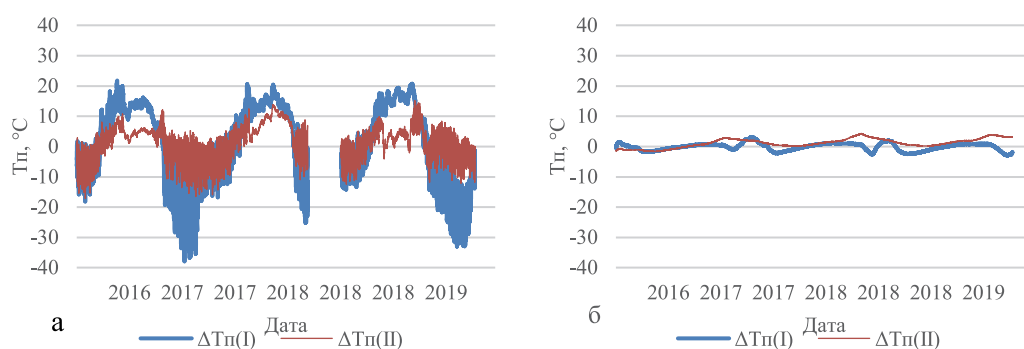
В качестве эталонной информации использованы данные температуры песчаной почвы, полученные с помощью атмосферно-почвенных измерительных комплексов [5], установленных сотрудниками Института географии имени В. Б. Сочавы СО РАН в разных ландшафтах Тункинской котловины (Республика Бурятия). Измерения проводятся с 13 октября 2011 г. по настоящее время с часовым интервалом.

При проверке адекватности построенной модели анализированы следующие статистические характеристики: средняя ошибка, средний модуль ошибки, средняя квадратическая ошибка, коэффициент корреляции и комплексная эффективность Клинга-Гупты.

Первый эксперимент показал большие различия между рядами, изменчивость температуры почвы в течение года по данным наблюдения значительно больше. Разность в зимний период достигает 20°C

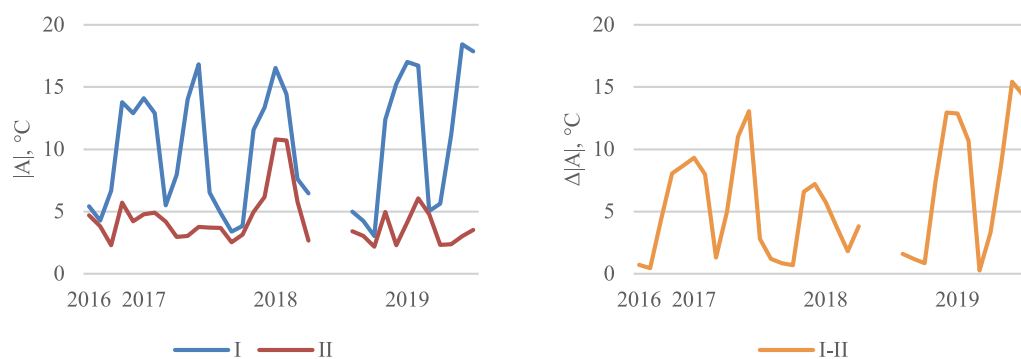
(рис.1). В целом, по всей толще почвы температура, полученная в результате моделирования – выше. Абсолютный максимум наступает на месяц раньше, минимум фиксируется дольше на два месяца. Средний модуль ошибки максимален в летние и зимние месяцы и достигает  $19^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Среднеквадратическая ошибка также высока. Можно сделать вывод - при моделировании температуры песчаной почвы фиксируется большое отличие полученных значений от натуральных измерений особенно в межсезонье и зимний период. Ошибка может быть связана с завышенным количеством поступающих осадков, рассчитываемых при моделировании.

На следующем этапе разработчиками была скорректирована работа модели, переписан код. После чего проведен второй эксперимент. При проведении экспериментов исходные данные (атмосферный форсинг, глубины, почвенные параметры) не меняются. В результатах второго эксперимента у поверхности почвы до глубины 20 см нет резких скачков температур, наблюдается равномерное падение/рост. Начиная с глубины 60 см амплитуда температуры почвы в зимний период становится меньше. Резкое прекращение спада (роста) температур происходит из-за установления (схода) снежного покрова. Со 120 см температура не опускается ниже  $0^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 1.**

Разность между температурой почвы, полученной в результате моделирования и измеренной на глубине: а – 2 см, б – 320 см.



**Рис. 2.**

Средний модуль ошибки моделирования температуры песчаной почвы на глубине 2 см.

При сравнении результатов расчета второго эксперимента с данными натуральных наблюдений сделаны следующие выводы: у поверхности в зимний период температура в модели завышена в среднем на  $4^{\circ}\text{C}$ , летом занижена на  $2^{\circ}\text{C}$ . Разность температур не превышает  $10^{\circ}\text{C}$ . На глубине 320 минимум и максимум в натуральных наблюдениях на месяц позже. Средний модуль ошибки между натуральными и модельными данными максимальный в зимние месяцы и в среднем за год составляет  $3^{\circ}\text{C}$ .

После внесения изменений в код модели Результаты моделирования стали ближе к натуральным наблюдениям в среднем на  $5^{\circ}\text{C}$  до глубины 20 см, на  $2^{\circ}\text{C}$  – 60 см и на  $1^{\circ}\text{C}$  со 120 до 320 см. Так максимальная разность температур почвы между двумя наборами данных уменьшилась в 2 раза (рис.1). Модуль ошибки снизился от 10 до 4. Среднеквадратическая ошибка в летние и зимние месяцы уменьшилась на  $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$ . В скорректированной модели возрос показатель эффективности Клинга-Гупты.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300158-9.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Быховец С.С., Сороковиков В.А., Мартуганов Р.А., Мамыкин В.Г., Гиличинский Д.А. История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций России // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 1. С. 7-20.

2. Володин Е. М. Базовая модель динамики атмосферы // Математическое моделирование земной системы. – 2016. – С. 13-20.
3. Шуклина Е. С., Воронай Н. Н., Черкашина А. А. База данных GSDE (Global Soil Dataset for Earth System Models): сравнение параметров и значений гранулометрического состава почв и грунтов с результатами натурных наблюдений (на примере Тунгусской котловины) //XIV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу. – 2021. – С. 259-262.
4. Shangquan W. et al. A global soil data set for earth system modeling //Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2014. – Т. 6. – №. 1. – С. 249-263.
5. Система автоматического мониторинга «САМ». введ. 16.03.2014. – ИнФлай.–18 с.

## Modeling of the hydrological regime of the river Tom

Razarenova A.D.<sup>1</sup>, Krylenko I.N.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: svd010100@mail.ru

The study area is the Tom basin with total catchment area 61000 km<sup>2</sup>. There are some big cities like Tomsk, Kemerovo, Novokuznetsk which are regularly flooded. Mathematical modeling methods have been increasingly used to solve tasks related to flood research. Runoff formation hydrological model ECOMAG (author U.G.Motovilov) was set up for the basin under study.

The upper Tom and its inflows are located in Gornaya Shoria. The river valley is mainly in the Kuznetskaya Kotlovina, which adjoins the West Siberian lowland in the northwest. Grey and dark-grey soils are widespread in the lower reaches, as well as leached and podzolized chernozems with arable land. In the middle and upper Tom prevail sod-podzolics and brownzems acid with broad-leaved forests. Continental air prevails over the Tom basin. The distribution of meteorological characteristics is determined by the relief features. For the limiting gauge Tom – Tomsk snow supply for the river is 40%, rain and ground supply – 33% and 27%. The average discharge for 1977-2007 is 1020 m<sup>3</sup>/s, the average maximum – 7390 m<sup>3</sup>/s, the maximum – 11600 m<sup>3</sup>/s on May 14, 1977. Tom is the river with spring-summer high water and floods in the warm season.

As model forcing data of daily temperatures, precipitation and air moisture deficit were used. For model calibration hydrologic data for 1989-1998 of 2 gauges in river basin: Tom – Tomsk and Tom – Novokuznetsk was involved. As a result of calibration, a good conformity between measured and modeled streamflow hydrographs was received: NSE is 0,81 and BIAS is 6% for Tomsk, NSE is 0,82 and BIAS is 4% for Novokuznetsk.

Verification was done using data for 2008-2014 of 5 gauges: Tom – Tomsk, Tom – Novokuznetsk, Tom – Kemerovo, Mras-Su – Miski, Kondoma – Kondoma. The catchment area for the gauges: Tomsk – 57000 km<sup>2</sup>, Novokuznetsk – 29800 km<sup>2</sup>, Kemerovo – 47400 km<sup>2</sup>, Miski – 8790 km<sup>2</sup>, Kondoma – 2510 km<sup>2</sup>. Based on the results of verification a good quality of modeling for the gauges Tom – Tomsk, Tom – Novokuznetsk and Tom – Kemerovo was received, NSE is more than 0,80, BIAS is less than 7%. For stations with a smaller catchment area the modeling quality is satisfactory. In addition, verification according to the satellite GRACE data for the Tom basin was performed. Satisfactory conformity between satellite measured and modeled  $\Delta$ TWS was obtained.

Numerical experiments to estimate hydrograph sensitivity to input meteorological data by DC-method were conducted. Increasing the amount of precipitation by each 10% leads to increasing high water runoff by 13% and increasing temperature by 1°C leads to hydrograph configuration change (moves the high water to earlier period, increases the flood period and slightly increases the low water runoff) and decreasing annual runoff by 2,8%.

# Моделирование водного режима реки Томи

Разаренова А.Д.<sup>1</sup>, Крыленко И.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: svd010100@mail.ru

Исследования речного стока и процессов его формирования – необходимая основа для мониторинга и прогноза наводнений. В последнее время все чаще для решения задач, связанных с исследованиями наводнений, применяются методы математического моделирования. В представленной работе для детального исследования процессов формирования стока в бассейне Томи была адаптирована модель формирования стока ECOMAG (автор Ю.Г. Мотовилов, ИВП РАН).

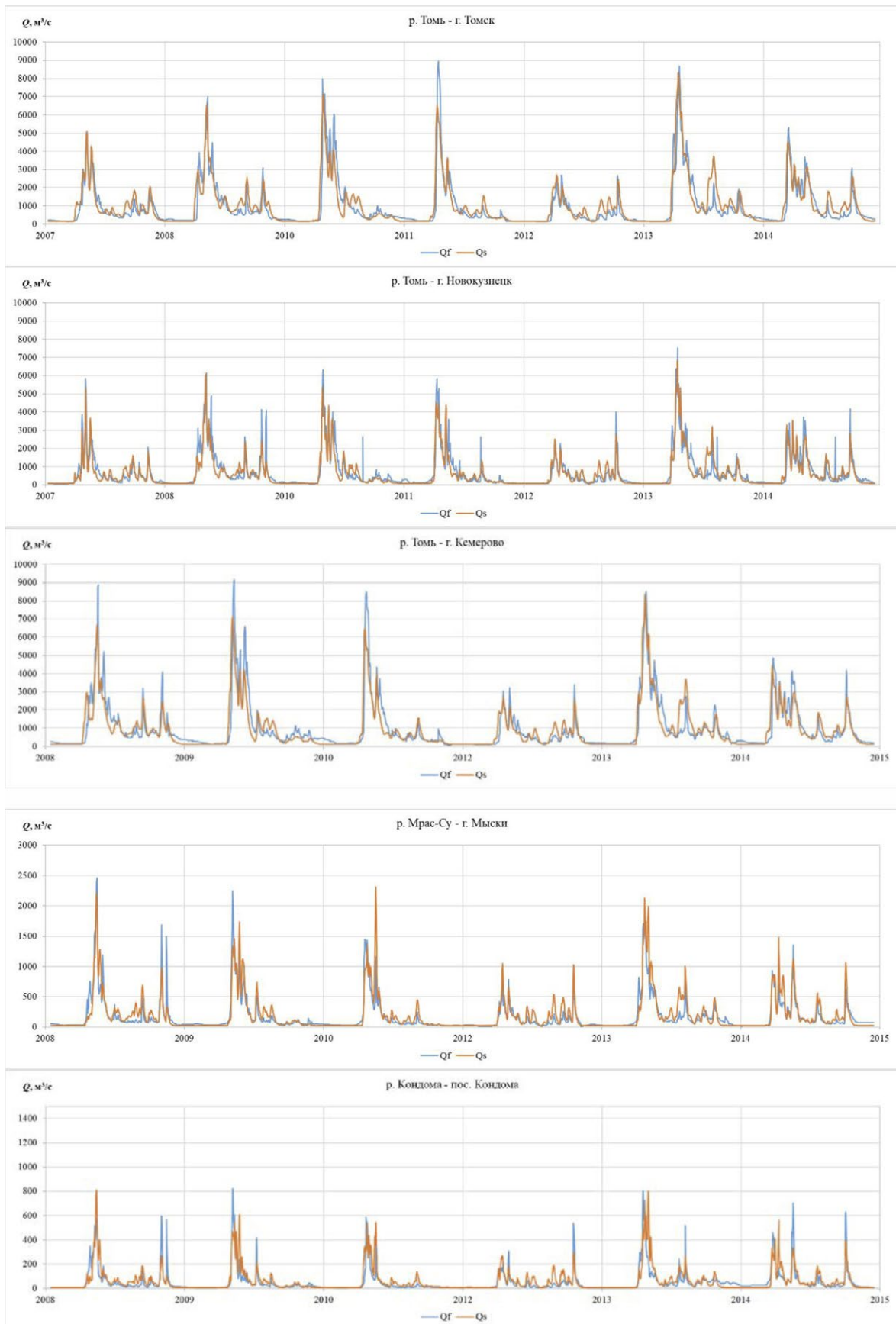
Река Томь – крупнейший правобережный приток р. Оби с водосборной площадью 61000 км<sup>2</sup>. В бассейне реки Томи располагаются крупные города, такие как Кемерово, Томск, Новокузнецк и другие, которые часто подвергаются затоплениям. Исток Томи расположен на западном склоне Абаканского хребта. Верхнее течение реки Томи и её притоков – рек Кондомы и Мрас-Су – расположены в Горной Шории. Долина реки лежит преимущественно между Кузнецким Алатау и Салаирским кряжем в Кузнецкой котловине. Кузнецкая котловина на северо-западе примыкает непосредственно к Западно-Сибирской низменности. По данным Единого государственного реестра почвенных ресурсов России почвенный покров территории бассейна Томи включает 21 тип почвы. В низовьях широко распространены серые и тёмно-серые лесные почвы, а также чернозёмы выщелоченные и оподзоленные. Преобладающими типами почв в среднем течении Томи и в верховьях являются дерново-подзолистые и бурозёмы кислые. Преобладающими ландшафтами бассейна реки Томи являются широколиственные леса в верховьях и пашни на территории чернозёмов в низовьях. Кузнецкая котловина занята преимущественно лесостепью. Над территорией бассейна Томи преобладают континентальные воздушные массы. Территориальное распределение метеорологических характеристик определяется особенностями рельефа бассейна Томи. Максимумы среднесезонной температуры за период 1977-2014 гг. наблюдаются в юго-западной части бассейна Томи и достигают за рассматриваемый период более 2,5°C. Минимумы среднесезонных годовых температур характерны для территории Горной Шории и опускаются ниже -1°C. На территории бассейна годовые суммы осадков могут изменяться от 450 мм на севере и до 1500 мм на юго-востоке.

Питание реки для замыкающего створа р. Томь – г. Томск смешанное: снеговое питание составляет 40%, дождевое и грунтовое питание имеют примерно равные доли (33% и 27%). Большая часть дождевого и грунтового стока формируется в верхнем течении Томи (в горном и предгорном районах). Средний расход для замыкающего створа р. Томи за период 1977-2007 гг. составил 1020 м<sup>3</sup>/с, средний максимальный – 7390 м<sup>3</sup>/с, максимальный – 11600 м<sup>3</sup>/с 14 мая 1977 года. По характеру водного режима водотоки бассейна Томи относятся к типу рек с весенне-летним половодьем и паводками в тёплое время года. Для рек такого типа основной фазой водного режима является половодье, на которое приходится 70-80% годового стока и которое длится 3-4 месяца, в период половодья наблюдаются максимальные расходы и наибольшие уровни.

Используемый в работе информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG включает в себя: математическую модель ECOMAG, ГИС, базы данных информации о характеристиках территории и управляющую оболочку. Гидрологический блок модели описывает основные процессы гидрологического цикла суши (инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и речного стока). Моделирование гидрологических процессов на каждом ландшафтном элементе выполняется для четырех уровней: для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период учитываются гидротермические процессы в снежном покрове и почве. При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется на отдельные ландшафтные элементы (элементарные водосборы) с учетом особенностей рельефа, структуры речной сети, типов почв, растительности, и др.

Для адаптации ИМК ECOMAG для бассейна р. Томи использовалась информация о подстилающей поверхности из географических баз данных (ЦМР, цифровые почвенная и ландшафтная карты, отражающие характеристики и состояние природных ресурсов), карты гидрографической сети и расположения пунктов гидрологического и метеорологического мониторинга в ГИС-формате, включая: ЦМР GLOBE (DMA) с разрешением 30 угловых секунд или 1 км; почвенная карта РФ масштаба 1:2500000 (разработана под руководством М.А. Глазвской) в формате векторных данных; ландшафтная карта СССР масштаба 1:2500000 (разработана под руководством В.А. Николаева) в формате векторных данных; пространственные данные о водотоках, метеорологических станциях и гидрологических постах;





**Рис. 1.** Гидрографы фактического ( $Q_f$ ) и расчётного ( $Q_s$ ) стока за период верификации модели 2007-2014 гг. для постов р. Томь – г. Томск и р. Томь – г. Новокузнецк, и за период 2008-2014 гг. р. Томь – г. Кемерово, р. Мрас-Су – г. Мыски и р. Кондома – пос. Кондома.

ряды многолетних метеорологических наблюдений по станциям за период с 1977 по 2014 гг. со средне-суточной температурой, суточной суммой осадков и дефицитом влажности воздуха из архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [<http://meteo.ru/>]; многолетние наблюдения на гидрологических постах за расходами воды за период 2008-2018 гг. из архива АИС ГМВО [<https://gmvo.skniivhru/>] и за период ранее 2008 г. по данным гидрологических ежегодников.

Большая часть параметров модели задаётся для различных типов подстилающей поверхности и почв из баз данных ИМК ЕСОМАГ. Далее множители на наиболее важные параметры подбираются в процессе калибровки для достижения наименьшего отклонения смоделированных гидрографов от фактических. Калибровка модели формирования речного стока Томи производилась на данных за период с 1989 по 1998 год по постам р. Томь – г. Томск и р. Томь – г. Новокузнецк. Водосборная площадь для этих постов составляет 57000 км<sup>2</sup> и 29800 км<sup>2</sup> соответственно. Для оценки качества использовались критерий эффективности модели Нэша-Сатклиффа и критерий соответствия объёмов стока BIAS. При оценке качества результатов моделирования критерий NSE для поста р. Томь – г. Томск составил 0,81, BIAS 6%, а для поста р. Томь – г. Новокузнецк – 0,82, BIAS 4%. Средневзвешенный критерий NSEtotal составил 0,84. Такие результаты считаются хорошими.

Верификация модели производилась по данным за период 2008-2014 гг. Чтобы оценить качество работы модели на других участках бассейна помимо основных створов р. Томь – г. Томск и р. Томь – г. Новокузнецк дополнительно оценивались смоделированные гидрографы для следующих постов: р. Томь – г. Кемерово, р. Мрас-Су – г. Мыски и р. Кондома – пос. Кондома. Площади водосборов для рассматриваемых постов составляют 47400 км<sup>2</sup>, 8790 км<sup>2</sup> и 2510 км<sup>2</sup> соответственно. Данные указанных постов на данном этапе не использовались при калибровке модели, однако модель правдоподобно воспроизводит гидрографы стока для двух крупных притоков Томи р. Мрас-Су и р. Кондома, а также створа гидрологического поста в г. Кемерово, расположенного между г. Томск и г. Новокузнецк. По итогам верификации модели на другом временном периоде было получено хорошее качество моделирования для постов р. Томь – г. Томск, р. Томь – г. Новокузнецк и р. Томь – г. Кемерово (критерий NSE более 0,80, BIAS не превышает 7%). Для постов с меньшей площадью водосборов на притоках в горном районе качество моделирования удовлетворительное (рис. 1). С целью дополнительной верификации сравнивались аномалии влагозапасов в бассейне Томи по результатам моделирования и спутниковых данных миссии GRACE за период 2002-2014 гг. Для оценки полученных данных использовались критерий Нэша-Сатклиффа и коэффициент корреляции, которые составили 0,58 и 0,78 соответственно. В результате верификации по спутниковым данным для всего бассейна Томи было получено удовлетворительное соответствие аномалий влагозапасов.

На основе адаптированной модели был проведён ряд численных экспериментов по оценке чувствительности модели к изменениям метеорологических входов с использованием метода линейной трансформации метеорологических рядов наблюдений (метод «delta-change», DC-метод). По результатам численных экспериментов оценивалось относительное изменение объёма стока и трансформация среднемноголетних смоделированных гидрографов за период 1989-2014 гг. для замыкающего поста р. Томь – г. Томск при увеличении температур воздуха и осадков. По результатам моделирования продемонстрировано, что увеличение температуры сдвигает половодье на более ранние сроки, продлевает паводочный период, немного увеличивает меженный объём стока и уменьшает годовой объём стока, а увеличение осадков значительно увеличивает сток в течение всего года. При увеличении осадков на каждые 10% отмечается рост объёма стока половодья и паводков примерно на 13%. При значительном росте температур на 3-4°C при одновременном росте осадков на 10% изменения годового стока имеют положительный знак, но незначительны, а при росте осадков на 20-30% превышают величину 15%.

*Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.*

# Numerical simulation of methane emission from the Rybinsk reservoir with the one-dimensional LAKE 3.0 model and the model sensitivity study

Lomov V.A.<sup>1,2,3</sup>, Stepanenko V.M.<sup>2,4</sup>, Gladskikh D.S.<sup>2,4,5</sup>, Mortikov E.V.<sup>2,4,6</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>3</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Centre of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>6</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: lomson620@mail.ru

Methane is one of the major greenhouse gases in the atmosphere. Artificial reservoirs are important anthropogenic source of methane in the air (Tortajada et al. 2012, Gash et al. 2010, Deemer et al. 2016, Fedorov et al. 2005).

Possible approach for methane emission estimation from reservoirs is mathematical modeling. In presented work, one-dimensional hydrodynamic model LAKE 3.0 (Stepanenko et al. 2020) was used for methane emission estimation from the Rybinsk reservoir. Previously, the LAKE model has already been successfully used to estimate methane emissions from both natural (Stepanenko et al., 2020) and artificial water bodies (Lomov et al. 2020).

The specifics of methane fluxes modeling are a large number of factors in the model (included in biochemical calculation module) should be calibrated. These parameters are included in the equations in the form of both static and dynamic forms. In the current research the sensitivity experiments with such key parameters as vertical water advection (VA) in the reservoir, background thermocline diffusion (BD) etc. was carried out. Based on the experiments performed, the optimal parameters of the LAKE model were obtained to estimate the methane emission from the Rybinsk reservoir in the modern period.

Methane annual emissions were calculated for 2011 - 2018, 2010 was chosen as a spin-up period. The atmospheric forcing data for this calculation was taken from NCEP-NCAR reanalysis for the corresponding period. Based on this experiment, the estimate of the annual methane emission from the Rybinsk Reservoir was 35600 tC-CH<sub>4</sub>, and the average methane surface flux was 21.3 mgCH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

*The research was founded by a project of studying methane emissions from large reservoirs in Russia, Agreement 1010-416-021 dated April 27, 2021 "RUSHYDRO".*

## REFERENCES:

1. Deemer B, Harrison A, Li S, Beaulieu J, Delsontro T et.al. 2016 *Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis BioScience* (Berlin: Springer) 66 (11) pp 949 – 964
2. Fedorov Y A, Tambieva N S, Garkusha D N and Horoshevskaya V O 2005 *Methane in water ecosystems* (Rostov-on-Don: Copycenter) p 329
3. Gash J, Goldenfum J, Richard M Taylor et.al. 2010 *Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs* (London: International Hydropower Association) *The World Bank Contract: 7150219* p 166
4. Lomov V A, Stepanenko V M, Grechushnikova M G and Repina I A 2020 *Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling* (IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci*) 611 pp 12 – 29
5. Stepanenko V M, Valerio G and Pilotti M 2020 *Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models* (*J. of Adv. in Modelling Earth Sys*) 12 pp e21063
6. Tortajada C, Altinbilek D and Biswas K 2012 *Impact of large dams: A Global Assessment* (Berlin: *Water Resources Development and Management, Springer*) p 410

# Численное воспроизведение потоков метана из Рыбинского водохранилища с помощью одномерной модели LAKE 3.0 и исследование модели на чувствительность к внешним параметрам

Ломов В.А.<sup>1,2,3</sup>, Степаненко В.М.<sup>2,4</sup>, Гладских Д.С.<sup>2,4,5</sup>, Мортиков Е.В.<sup>2,4,6</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>6</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук, г. Москва, Россия

E-mail: lomson620@mail.ru

В настоящее время оценка антропогенного вклада в увеличение содержания парниковых газов в атмосфере является очень значимой научной задачей. К главным агентам Глобального потепления относятся такие газы, как углекислый газ, метан, оксид азота и многие другие. Содержание метана в атмосфере невелико, однако, этот газ имеет значительный потенциал глобального потепления по отношению к CO<sub>2</sub> (Forster et al., 2007). Источников метана в атмосферу множество, как природных, так и антропогенных. Одним из важных антропогенных источников метана в атмосфере являются искусственные водоемы (Tortajada et al. 2012, Gash et al. 2010, Deemer et al. 2016, Fedorov et al. 2005).

Один из способов оценки эмиссии метана из водохранилищ – это математическое моделирование. В данной работе с помощью одномерной гидродинамической модели LAKE 3.0 (Stepanenko et al. 2020) была оценена эмиссия метана из Рыбинского водохранилища. Ранее модель LAKE уже применялась для оценки эмиссии метана как с естественных (Stepanenko et al., 2020), так и с искусственных водоемов (Lomov et al. 2020).

Особенность моделирования потоков метана заключается в том, что при расчете биохимических процессов необходимо учитывать большое количество факторов в модели, которые включены в уравнения в виде параметров как статических, так и динамических. Для большинства водоемов данные параметры невозможно откалибровать по натурным наблюдениям, поскольку для этого необходимы продолжительные ряды наблюдений различных характеристик. Проводить такие наблюдения для каждого изучаемого водоема слишком трудоемко, поэтому в данной работе был проведен ряд экспериментов с моделью LAKE 3.0 для определения чувствительности воспроизведения потоков метана к различным параметрам модели.

В ходе данных экспериментов рассматривалось включение и выключение таких ключевых параметров модели, как вертикальная адвекция воды (ВА) в водохранилище и дополнительная диффузия (ДД) в термоклине:

$$\frac{dH}{dt} = r - E - \frac{1}{A(0)} \int_0^H \phi_{\Gamma_A} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dl dz + M \quad (1)$$

$$k_{BD} = k_0 A_0^{k_1} (N^2)^{-k_2} \quad (2)$$

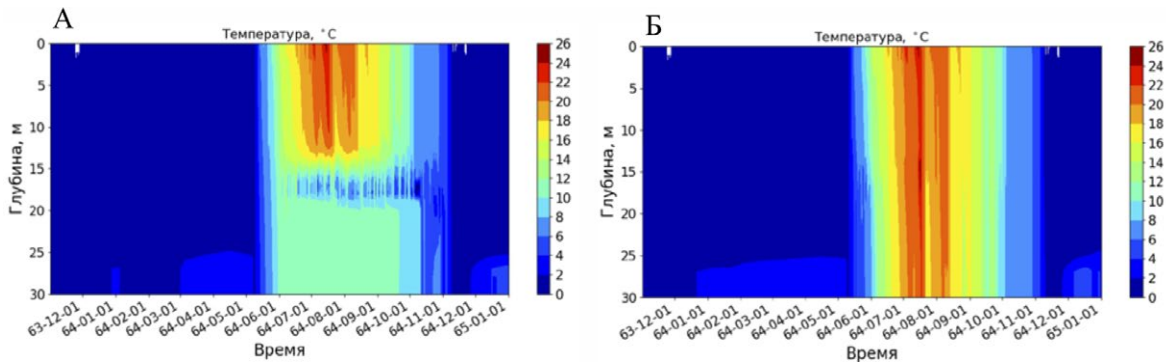
где  $k_0 = 8.17E-4$ ,  $k_1 = 0.56$ ,  $k_2 = -0.43$  эмпирические коэффициенты,  $A_0$  площадь водохранилища  $N$  частота Брента-Вяйсяля (Stepanenko et al. 2011, Hondzo and Stefan 1993).

При воспроизведения водного баланса водохранилища в модели необходимо задавать колебания уровня воды, а также приток воды и сбросы в нижний бьеф. При этих условиях параметризация вертикальной адвекции воды (уравнение 1) в модели является необходимой. При ее отключении в модели неправильно воспроизводится температурная стратификация и происходит дополнительный прогрев придонных горизонтов воды (Рис. 1А).

Понижение температуры на горизонте 16 м обусловлено сбросами воды в нижний бьеф, так как на этой глубине расположены водозаборы Рыбинской ГЭС. Кроме того, металимнион при таких условиях расположен достаточно глубоко, из-за чего происходит дополнительная аэрация, что важно при расчете концентраций метана в воде.

Эксперимент с включением/отключением фоновой диффузии показал, что при учете уравнения (2) модель воспроизводит слишком интенсивное перемешивание водоема в летний период, даже в наиболее глубоких частях не наблюдается температурная стратификация. Из-за этого в летний период вся толща насыщена кислородом, что не соответствует реальным условиям. При этом из-за высоких температур у дна и в донных отложениях генерация метана будет значительно завышена. Один из параме-



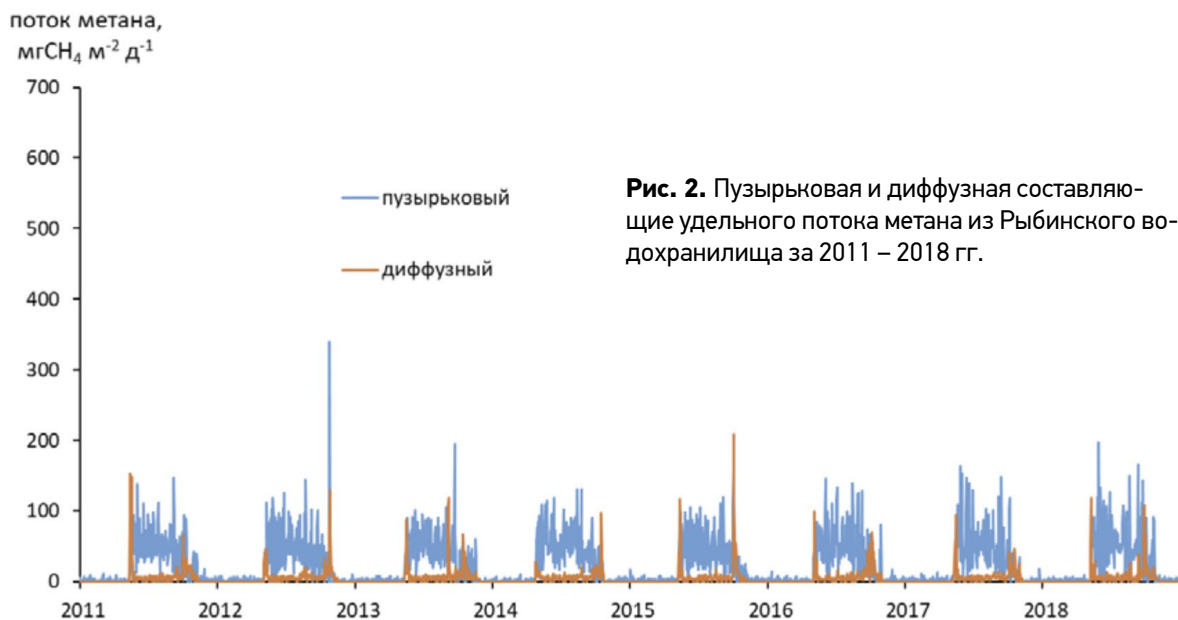


**Рис. 1.** Распределение температуры по глубине Рыбинского водохранилища по результатам моделирования 1964 года при отключенной вертикальной адвекции (А) и отключенной дополнительной диффузии (Б).

тров, используемых в уравнении (2) – это площадь водохранилища. Так как Рыбинское водохранилище имеет очень большую площадь, при включенной дополнительной диффузии возникает эффект чрезмерного перемешивания в термоклин (Рис. 1Б).

На основе проведенных экспериментов, были подобраны оптимальные параметры модели LAKE для оценки эмиссии метана из Рыбинского водохранилища в настоящий период. Эмиссия метана рассчитывалась за 2011 – 2018 года, 2010 год был выбран в качестве «разгонного». Данные атмосферного форсинга в этом расчете – реанализ NCEP-NCAR за соответствующий период.

В результате этого эксперимента был получен график изменчивости удельного потока метана из Рыбинского водохранилища за исследуемый период (Рис. 2).



**Рис. 2.** Пузырьковая и диффузная составляющие удельного потока метана из Рыбинского водохранилища за 2011 – 2018 гг.

На основе этого эксперимента оценка годовой эмиссии метана из Рыбинского водохранилища составила 35.6 тыс. тС-CH<sub>4</sub>, а средний удельный поток метана – 21.3 мгCH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup> в сут.

Работа выполнена в рамках проекта по изучению эмиссии метана из крупных водохранилищ России, Договор 1010-416-021 от 27.04.2021 ПАО РУСГИДРО.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Deemer B, Harrison A, Li S, Beaulieu J, Delsontro T et.al. 2016 Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis BioScience (Berlin: Springer) 66 (11) pp 949 – 964
2. Fedorov Y A, Tambieva N S, Garkusha D N and Horoshevskaya V O 2005 Methane in water ecosystems (Rostov-on-Don: Copycenter) p 329
3. Gash J, Goldenfum J, Richard M Taylor et.al. 2010 Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs (London: International Hydropower Association) The World Bank Contract: 7150219 p 166

4. Hondzo M and Stefan H G 1993 Lake Water Temperature Simulation Model (*J. of Hydraulic Engineering*) 119(11) pp 1251 – 1273
5. Lomov V A, Stepanenko V M, Grechushnikova M G and Repina I A 2020 Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling (*IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*) 611 pp 12 – 29
6. Stepanenko V M, Valerio G and Pilotti M 2020 Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models (*J. of Adv. in Modelling Earth Sys*) 12 pp e21063
7. Stepanenko V, Machul'skaya E, Glagolev M and Lykosov V 2011 Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone (*Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics*) 47(2) pp 252–264
8. Tortajada C, Altinbilek D and Biswas K 2012 *Impact of large dams: A Global Assessment* (Berlin: Water Resources Development and Management, Springer) p 410

## Spread of a cold wave in the snow during the preparation of ski slopes by salting

Frolov D.M., Rzhantsyn G.A., Cherkasova V.A., Sokratov S.A., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: [frolov@geogr.msu.ru](mailto:frolov@geogr.msu.ru)

The paper presents a method of hydrological and hydrophysical studies to observe the propagation of a cold wave in the snow during the preparation of ski slopes by salting. Salting is used in the preparation of ski slopes for competitions, especially when the average daily air temperature is approaching positive levels, and during the day there is a melting of snow cover, for a short-term decrease in the temperature of the snow column and its partial freezing. The experiments were carried out in the summer of 2021 and 2022 on the Dzhanquat and Garabashi glaciers of the Caucasus. The experiments used thermal sensors and a temperature logger manufactured by LLC "MSU-Geophysics". The temperature sensors were located on a rod stuck in the snow with an interval of 5 cm. The temperature was measured every minute. With a single salting, a cold wave was observed for about 4-5 hours and with freezing of the lower strata with a decrease in the temperature of the underlying snow layers to -3--5 °C. The analysis of the observational data showed the propagation of the cold wave deep into 50-60 cm. The research method will allow us to investigate the peculiarities of the propagation of the cold wave during salting and optimize the salting process for the most effective preparation of ski slopes for competitions.

## Распространение волны холода в снегу при подготовке горнолыжных трасс засаливанием

Фролов Д.М., Ржаницын Г.А., Черкасова В.А., Сократов С.А., Кошурников А.В., Гагарин В.Е.

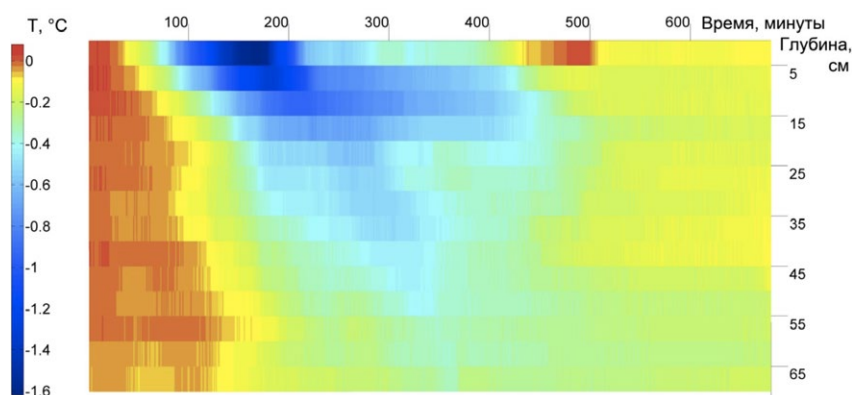
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: [frolov@geogr.msu.ru](mailto:frolov@geogr.msu.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

В работе представлен метод гидрологических и гидрофизических исследований по наблюдению за распространением волны холода в снегу при подготовке горнолыжных трасс засаливанием. Известно, что при подготовке горнолыжных трасс к соревнованиям, особенно когда среднесуточная температура воздуха приближается к положительным отметкам, а днём возникает таяние снежного покрова, для кратковременного понижения температуры снежной толщи и её частичного смерзания используется засаливание. Эксперименты проводились летом 2021 и 2022 года на ледниках Джанкуат и Гарабаша Кавказа.

## ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

Для исследования термического состояния снежной толщи при засаливании использовался термокоса, термодатчики и логгер температуры производства ООО "МГУ-Геофизика". Датчики температуры были расположены на воткнутом в снег стержне с интервалом в 5 см. Измерение температура проводилось ежеминутно. При однократном засаливании наблюдалась волна холода в течение около 4-5 часов и при смерзании нижней толщи с понижением температуры нижележащих слоёв снега до  $-3$ -- $-5$  °С. Анализ данных наблюдений показал распространение волны холода вглубь до 50-60 см (рис. 1). Внешний вид прибора указан на рисунке 2.



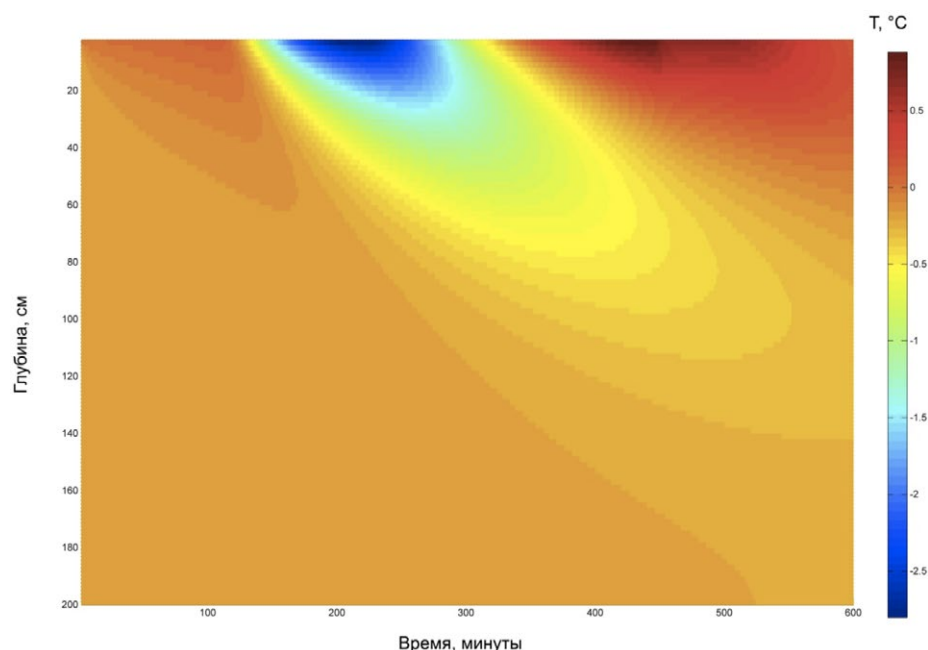
**Рис. 1.** Распространения волны холода при засаливании снега на леднике Джанкуат.



**Рис. 2.** Внешний вид прибора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ.

Метод исследования позволит исследовать особенности распространения волны холода при засаливании и произвести оптимизацию процесса засаливания для наиболее эффективной подготовки горнолыжных трасс к соревнованиям. Наблюдения показали хорошее соответствие с прошлогодними результатами, когда в соответствии с данными измерений температуры толщи снега при подготовительных работах горнолыжных трасс засаливанием на склоне ледника Гарабаши 25.06.2021 – 01.07.2021 было произведено моделирование теплового поля в снеге. Плотность снега в районе уплотнённой трассы в точке измерений составляла  $350$ - $400$   $\text{кг}/\text{м}^3$ . Исходными данными температуры являлись результаты записи двух логгеров, расположенных (закопанных в снег) на разной глубине (один - ближе к поверхности, а другой - на глубине 40 см). На основе разностной аппроксимации дифференциального уравнения в частных производных для теплопроводности (первого порядка по времени и второго по пространству) был произведен расчёт распространения волны холода при засаливании от поверхности вглубь снега. Результаты расчёта распределения температуры по глубине и по времени в снеге в исследуемой точке трассы при засаливании можно видеть на рисунке 3.



**Рис. 3.** Распределение температуры по глубине и по времени в снеге в исследуемой точке трассы при засаливании (результаты расчёта).

Исходными данными расчёта задавались результаты измерения температуры логгера ближе к поверхности, а результаты расчёта температуры на глубине 40 см согласуются с данными измерения второго логгера. Вычисления проводились посредством полученной на основе уравнения теплопроводности Фурье разностной схеме.

Таким образом, температурное поле в снеге описывалось уравнением теплопроводности Фурье:

$$C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_i \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

где  $K_i$ ,  $C_i$  – коэффициенты кондуктивной теплопроводности и теплоемкости,  $T$  – температура, °C,  $t$  – время. Зависимости коэффициентов кондуктивной теплопроводности и теплоемкости снега от его плотности выражаются соотношениями

$$K_s = 0,018 + 0,87 \rho / 10^3; C_s = \rho C_l \text{ при } 120 < \rho < 350 \text{ кг/м}^3,$$

где  $C_l$  – коэффициент теплоемкости льда,  $\rho$  – плотность снега. Граничные условия для уравнения теплопроводности задавались следующие: на поверхности снега задавалась  $T = T_{surf} = T_{\text{погрел}}$ ,  $\rho = 350 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_l = 2100 \text{ Дж/(}^\circ\text{C кг)}$ ,  $C_s = 420000 \text{ Дж/(}^\circ\text{C м}^3)$ ,  $K_s = 0.194 \text{ Дж/(}^\circ\text{C с м)}$ . Глубина снежной толщи 2 м разбивалась на  $i = 1, n (=200)$  частей по 1 см. Записывалось разностное уравнение

$$C_i \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = K_i \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2}$$

которое даёт новое значение температуры на новом временном слое

$$C_i \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = K_i \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2}$$

Шаг по времени в 30 секунд разбивался на интервалы по 0.1 секунды и просчитывалось на новом шаге, используя

$$K \frac{T_0 - T_1}{\Delta x} = 0, T_{n+1} = T_{surf}$$

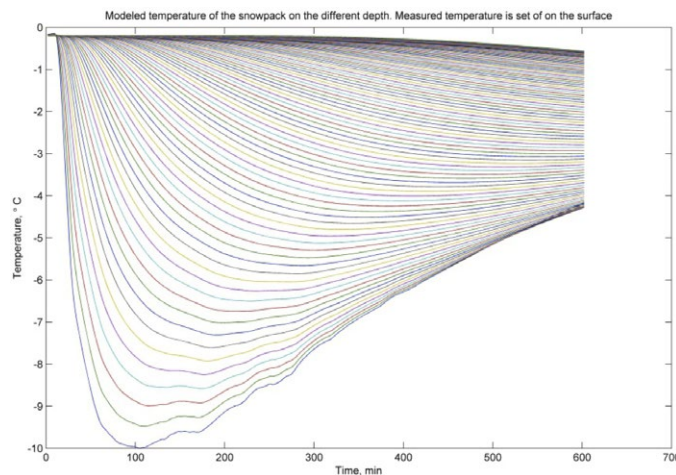
Разностная схема для выполнения шага по  $j$  записывалась:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \Delta t / C_i * K_i / \Delta x^2 (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j) \text{ для } i = 1, n$$

и

$$T_0 = T_1, T_{n+1} = T_{surf}$$

Результаты численного моделирования волны холода от засоления снега в пенопластовом коробе в лабораторных условиях показаны на рисунке 4.



**Рис. 4.**

Результаты численного моделирования волны холода от засоления снега в пенопластовом коробе в лабораторных условиях (разные линии соответствуют изменению температуры на разной глубине).

Работа поддержана госбюджетной темой «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4) и «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Основы мерзлотного прогноза при инженерногеологических исследованиях // Под ред. В.А. Кудрявцева. Изд-во МГУ, 1974. 431 с.
2. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики, 1999.
4. Фролов Д.М., Ржаницын Г.А., Сократов С.А. и др. Геотехнический мониторинг снежных покровов на ледниках Эльбруса (Кавказ) / Д. М. // Геофизика. — 2022. — № 3. — С. 70–75.



# Expected response of Lake Glubokoe thermal regime to climate warming during the 21st century

Erina O., Tereshina M., Sokolov D.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: [erina.oxn@gmail.com](mailto:erina.oxn@gmail.com)

The thermal regime of lakes is one of the most important abiotic factors controlling the freshwater ecosystems and significantly controls the structure of their biological communities. In small lakes without significant anthropogenic load, natural thermal and dynamic conditions are maintained resulting in the forming of sustainable ecosystems. Currently, climate warming is a serious challenge to this sustainability, as changes in any component of the climatic system are somehow reflected in the regime of lakes. Increase in water temperature, intensification and increase in duration of thermal stratification may lead to irreversible changes in species composition of sensitive plankton communities, change in oxygen regime of deep layers of lakes, increase of internal nutrient load, etc.

Lake Glubokoe, located in the Moscow region within the natural reserve, is a small intact lake that could be an example for assessing the effects of climate change on the lakes of the East European Plain. The lake is characterized by low concentrations of nutrients and low biological productivity. During the last few decades, the structure of the planktonic communities of the lake, previously changed by human impact, remained almost unchanged, but the disruption of the lake ecosystem is possible upon the global climatic crisis.

We used the results of scenario simulations of four climate models used in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in order to predict the probable trends in the thermal regime of Lake Glubokoe until the end of the 21st century. The obtained series of meteorological data were used as the atmospheric forcing for the one-dimensional thermodynamic model GLM, preliminarily calibrated based on the field measurements. As a result, we obtained the set of daily data on the vertical thermal structure of the lake under different scenarios of greenhouse gas emissions up to 2099.

Analysis of modeling results shows that the changes in the thermal regime of the lake that have already occurred since the beginning of the 21st century, concerning the average annual and maximum water temperatures, stability of the water column during stratification, duration of ice-free and stratified periods, may persist until the end of the century even under the maximum emission reduction scenario. In the most negative scenarios, the rate of surface water temperature increase can reach 0.5 °C/10 years and more, quantitative characteristics of stratification stability by the end of the century can increase 1.5-2 times, the duration of stable summer stratification period may increase by a month or more. It is important that even with a considerable variation in the results obtained using data from different climate models, they all show a reliable strong increase in the total warming of the lake and increased stratification in any scenario, except for the most severe reduction of global greenhouse gas emissions.

## Ожидаемый отклик характеристик термического режима озера Глубокого на потепление климата в течение XXI века

Ерина О.Н., Терешина М.А., Соколов Д.И.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: [erina.oxn@gmail.com](mailto:erina.oxn@gmail.com)

Температурный режим озер является одним из важнейших абиотических факторов, контролирующих состояние пресноводных экосистем, и в значительной мере определяет структуру их биологических сообществ. В небольших малопроточных озерах, не испытывающих существенной прямой антропогенной нагрузки, постоянство термического и динамического режима приводит к формированию устойчивых сообществ живых организмов. В настоящее время серьезную угрозу для этой устойчивости представляет потепление климата, так как изменения в любом элементе климатической системы так или иначе отражаются на режиме озер. Увеличение температуры воды, усиление и увеличение продолжительности термической стратификации могут привести к необратимому изменению видового состава чувствительных планктонных сообществ, изменению кислородного режима глубинных слоев озер, увеличению внутренней биогенной нагрузки и т.д.

Озеро Глубокое, расположенное в Московской области в пределах природного заказника (координаты), можно считать ненарушенным малым водоемом, на примере которого могут быть оценены последствия изменений климата для озер Восточно-Европейской равнины. Для озера характерны низкие концентрации биогенных элементов и малая биологическая продуктивность. В течение последних нескольких десятилетий структура планктонных сообществ озера, ранее подвергавшаяся изменениям за счет антропогенного воздействия, оставалась почти неизменной, однако при наступлении глобального климатического кризиса возможно нарушение экосистемы озера.

По структуре водного баланса озера Глубокое в приходной части озера основную долю его питания составляют атмосферные осадки. Котловина озера имеет конусообразную форму, максимальная глубина составляет 32 м, площадь зеркала – 0,59 км<sup>2</sup>. Такая большая глубина по отношению к небольшой площади озера может способствовать формированию устойчивой плотностной стратификации, ежегодному развитию аноксидных условий и «застойности» придонных слоев воды.

В качестве инструмента исследования использована одномерная модель GLM (General Lake Model), разработанная в Университете Западной Австралии (UWA) и основанная на принципах, ранее реализованных в модели DYRESM. Расчет тепло- и массообмена в модели реализован исключительно по энергетическому принципу (сопоставление доступной для перемешивания кинетической энергии и устойчивости водной толщи), при этом вертикальная структура озера не разделяется по равномерной сетке, а разбивается на однородные по плотности слои с переменной толщиной.

Входными данными для модели служат: батиграфическая кривая озера, ежесуточные ряды метеорологических характеристик (температура воздуха, количество осадков, относительная влажность, давление и скорость ветра), начальное вертикальное распределение температуры воды. В качестве метеорологических характеристик использовались данные наблюдений близлежащих метеостанций Можайск, Волоколамск, а также данные реанализа NCEP/NCAR.

Калибровочный расчет для озера Глубокое проводился для вегетационного периода 2017 года, наиболее обеспеченного материалами наблюдений за последние 50 лет, что позволило провести на основе этого материала подробную калибровку и оптимизацию параметров модели. Верификационный расчет проводился для периода с 1991 по 2015 гг. на основе данных наблюдений за температурой воды, проводимых сотрудниками станции на оз. Глубокое.

Результаты калибровки и верификации показали высокую сходимость как количественных характеристик воспроизведения термического режима озера, так и их качественных показателей, таких как продолжительность стратификации и безледного периода, глубина термоклина. По модели GLM для оз. Глубокое величина среднеквадратической ошибки расчета температуры воды (RMSE) в целом по озеру составила 1,11 °С, что входит в заданные пределы хорошего качества моделирования (<1,5 °С) с учетом большого набора данных для проверки, средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 0,72 °С. Коэффициент парной корреляции R между фактическими и расчетными значениями температуры воды составил 0,99, коэффициент эффективности модели Нэша-Сатклиффа (NSE) – 0,96, что соответствует очень хорошему качеству моделирования (выше 0,75).

Для того, чтобы спрогнозировать вероятные тренды в термическом режиме озера Глубокое до конца XXI века, мы использовали результаты сценарных расчетов четырех климатических моделей, используемых в работе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) согласно протоколу озерного сектора проекта ISIMIP2b. Полученные ряды метеоданных были использованы в качестве атмосферного форсинга. В результате был получен массив ежесуточных данных о вертикальной термической структуре озера при различных сценариях эмиссий парниковых газов до 2099 года.

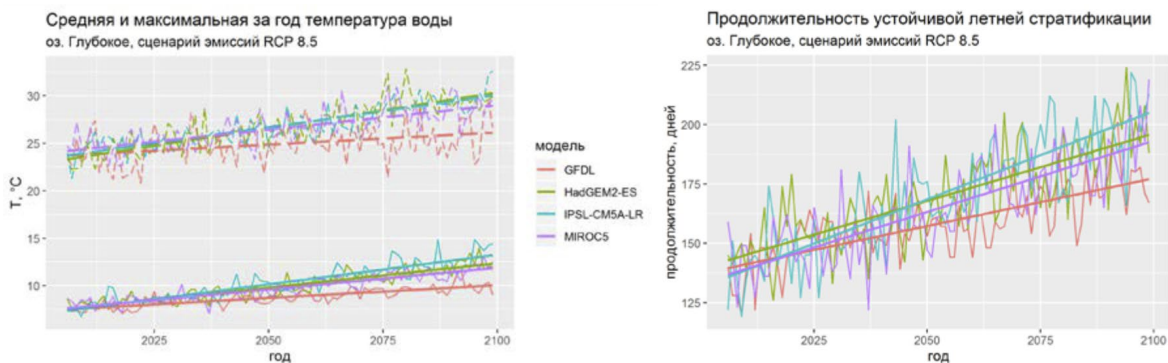
Для оз. Глубокое среднегодовая температура поверхностного слоя воды за первое расчетное десятилетие (2006–2015 гг.) по результатам расчета в модели GLM составила в среднем 8,0 °С (от 7,6 до 8,4 °С в зависимости от используемой климатической модели и сценария эмиссий RCP). Средняя за этот период максимальная температура в поверхностном слое составляла 24,1 °С (23,3–24,9 °С). Средняя устойчивость водной толщи по Шмидту за летние месяцы составила 373 Дж/м<sup>2</sup> (346–407 Дж/м<sup>2</sup>), максимальная – 561 Дж/м<sup>2</sup> (515–598 Дж/м<sup>2</sup>). Средняя продолжительность летней стратификации (определяемая как длина периода, в течение которого устойчивость непрерывно превышает пороговое значение) за 2006–2015 гг. составила 143 дня (от 137 до 149 дней в зависимости от сценария).

При использовании сценария с наиболее сильным сокращением выброса парниковых газов (RCP 2.6) использование данных климатической модели GFDL в качестве атмосферного форсинга для оз. Глубокое приводит к формированию термодинамического режима, не подверженного многолетним изменениям: характеристики термического режима за последнюю декаду расчета (2090–2099 гг.) отличаются от начальных характеристик менее, чем на 5%. Использование данных модели IPSL-CM5A-LR приводит к значимому ( $p < 0.01$ ) увеличению среднегодовой поверхностной температуры воды с 7,9 до 9,1 °С и средней за летний период устойчивости водной толщи с 386 до 448 Дж/м<sup>2</sup>. Форсинг MIROC5 приводит к статистически достоверному изменению всех рассматриваемых характеристик: среднегодовая температура поверхностного слоя к концу века достигает 8,9 °С, максимальная температура – 26,1 °С, средняя и максимальная за летний период устойчивость водной толщи достигают 459 и 684 Дж/м<sup>2</sup>

соответственно, продолжительность устойчивой летней стратификации увеличивается до 160 дней. Изменения в характере термического режима даже при сценарии максимального сокращения выброса парниковых газов связаны с инерционностью изменений в климатической системе: большинство климатических моделей прогнозируют продолжение роста температуры воздуха до середины столетия.

Переход к сценарию RCP 6.0 приводит к тому, что все используемые климатические модели обеспечивают статистически достоверное изменение термического режима озера. Среднегодовая температура воды возрастает к 2099 году до 9,4–10,3 °С, максимальная температура – до 24,1–27,4 °С. Средняя за летний период устойчивость водной толщи увеличивается до 388–536 Дж/м<sup>2</sup>, максимальная – до 563–742 Дж/м<sup>2</sup>, продолжительность устойчивой стратификации возрастает до 166–175 дней. Наиболее быстрый темп роста температуры воды, продолжительности и устойчивости летней стратификации для оз. Глубокое наблюдается при использовании данных климатических моделей IPSL-CM5A-LR и HadGEM2-ES, наименьший – при использовании данных модели GFDL. Темп роста поверхностной температуры воды составляет около 0,1 °С/10 лет при использовании данных модели GFDL и около 0,3 °С/10 лет при использовании трех других моделей.

Еще более стремительный нагрев и усиление стратификации наблюдается в оз. Глубокое при сценарии RCP 8.5 (непрерывное нарастание эмиссий парниковых газов в течение 21 века), хотя разброс между различными климатическими моделями увеличивается (рис.1). Использование климатических данных модели GFDL приводит к темпам прогресса, сравнимым с результатом моделирования сценария RCP 6.0 по данным других моделей: поверхностная температура воды увеличивается в среднем на 0,27 °С в 10 лет, продолжительность стратификации к 2099 году возрастает до 180 дней, средняя устойчивость – до 470 Дж/м<sup>2</sup>, максимальная – до 664 Дж/м<sup>2</sup>. Данные моделей HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR и MIROC5 вызывают приблизительно одинаковые изменения в термическом режиме озера: среднегодовая поверхностная температура воды увеличивается с темпом около 0,5 °С/10 лет, достигая к 2099 году 11,9–13,1 °С, максимальная годовая температура воды достигает почти 30 °С, средняя летняя устойчивость водной толщи увеличивается в 1,5–2 раза по сравнению с началом века, продолжительность устойчивой стратификации достигает 195–201 дня.



**Рис. 1.**

Средняя и максимальная за год температура воды (а) и продолжительность устойчивой летней стратификации (б) в оз.Глубокое в XXI веке при реализации наиболее негативных сценариев потепления климата RCP 8.5

Таким образом, анализ результатов моделирования показывает, что уже произошедшие с начала XXI века изменения в термическом режиме озера, касающиеся среднегодовой и максимальной температуры воды, устойчивости водной толщи во время стратификации, продолжительности безледного и стратифицированного периода, могут сохраняться вплоть до конца века даже при сценарии максимального сокращения выбросов. При наиболее неблагоприятных сценариях темпы увеличения поверхностной температуры воды могут достигать 0,5 °С/10 лет и более, количественные характеристики устойчивости стратификации к концу века могут возрасти в 1,5–2 раза, продолжительность периода устойчивой летней стратификации может увеличиться на месяц и более. Важно, что даже при значительном разбросе результатов, полученных при использовании данных различных климатических моделей, все они показывают достоверное сильное увеличение общего прогресса озера и усиление стратификации при любом сценарии, кроме наиболее жесткого сокращения глобальной эмиссии парниковых газов.

*Работа выполнена в рамках госбюджетной темы МГУ имени М.В. Ломоноова 121051400038-1 «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши».*

# Parameterization of the groundwater level and subsurface runoff in the land surface model

Bogomolov V.<sup>1,2,5,6,7</sup>, Dyukarev E.<sup>1,3,7</sup>, Stepanenko V.<sup>2,4,5,6,7</sup>, Ryazanova A.A.<sup>1,7</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Research Computing Center, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiisk, Russia

<sup>4</sup>Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>6</sup>Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

<sup>7</sup>Institute of Atmospheric Physics A. M. Obukhov RAS, Moscow, Russia

E-mail: [verminrus@mail.ru](mailto:verminrus@mail.ru)

An important uncertainty in forecasting climate change is played by the lack of knowledge about the state of the ground surface. The problems are mainly related to the determination of fluxes of energy, moisture and greenhouse gases from surface, temperature and humidity of surface layer, state of vegetation. In addition, accurate maps of the distribution of various types ecosystems are often lacking. The currents on the underlying surface are characterized by complex feedbacks between the atmosphere and terrestrial ecosystems. These connections have a pronounced regional specificity and a special character in the wetlands of Western Siberia. Wetlands ecosystems are included in some modern climate models as a special type of underlying surface. However, all the variety of wetlands is reduced to one type - the waterlogged type of soil. In fact, a combination of the prevailing vegetation cover (moss, grass, shrubs, trees), the level regime of wetland waters, and various thicknesses of peat deposits form specific types of wetland ecosystems. Different types of wetland ecosystems make significantly different contributions to the formation of heat and moisture fluxes at the surface-atmosphere interface.

The thermal diffusivity of peat deposits in bogs, especially during the period of freezing and thawing, depends on the processes of heat release or absorption associated with phase transformations of water. Therefore, the rate of heat propagation in the deposit is determined by the value of the effective thermal diffusivity coefficient, which directly depends on the correctness of reproduction.

*Acknowledgments. The acquisition of field data and their comparison with the data of model calculations was carried out with the support of the RSF project 22-47-04408, model calculations within the land surface model with the created parameterization were carried out with the support of the RSF project 21-71-30003.*

## Параметризация уровня грунтовых вод и подповерхностный стока в модели деятельного слоя суши

Богомолов В.Ю.<sup>1,2,3,4,5</sup>, Степаненко В.М.<sup>2,5,6</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>1,5,7</sup>, Рязанова А.А.<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>4</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>6</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>7</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

E-mail: [verminrus@mail.ru](mailto:verminrus@mail.ru)

Болотные экосистемы играют значительную роль в глобальном круговороте углерода, являясь источниками и стоками парниковых газов. Повышение приземной температуры воздуха и снижение уровня вод вызывает иссушение торфа, повышение температуры и аэрируемости, что способствует росту эмиссии парниковых газов. Гидрологический режим болот существенно определяет условия разложения органического вещества, с выделением преимущественно метана в переувлажнённых почвах и углекислого газа в аэрируемой зоне. В последние годы растёт количество эмпирических данных о больших значениях эмиссии метана с болот, водоёмов и водотоков суши, что особенно важно ввиду высокого парникового потенциала метана (29:1). Болотные экосистемы до сих пор представлены во



многих моделях деятельного слоя суши упрощённо, без возможности расчёта эмиссии в атмосферу парниковых газов и изменения гидрологического режима болот.

При этом уровень болотных вод относительно поверхности болота (УБВ) является не только основным показателем степени обводнённости болот, но и важной характеристикой водного режима болот: стока, испарения, влагосодержания, и т. д.

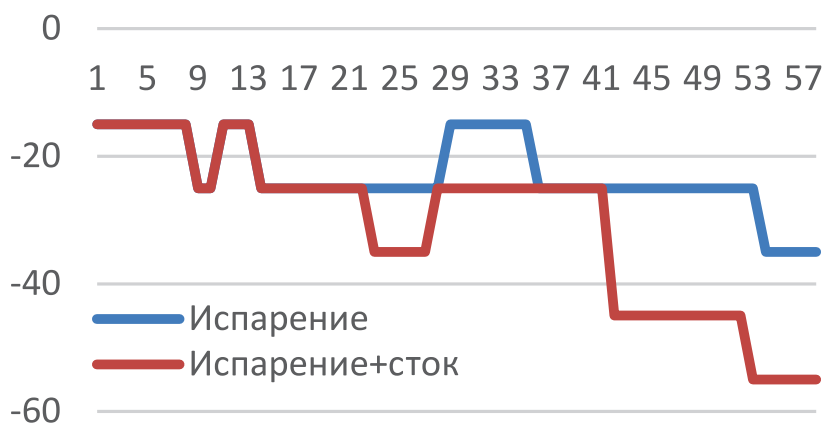
Как известно, изменения уровня воды на болотах определяются целым рядом факторов: осадками, испарением, стоком и водно-физическими свойствами деятельного слоя болот. Поскольку структура и водно-физические свойства деятельного слоя различных болотных микроландшафтов отличаются друг от друга, то даже при одних и тех же погодных условиях колебания уровней воды будут различаться если не характером хода уровня, то его амплитудой [1]. На данный момент в существующих моделях деятельного слоя существует несколько основных подходов воспроизведения УБВ. Первый как прогностическую функцию в зависимости от водного баланса на поверхности [2], или еще более эмпирическая зависимость [3]. Данное прогностическое определение уровня грунтовых вод позволяет более менее правильно определять слой максимального насыщения влаги для конкретных болот, на которых они проверялись или настраивались, пренебрегая правильностью воспроизведения стока, испарения и транспирации. В других же моделях, таких как JSBACH [4], PEAT-CLSM [5] или схема для болот в рамках CLASS [6] уровень грунтовых вод воспроизводится явно и зависит от водного баланса на поверхности, гидродинамических характеристик почвы и параметризации поверхностного стока и речного стока. В некоторых из них в частности CLASS включаются специфические типы поверхности присутствующие болотным экосистемам, такие как моховой покров, из-за пренебрежения которым модель переоценивает потоки явного и скрытого тепла на поверхности болота в засушливые периоды [7], что напрямую влияет на УБВ. Для решения этой проблемы более корректно описывается взаимодействие между мхом, почвой и атмосферой. Добавляется новый слой почвы толщиной 0,10 м над пористой органической почвой.

Но во всех этих случаях не учитывается специфическое строение олиготрофных болот и связанный с этим сток с центра болота на его периферию, то есть введение слагаемого в уравнении для влаги зависящего от пространственных масштабов болотной экосистемы (в случае, если мы подразумеваем болота как под сеточный компонент ячейки модели деятельного слоя суши). Попытки такого учета есть в работе [1] где моделируются определённые ключевые гидрологические процессы для не осушенных торфяников в частности для олиготрофных болотах. Но в данной работе все остальные процессы, такие как фазовые переходы, транспирация и т.д. параметризуются или вообще пренебрегаются.

В настоящем работе ставится задача развития новых параметризаций термодинамических, гидрологических процессов для болотных экосистем, как составляющих компонент модели деятельного слоя суши.

Научная новизна новой параметризации процессов гидротермического цикла болотных экосистем для моделей деятельного слоя суши заключается в комплексной оценке процессов в болотных экосистемах на примере территории Западной Сибири, включающей всестороннее изучение факторов, влияющих на термовлажностный режим; в частности, предложена и калибрована на натурных данных оригинальная параметризация бокового стока жидкой влаги в торфяной залежи для модели деятельного слоя суши, в которой явно учтена типичная форма поверхности олиготрофных болот. Новая параметризация описывает горизонтальный сток в торфяной залежи болота с центра на его периферию и регулирует колебание УБВ в рамках одномерного похода описания процессов в деятельном слое суши.

На рисунке 1 видно как на испарение влияет созданная параметризация горизонтального стока в рамках численных экспериментов с моделью деятельного слоя суши.



**Рис. 1.** Динамика влагосодержания в двух численных экспериментах, с параметризацией горизонтального стока и без.

Получение натуральных данных и их сравнение с данными модельных расчетов проведено при поддержке проекта РФФ 22-47-04408, модельные расчеты в рамках модели деятельного слоя суши с созданной параметризацией проведены при поддержке проекта РФФ 21-71-30003.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Под. Ред. С.М. Новикова – СПб. : БВМ, 2009. – 536 с.
2. C.E. Ballard, N. McIntyre a, H.S. Wheeler a,d, J. Holden b, Z.E. Wallage Hydrological modelling of drained blanket peatland. *Journal of Hydrology* 407 (2011) 81–93
3. Yurova, A., Tolstykh, M., Nilsson, M., and Sirin, A. (2014), Parameterization of mires in a numerical weather prediction model, *Water Resour. Res.*, 50, 8982– 8996
4. C.H. Reick, V. Gayler, T. Raddatz R. Schnur and S. Wilkenskjeld JSBACH 3.1, the land component of ECHAM 6 Max Planck Institute for Meteorology D-20146 Hamburg, Germany 2015 p 193
5. Bechtold M., De Lannoy G., et al PEAT-CLSM: A Specific Treatment of Peatland Hydrology in the NASA Catchment Land Surface Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 2019 10.1029/2018MS001574.
6. Wu, Y., Verseghy, D. L., and Melton, J. R.: Integrating peatlands into the coupled Canadian Land Surface Scheme (CLASS) v3.6 and the Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM) v2.0, *Geosci. Model Dev.*, 9, 2639–2663
7. Comer, N. T., Lafleur, P. M., Roulet, N. T., Letts, M. G., Skarupa, M., and Verseghy, D.: A test of the Canadian Land Surface Scheme (CLASS) for a variety of wetland types, *Atmos.-Ocean*, 38, 161–179, 2000.

## СЕКЦИЯ 8

Экстремальные  
климатические  
явления,  
региональные риски  
и социо-  
экономические  
последствия

## SESSION 8

Extreme Climatic  
Events, Regional Risks  
and Socio-economic  
Impacts

## Digital twin for environment

Viazilov E.D.

RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

E-mail: [vjaz@meteo.ru](mailto:vjaz@meteo.ru)

Environmental data are large, complex and diverse in structure, heterogeneous and distributed; exist on different temporal and spatial scales of generalization. To study climate change, impacts of disasters on the population and industrial enterprises, an interdisciplinary approach based on a single source of data is needed. In today's world, data must be available for analysis no matter where it is located. The prospect for the development of using integrated data is them the widespread applying in various types of models and the creation of a digital twin (DT) not only for the environment, but also with the inclusion of additional information. DT is a digital model of a specific physical object or process with connected datasets that provides convergence between physical and virtual states at an appropriate synchronization rate (standard ISO 23247).

Creating digital copies of real physical objects, the state of the environment of a particular region, geographical or social object (water object, country, and federal subject) allows to simulate main stages of the life cycle of enterprises (planning, design, construction, exploitation and modernization); predict weather conditions, climate change. The use of DT for organizing users service requires the use of a wide range of data [2] – operational, observed, prognostic, climate generalizations, and information on the state of serviced enterprises, reflecting the current economic, social, technical, economic and organizational situation at enterprises. In this case, using the DT, it is possible to simulate possible impacts on various objects, assess the possible damage at a particular level of danger, calculate the cost of preventive actions and optimize decision-making processes taking into account the available information.

Physically, the DT is a new type of database that helps in the development and testing of models, better informs enterprises heads about the environmental impacts on enterprises, the population, and also allows optimizing decision to reduce or prevent these impacts.

Observational data will be constantly updated in the DT and used both for predicting climate change, earth evolution, and for assessing the impact of the environment on enterprises activities. For DT development it is necessary to integrate, in addition to environmental observations, data on human activities. The DT should help to assess the impact of the environment on objects of the economy. In this case, DTs of enterprises are used. DT describes the real cause-and-effect relationships between productions, economic, financial, organizational

indicators of the enterprise and external environmental impacts. DTs of new objects during the design period should be tested on DT of the environment in the region where they will be operated.

From the point of view of users, DT is a database, the work with which goes through a single user interface. This makes it possible to collect and analyze data on environmental impacts on various enterprises and their activities, and also creates opportunities for modeling and predicting the operation of objects in various conditions and modes. Experiments with DT can be carried out long before the passage of the disasters. DT tools should be models of impacts, damage assessment, calculation of the cost of preventive actions, as well as modeling the consequences of decision-making.

DT in the field of environment is a transition to a new level of abstraction of data processing. In DT the basic unit of data management should be the separate object, the structure of which is standardized at international, or departmental, or national levels. Object storage is an architecture in which data is managed on level of objects. The wide exchange of data and metadata requires the standardization of object properties. DT must be created in such a way that any external system can obtain the necessary data slice without human intervention.

*The study was conducted as part of the Caspian Sea Digital Twin program, implemented as part of the UNESCO IOC activities related to the UN Decade of Ocean Sciences for Sustainable Development (2021-2030).*

## Цифровой двойник для окружающей среды

**Вязилов Е.Д.**

ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Россия

E-mail: [vjaz@meteo.ru](mailto:vjaz@meteo.ru)

Данные по окружающей среде являются большими, сложными и многообразными по структуре, разнородными и распределенными по хранению, существуют в разных временных и пространственных масштабах обобщения. Для исследования последствий изменения климата, оценки воздействий опасных явлений на население и промышленные предприятия необходим междисциплинарный подход, основанный на едином источнике данных. Такие возможности открываются благодаря интеграции данных из различных доменов.

В современном мире данные должны быть доступны для анализа независимо от того, где они находятся. Интеграция данных, как правило, производится на основе имеющихся баз и массивов данных без учета всех задач их использования. Перспективой развития использования интегрированных данных является их широкое применение в различного рода моделях и создание цифрового двойника (ЦД) не только по окружающей среде, но и с включением в него дополнительной информации [1, 2].

Существует несколько определений термина ЦД. Наиболее общее определение дано в стандарте ISO 23247. «ЦД – это цифровая модель конкретного физического объекта или процесса с подключенными наборами данных, которая обеспечивает конвергенцию между физическим и виртуальным состояниями с соответствующей скоростью синхронизации». С помощью ЦД можно провести моделирование решений и выбрать оптимальный вариант перед тем, как приступить к его реализации. ЦД позволяет работать с одной и той же информацией всем участникам выполнения бизнес процессов предприятий, зависящих от сложившихся условий окружающей среды.

Создание цифровых копий реальных физических объектов, состояния окружающей среды отдельного региона, географического или социального объекта (водный объект, страна, субъект федерации) позволит моделировать реализацию основных этапов жизненного цикла объектов: планирование, проектирование, строительство, эксплуатацию и модернизацию предприятий; прогнозировать погодные условия, изменение климата. Для описания ЦД следует оцифровать как статические (метаданные), так и динамические свойства объектов (изменение их во времени). Создание ЦД требует, чтобы информационные системы сбора, доведения и применения данных об окружающей среде могли обмениваться данными и информацией в режиме реального времени.

Использование ЦД для организации гидрометеорологического обеспечения потребителей требует привлечения более широкого спектра данных [3] - оперативных наблюдаемых, прогностических, климатических обобщений, показателей о состоянии обслуживаемых промышленных объектов, отражающих сложившуюся на объекте экономическую, социальную, технико-экономическую и организационную обстановку. ЦД в этом случае позволяет провести моделирование возможных воздействий на различные объекты, дать оценку возможного ущерба при том или ином уровне опасности, рассчитать стоимость превентивных мероприятий и оптимизировать бизнес процессы принятия решений с учетом имеющейся комплексной информации.

Физически ЦД – это база данных нового типа, которая поможет в разработке и тестировании моделей и лучше информирует руководителей о воздействиях окружающей среды на промышленные объек-



ты и население, а также позволит оптимизировать решения для уменьшения или предотвращения этих воздействий. С помощью ЦД могут быть реализованы следующие функции:

- предоставление цифровой копии свойств конкретных объектов и или процессов;
- отображение объектов и процессов на экране компьютера в виде изолиний значений параметров, областей их экстремальных значений, линий фронтов;
- описание текущего состояния, условий функционирования, поведения, местоположения и других свойств объектов ЦД;
- агрегация, анализ и управление данными;
- моделирование системы мониторинга диагностики оборудования и других элементов управления предприятием с учетом состояния окружающей среды.

Данные наблюдений в ЦД будут постоянно обновляться. Цифровые дневники новых объектов в период проектирования должны тестироваться на ЦД окружающей среды по району, где они будут эксплуатироваться. Для реализации ЦД необходимо:

- создать единые правила формирования состава, структуры, типов хранения и обозначения свойств различных объектов, включенных в ЦД;
- подготовить цифровые формализованные паспорта предприятий, определить основные показатели уязвимости объекта;
- разработать алгоритмы и модели для расчета показателей уязвимости предприятий.

Для создания ЦД в области окружающей среды необходимо развитие цифровой платформы для сквозной автономной обработки данных об окружающей среде в виде конвейера «от наблюдения до принятия решений». Это позволяет собирать и анализировать данные о воздействиях окружающей среды на различные объекты и их деятельность, а также создает возможности для моделирования и прогнозирования работы объектов в различных условиях и режимах. Важно, что эксперименты с ЦД можно проводить задолго до прохождения ОЯ. Развитие ЦД поможет создать новые инструменты по прогнозу различных гидрометеорологических явлений, оценке последствий. Инструментами ЦД должны стать модели прогноза состояния окружающей среды, воздействий, оценки ущерба, расчета стоимости превентивных мероприятий, а также средства моделирования последствий принятия решений.

Для ЦД, кроме свойств окружающей среды, необходима социально-экономическая, технологическая, организационная и другая информация по объектам. Организационная информация включает информацию для управления гидрометеорологическим обеспечением потребителей. Это сведения об объектах, зависящих от условий среды; нормативная правовая информация; сведения о системе обслуживания; результаты учета выдачи и передачи штормовых предупреждений об ОЯ; описания ситуаций с прогнозом воздействий ОЯ и рекомендациями для принятия решений. Для ЦД важными являются сведения о применяемых экономико-математических моделях; сведения о материалах, грузах; детальные технические характеристики объектов с указанием размеров и других свойств; сведения прогностических органов; методах прогнозов; выпускаемой информационной продукции; экспертах; плановые показатели предприятий. Техничко-экономическая информация включает сведения об объектах, определяет характеристики опасности для объекта. Социальная информация включает место жительства, работы населения, расположение мест скопления людей (театры, кинотеатры, вокзалы, универмаги, др.).

Данные для ЦД возникают на этапе проектирования, строительства и эксплуатации предприятий, и, меняясь во времени, сопровождают его на протяжении всего жизненного цикла. Базовыми основами для создания и развития ЦД являются:

- интеграция данных;
- наличие метаданных об источниках интегрируемых данных;
- обеспечение совместимости интегрированных данных по единству наименований атрибутов, использованию стандартизованных классификаторов;
- связывание данных из различных источников о рассматриваемом объекте.

Базовыми элементами ЦД должны стать средства интеграции распределенных и неоднородных данных, которые позволяют быстро настраивается на новые объекты путем развития единого словаря параметров, общих кодов и классификаторов; включать оперативные наблюдаемые, прогностические и климатические данные по окружающей среде; подключать необходимые данные из других предметных областей. На их основе можно будет развивать приложения для прогноза последствий изменений климата на деятельность предприятий.

При создании ЦД в области окружающей среды необходимо перейти на новый уровень абстракции хранения и обработки данных. Учитывая необходимость интеграции множества различных данных из различных предметных областей в ЦД основной единицей управления данными должен стать минимальный объект мира, структура и свойства которого должна быть максимально стандартизована на международном, или национальном, или ведомственном, или локальном уровнях. Объектное хранение представляет собой архитектуру, в которой данными управляют на уровне объектов. Каждый объект содержит метаданные или данные, глобально каждый объект имеет уникальный идентификатор. Все свойства каждого объекта, включая множественные, должны храниться в одной таблице.



ЦД должен быть создан таким образом, чтобы любая внешняя система могла получить необходимый срез данных без участия человека. Важно, чтобы ЦД отражал складывающиеся ситуации на промышленном объекте и в окружающей среде, то есть данные должны постоянно актуализироваться, проверяться на корректность и быть доступными в режиме реального времени.

*Благодарности. Исследование проведено в рамках проекта «Цифровой двойник Каспийского моря», осуществляемый в рамках деятельности МОК ЮНЕСКО, связанной с Десятилетием наук об океане в интересах устойчивого развития ООН (2021–2030 гг.).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57700.37 - 2021. «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».
2. Bauer P., Stevens B. & Hazeleger W. A digital twin of Earth for the green transition. J. "Natural Climate Change". 2021. Vol. 11. pp. 80–83. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.
3. Viazilov E. New Paradigm of Hydrometeorological Support for Consumers. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1363. Kohei Arai Editor. *Advances in Information and Communication Proceedings "Future of Information and Communication Conference (FICC)"*. 2021. Vol. 1. Publish House "Springer". pp. 171-181. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-73100-7>, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73100-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73100-7_13).

## Impact of Moscow city on intense summer precipitation

Yarinich Yu.I.<sup>1,2,3</sup>, Varentsov M.I.<sup>2,3,4</sup>, Platonov V.S.<sup>1</sup>, Stepanenko V.M.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: [julia.yarinich@yandex.ru](mailto:julia.yarinich@yandex.ru)

Large cities are especially vulnerable to heavy precipitation events, which can lead to significant economic losses. This topic is relevant both due to the observed increase in the frequency of dangerous weather phenomena including extreme precipitation [Ye et al., 2017; Chernokulsky et al., 2019] in mid-latitudes in general, and due to the previously noted intensification of deep atmospheric convection and associated rainfall over urban areas [Han et al., 2014]. Despite the numerous studies, the magnitude of urban effects on intense precipitation and their physical drivers are not fully understood yet.

In this study, we investigated urban effects on intensity and frequency of summer precipitation events exemplified by Moscow megacity, Russia. Previously, an increase of mean summer precipitation amount by 10% over Moscow was revealed according to COSMO-CLM simulations for multiyear period [Varentsov et al., 2018]. Here we used long-term (1988–2020) observations timeseries at urban and rural weather stations. Statistical analysis was performed separately for categories of precipitation intensity. Moreover, we estimated atmospheric convective instability and frontal parameters based on ERA5 reanalysis data in order to classify precipitation cases according to the synoptic situation.

Eventually, we obtained that mean seasonal precipitation sum among urban stations is higher than mean sum among rural stations on 5.3%. The influence of the Moscow megacity is positive and the highest in cases when daily precipitation sum is between 20 and 40 mm. For both weak (1 – 5 mm) and extreme (> 60 mm) precipitation mean repeatability of such cases in Moscow is lower than for the rural stations. The influence of the city is higher in unstable atmosphere with weak mean winds and high water vapor content.

#### REFERENCES:

1. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I. I., Semenov V. A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environmental Research Letters*. – 2019. – T. 14. – №. 4. – C. 045001.
2. Han J.Y., Baik J.J., Lee H. Urban impacts on precipitation // *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 2014. V. 50. № 1. P.17–30.
3. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia // *Atmosphere*. 2018. V. 9. № 2. P. 50.
4. Ye H., Fetzer E. J., Wong S., Lambriqtsen B. H. Rapid decadal convective precipitation increase over Eurasia during the last three decades of the 20th century // *Science Advances*. – 2017. – T. 3. – №. 1. – C. e1600944.

# Влияние Москвы на интенсивные летние осадки

Ярынич Ю.И.<sup>1,2,3</sup>, Варенцов М.И.<sup>2,3,4</sup>, Платонов В.С.<sup>1</sup>, Степаненко В.М.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>4</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

E-mail: julia.yarinich@yandex.ru

Возрастающая изменчивость погодных условий, сопутствующая потеплению климата, наблюдаемые тенденции к повышению значения влагосодержания [Ross, Elliott, 2001] и неустойчивости атмосферы [Riemann-Campe et al., 2009] приводят к возрастанию повторяемости опасных погодных явлений, связанных с глубокой конвекцией [Ye et al., 2017]. Это, в свою очередь, увеличивает риски природно-техногенных катастроф, социального и экономического ущерба, особенно значительного в крупных городах. На фоне увеличения повторяемости опасных конвективных явлений растет и актуальность задачи исследования учета на практике (в том числе в задачах прогноза погоды) влияния городов на подобные процессы.

Основной целью работы является оценка влияния урбанизированных территорий на усиление конвективных процессов и связанных с ними осадков по данным долгопериодных наблюдений на метеорологических станциях Московского региона.

## МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

Наиболее полные ряды данных наблюдений суточных сумм осадков были собраны по 27 метеостанциям Московского региона: из них 6 метеостанций находятся в пределах 16-километрового радиуса от центра Москвы (МГУ, ВДНХ, Балчуг, Тушино, ТСХА, Немчиновка), а 21 метеостанция является фоновой для региона (Клин, Дмитров, Переславль-Залесский, Александров, Волоколамск, Можайск, Ново-Иерусалим, Подмосковная, Павловский Посад, Петушки, Черусти, Малоярославец, Наро-Фоминск, Серпухов, Коломна, Кашира, Рязань, Гагарин, Старица, Юрьев-Польский, Тверь). Оценка влияния города проводилась по характеристике сезонных, месячных и суточных сумм осадков для периода с мая по сентябрь с 1988 по 2020 год по относительной разности среднего значения суммы осадков по городским ( $P_{\text{город}}$ ) и фоновым ( $P_{\text{фон}}$ ) метеостанциям:

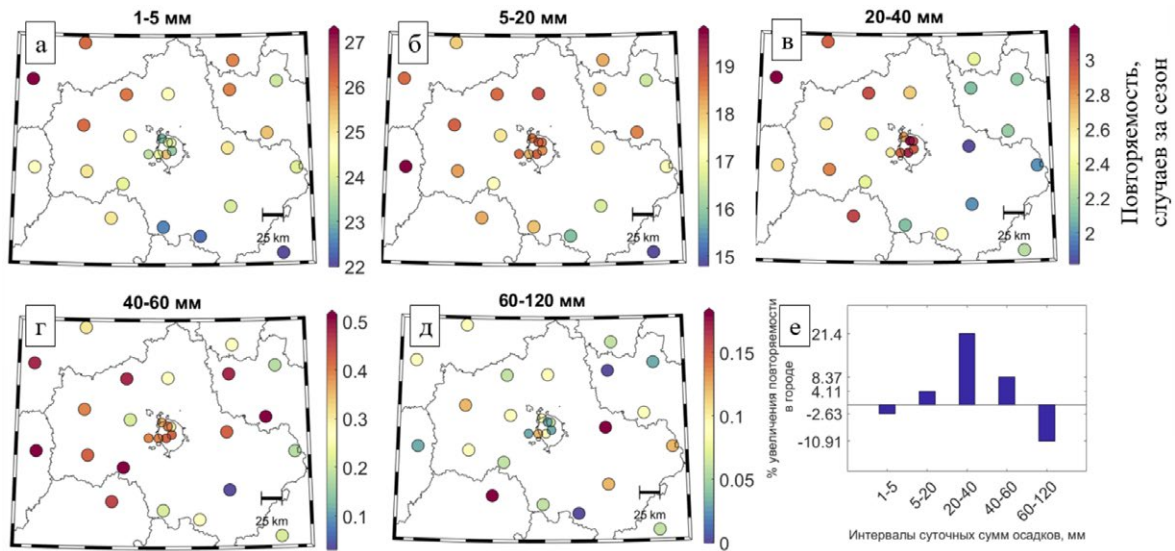
$$\Delta P = \frac{P_{\text{город}} - P_{\text{фон}}}{P_{\text{фон}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Оценка условий атмосферы, сопровождающих случаи выпадения осадков в Московском регионе, была проведена путём анализа данных реанализа ERA5. При этом использовались как непосредственно данные реанализа (модуль скорости ветра V10, м/с), так и производные параметры атмосферы, такие как потенциальная энергия конвекции MLCAPE [Riemann-Campe et al., 2009], интегральное влагосодержание атмосферы PW, фронтальный параметр TFP [Huber-Pock, Kress, 1989] и индекс влажности NIX [Huber-Pock, Kress, 1989], рассчитанные в рамках данной работы. Повышенные или пониженные значения данных параметров атмосферы в отдельности или в совокупности позволяют проследить степень влияния различных городских эффектов [Oke et al., 2017]: термодинамических (остров тепла и связанные с ним мезомасштабные циркуляции), динамических (влияние шероховатости на крупномасштабный поток и формирование мезомасштабных циркуляций) и микрофизических (влияние аэрозолей). В качестве пороговых значений для разделения состояний атмосферы были выбраны квантили уровня 0.75 по выборке данных за исследуемый период для всех индексов, кроме TFP и NIX – для них пороговые значения были взяты из литературы [Huber-Pock, Kress, 1989]. В качестве значений индексов для каждых конкретных суток брались максимальные значения на площади, ограниченной приближенными координатами крайних точек Москвы (55.5 – 56 ° с.ш., 37.25 – 38 ° в.д.), и максимальное (для MLCAPE, PW, TFP, NIX) или среднее (для V10) значение по времени за сутки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В пространственном распределении сезонных сумм осадков значимое на уровне 80% увеличение в среднем по городским метеостанциям относительно фоновых составляет 16% и наблюдается в августе, в остальные месяцы колеблется в пределах значений 1.6 – 7% и не является статистически значимым. В среднем за сезон (май – сентябрь) превышение в городе составляет 5.3 %. Схожие оценки из литературы показывают превышение 3.4 % [Стулов, 1993] и 10% [Григорова, 2005] в Москве относительно фоновых станций.

Показано, что наибольшая повторяемость в Москве относительно фоновых метеостанций наблюдается для случаев осадков средней интенсивности (20 – 40 мм за сутки); превышение составляет 22% (Рисунок 1). Осадки малой интенсивности (1 – 5 мм за сутки), напротив, в городе имеют меньшую повторяемость, нежели за его пределами (-2.6 %); аналогичная ситуация прослеживается для повторяемости экстремальных осадков (более 60 мм за сутки): в Москве они возникают реже на 11% относительно фона.



**Рис. 1.** Повторяемость осадков по градациям интенсивности суточных сумм (а – д), Относительное различие повторяемости суточных сумм осадков в среднем по городским станциям относительно фоновых в зависимости от градаций интенсивности (е).

Сильные ливневые осадки (более 12 мм за сутки) в Москве выпадают чаще в значительно неустойчиво стратифицированной атмосфере ( $MLCAPE \geq 328$  Дж/кг) с невысокими фоновыми скоростями ветра ( $V10 < 4.2$  м/с), нежели при слабонеустойчивой стратификации или значительной средней скорости ветра (Таблица 1). Интересно, что в отдельности показатели неустойчивости и скорости ветра, вероятно, могут влиять несколько иначе: в 511 случаях с высокими фоновыми скоростями ветра ( $V10 \geq 4.2$  м/с) среднее превышение повторяемости интенсивных осадков в городе оказалось выше, нежели при слабом ветровом потоке. Для атмосферы с высоким интегральным влагосодержанием ( $PW \geq 31$  кг/м<sup>2</sup>) влияние города проявилось заметно более значимо, чем для случаев с низким содержанием водяного пара. Для выраженных фронтальных зон ( $TFP > 2.5$  &  $HIX \geq 0.7$ ) превышение повторяемости интенсивных осадков в городе оказалось немного более заметно, чем для размытых или вторичных фронтов, либо внутримассовых процессов.

**Таблица 1.** Относительная разность повторяемости суточных сумм осадков в среднем по городским станциям относительно фоновых в зависимости от синоптической ситуации ( $\Delta P$ ).

Синоптическая ситуация	Предикторы	$\Delta P$ , %	Кол-во случаев
Условия для влияния/отсутствия влияния термодинамических эффектов города			
Значительная неустойчивость и слабый фоновый поток	$MLCAPE \geq 328$ & $V10 < 4.2$	15.81	429
Слабая неустойчивость / значительный фоновый поток	$MLCAPE < 328$   $V10 \geq 4.2$	9.87	1209
Условия для влияния/отсутствия влияния динамических эффектов города			
Значительный фоновый поток	$V10 \geq 4.2$	16.72	511
Слабый фоновый поток	$V10 < 4.2$	7.52	1127
Условия для влияния/отсутствия влияния аэрозолей			
Значительное влагосодержание	$PW \geq 31$	18.68	754
Малое влагосодержание	$PW < 31$	4.73	884
Условия для влияния / отсутствия влияния комплексного эффекта города			
Выраженные фронтальные зоны	$TFP > 2.5$ & $HIX \geq 0.7$	12.57	429
Размытые/вторичные фронты, внутримассовая конвекция	$TFP \leq 2.5$   $HIX < 0.7$	11.17	1209
<b>Все случаи</b>		<b>11.0</b>	<b>1638</b>



Для выборки случаев, когда максимальное значение суточной суммы осадков на какой-либо метеостанции Московского региона составляло более 12 мм в сутки (квантиль 0.95 в среднем по региону). Синоптическая ситуация оценивалась на основе индексов, рассчитанных по данным реанализа ERA5: «Предикторы».

*Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых российских ученых – кандидатов наук МК-5988.2021.1.5*

*Благодарности. Авторы выражают благодарность Дроновой Елене Александровне за предоставление данных о суточных суммах осадков; Сергею Геннадьевичу Давлетшину за предоставление данных ВНИИГМИ-МЦД по расширенному каталогу станций; Мельничуку Александру Юрьевичу и Викулину Владимиру Евгеньевичу за предоставление данных об осадках по метеостанциям Московского региона и за предоставление доступа к архиву синоптического анализа из архивов УГМС России.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорова Е. С. Мезоклиматические особенности развития зон активной конвекции и конвективных опасных явлений погоды в мегаполисе : дис. – СПб. : автореф. дис... канд. геогр. наук, 2005.
2. Стулов Е.А. Влияние города Москвы на усиление летних осадков // *Метеорология и гидрология*. 1993. № 11. С. 34–41.
3. Huber-Pock F., Kress C. An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products // *Meteorology and Atmospheric Physics*. – 1989. – Т. 40. – №. 4. – С. 170-180.
4. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509
5. Riemann-Campe K., Fraedrich K., Lunkeit F. Global climatology of convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis // *Atmospheric Research*. – 2009. – Т. 93. – №. 1-3. – С. 534-545.
6. Ross R. J., Elliott W. P. Radiosonde-based Northern Hemisphere tropospheric water vapor trends // *Journal of Climate*. – 2001. – Т. 14. – №. 7. – С. 1602-1612.
7. Ye H., Fetzer E. J., Wong S., Lambriqtsen B. H. Rapid decadal convective precipitation increase over Eurasia during the last three decades of the 20th century // *Science Advances*. – 2017. – Т. 3. – №. 1. – С. e1600944.

## Joint anomalies in the atmospheric and lithospheric processes in the Tomsk region

**Cheredko N.N., Malyshkov S.Yu., Gordeev V.F., Tartakovsky V.A., Kabanov M.M.**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
 E-mail: atnik3@rambler.ru

The climate system of the Earth is characterized by a lot of physical quantities (elements of the system). They interact with each other and with the environment constantly. As a result, composite effects may occur. The analysis of such effects can contribute to finding signs and predictors of climate change. Also, the problem of identifying the contribution of various factors to climate change can be solved. In this paper, we study consistent anomalies in the dynamics of weather processes and in the dynamic series of the earth's natural pulsed electromagnetic field (ENPEMF). This refers to ENPEMF of lithospheric origin.

Objective information about the development of natural and climatic processes and the risks of their reaching critical thresholds is important. Such information is one of the bases for making managerial decisions at the regional level. The IMCES SB RAS develops a complex for monitoring the precursors of the stress state of regional geosystems. Continuous measurements of air temperature and humidity, as well as lithospheric potential are provided. IMCES SB RAS created original recorders for measuring the lithospheric potential, developed methods for adjusting the meters to increase the share in the total pulse flow of precisely lithospheric origin.

In the Tomsk region, two automatic autonomous measuring systems are located in the villages of Kireevsk and Polynyanka. The distance between these villages is 100 km. We have at our disposal data from these polygons for the period 2018-2021. In addition, daily and urgent data from the meteorological stations Tomsk and Bakchar were involved. They are located closest to the measuring ranges. These data are taken from the

open website [<http://aisori.meteo.ru>]. We have expanded the possibilities of analysis. To do this, comparative measurements of ENPEMF are carried out at each test site using two channels of predominant reception: North-South (H1) and West-East (H2). We analyzed data from two polygons and from different registration channels.

The analysis showed that for most of the period under consideration, the time course of ENPEMF was consistent. The correlation of impulses H1 and H2 at the same polygon with each other and with the same name at different polygons is on average more than 0.8. Apparently, such a consistency of the time course is a consequence of the global modulation of the electromagnetic field by large-scale processes associated with the rotation of the Earth around its axis and around the Sun. In some sections of the time course, the signals from different directions and from different polygons are mismatched. These anomalies may be associated with local and regional dynamic processes in the lithosphere. Also, they may be the result of changes in the conditions for the propagation of electromagnetic waves in the earth-ionosphere waveguide in the area of the measuring point. In this case, one can expect anomalies in the time course of the characteristics of the state of the surface layer of the atmosphere in the given region. These anomalies in time may be with some shift. Intervals of mismatches in the time course of ENPEMF were investigated in connection with weather situations during these periods. Most of the cases of reduced ENPEMF correlations are associated either with extreme events of the temperature regime at the considered stations, or with the processes of sharp cooling-warming. Some of the cases are consistent with precipitation. Pronounced violations of the consistency of ENPEMF are observed more often in the cold half of the year.

Consistency of atmospheric and lithospheric disturbances in the region was found. Probably, the causes of significant anomalies in the dynamics of meteorological and lithospheric events are the same. Further study of their nature and implementation mechanisms in the regional geosystem is of both scientific and practical interest.

## Совместные аномалии в атмосферных и литосферных процессах в Томской области

Черedyкo Н.Н., Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Тартаковский В.А., Кабанов М.М.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [atnik3@rambler.ru](mailto:atnik3@rambler.ru)

**К**лиматическая система Земли представляет собой результат непрерывного взаимодействия между собой и с окружающей средой большого числа физических величин, элементов системы. Анализ возникающих вследствие этого композитных эффектов может способствовать нахождению признаков и предикторов изменения состояния климата, как в глобальном, так и в региональном масштабах, в том числе, решению проблемы дифференциации откликов на внутренние и внешние по отношению к геосистеме воздействия.

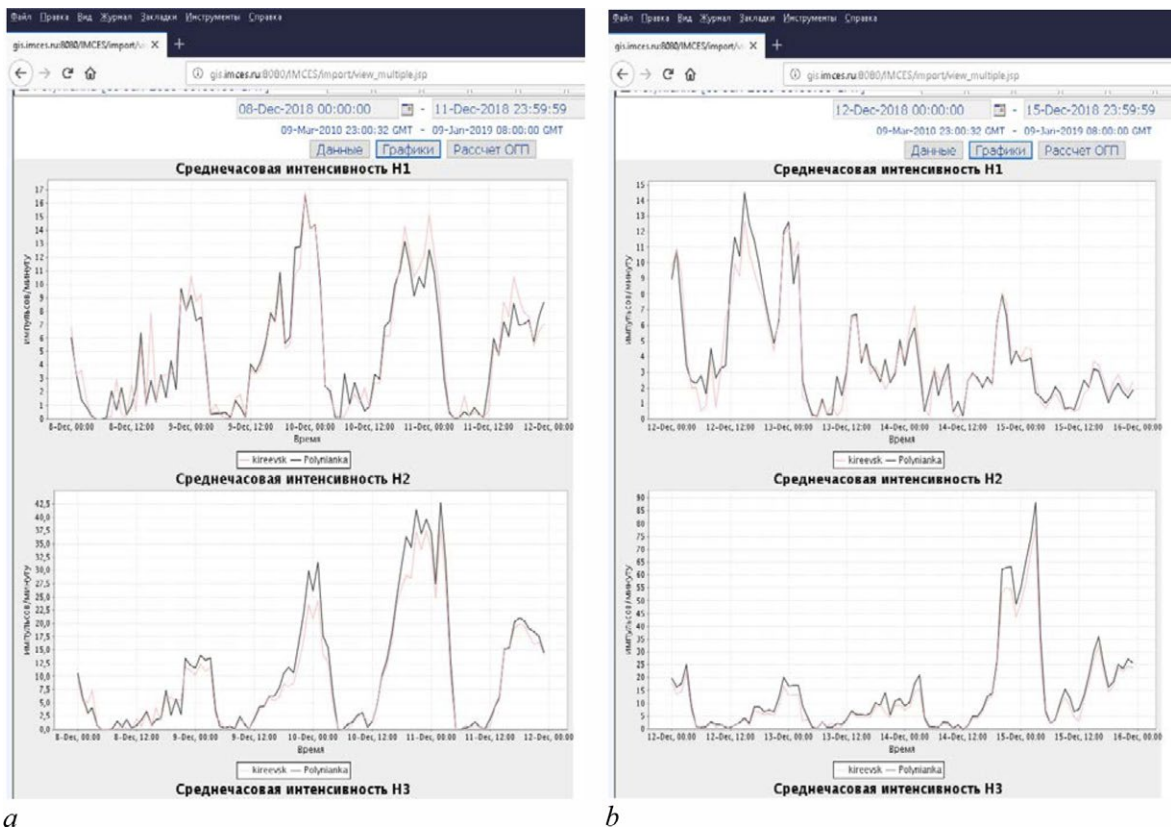
В данной работе исследуются совместные аномалии в динамике погодных процессов и во временных ходах естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), приуроченных к геодинамике литосферы. Объективная информация о развитии природно-климатических процессов и рисках достижения их характеристиками критических порогов является одним из оснований для принятия управленческих решений на региональном уровне. Организация и развитие мониторинговых систем на основе отечественной инструментально-аналитической базы для получения такой информации, как никогда, актуальна. Такой комплекс развивается в ИМКЭС СО РАН в целях мониторинга предвестников напряженного состояния региональных геосистем. Обеспечиваются непрерывные измерения температуры и влажности воздуха, а также литосферного потенциала. Для измерения литосферного потенциала в ИМКЭС СО РАН найдено оригинальное аппаратно-методическое решение регистрации ЕИЭМПЗ [1], разработаны методы настройки измерителей для увеличения доли в общем потоке импульсов именно литосферного происхождения [2].

Материалами для анализа послужили данные автоматических автономных измерительных комплексов на двух полигонах Томской области, разнесенных на 100 км: Киреевск, Польшанка, за 2018-2021 гг. Комплексы включают в себя многоканальные геофизические регистраторы для измерения ЕИЭМПЗ, а также измерители основных метеопараметров. Кроме того, были привлечены суточные и срочные данные с метеостанций Томск и Бакчар, ближайших к автоматическим измерительным полигонам, взятые на сайте ВНИИГМИ-МЦД [<http://aisori.meteo.ru>].

Аномалии в импульсных электромагнитных полях могут возникать при изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов и при изменении воздействия разной природы и масштабов на источники полей. Предполагаем, что измерения на разнесенных полигонах позволят дифферен-

цировать влияние на динамику ЕИЭМПЗ локальных и внешних крупномасштабных факторов, исследовать особенности отклика на них, в том числе, с учетом локальных и региональных атмосферных условий. Для расширения возможностей анализа на каждом из полигонов организованы сравнительные измерения ЕИЭМПЗ по двум каналам преимущественного приема: Север – Юг (Н1) и Запад-Восток (Н2).

Анализ данных показал, что, несмотря на значительное расстояние между полигонами и на разные каналы преимущественного приема большую часть рассмотренного периода временной ход ЕИЭМПЗ на них согласован (рис. 1а). Корреляция импульсов Н1 и Н2 на одном полигоне между собой и одновременно на разных полигонах составляет в среднем более 0,8. Такая согласованность временного хода, по-видимому, является следствием глобальной модуляции электромагнитного поля крупномасштабными процессами, связанными с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Тем не менее, на некоторых участках временного хода сигналы с разных направлений и с разных полигонов рассогласованы (рис. 1б). Эти аномалии могут быть связаны с локальными и региональными динамическими процессами в литосфере [1]. Также, они могут являться следствием изменения условий распространения электромагнитных волн в волноводе земля-ионосфера в районе измерительного пункта. Следовательно, в таких случаях согласованные по времени или с некоторым временным сдвигом возмущения должны формироваться и в характеристиках состояния приземного слоя атмосферы в данном районе. Интервалы рассогласований временного хода ЕИЭМПЗ были исследованы в связи с погодными ситуациями в эти периоды.



**Рис. 1.** Временной ход ЕИЭМПЗ по данным измерителей на полигонах Киреевск и Поляннка по двум каналам преимущественного приема: Н1 – Север-Юг, Н2 – Запад-Восток. *а* – за период с 8 по 12 декабря 2018 г.; *б* – за период с 12 по 15 декабря 2018 г. Красной линией показан временной ход импульсов на полигоне в п. Киреевск, темной линией – в п. Поляннка.

Для аномальных интервалов во временном ходе ЕИЭМПЗ первоначально были проанализированы условия атмосферной циркуляции, определяющие главным образом локальную погоду. Рассогласования временного хода ЕИЭМПЗ на разных пунктах и с разных направлений преимущественного приема наблюдались наиболее часто при меридиональных типах циркуляции по классификации Б.Л. Дзердзевского [3], наиболее часто при развитии элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) меридиональной южной группы. При таких типах циркуляции в Северном полушарии отмечаются высокие барические градиенты, что формирует интенсивные меридиональные атмосферные процессы, и, как следствие, в различных регионах возникают аномалии, вплоть до проявления метеорологических экстремумов, следствием которых могут быть разного рода природные и технологические катастрофы [3, 4], а также активация экзогенных событий в различных регионах России [5].

В более 60% случаев снижение согласованности наблюдаются при меридиональном южном типе циркуляции (ЭЦМ 13з и 13л), в среднем в 24% случаев снижение согласования наблюдалось при меридиональной северной группе циркуляции. С теми же типами циркуляции, примерно в таком же соотношении, связаны периоды, когда в летний сезон года несколько дней подряд отмечаются низкие значения интенсивности импульсного потока по разным каналам преимущественного приема.

Выраженные нарушения согласованности ЕИЭМПЗ отмечаются чаще в холодное полугодие. Ранее нами показано [4], что для Томской области наиболее характерны и несут существенные социальные и экономические риски экстремальные температурные события, также, в зимний период. Для погодных условий это связано с различием мощности циркуляционных процессов над регионом в зимний и летний сезоны.

Большая часть случаев пониженных корреляций ЕИЭМПЗ связаны либо с экстремальными событиями температурного режима на рассмотренных станциях, либо с процессами резких похолоданий – потеплений. Часть случаев согласованы с выпадением осадков. Экстремальными событиями температурного режима в холодный период года считаются явления: «низкие температуры» (НТ), «сильный мороз» (СМ) и «аномально холодная погода» (АХП). Азиатский максимум, определяющий погодные условия большей части зимы в Томской области, является наиболее мощным зимним центром действия атмосферы. Летом редко наблюдаются «высокие температуры» (ВТ). Они формируются вследствие развития устойчивого антициклона над Томской областью, часто в условиях его блокирования. Резкие потепления и похолодания в регионе связаны с прохождением фронтальных систем.

Вследствие ограниченного числа полигонов и периода измерения ЕИЭМПЗ на них на данный момент возможны только предварительные выводы, но обнаруженная согласованность атмосферных и литосферных возмущений в регионе, далеко от сейсмоактивных районов, поддерживает целесообразность дальнейших исследований. Вполне вероятно, причины существенных аномалий в динамике метеорологических и литосферных событий одни и те же. Исследование их природы и механизмов реализации в региональной геосистеме представляет и научный, и практический интерес.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Gordeev V.F, Malyshkov S.Yu, Shtalin S.G, Polivach V.I and Krutikov V.A. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 48. 012026. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012026.
2. Гордеев В.Ф., Малышков С.Ю., Крутиков В.А., Поливач В.И., Кабанов М.М., Капустин С.Н., Шталин С.Г., Пустовалов К.Н. Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. № 02. С. 105–109. DOI: 10.15372/AOO20220204.
3. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / отв. ред. А.Б. Шмакин. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
4. Волкова М. А., Чередыко Н. Н., Титовская А. А., Журавлев Г. Г. Изменения параметров экстремальности температурного режима на юге Западной Сибири в холодный период // *Труды ГГО*. 2019. Вып. 594. С. 120–136.
5. Мальнева И.В. Природные катастрофы, связанные с опасными геологическими процессами // *Жизнь Земли*. 2017. Т. 39, №1. С. 12–25.

## Extreme summer precipitation in Siberia in 2015–2021

Cheredko N.N.<sup>1</sup>, Volkova M.A.<sup>2</sup>, Kuzhevskaya I.V.<sup>2</sup>, Chursin V.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: atnik3@rambler.ru

There is an increase in anomalies of various geophysical parameters, an increase in the frequency, intensity and spatial scale of extreme weather events. This is of concern to scientists, businessmen and ordinary people, because it can lead to an increase in economic and social damage in various regions. Analysis of changes in the characteristics and conditions for the formation of extreme precipitation is important. They are formed unevenly in time and territory. Their analysis can help refine the methods for predicting such events, as well as the consequences of their impact on the regional economy and population.



The climate is continental in Western Siberia. Most of the precipitation falls on the warm half of the year. Most of this precipitation is torrential rain. We have studied extreme precipitation and the conditions of its formation according to the data of 200 meteorological stations in Siberia. We used data from storm warnings in the WAREP code provided by the Federal State Budgetary Institution "West Siberian UGMS" and daily data from the open database [meteo.ru]. We also used satellite remote sensing data. Cases with the following dangerous and unfavorable phenomena were considered: "heavy rain" and HH "very heavy rain". Their criteria are given in the relevant ruling document.

During the considered period of years, the maximum number of "heavy rain" events was observed at Raduzhny and Staritsa stations. These stations are located in the area of the rarefied water system of the Great Vasyugan swamp complex. Such conditions are one of the factors in the formation of the following dangerous and unfavorable phenomena in a given territory. They enhance convection. It was found that in the study area, the phenomena of "heavy rain" and "very heavy rain" were most often observed under the conditions of the formation of mesoscale convective complexes. In some cases, the considered events with extreme precipitation were observed when the mesovortex was cloudy or during the passage of a cold front.

In order to detect the presence or absence of the following dangerous and unfavorable phenomena from satellite images, V.V. Chursin developed an original algorithm. Data from the NOAA, MetOp and SUOMI-NPP polar orbiting spacecraft were used to analyze and verify this algorithm. The model made it possible to identify in advance the zones of potential extreme precipitation over the study area. High estimates of the reliability of detection of probable zones of the following dangerous and unfavorable phenomena were obtained.

## Экстремальные летние осадки в Сибири в 2015–2021 гг.

Черedyкo Н.Н.<sup>1</sup>, Волкова М.А.<sup>2</sup>, Кузевская И.В.<sup>2</sup>, Чурсин В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>НИ Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: atnik3@rambler.ru

**В**ажнейшая международная проблема XX в., проблема климатических изменений, осталась таковой и в XXI в. Особую обеспокоенность ученых, бизнесменов и простых обывателей вызывает рост аномальных проявлений различных геофизических параметров, увеличение частоты, интенсивности и пространственных масштабов экстремальных погодных событий, что может приводить к увеличению экономического и социального ущерба в различных регионах России [1]. Показатели изменчивости режима увлажнения, который также включает опасные и неблагоприятные явления в режиме осадков, существенно различаются в разных регионах. Анализ изменения характеристик и условий формирования экстремальных осадков может способствовать уточнению методик прогнозирования таких событий, а также последствий их воздействия на региональную экономику и население.

В течение года режим осадков определяется региональными синоптическими закономерностями, характеризуется высокой степенью кластеризации в пространстве и во времени, что проявляется пространственно-временной неоднородностью формирования экстремальных событий с количеством осадков или интенсивностями их выпадения, в десятки раз превосходящими уровни средних значений. В континентальном климате Западной Сибири основная часть осадков приходится на теплое полугодие, из них большая часть ливневые дожди [2], что обусловлено активной конвекцией в этот период года. Для 200 метеостанций Западно-Сибирского (ЗС УГМС), Обь-Иртышского (ОИ УГМС), Среднесибирского (СС УГМС) УГМС за период май-октябрь 2015-2021 гг. по данным штормовых оповещений в коде WAREP, предоставленных ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС, и с использованием суточных данных из открытой базы ВНИИГМИ МЦД [meteo.ru] проведен анализ экстремальных осадков и условий их формирования с привлечением данных спутникового дистанционного зондирования. Рассматривались случаи со следующими опасными (ОЯ) и неблагоприятными (КМЯ) явлениями, повлекшие по данным [3, 4] экономические или социальные ущербы: КМЯ «сильный дождь» (количество осадков не менее 35 мм за 12 ч [5]), ОЯ «очень сильный дождь» (ливневый дождь, количество осадков не менее 50 мм за период не более 12 ч [6]). Для вероятностного детектирования на основе спутниковых снимков наличия или отсутствия опасных конвективных явлений, в том числе, ливневых осадков, В.В. Чурсин разработал оригинальный алгоритм, для анализа и верификации которого использовались данные полярно-орбитальных космических аппаратов серии NOAA, MetOp и SUOMI-NPP, принимаемых сибирским центром НИЦ Планета.

Количество случаев рассмотренных ОЯ и КМЯ существенно меняется пространственно, что объясняется значительным влиянием локальных условий, и по годам, что определяется циркуляционными факторами.

За рассмотренный период лет максимальное число событий «сильный дождь» (табл. 1), шесть случаев, наблюдалось на станции Радужный (Ханты-мансийский автономный округ (ХМАО), ОИ УГМС), пять случаев на станции Старица (Томская обл., ЗС УГМС), на двух станциях (табл. 1) по четыре случая, на остальных рассмотренных станциях 0-3 случая.

Станции Радужный и Старица расположены в зоне разреженной водной системы комплекса Большого Васюганского болота, что является одним из факторов формирования ОЯ и КМЯ на данной территории. В условиях переувлажненности и существенного перегрева активируются конвективные процессы. В работе [7] показано, что на фоне потепления климата растет повторяемость конвективных облачных структур и сумм ливневых осадков в Западной Сибири, а также отмечается рост ущербов от них. При развитии конвективной облачности в результате перегрева масс приземного воздуха в условиях неустойчивой стратификации нижней тропосферы в областях пониженного атмосферного давления в теплый период года формируются мезомасштабные конвективные комплексы (МКК).

**Таблица 1.**

Характеристики метеостанций с наибольшим числом случаев КМЯ «сильный дождь» за период 2015-2021 гг.

УГМС	Станция	Индекс	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Дата	Кол-во осадков, мм	Интенсивность, мм/час
Обь-Иртышское	Радужный	23758	62,2	77,3	04.07.19	36	33,8
					04.07.19	41	19,8
					05.07.19	41	21,0
					02.08.19	152	111,2
					05.07.21	40	20,0
				26.07.21	44	3,8	
Западно-Сибирское	Старица	29224	58,2	80,6	16.06.18	35	10,7
					20.06.18	45	5,3
					26.06.18	38	8,7
					02.07.20	42	6,4
				13.07.21	49	13,4	
Обь-Иртышское	Исилькуль	28688	54,9	71,3	04.07.15	42	4,0
					21.08.18	42	3,6
					15.08.19	39	28,5
					08.08.21	39	6,0
Средне-сибирское	Красноярск	29570	56,0	92,8	20.08.17	44	3,8
					04.09.18	40	3,5
					27.05.20	44	3,8
					14.08.21	37	3,2

Конвективные явления более локальны, имеют меньшее «время жизни» и сложнее прогнозируемы, чем фронтальные процессы. События в условиях МКК часто могут быть не зафиксированы наблюдателем на станции вследствие разреженности сети станций. Расширенные данные для той или иной территории и дополнительные прогнозные признаки можно получать с помощью спутниковых снимков.

Данные спутников привлекались для случаев, наиболее близких по времени пролета спутника ко времени начала аномалии, с разницей не более 12 ч. Анализ спутниковой информации позволил получить ряд характеристик (табл. 2). По данным монтажа RGB композитных снимков (1, 4 и 3 каналов) случаев с рассмотренными ОЯ и КМЯ было получено, что на исследуемой территории эти явления наиболее часто наблюдались в условиях формирования МКК. При этом, оптическая толщина облачности, которая оценивалась с использованием облачных продуктов ATML2, составляла для рассмотренных случаев 150, что соответствует кучево-дождевой облачности с высокой водностью. Верхняя граница облачности варьирует в пределах 10250–17000 м, а значения общего влагозапаса меняются от 1700 до 5200 г/м<sup>2</sup>, что также соответствует условиям формирования кучево-дождевой облачности с высоким влагосодержанием.

В некоторых случаях рассмотренные ОЯ и КМЯ наблюдались при облачности мезовихря или в условиях прохождения холодного фронта.

**Таблица 2.**

Пример данных спутниковой информации о случаях с КМЯ «Сильный дождь».

Станция	Дата	Время явлен.	Время пролета спутника	Кол-во осадков, мм	Тип облачности	Оптич. толщина	Высота ВГО, м	Интегральная облачная влага, г/м <sup>2</sup>
Тальменка	22.09.15	1:08	4:50	37	ХФ	150	10250	3617
Волчиха	23.07.16	11:47	7:20	39	МКК	150	14800	3154
Искитим	18.07.17	4:20	4:45	39	МКК	150	10600	3142
Усть-Тарка	28.07.17	10:25	7:10	42	мезовихрь	150	10700	3309
Шелаболиха	10.06.18	9:35	8:15	37	ХФ	150	12050	2498
Старица	26.06.18	5:00	4:50	38	мезовихрь	150	12150	2664
Троицкое	01.07.18	9:38	6:45	35	МКК	150	16900	4659

*Примечание.*
*МКК – мезомасштабные конвективные комплексы, ХФ – холодный фронт, ВГО – верхняя граница облачности.*

Разработанная В.В. Чурсиным модель вероятностного детектирования атмосферных явлений позволила выявлять заблаговременно зоны над территорией исследования, характеризующиеся условиями потенциально возможного формирования экстремальных событий в режиме осадков. Оценка достоверности детектирования вероятных зон ОЯ и КМЯ проводилась показала, что оправдываемость модельных данных для ливневых дождей различной интенсивности не опускается ниже 81% для всех станций. Пространственно средние значения достоверности меняются незначительно, что говорит о стабильной работе методики вне зависимости от географических особенностей точки исследования.

В результате проведенного анализа получено, что экстремальные события в режиме летних осадков в Сибири наблюдаются в большей степени в условиях развития МКК с существенным влиянием на процессы локальных условий расположения станций. Такие явления возможно заблаговременно предупредить с использованием спутниковых данных и алгоритма детектирования атмосферных явлений, основанного на технологиях машинного обучения и нейронных сетях.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Россия и сопредельные страны: экологические, экономические и социальные последствия изменения климата / Под ред. Честина И.Е., Коллоффа Н. WWF России, OXFAM. – М., 2008. 64 с.*
2. *Сморкалова А. Г. Характеристика ливневых дождей по Омской, Томской и Тюменской областям // Вопр. географии Сибири. Томск, 1976. Вып. 9. С. 30–34.*
3. *Голубев А.Д., Паршина Л.Н., Сумерова К.А. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в ... 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2021. №№9-11. С. 139-142.*
4. *Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в ... 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2020. №№9-11. С. 129-139.*
5. *Руководящий документ РД 52.27.724 – 2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2009. 62с.*
6. *Руководящий документ РД 52.04.563–2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. – СПб.: «Моби Дик», 2013. 54 с.*
7. *Алексеев Г.В., Анисимов О.А., Ашик И.М. и др. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. 1008 с.*

# Analysis of flood-hazardous situations in the mountainous areas of the Baikal region

Kichigina N.V.<sup>1</sup>, Voropay N.N.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [nkichigina@mail.ru](mailto:nkichigina@mail.ru)

In the Baikal region, floods are typical for rivers of the southwestern coast of Lake Baikal, where they can be aggravated by mudflows, and for Lena and Kirenga basins, along with snow melting floods and jams. The highest danger of flooding exists in the rivers originating on the ridges and foothills of the Eastern Sayan in the basins of the left tributaries of the Angara River - the Irkut, Kitoy, Belaya, Oka, Iya, Uda, Biryusa [1]. The damage to human settlements, agricultural and industrial enterprises in these densely populated and well-developed areas can be very large. The July 2001 and June 2019 floods were particularly devastating.

We used data on daily water levels at 56 gauging stations and daily atmospheric precipitation at 37 weather stations of Roshydromet in the basins of the Angara, upper Lena rivers and Lake Baikal. The rivers considered are mainly middle-sized rivers. An average river flows within the same geographical area, its flow is formed in more or less homogeneous physical and geographical conditions, and the variability of its flow depends to the greatest extent on climatic factors.

To determine the time lag of flooding on rivers after extreme precipitation, we analyzed all cases of exceeding the critical level at selected gauging stations in Pribaikalye. The method of superimposed epochs was used for the analysis. The period from 2001 to 2015, which is characterized by an increase in the frequency of extreme hydroclimatic events, was chosen. All cases of exceeding the critical levels of the beginning of flooding (Hcr) and the release of water to the floodplain (Hp) were preliminarily analyzed. Exceedances of mixed (from superposition of snowmelt and rains) and jam genesis were excluded from the calculations. Only rainfall exceedances of Hcr and Hp levels were used in the calculations and the correlations were considered for the same period. Time lag between precipitation and floods varies from 2 to 7 days. At Roshydromet weather stations, located no more than 10 km from the hydrological station, this time lag averages 3 days. Flooding occurs two days after observation of the maximum 5-day precipitation sum (R5d) at neighboring weather stations. The catchment area covered by precipitation and the intensity of precipitation affect the onset of flooding. Daily precipitation in a small river catchment can be used for flood analysis and forecasting. Medium river basins require analysis of five-day precipitation observed at weather stations. Floods usually occur after the accumulation of an extreme amount of precipitation R5d (at least 40-50% of the monthly precipitation norm) at most weather stations located in the catchment area. The maximum amount of flash floods was observed at Roshydromet stations Iya-Tulun and Vitim-Bodaibo.

## Анализ паводкоопасных ситуаций в горных районах Байкальского региона

Кичигина Н.В.<sup>1</sup>, Воропай Н.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [nkichigina@mail.ru](mailto:nkichigina@mail.ru)

Наводнения являются одним из самых опасных природных стихийных бедствий, уступая лишь землетрясениям. В последние годы резко участились катастрофические наводнения и возросли размеры причиняемого ими ущерба, что связывают, как с гидроклиматическими изменениями, так и с усилением хозяйственного развития паводковоопасных территорий.

В Байкальском регионе паводочные наводнения характерны для рек юго-западного побережья оз. Байкал, где они могут усугубляться сходом селей, и для бассейнов Лены и Киренги, наряду с паводочными и заторными. Самая же высокая опасность паводочных наводнений существует на реках, берущих начало на хребтах и предгорьях Восточного Саяна в бассейнах левых притоков Ангары – рек Иркут, Китой, Белая, Оки, Ия, Уда, Бирюса [1]. Ущерб населенным пунктам, сельскохозяйственным и промышленным предприятиям на этих плотно заселенных и хорошо освоенных территориях может быть очень большим. Особенно большим ущербом отличились паводки в июле 2001 и в июне 2019 гг.



Дождевые паводки, сформированные в горных районах, обладают особенно большой опасностью из-за высокой скорости их формирования, а также сложностью прогнозирования осадков в горах. Характеристика осадков, которую мы можем представить, используя данные сети метеостанций Росгидромета, не в полной мере отображает ситуацию атмосферного увлажнения территории. Большинство существующих метеостанций расположены на равнинных территориях в зоне транзита и аккумуляции речного стока и не позволяют оценить количество, интенсивность и площади выпадения осадков в зоне его формирования в горах. Пространственная изменчивость осадков довольно слабо освещается данными наблюдений ввиду неравномерного расположения метеостанций относительно высотных зон. При этом, из-за низкой временной дискретности гидрологических данных расчетный шаг, как правило, составляет одни сутки [2]. Однако в горах дождевые паводки на реках могут сформироваться в течении нескольких часов.

В связи с этим цель работы – оценить отклик речного стока и формирование наводнений на выпавшие осадки в горных районах по данным, как существующей сети метеостанций и гидрологических постов Росгидромета, так и по альтернативным данным, полученным на экспериментальных водосборах в результате мониторинга за осадками и уровнями воды в горах с помощью Атмосферно-почвенных измерительных комплексов (АПИК). Используются данные об ежедневных уровнях воды на 56 гидропостах и суточных атмосферных осадках на 37 метеостанциях Росгидромета в бассейнах рек Ангары, верхней Лены и оз. Байкал. При этом рассматриваются преимущественно средние реки. Средняя река протекает в пределах одной географической зоны, ее сток формируется в более или менее однородных физико-географических условиях, и изменчивость ее стока в наибольшей степени зависит от климатических факторов [3].

В горных районах Прибайкалья были установлены АПИК, включающие осадкомеры (производство ИМКЭС, Томск, Россия), фиксирующие и передающие по каналу GSM данные об осадках с периодичностью один раз в час. Создание такой сети начато в ИГ СО РАН им. В.Б.Сочавы в 2018 г. АПИК установлены на экспериментальных горных водосборах р.Кынгьрга (Тункинская котловина) и руч.Ланинский (Приольхонье). В Тункинской котловине АПИК установлены в пос. Тунка (дно котловины), на высоте 717 м, пос. Аршан (у подножья гор), на высоте 870 м, и на пике Любви (в горах) на высоте 1892 м. Гидрологический пост с автоматическим уровнемером оборудован на р. Кынгарге у пос. Аршан. Измерения уровня, температуры и проводимости воды на нем производятся с периодичностью 1 раз в 30 мин.

Количественным показателем начала наводнения принят критический уровень (Нкр), при котором происходит выход воды на пойму со значительным затоплением сельскохозяйственных угодий и частичным – населенных пунктов, что соответствует классу средних наводнений. Уровень начала выхода воды на пойму (Нп) использовался в качестве количественного показателя повышенной водности рек в паводочный период.

Для всех случаев экстремальной водности (с превышением Нкр и/или Нп) за исследуемый период выполнен анализ осадков за короткие интервалы – сутки и R5d (максимальная пентадная сумма). Для описания экстремумов объединенная рабочая группа ВМО по обнаружению изменений климата предложила набор из 27 индексов экстремальности. Большинство индексов относятся к количеству дней, когда значения метеорологической величины выходят за пределы некоторого заданного порогового значения. Одним из основных при анализе экстремальных осадков является R5d (максимальная пентадная сумма). Этот же индекс выявляет ситуации, ассоциируемые с возникновением дождевых паводков.

Для определения времени запаздывания наступления наводнения на реках после выпадения экстремальных осадков был проведен анализ всех случаев превышения критического уровня на выбранных гидропостах Прибайкалья. Для анализа использован метод наложенных эпох. Был выбран период с 2001 по 2015 гг., который характеризуется увеличением повторяемости экстремальных гидроклиматических событий. Предварительно был проведен анализ всех случаев превышения критических уровней начала наводнения (Нкр) и выхода воды на пойму (Нп). Из расчетов были исключены превышения смешанного (от наложения снеготаяния и дождей) и заторного генезиса. В расчетах использованы только дождевые превышения уровней Нкр и Нп и корреляции рассматривались для этого же периода.

Методом наложенных эпох определена временная задержка наступления наводнения после экстремальных осадков за период 2001-2015 гг. для всех случаев превышения критического уровня на реках бассейнов р.Лены, р.Ангары и оз.Байкал за период 2001-2015 гг. За нулевую дату принят день начала наводнения - превышения Нкр на гидропостах. Максимальное количество случаев паводочных наводнений (14) наблюдается на гидропостах Ия-Тулун и Витим-Бодайбо. Время запаздывания, зависящее от комплекса факторов, составляет от 2 до 7 суток. В среднем, при анализе суточных сумм осадков на метеостанции, расположенной не далее 10 км от гидропоста, это время составляет 3 суток. Наводнение наступает в среднем через 2 суток после прохождения максимума R5d на этих же метеостанциях. Площадь бассейна, охваченная осадками, и интенсивность выпавших осадков также влияют на наступление наводнения.

Ливневые локальные осадки высокой интенсивности в горах приводят к резкому подъему уровня и вызывают катастрофические наводнения в бассейнах отдельных небольших рек, как это было в пос.

Аршан в 2014 г. [4]. На средних реках, согласно нашим результатам, таких осадков, в большинстве случаев недостаточно для возникновения наводнения. Более информативной характеристикой является сумма осадков за пять суток (R5d). Превышение критических уровней (Нкр) на гидрологических постах и наступление наводнения происходит при накопленной экстремальной сумме осадков за пять суток (не менее 40-50 % от месячной нормы осадков) на большинстве метеостанций, расположенных на водосборе. Отклик уровня воды на накопленные 5-дневные суммы осадков происходит в среднем через 2-5 дней.

В качестве примера рассмотрено паводочное наводнение в июле 2012 г. на гидропосте р.Витим – г.Бодайбо и проанализированы суточные суммы атмосферных осадков за предшествующий период на 7 метеостанциях, расположенных на его водосборе. Паводок продолжался с 9 июля по 11 августа. Наблюдалось две волны наводнения (превышение Нкр) продолжительностью 6 и 8 дней, максимальный подъем уровня над Нкр составил 2,25 м. Наводнение было сформировано продолжительными дождями, начавшимися повсеместно на водосборе и зафиксированными на всех метеостанциях в начале июля. Начало затопления наблюдалось через двое суток после достижения максимума R5d на метеостанции Мамакан (22,7 мм), расположенной на расстоянии 5,8 км от гидропоста р.Витим – г.Бодайбо. С увеличением расстояния между гидропостом и метеостанцией увеличивается запаздывание начала затопления относительно даты наблюдения R5d. На метеостанциях Чара и Средний Калар, расположенных на расстоянии 260 и 290 км от гидропоста, максимум R5d наблюдался за трое суток до затопления и составил 50 и 57,4 мм, соответственно. Наибольшее время добегания (4 суток) при R5d 23-40 мм отмечено для метеостанций Усть-Каренга и Романовка, расположенных на удалении более 400 км. Выпадение осадков такой же интенсивности, но менее, чем на половине метеостанций в другие годы не приводили к превышению уровня Нкр на этом гидропосте и к наводнению.

Таким образом, временной лаг между осадками и паводками колеблется от 2 до 7 дней. При анализе суточных сумм осадков на метеостанции Росгидромета, расположенной не более чем в 10 км от гидрологической станции, этот временной лаг составляет в среднем 3 дня. Затопление происходит через два дня после наблюдения 5-дневного максимума осадков (R5d) на соседних метеостанциях. Площадь водосбора, покрытая осадками, и интенсивность осадков влияют на начало наводнения. Суточные осадки, выпадающие в водосборе небольшой реки, можно использовать для анализа и прогнозирования паводков. Бассейны средних рек требуют анализа пятидневной суммы осадков, наблюдаемой на метеостанциях. Наводнения обычно возникают после накопления экстремального количества осадков R5d (не менее 40-50% от месячной нормы осадков) на большинстве метеостанций, расположенных в водосборной зоне. Максимальное количество ливневых паводков наблюдалось на постах Росгидромета Ия-Тулун и Витим-Бодайбо.

Полученные результаты могут быть полезны для улучшения качества прогнозов дождевых паводков. По мере накопления массива измерений на экспериментальных бассейнах появится возможность использования более развитых моделей формирования стока и надежного прогноза.

*Работа выполнена в рамках программы НИР АААА-А21-121012190059-5*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Гидроклиматические исследования Байкальской природной территории / Н.Н. Вороняй, О.В. Гагаринова, Е.А. Ильичева и др. // Отв. ред. Л.М. Корытный; Рос. акад. наук, Сиб. Отд-ние, Институт географии им. В.Б. Сочавы. – Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2013. – 188 с. <http://www.izdatgeo.ru/index.php?action=book&id=338>*
2. *Пожидова Д.С. Катастрофические паводки в горных и предгорных районах Краснодарского края и Республике Адыгея // Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления. Сб тр. Третье конф. Научн.-обр. центра. М.: Кафедра гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова, ИВП РАН, 2014. – С. 188-189.*
3. *Богданова Е.Г. Интенсивность осадков / Климат России. Под ред. Н.В.Кобышевой. – С-Пб., Гидрометеиздат, 2001. – С.317-329.*
4. *Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. / С.А. Макаров, А.А. Черкашина, Ж.В. Атутова, А.В. Бардаш, Н.Н. Вороняй, Н.В. Кичигина, Б.Ф. Мутин, О.П. Осипова, Н.Н. Ухова - Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2014. – 111 с.*

# Thunderstorm activity over Western Siberia

Gorbatenko V.P., Gromova A.V., Zhuravlev G.G.

Tomsk State University, Tomsk, Russia  
E-mail: vpgor@tpu.ru

The study of the general regularities of the spatial and temporal distribution of thunderstorm activity for various regions of Russia remains an urgent task. Against the backdrop of climate change, specialists in various production areas have to deal with the issues of choosing the degree of lightning protection. The number of high-rise buildings and building area is growing; explosives and combustible substances are used in industry; sensitive electronic devices that react sharply to electromagnetic disturbances in the atmosphere.

In Russia the basic information sources concerning thunderstorm danger of territory are visual-hearing observations at meteorological stations and episodic instrumental observations. The Western Siberia Region characterized by temperate thunderstorm activity. But there are considerable changes annual and interannual variability of investigated characteristics.

It is known that changes in the temperature and humidity state of the atmosphere and the underlying surface can lead to a spatial shift in the location of the main centers of thunderstorm activity. Therefore, it is important to compare maps of the spatial distribution of thunderstorm activity in different observation periods.

The goal of this study is to compare the spatial and temporal variability of thunderstorm activity over Western Siberia. We have analyzed the historical thunder-day data collected at 40 state meteorological stations of Western Siberia region over the period 1936- 2020.

In the range of geographical latitudes 50-70 degrees north latitude relatively strict latitudinal zonality is noted only in the northern regions, up to approximately 63 °N. The rest of the territory is dominated by focal distribution of thunderstorms. South of 60 degrees north latitude there are an average 42 thunderstorm hours and 22 thunderstorm days with maximum are about 65 thunderstorm hours and 33 thunderstorm days and minimum are 22 thunderstorm hours and 14 thunderstorm days per year.

Like the other meteorological elements, thunderstorm activity characteristics are defined by a considerable variation of average annual values that is caused by the changeableness of the circulating processes in atmosphere. Mostly this goes parallel with the variability of synoptic flow conditions favorable for the development of thunderstorms.

Over the highland parts of the territory, a considerably larger amount of thunderstorm days is observed than it is for the plain parts. The biggest values are registered in the southern (mountainous) part of the territory near the Altay Mountains.

Comparison of thunderstorm activity maps for different periods of time reveals both similarities and differences in the spatial position of the centers of high frequency of thunderstorms.

It was found that the level of high thunderstorm activity recorded in the last decade was observed in the 50s of the 20th century.

The duration of the thunderstorm season (the number of days between the first and last thunderstorm of the year) increased by an average of 5 days at 60°N And for 15 days at latitude 55° N. A slight increase in the number of days with thunderstorms per year in recent decades is due to a change in the length of the thunderstorm season. There is also an increase in the number of lightning during one day with a thunderstorm. This indicates some increase in the convective potential of the region in the last decade.

At most stations, an increase in the amount of lightning is observed during one day with a thunderstorm. This indicates an increase in the convective potential of the region in the last decade.

## Грозовая активность над Западной Сибирью

Горбатенко В.П., Громова А.В., Журавлев Г.Г.

Томский государственный университет, Томск, Россия  
E-mail: vpgor@tpu.ru

Изучение общих закономерностей пространственного и временного распределения грозовой активности для различных районов России является актуальной задачей. На фоне изменения климата вопрос об изменении повторяемости опасных погодных явлений, таких как гроза, град, ливень и сильный ветер остается открытым. Однако специалистам разных производственных сфер приходится сталкиваться с вопросами выбора степени молниезащиты, поскольку растет количество высотных домов и площадь застройки; в промышленности используются взрывчатые вещества и горючие вещества; чувствительные электронные устройства, остро реагируют на электромагнитные возму-



щения в атмосфере генерируемые молниями. Несмотря на то, что Западно-Сибирский регион характеризуется умеренной грозовой активностью [1, 2], всегда наблюдались значительные вариации межгодовой изменчивости активности гроз как в целом по региону, так и в пределах отдельных административных областей [2,3,4]. Известно, что изменение температурно-влажностного состояния атмосферы и подстилающей поверхности могут привести к пространственному смещению основных очагов повышенной грозовой активности [5]. На фоне наблюдающегося изменения климата Западной Сибири, конвективный потенциал атмосферы также меняется [6], что влечет за собой изменение частоты молниевых разрядов. Но отражается ли это на используемых в практике молниезащиты таких характеристиках грозовой активности как среднее число дней с грозой и средняя суммарная за год продолжительность гроз пока не ясно.

Целью настоящих исследований является сравнение пространственной и временной изменчивости грозовой активности над Западной Сибирью за период 1936-2020 гг.

Для исследования использованы данные ВНИИГМИ-МЦД и климатических справочников на 40 государственных метеостанциях Западной Сибири за период 1936-2020 гг. Рассматривалась территория, ограниченная 50-70 °с.ш. и 60-95 °в.д.

Сравнение карт грозовой активности, построенных в разные периоды времени выявляет как сходство, так и различия в пространственном положении очагов высокой повторяемости гроз. В диапазоне географических широт 50°-70° с. ш. на протяжении всей истории метеонаблюдений относительно строгая широтная зональность фиксируется лишь в северных районах, примерно до 63 °с.ш. На остальной территории преобладает очаговая интенсивность грозовой активности (рис.1). К югу от 60 градусов северной широты регистрируется, в среднем, 42 грозовых часа и 22 грозовых дня, при максимуме около 65 грозовых часов и 33 грозовых дня, а минимуме 22 грозовых часа и 14 грозовых дней в году.

Наибольшие значения отмечаются в южной (горной) части территории у Горного Алтая. Заметим, что в умеренных широтах Евразии гроза тоже отмечается 10–30 дней в году. Если в Западной Европе гроза наблюдается во все сезоны, в Восточной Европе – почти исключительно летом. За полярным кругом гроза – редкое явление, которое до начала глобального потепления встречалось не чаще одного раза в 10 лет. Сравнивая пространственное распределение числа дней с грозой с более ранними исследованиями этой характеристики грозовой активности, замечено, что широтное распределение числа дней с грозой охватывает большую территорию, по сравнению с картами, полученными за более ранние периоды [1,2]. По результатам настоящих исследований замечено, что мезомасштабные очаги повышенных значений среднего числа дней с грозой и средней суммарной за год продолжительности гроз сохранились, хотя и несколько изменили пространственное расположение.

Как и другие метеорологические элементы, характеристики грозовой деятельности определяются значительными вариациями среднегодовых значений (рис.2), что обусловлено непостоянством циркуляционных процессов в атмосфере. В основном это происходит параллельно с изменчивостью синоп-

тических условий течения, благоприятных для развития гроз. Установлено [1,2], что уровень высокой грозовой активности, аналогичной зарегистрированный в последние десятилетия, наблюдался в 50-х годах XX века. На рис.2 представлена межгодовая изменчивость числа дней с грозой в году в районе метеорологических станций Томской области, расположенных в диапазоне географических широт 56-60°с.ш.

Анализируя пределы изменчивости среднего числа дней с грозой на территории умеренных широт Западной Сибири, можно убедиться, что анализируемая характеристика грозовой активности в XXI веке не выходит за пределы значений, зарегистрированных в предыдущее столетие. Очевидно наличие циклических составляющих в рядах числа дней с грозой, которые могут быть обусловлены рядом причин [1]. Известно, что на территории Западной Сибири наблюдается смещение климатических сроков устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0 и 5 °С, хорошо заметные весной и осенью

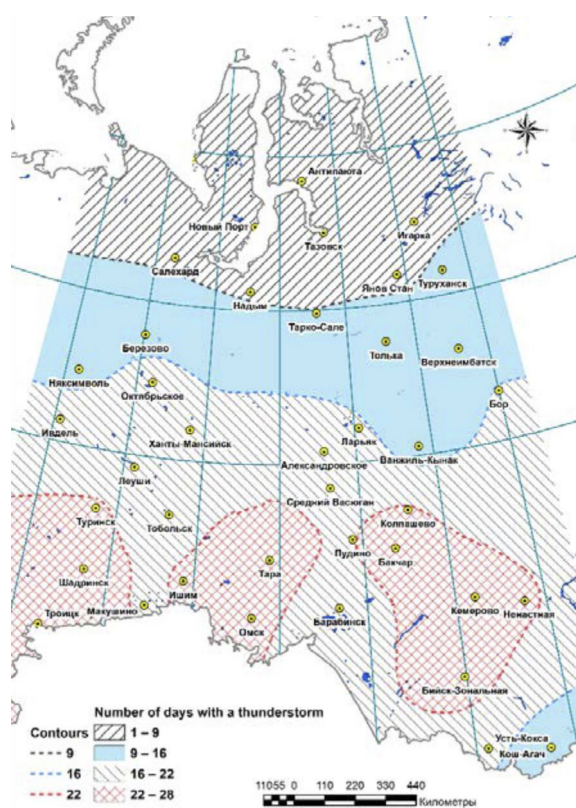
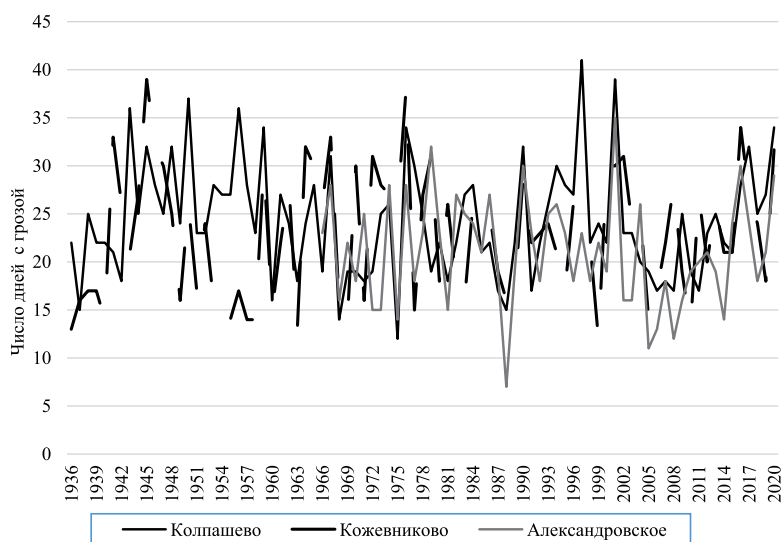


Рис. 1.

Среднее число дней с грозой над Западной Сибирью за период 1966-2015 гг.





**Рис. 2.** Межгодовая изменчивость числа дней с грозой в году в районе метеорологических станций Томской области.

[7]. Например, в Томской области весенние даты смещаются на более ранние сроки со скоростью 2 дня за 10 лет, а осенние даты – на более поздние сроки в среднем на 1 день за 10 лет. Это приводит к увеличению продолжительности периодов с температурой при которой возможно развитие конвекции. Продолжительность грозового сезона (число дней между первой и последней грозой в году) над Западной Сибирью увеличилась в последние десятилетия в среднем на 5 дней на уровне 60° с.ш., и на 15 дней на уровне 55°с.ш. На этом фоне заметного превышения визуально наблюдаемых характеристик в районе большинства исследуемых метеостанций не произошло.

В результате проведенных исследований получено:

1. Продолжительность грозового сезона (число дней между первой и последней грозой в году) над Западной Сибирью увеличилась в последнее десятилетие в среднем на 5 дней на уровне 60° с.ш., и на 15 дней на уровне 55°с.ш.
2. Статистически значимых направленных тенденций в изменении уровня грозовой активности (числа дней с грозой в году и суммарной за год продолжительности гроз) не выявлено.
3. Некоторое увеличение числа дней с грозой в году в последние десятилетия обусловлено изменением продолжительности грозового сезона.
4. На большинстве станций замечено увеличение количества молний в течение одного дня с грозой. Это свидетельствует о увеличении конвективного потенциала региона в последнее десятилетие. Но наличие тенденций на увеличение молниевой активности может быть обнаружено только при наличии приборов, регистрирующих каждый разряд.
5. Поскольку выбор молниезащитных мероприятий на территории России по прежнему осуществляется на основе теоретических оценок по числу дней с грозой и суммарной за год продолжительности гроз, оцениваемых исключительно визуально, это может привести к росту ущерба от повышенной молниевой активности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Горбатенко В.П., Ершова Т.В. Молния как звено глобальной электрической цепи. Томск: издательство ТГПУ. 2011. 204 с.
2. Региональный мониторинг атмосферы // М.Ф. Адаменко, Н.М. Алехина, В.П. Горбатенко, Г.О. Задде, М.В. Кабанов и др.; под ред. М.Ф. Адаменко - Томск: МГП "Раско", 2000. Ч. 4.: Природно-климатические изменения. - 270 с.
3. Горбатенко В.П., Дульзон А.А., Решетько М.В. Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью // Метеорология и гидрология. 1999. № 12. С. 21-28.
4. Горбатенко В.П., Дульзон А.А. Результаты исследования грозовой активности над территорией Томской области // Известия ТПУ. 2006. № 2. С. 126-130.
5. Горбатенко В.П., Дульзон А.А. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность // География и природные ресурсы. 1997. № 2. С. 142-146.
6. Горбатенко В.П., Кузевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108–117.
7. Горбатенко В.П., Волкова М.А., Носырева О.В., Кузевская И.В. Современные тенденции климатических характеристик, влияющих на развитие транспортной системы Томской области //Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 4. С. 71-95.

# Research of the accident rate connection for the electric grid with climatic factors for the European territory of Russia

Voronkova E.M.

National Research University «MPEI», Moscow, Russia

The purpose of this article is to establish possible climate risks on the territory of the Central and Volga Federal Districts for energy facilities, in particular for overhead transmission lines. Using the example of two specific regions, the most significant weather and climatic causes of outages were identified, which should be taken into account in the approaches to accounting for climatic vulnerabilities. After all, as a review of recent studies shows, there has been a significant impact of climate on the process of transmission and distribution of electrical energy. In addition to the direct dependence of the electric power consumption on the surrounding air temperature (season of the year), precipitation and clouds, etc., it is necessary to understand that the weather and climatic effects are also associated with the processes of aging and wearing of equipment, outages and the service quality of electric power facilities. Therefore, the question of analyzing possible climate risks and their consequences is increasingly being raised.

The existing approaches to taking into account the climatic impact on energy facilities during their design or modernization should be changed. Firstly, more factors should be taken into account, and secondly, environmental loads on objects should be calculated with climate change.

A rational way to accurately determine climatic loads is a statistical analysis of equipment failures. Detailing of climatic causes for outages according to statistical data establishes all possible causes of environmental impact on the particular region territory. Such an analysis makes it possible to assess the potential contribution of changing climatic conditions to the accident rate of energy facilities. In addition to identifying specific factors that are the causes of climate risks (each region under consideration will be characterized by its own indicators), a detailed analysis of the origin of weather and climate outages allows you to determine the percentage of contribution for each factor to the overall accident rate, as well as the trend of their influence. In most cases, equipment outages are accompanied by a combination of several factors. Therefore, it is advisable not only to determine essential indicators, but also to analyze the consequences of their combined impact, which should be taken into account in the design. In turn, this makes it possible to determine the list of significant climate risks.

Using the example of two regions for the Central Federal District, the contribution of various climatic factor groups to the overall accident rate of the electric grid complex was determined. According to the obtained results for regions located in the same Federal District, the factors constituting a threat to operational equipment are different. For the Ivanovo region, the greatest danger is the wind and thunderstorm activity in the region. At the same time, it is also worth considering the influence of precipitation (solid and liquid), as well as glaze-ice and rime deposition. For the Ryazan Region, the wind loads determine a significant share of risks, but it is also worth considering the impact of thunderstorms and liquid precipitation.

When considering outages by types of climatic factors, taking into account their combined effect, the most dangerous combinations were identified. For the Ivanovo region, these are wind, thunderstorms, as well as a combination of wind and thunderstorm effects. For the Ryazan region, this is the wind separately, as well as in combination with other possible factors. These combinations should be taken into account when designing and upgrading electrical equipment, as they represent the most dangerous climatic risks.

## Исследование связи аварийности электросетевого хозяйства с климатическими факторами для Европейской территории России

Воронкова Е.М.

НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Обзор исследований в области обеспечения надежности энергосистем [1] за последние 10 лет показал существенное влияние климата на процесс передачи и распределения электрической энергии. Помимо непосредственной зависимости потребляемой электроэнергии от температуры окружающего воздуха (сезона года), осадков и облачности и др., погодноклиматическое воздействие также связано с процессами старения и износа оборудования. В последнее время также наблюдается значительное влияние явлений природы на аварийность объектов энергетики, так как нередко погод-

ные факторы являются причиной их отключения. В свою очередь высокая аварийность снижает качество передаваемой электроэнергии (провалы напряжения, отсутствие электроснабжения и т.д.).

Для существующих методов, принимающих во внимание климатическое воздействие на объекты энергетики при их проектировании или модернизации, целесообразно учитывать существующие тенденции изменения климата. Использование региональных климатических карт основных факторов или введение поправочных коэффициентов для нормативных величин конкретных регионов значительно повысит достоверность сведений расчетных климатических нагрузок, которые должны выдерживаться проводами линиями электропередачи, опорами, различной арматурой и т.д.

Согласно ПУЭ-7 [2] для воздушных линий электропередачи (ВЛ) – наиболее распространенных устройств передачи и распределения электрической энергии, в качестве основной климатической нагрузки выступают ветровое давление при отсутствии и наличии гололёда, грозовая активность, гололёдно-изморозевые отложения, пляска проводов и тросов (грозотросов), тесно связанная с ветровой активностью района. Так как воздушные линии представляет собой сложную систему, состоящую непосредственно из проводов, опор, изоляторов, арматуры и др., при проектировании необходимо учитывать влияние климатических факторов на все элементы ВЛ. Исходя из представленных климатических нагрузок в ПУЭ-7 основные расчёты проводятся для проводов, тросов, опор и гирлянды изоляторов. Однако статистические данные отказов [3] свидетельствуют и об аварийности под действием погодных явлений других элементов воздушных линий электропередачи.

При расчете климатических нагрузок по СП 20.13330.2016 [4] учитываются только ветровые и гололёдные нагрузки, а также температурные климатические воздействия. Последние применяются только для опор ВЛ. Существенным недостатком данного документа является невозможность оценки периода применения нормативных значений.

Одним из возможных способов точного определения климатических нагрузок на воздушные линии электропередачи является детальный анализ климатической ситуации в конкретном регионе (области), статистический анализ отказов, вызванных погодными явлениями, а также опыт эксплуатации в сложных климатических условиях. Не всегда климатическая база данных позволяет с точностью интерпретировать районы по типам климатической нагрузки. В некоторых случаях только опыт эксплуатации и статистика отказов (повреждений) позволяют скорректировать данные карт районирования.

На сегодняшний день на территории Российской Федерации основная база статистики отказов оборудования составляется по данным актов расследования причин аварий, эксплуатационным журналам, журналам аварийности. Согласно приказу Министерства энергетики РФ № 90 [5] все причины климатического характера относятся к организационным причинам повреждения (причины, вызванные сторонним воздействием на оборудование) и классифицируются только на: гололёдно-изморозевые отложения; ветровые нагрузки; атмосферные перенапряжения (гроза); природные пожары; прочие воздействия неблагоприятных природных явлений.

Данная классификация учитывает только ограниченное количество факторов, а в случае «прочие воздействия неблагоприятных природных явлений» не всегда конкретизирует воздействующий фактор. Поэтому на примере данных аварийности электросетевых компаний Центрального и Приволжского Федеральных округов за 10 лет [3] были выявлены погодные явления, являющиеся причинами отключений рассматриваемых регионов. В зависимости от происхождения климатические причины также были объединены в группы (таблица 1).

**Таблица 1.** Классификация погодно-климатических причин отключений оборудования.

пп.	Группа	Климатический фактор
1	Ветровые нагрузки	ветер
2	Грозовая активность	гроза; атмосферные перенапряжения; (шаровая) молния
3	Осадки жидкие	дождь; ливень; изморось
4	Осадки твердые	снег; град; снегопад; метель; ледяной дождь
5	Гололёдные явления	гололёдно-изморозевые отложения; гололёд; гололедица; заморозки; изморось; лёд; наледь
6	Влага	влага; влажность воздуха; туман; роса; вода или конденсат
7	Температура	высокая температура; низкая температура; перепады температуры; переход температуры через 0°С
8	Природные пожары	природные пожары
9	Грунтово-почвенные явления	оттаивание грунта; заболоченная местность; загнивание опоры в грунте; наброс грунта; движение грунта
10	Гидрологические явления	поверхностные воды; грунтовые воды; талые воды; половодье; паводок



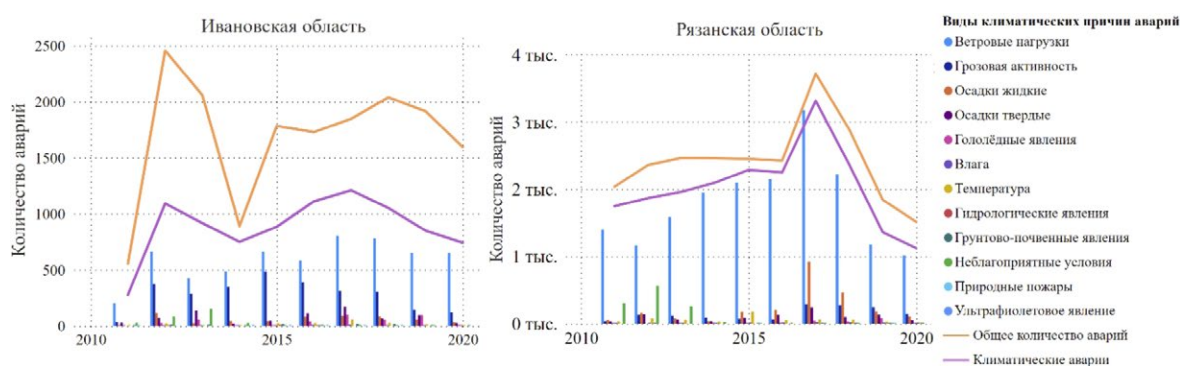
пп.	Группа	Климатический фактор
11	Ультрафиолетовое явление	ультрафиолетовое излучение
12	Прочие воздействия неблагоприятных природных явлений	неблагоприятные погодные явления; атмосферные воздействия; воздействие стихийных или экстремальных явлений

Анализ и детализация аварий климатического характера по статистическим данным [3] установила большее количество групп возможных причин воздействия окружающей среды, чем в классификации приказа Министерства энергетики РФ №90 [5]. При этом во всех группах факторов (таблица 1) также были конкретизированы погодные явления. В случае отсутствия точного признака в аварийных журналах указывалось воздействие неблагоприятных природных явлений.

Такой анализ позволяет оценить возможный вклад изменяющихся климатических условий в аварийность объектов энергетики. На примере двух регионов Центрального Федерального округа (Ивановской и Рязанской областей) был определен вклад в отдельности каждой группы климатических факторов (без учета их совместного действия) в общую аварийность элементов электроэнергетической системы. Для определения доли вклада конкретного фактора было определено общее количество зафиксированных случаев аварий, а также количество случаев аварий климатического характера по данным аварийных отключений ПАО «Россети Центр и Приволжье» [3] (рис. 1). Однако помимо анализа отдельных групп климатических факторов в работе была выполнена оценка аварийности комбинации факторов. Последние демонстрируют общий вклад всех аварий климатического характера в аварийность сетей данных регионов.

Анализ полученных результатов на рис. 1 демонстрирует роль отдельных групп факторов, согласно которым можно выявить долю случаев повреждения оборудования, в которых одной из причин отключения является климатический фактор конкретной группы. Т.е. в случае отключений группы «ветровые нагрузки» (рис. 1) учитываются все аварии, в которых отключение произошло при воздействии ветра (влияние ветра в отдельности или в сочетании с другими факторами). В случае «грозовой активности» также учитываются любые отключения, связанные с воздействием грозы, но можно встретить аварии из-за грозы и ветра.

Из полученных распределений для конкретных районов определяется перечень существенных климатических рисков. Для Ивановской области наибольшую угрозу для экономических последствий электроснабжения представляют ветровая и грозовая активность региона. При этом также следует учитывать влияние осадков (твердых и жидких), а также возникновение гололёдно-изморозевых явлений. Три последние группы факторов находятся примерно на одном уровне по отношению к друг другу, при этом доля их аварий составляет в среднем 4–9% всех климатических аварий. Это примерно 60–80 зафиксированных случаев отключений (в среднем). Вместе с тем в некоторых случаях наблюдалось каскадное отключение электроснабжения.



**Рис. 1.** Распределение климатических аварий по отдельным группам факторов (без учета их совместного воздействия) за 10 лет на территории Ивановской и Рязанской областей

Для Рязанской области, которая превышает территорию Ивановской в 1,8 раз, зафиксировано большее влияние климатических факторов на аварийность объектов электросетевого хозяйства в абсолютном выражении. Однако, при рассмотрении удельных величин (количество аварий по отношению к площади территории) на территории Ивановской области наблюдается большее воздействие на аварийность для таких параметров как гидрологические, грунтово-почвенные, ультрафиолетовые явления и грозовая активность. Для грозовой активности удельные величины отличаются в среднем в 4,7 раз.



Основными факторами, представляющими угрозу для Рязанского региона, являются ветровые, грозовые и гололедные нагрузки, осадки (жидкие и твердые), но также и температура. Однако существенную долю рисков определяет именно ветровые нагрузки (в среднем определяют 90% всех климатических аварий), а с 2017 г. возросло влияние грозы и жидких осадков. Поэтому в качестве основных рисков для Рязанской области можно рассматривать – ветровую и грозовую активность, жидкие осадки.

Распределение случаев отключений по видам климатических факторов комбинированного влияния определяет суммарное количество всех случаев отключений. В данном случае учитываются только конкретные сочетания групп факторов, из которых определяется наиболее опасные сочетания погодно-климатических явлений. Для Ивановской области это – ветер, гроза, а также комбинация воздействия ветра и грозы. Для Рязанской области – ветер в отдельности, а также в сочетании с другими возможными факторами (осадки, гололедные явления, влага, гидрологические явления и т.д.). До 2013 г. также существенными было влияние гидрологических факторов и неблагоприятных погодных условия («прочее»), однако тенденция их влияния пошла на спад, поэтому на данный момент они не представляют существенной угрозы.

*Благодарности Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 18-79-10255).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Годовые отчеты ПАО «РОССЕТИ», 2010-2020.* URL: <https://rosseti.ru/investors/info/year/> (Дата обращения: 01.06.2021).
2. *Правила устройства электроустановок 7-е изд. – М.: Госторгиздат, 2015. - 144 с.*
3. *Сводные данные об аварийных отключениях, 2011-2020.* URL: [https://mrsk-cp.ru/for\\_consumers/service\\_area/network\\_condition/svodnye-dannye-ob-avariynykh-otklyucheniy\\_akh/](https://mrsk-cp.ru/for_consumers/service_area/network_condition/svodnye-dannye-ob-avariynykh-otklyucheniy_akh/) (Дата обращения: 01.06.2021).
4. *Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (с Изменениями №1, 2): СП 20.13330.2016. Введ. с 04.06.2017. М. : Стандартинформ, 2018. - 95с.*
5. *Приказ Министерства энергетики РФ от 2 марта 2010 г. № 90 «Об утверждении формы акта о расследовании причин аварий в электроэнергетике и порядка ее заполнения» [Электронный источник] / <https://base.garant.ru/12175335/> (дата обращения: 10.10.2020).*

Выражаю заинтересованность в публикации в IOP Conference Series: Earth and Environmental Science статьи, написанной на английском языке по материалам докладов.

## Features of convective cloud systems that caused windthrow in the forest zone of European Russia and Ural region based on Meteosat satellite images

Shikhov A.N.<sup>1,2</sup>, Chernokulsky A.V.<sup>2,3</sup>, Yarinich Yu.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Perm State University, Perm, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: [and3131@inbox.ru](mailto:and3131@inbox.ru)

The characteristics of MCSs which generated windthrow events in the European Russia (ER) and the Ural region between 2006 and 2021 were studied using the images from the 12-bands SEVIRI radiometer on the Meteosat-8 satellite. According to the windthrow database (Shikhov et al., 2020), updated for 2021, we selected squall and tornado events, supported by high-quality SEVIRI/Meteosat images. Based on the comparison of successive Meteosat images, windthrows, and other information on the time of occurrence for storm events, the MCS that caused each windthrow was determined. As a result, the sampling size was 229 windthrows (caused by 112 squalls and 117 tornadoes), which were referred to 97 different MCSs.

The presence of intense updrafts was identified based on the cloud top signatures namely Overshooting Top (OT), as well as Cold-ring, Cold U/V, or Enhanced-V (Brunner et al., 2007), which were found by the cloud top temperature images. For each signature, the type and duration of occurrence was defined.

According to the Meteosat images, the time of occurrence has been clarified for each windthrow. For each MCS, the scale (meso- $\alpha$  or meso- $\beta$ ), the type of MCS, the diameter along the major and minor axes, and the

minimum cloud top temperature during a squall/tornado are determined. When determining the MCS type, we assumed that a long-lived overshooting top (OT or CRCUV pattern) in combination with the windthrow caused by a squall/tornado indicates the probability of a mesocyclone in the MCS.

Most of the MCSs had the scale of meso- $\alpha$  (64.6%) at the time of occurrence of squalls and tornadoes, in another 6.6% of cases they transformed from the meso- $\beta$  scale to the meso- $\alpha$  scale. The remaining 28.8% refer to the meso- $\beta$  scale. The proportion of the MCSs of meso- $\alpha$  scale reaches 72% for squall events, and for tornado events it is 56%. The squalls that cause windthrows are usually generated by squall lines (including those embedding mesocyclones), mesoscale convective complexes (MCCs), and supercell storms transformed into MCCs. In turn, tornadoes are mainly generated by supercell storms (about 40% of which are then transformed into MCCs), and by squall lines embedding mesocyclones.

The minimum cloud top temperature during the occurrence of squalls and tornadoes averaged  $-60.1$  °C. In cases with squalls, it is significantly lower than in cases with tornadoes (at  $\alpha = 0.01$ ). The highest values of the cloud top temperature ( $-32$ °C to  $-50$ °C) are typical for short-lived supercell storms or squall lines, which formed under weak convective instability and generated more often tornadoes than squalls. Long-lived MCSs (with a lifetime of 10 hours or more) were usually formed under strong instability and were characterized by a low cloud top temperature ( $-60$ °C and lower).

In 70.6% of cases, OT and CRCUV signatures were identified on the cloud top at the time of formation or passage of the squall/tornado causing windthrow. The duration of signatures lifetime ranges from 15 minutes to 6 hours or more. For both squalls and tornadoes, signatures OT type are more common than CRCUV. However, the number of cases without signatures is significantly higher for MCSs with tornadoes than for squall-generating MCSs. This finding is of practical significance since such MCSs, which have no such signatures, cannot be identified as potentially hazardous according to Meteosat-8 images.

*The study was funded by the RSF Project No 18-77-10076*

#### REFERENCES:

1. Brunner J.C., Ackerman S. A., Bachmeier A. S., Rabin, R.M. *A quantitative analysis of the enhanced-V feature in relation to severe weather // Weather and Forecasting. 2007, V. 22(4), P. 853–872.*
2. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina, A.V. *A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 3489–3513.*

## Особенности конвективных облачных систем, вызывающих ветровалы в лесной зоне Европейской территории России и Урала, по спутниковым данным Meteosat

Шихов А.Н.<sup>1,2</sup>, Чернокульский А.В.<sup>2,3</sup>, Ярынич Ю.И.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: and3131@inbox.ru

Смерчи и шквалы, как и другие опасные явления погоды конвективного характера, генерируются отдельными конвективными ячейками или (чаще) мезомасштабными конвективными системами (МКС). Основными инструментами для мониторинга и изучения МКС являются доплеровские метеорологические радиолокаторы и геостационарные метеоспутники. Для территории Европы, включая ЕТР, доступны данные серии спутников Meteosat, оператором которых является Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников EUMETSAT. Спутники Meteosat Second Generation (MSG) обеспечивают получение данных о температуре и альбедо верхней границы облаков (ВГО) каждые 15 мин, а для территории Европы (включая западную часть ЕТР) – каждые 5 мин с помощью 12-ти канального радиометра SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager).

В настоящей работе рассматриваются характеристики МКС, генерирующих шквалы и смерчи, с которыми были связаны ветровалы на Европейской территории России (ЕТР) и на Урале в период с 2006 по 2020 гг. Проанализированы характерные сигнатуры на верхней границе облаков (ВГО), позво-

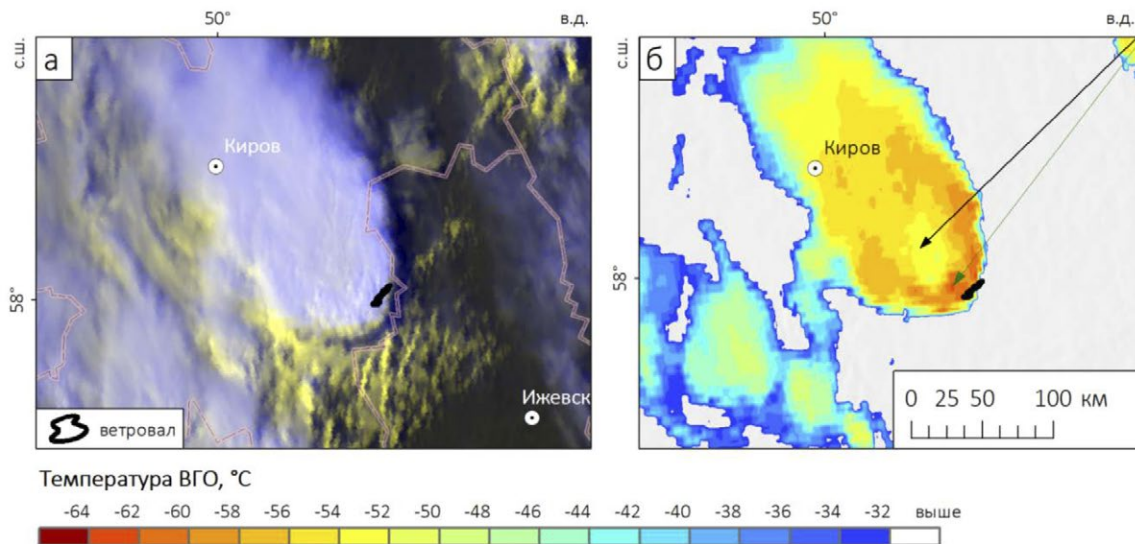
ляющие диагностировать эти явления по снимкам Meteosat-8. Также по данным современного реанализа ERA-5 (Hersbash et al., 2020) рассмотрены условия возникновения этих МКК.

Для проведения исследования на основе базы данных ветровалов (Shikhov et al., 2020), актуализированной до 2021 г., была создана выборка случаев, обеспеченных качественными снимками SEVIRI/Meteosat-8. Она включает 229 ветровалов (112 шкваловых и 117 смерчевых), за период с 2006 по 2021 гг. Данные SEVIRI/Meteosat-8 получены с сервера EUMETSAT. Их обработка включала конвертацию в формат Geotiff, извлечение по границам заданной области, расчет яркостной температуры и альbedo средствами пакета MSGDataRetriever и создание RGB-изображений на основе исходных спектральных каналов и их разностей.

Анализ характеристик МКК со шквалами и смерчами, проводился в два этапа. Изначально путем сопоставления последовательных снимков Meteosat с контурами ветровалов и с имеющейся информацией о времени возникновения явлений определяли, какая именно МКК вызвала ветровал. Если на этом этапе возникала неопределенность, то ветровал исключали из дальнейшего анализа. В итоге 229 ветровалов были отнесены к 97 различным МКК. Также на данном этапе уточнено время возникновения ветровалов. Для каждой МКК был определен масштаб по классификации (Orlanski, 1975), тип по Мэддоксу (Maddox, 1980) и по классификации NSSL (National Severe Storms Laboratory..., 2021). Также выделены случаи трансформации одного типа МКК в другой.

Далее по изображениям температуры ВГО оценивалось наличие сигнатур пробоя тропопаузы (Overshooting Top, ОТ) или кольцеобразных, U/V-образных структур на верхней границе облаков (Enhanced-V) при возникновении шквала или смерча, вызвавшего ветровал. В случае обнаружения таких сигнатур определен их тип и продолжительность существования. Отдельно учитывались ситуации с совместным существованием сигнатур разных типов, и трансформация одной сигнатуры в другую.

При определении типа МКК было принято предположение, что долгоживущий пробой тропопаузы (сигнатура ОТ или CRCUV) в сочетании с наличием ветровала от шквала/смерча свидетельствует о наличии мезоциклона (рис. 1). В идеале наличие мезоциклона должно быть верифицировано по данным ДМРЛ, однако их отсутствие не позволило выполнить верификацию. Также для каждой МКК определен диаметр по большой и малой оси и минимальная температура ВГО при шквале/смерче.



**Рис. 1.** Суперячейка с выраженной кольцевой сигнатурой, вызвавшая ветровал 04.08.2021 г. на снимке Meteosat-8 в комбинации каналов HRV-HRV-IR (а) и температура ВГО (б).

Большинство МКК в момент возникновения шквалов и смерчей имели масштаб мезо-α (64,6%), еще в 6,6% случаев происходила трансформация от масштаба мезо-β к масштабу мезо-α, остальные 28,8% относятся к масштабу мезо-β. В случаях со шквалами доля МКК масштаба мезо-α достигает 72%, а в случаях со смерчами – 56%.

Шквалы, вызывающие ветровалы, связаны обычно с линиями шквалов, квазиокруглыми мезомасштабными конвективными комплексами (МКК) и со случаями трансформации суперячеек в МКК. В свою очередь смерчи в основном генерируются суперячейками (около 40% которых трансформируется затем в МКК), и с линиями шквалов, включающими мезоциклоны.

Продолжительность существования МКК, вызывающих шквалы и смерчи, составляет от 2 ч до 12 ч и более. Среди МКК масштаба мезо-α свыше 50% являются долгоживущими (с продолжительностью существования 10 ч и более), в то время как среди МКК мезо-β масштаба таких всего 23% (в основном

это суперячейки, которые трансформировались в МКК). Продолжительность периода, в течение которого одна МКС способна генерировать шквалы и смерчи, составляет от нескольких минут до 5 ч и более.

С большинством рассмотренных МКС связан только один ветровал (50% случаев) или два ветровала (22,5% случаев). В трех случаях (12.06.2010, 2.08.2017 и 27.06.2020) с прохождением одной МКС связано более 10 ветровалов. Эти МКС имели одну общую особенность – они включали в себя предположительно несколько мезоциклонов (выявленных как пробои тропопаузы), которые двигались параллельно друг другу и привели к возникновению нескольких параллельных полос ветровалов.

Минимальная температура ВГО при возникновении и прохождении шквалов и смерчей составляла от  $-32^{\circ}\text{C}$  до  $-70^{\circ}\text{C}$  (среднее  $-60,1^{\circ}\text{C}$ , медиана  $-62,0^{\circ}\text{C}$ ). В случаях со шквалами она оказалась статистически значимо ниже, чем в случаях со смерчами. Это обусловлено известными различиями в условиях возникновения между шквалами и смерчами (Taszarek et al., 2020). Самыми высокими значениями температуры ВГО (от  $-32^{\circ}\text{C}$  до  $-50^{\circ}\text{C}$ ) характеризуются короткоживущие суперячейки или линии шквалов, которые формировались при слабой конвективной неустойчивости и сильном сдвиге ветра, и вызывали преимущественно смерчи. В свою очередь, долгоживущие МКС формировались обычно в условиях сильной неустойчивости и отличались низкой температурой ВГО (ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

В большинстве случаев (70,6%) в момент образования или прохождения шквала/смерча, вызвавшего ветровал, на ВГО прослеживались сигнатуры интенсивных восходящих потоков – OT, или Enhanced-V (Brunner et al., 2007). В 10% случаев прослеживалось совместное существование двух и более сигнатур, а в 11% случаев – трансформация сигнатуры OT в CRCUV. Продолжительность существования сигнатур составила от 15 мин до 6 ч и более. Наибольшей продолжительностью существования отличались сигнатуры типа OT, причем они не связаны с вышеперечисленными случаями МКС, которые генерировали шквалы и смерчи в течение наиболее продолжительного времени. Для обоих типов явления чаще всего встречаются сигнатуры типа OT. Совместное существование двух и более сигнатур OT и CRCUV более характерно для случаев со шквалами, а трансформация сигнатуры OT в CRCUV – для случаев со смерчами. Доля случаев без сигнатур для МКС со смерчами существенно выше, чем со шквалами, особенно если они были генерированы МКС масштаба мезо- $\beta$ .

Для анализа условий возникновения МКС и их особенностей использован массив данных диагностических переменных (физико-статистических параметров атмосферы), ранее созданный для территории Северной Евразии за период с 1979 по 2020 гг. по данным реанализа ERA-5. Рассчитанные диагностические переменные подразделяются на три основные категории – температурно-влажностные характеристики, параметры ветра и композитные (комплексные) индексы. Данные имеют пространственное разрешение 0,25 и шаг по времени, равный 1 ч. На их основе выявлены условия, способствующие возникновению разных типов МКС, а также сигнатур восходящих потоков на ВГО.

*Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 18-77-10076)*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Brunner J.C., Ackerman S. A., Bachmeier A. S., Rabin, R.M. *A quantitative analysis of the enhanced-V feature in relation to severe weather // Weather and Forecasting. 2007, V. 22(4), P. 853–872.*
2. Hersbach H. et al. *The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049.*
3. Maddox R.A. *Mesoscale convective complexes // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1980. V. 61, P. 1374–1387.*
4. Orlanski I. *A rational subdivision of scales for atmospheric processes // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1975. V. 56. P. 527–530.*
5. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina, A.V. *A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 3489–3513.*
6. Taszarek M., Allen J.T., Púčík T., Hoogewind K.A., Brooks H.E. *Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // J. Climate, 2020, V. 33(24), P. 10263–10286.*



# Using ERA5 reanalysis data to refine climate maps for the electric power industry

Nesviatipaska A.I.<sup>1</sup>, Chereshnyuk S.V.<sup>2</sup>, Leonov I.I.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Research and Development Centre at Federal Grid Company of Unified Energy System, Moscow, Russia

E-mail: [anastasianesvatipaska@gmail.com](mailto:anastasianesvatipaska@gmail.com)

When designing overhead power transmission lines, the accuracy of determining climatic conditions is important. The reliability of overhead lines, and hence the uninterrupted supply of electricity, the provision of consumers and the functioning of industrial and infrastructure facilities depend on the compliance of the climatic parameters selected for design and subsequent operation with possible weather conditions.

The regional climatic zoning obtained on the basis of this technique is in good agreement with the climatic loads actually observed on air lines. However, the technique based on the processing of observational data has its drawbacks.

The placement of ground observation stations is uneven on the territory of Russia, therefore, there is a request for the use of new sources of information that can serve as an addition to the zoning of territories poorly covered by observation data.

The purpose of this work was to test the possibility of using ERA5 reanalysis data to refine regional maps of climatic zoning of the territory of Russia. The paper proposes the use of ERA5 reanalysis data.

For the construction of regional zoning maps, data on the meridional and zonal components of wind speed at 10 meters for wind load, total precipitation and precipitation type for the construction of ice load maps and K-index values for the construction of thunderstorm duration maps were used. The data of the ERA5 and ERA5-Land reanalysis were considered with a space step of  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  and  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ , respectively, and in time increments of 1 hour for the period from 1979 to 2021 for the territory of Russia [1].

The results obtained show that the climate maps constructed according to the reanalysis data are in good agreement with the maps developed based on the processing of station observations.

However, despite the relatively high spatial resolution of the ERA5 reanalysis, the maps obtained cannot be used as the only information for regional zoning.

To use numerical modeling data in the construction of regional climate zoning maps for the electric power industry, it is necessary to use regional reanalysis, which has a significantly higher spatial resolution than existing global reanalysis. However, the creation of such databases requires enormous computing power and is currently possible only for certain regions of the Russian Federation.

## REFERENCES:

1. Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. *The ERA5 global reanalysis*. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 1999–2049.

# Использование данных реанализа ERA5 для уточнения карт климатического районирования для электроэнергетики

Несвятипаска А.И.<sup>1</sup>, Черешнюк С.В.<sup>2</sup>, Леонов И.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, Москва, Россия

E-mail: [anastasianesvatipaska@gmail.com](mailto:anastasianesvatipaska@gmail.com)

При проектировании воздушных линий электропередачи важна точность определения климатических условий. От соответствия выбранных для проектирования и последующей эксплуатации климатических параметров возможным погодным условиям зависят показатели надежности воздушных линий, а значит, и бесперебойность подачи электроэнергии, обеспечение потребителей и функционирование промышленных и инфраструктурных объектов.

На основании действующих в Российской Федерации стандартов были созданы «Методические указания по расчету климатических нагрузок в соответствии с ПУЭ-7 и построению карт климатиче-

ского районирования» [1,2], основанные на обработке и анализе многолетних рядов наблюдений на метеорологических станциях России.

Разработанные в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» стандарты предлагают следующую методику: станционные ряды наблюдений за скоростью и направлением ветра, гололедно-изморозевыми отложениями приводятся к однородному виду, затем по эмпирическим формулам выводятся значения для ветровой нагрузки, эквивалентной толщине стенки гололеда и ветровой нагрузке при гололеде, а также продолжительности гроз на территории России.

На основании непрерывных рядов максимальных за год величин различных климатических характеристик, таких как скорость ветра, эквивалентная толщина стенки гололеда и ветровая нагрузка при гололеде рассчитываются значения климатических характеристик с обеспеченностью 96% (вероятность, с которой данная климатическая величина повторяется раз в 25 лет). Для оценки грозовой опасности территории строятся карты средней продолжительности гроз в часах.

Для каждого типа макро- и мезорельефа районированной территории строятся графики зависимости величин климатических характеристик от высоты над уровнем моря. При построении зависимости учитывается влияние микрорельефа местности вокруг метеостанции и опыт эксплуатации воздушных линий электропередачи. Графики проводятся как верхняя, огибающая точки метеостанций, линия, причем в спорных моментах преимущество отдается находящимся на наиболее открытой местности метеостанциям. На основании высотных зависимостей определяются значения климатических характеристик по территории. Таким образом изолинии районирования проводятся по гипсометрическим линиям. Территория разделяется на климатические районы, где каждому району соответствует свое значение климатических нагрузок, превышение которых ожидается не чаще чем один раз в 25 лет.

Региональное климатическое районирование, полученное на основании данной методики, хорошо согласуется с фактически наблюдаемыми на воздушных линиях климатическими нагрузками. Однако, методика основанная, главным образом, на обработке данных станционных наблюдений имеет свои недостатки.

Размещение станций наземного наблюдения крайне неравномерно на территории России, особенно в ее Азиатской части, потому появляется запрос на использование новых источников информации, способных послужить дополнением для районирования обширных территорий, слабо покрытых данными наблюдений. Такими источниками климатической информации могут быть динамически осредненные и интерполированные архивные климатические данные – реанализы.

Целью данной работы была проверка возможности использования данных реанализа ERA5 для уточнения региональных карт климатического районирования территории России.

В текущей работе предлагается использование данных реанализа ERA5 для уточнения региональных карт климатического районирования. ERA5 – это атмосферный реанализ пятого поколения, разрабатываемый Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), охватывающий период с января 1950 года по настоящее время. Реанализ ERA5 основан на версии CY41R2 модели IFS с 4D-Var усвоением данных и 137 вертикальными сигма-уровнями. Отличительной особенностью данного реанализа является высокое пространственное ( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) и временное разрешение (1 час) [3].

Для построения карт регионального районирования использовались данные широтной ( $u_{10}$ ) и зональной ( $v_{10}$ ) компонентам скорости ветра на 10 метрах для ветровой нагрузки, общее количество осадков (total precipitation) и тип осадков (type precipitation) для построения карт гололедной нагрузки и значения K-индекса (K-index) для построения карт продолжительности гроз. Рассматривались данные реанализа ERA5 и ERA5-Land с шагом по пространству  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  и  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  соответственно и шагом по времени 1 час для периода с 1979 по 2021 год для территории России.

Для ветровой нагрузки строились карты полей максимумов ветра за каждый год и максимумов за весь период, значения сравнивались с рассчитанными станционными, также сравнивались значения для 96%-вероятности. Так как ввиду усредненности значений реанализа поле оказывалось стабильно заниженным, определялся коэффициент соответствия станционным данным с использованием регрессионного анализа.

Для гололедной нагрузки суммировались значения общего количества выпавших осадков за сроки, в которые наблюдался замерзающий дождь. Среди значений за период гололедообразования определялись максимумы за год и за весь период для каждой точки. Полученные значения сравнивались с вычисленным по данным станционных наблюдений значениям.

Для грозовой активности для каждого срока определялось превышения индекса в точке порогового значения активности (35 для многочисленных гроз и разбросанных гроз, 26 для широко разбросанных гроз и изолированных гроз и меньше 20 для отсутствия грозовой активности), суммировались значения за год, определялось среднее за год число часов с грозой.

По полученным значениям были построены карты ветровых и гололедных нагрузок, а также карты продолжительности гроз.

Полученные результаты показывают, что климатические карты, построенные по данным реанализа, хорошо согласуются с картами, разработанными на основе обработки данных станционных наблюдений.

Однако, несмотря на относительно высокое пространственное разрешение реанализа ERA5, полученные карты нельзя использовать как единственную информацию для регионального районирования.

Данные реанализа ERA5-Land дают более высокую детализацию поля скорости ветра, но не могут быть использованы для граничащих с морем регионов, так как при его использовании выпадают из рассмотрения прибрежные точки с максимальной скоростью ветра (данные ERA5-Land представлены только для суши).

Полученные расчетные поля для карт регионального районирования по максимальной скорости ветра, гололедной нагрузке и карт продолжительности гроз могут быть использованы в качестве дополнительной информации, для регионов с очень слабым покрытием метеорологической сети наблюдений.

Для полноценного использования данных численного моделирования при построении региональных карт климатического районирования для электроэнергетики необходимо использовать региональные реанализы, имеющее значительно более высокое пространственное разрешение чем существующие глобальные реанализы. Однако создание подобных баз данных требует колоссальных вычислительных мощностей и на текущий момент возможно только для отдельных регионов Российской Федерации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Правила Устройства Электроустановок. Раздел 2. Передача электроэнергии. Главы 2.4, 2.5. - 7-е издание. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.*
2. *СТО 56947007- 29.240.055-2010 «Методические указания по расчету климатических нагрузок в соответствии с ПУЭ -7 и построению карт климатического районирования».*
3. *Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. The ERA5 global reanalysis. Q J R Meteorol Soc. 2020; 146: 1999– 2049.*

## Meteorological conditions for the use of ground heat for cooling low-rise buildings

Vasilets E.A.<sup>1</sup>, Pischalnikova E.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm State University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Perm, Russia

E-mail: [vasiletsea@mail.ru](mailto:vasiletsea@mail.ru)

In the warm season, at high air temperatures, buildings are prone to overheating. Comfortable conditions in the room can be achieved with a cooling system, the energy for which is converted from the ground. To use it, it is necessary to study the temperature of the soil itself at different depths and meteorological characteristics representative of the warm period of the year in Perm, such as air temperature and precipitation. The material for the study was the data of the meteorological station (MS) Perm for the warm periods of 2014–2019. The Microsoft Excel program was used for data processing and construction of graphic material.

The basis of the energy intensity of the soil is the phase transition of water that seeps through with rainwater. Precipitation of low intensity does not have a significant impact, in contrast to long and moderate. Therefore, it is necessary to take into account precipitation falling on average over several weeks.

For the period from 2014 to 2019 days were considered when precipitation more than 0.0 mm was observed (table). The minimum number was noted in June 2016 and amounted to 24 days; also, in terms of the amount for the entire season, the minimum falls on this year. In the warm period of 2017, the largest number of days with precipitation was noted, when MS Perm recorded 147 days with precipitation out of 153 total days of the season. The share of significant precipitation is 29% in 2017, 22% in 2018, and the highest value is 33% and is observed in 2019. In the warm period, when studying soil temperature, air temperature and precipitation with an intensity of more than 3 mm for 2014–2019 are considered. The ground temperature decreases more slowly than the air temperature (figure). At the beginning of the conditional cooling period in the territory of Perm, the soil temperature at a depth of 3.2 m has the lowest value in May - 4.2°C. Then this characteristic increases linearly and does not depend on the outside temperature. To cool low-rise buildings, a ground temperature of at least 2°C is required, so the use of soil as a conditioner is suitable for the territory of Perm, since the values below are not noted.

During the warm period of the year, the optimum air temperature for a living room is 22–25°C. In this regard, days were identified when the maximum outdoor temperature was 25°C or more (table). On average, for the entire study period, there are 31 days with temperatures above 25°C. For example, in 2016, twice as many days were recorded with the required air temperature, at which it is necessary to cool the premises. For a de-



tailed study of the need to use building cooling in the territory of Perm, the hottest year of the study period, 2016, was considered. To determine the duration of the time interval when the air temperature is above 25°C, urgent permit data were required. A dependence is revealed that from June to August the number of days increases, but the number of periods with elevated air temperature does not increase. The maximum duration of elevated outdoor air temperature is observed for four periods in a row at 11, 14, 17 and 20 hours of local time, in rare cases - one period.

Thus, in the warm period, air conditioning in the Perm region must be applied from 2 to 8 pm local time, in abnormally hot years - from 11 am. Soil temperature and meteorological parameters studied for 2014–2019 indicate the possibility of using special equipment (heat pumps) as a microclimate control in the room. Nevertheless, for a more detailed study of the topic, it is necessary to increase the temporal and spatial series of observations.

## Метеорологические условия использования тепла грунта для охлаждения малоэтажных зданий

Василец Е.А.<sup>1</sup>, Пищальникова Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Пермь, Россия

E-mail: [vasiletsea@mail.ru](mailto:vasiletsea@mail.ru)

В теплое время года при высокой температуре воздуха здания подвержены перегреву. Комфортных условий в помещении можно достичь с помощью системы охлаждения, энергия для которой преобразовывается из грунта. Для его использования необходимо изучить температуру самого грунта на разных глубинах и метеорологические характеристики репрезентативные для теплого периода года в г. Пермь, такие как температура воздуха и атмосферные осадки. Материалом для исследования послужили сведения метеорологической станции (МС) Пермь за теплые периоды 2014–2019 гг. Для обработки данных и построения графического материала использована программа Microsoft Excel.

Основу энергоемкости грунта составляет фазовый переход воды, которая просачивается с дождевыми водами. Осадки небольшой интенсивности не оказывают значительного влияния в отличие от продолжительных и умеренных. Поэтому необходимо учитывать осадки, выпадающие в среднем за несколько недель [1].

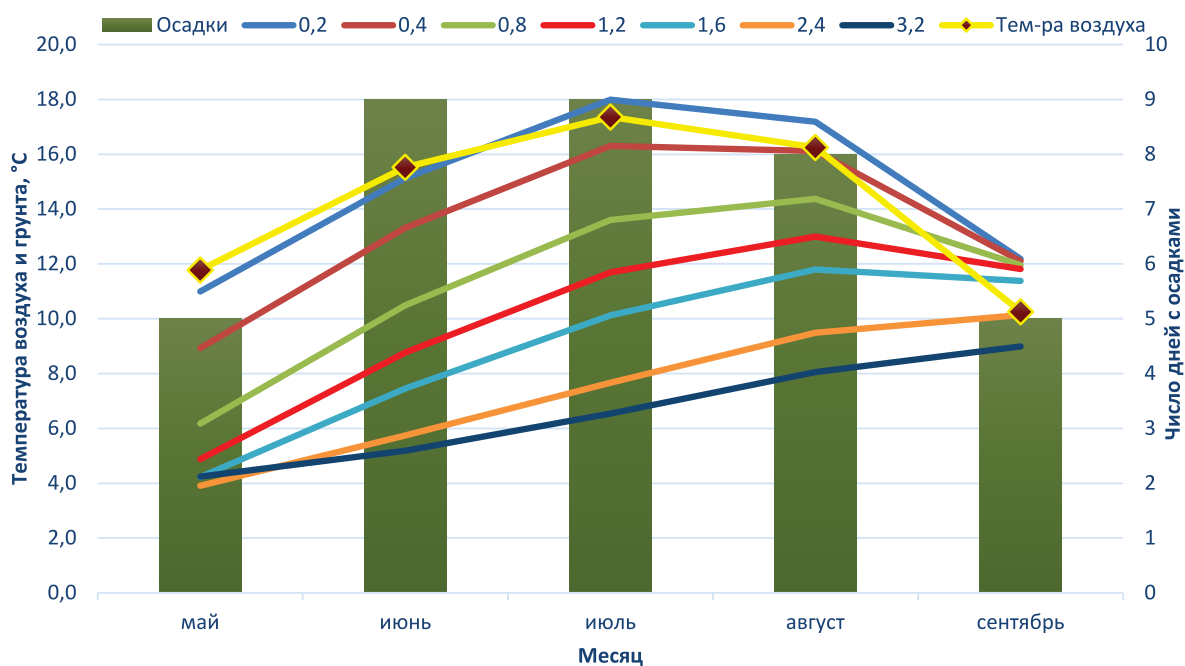
### Таблица 1.

Метеорологическая информация по данным МС Пермь (количество дней с осадками / количество дней с умеренными осадками более 3 мм, температура воздуха выше 25°C).

Месяц/год	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Май	26/ 2/ 9	28/5/ 4	26/2 / 8	27/7/ 1	29/6/ 2	27/8/ 7
Июнь	27/ 9/ 4	26/8/ 16	24/7/ 6	30/13/ 0	29/11/ 7	28/7/ 22
Июль	28/ 8/ 4	31/16/ 1	29/2/ 22	30/10/ 11	30/5/ 22	31/12/ 7
Август	31/ 4/ 10	30/12/ 0	26/3/ 26	30/6/ 6	28/6/ 7	31/16/ 1
Сентябрь	30/ 5/ 0	30/41/ 1	28/3/ 0	30/6/ 0	29/ 4/ 0	29/ 5/ 0

За период с 2014 по 2019 гг. за каждый месяц были рассмотрены дни, когда наблюдались осадки более 0,0 мм (табл. 1). Минимальное количество отмечалось в июне 2016 г. и составило 24 дня, также по сумме за весь сезон минимум приходится на данный год. Ежедневно осадки наблюдались в августе и сентябре 2014 г., июле и сентябре 2015 г., июне и сентябре 2017 г., июле и августе 2019 г. В теплый период 2017 г. отмечалось наибольшее количество дней с осадками, когда МС Пермь зафиксировала 147 дней с осадками из 153 общего числа дней сезона. Повторяемость осадков более 3 мм по отношению к общему числу дней составляет 20% в 2014 г., 31% – в 2015 г., 13% – в 2016 г., такое соотношение является наименьшим и связано с климатическими характеристиками этого сезона, который отмечается сухим и жарким. Доля существенных осадков составляет 29% в 2017 г., 22% – в 2018 г. и наибольшее значение равняется 33% и наблюдается в 2019 г.





**Рис. 1.** Временное распределение температуры грунта и метеорологических характеристик по месяцам.

В теплый период при изучении температуры грунта рассматривается температура воздуха и осадки интенсивностью более 3 мм за 2014–2019 гг. Солнечная энергия проникает в верхние слои грунта и может сохраняться на протяжении долгого времени. Температура грунта уменьшается медленнее, чем температура воздуха. В слое 0,2 м, начиная с середины июня грунт становится теплее, чем окружающий воздух, с августа воздух остывает и значения становятся ниже температуры на глубине 0,4 м (рис. 1). К концу августа температура воздуха становится ниже температуры в слоях 0,8–1,6 м и приближается к значению на глубине 2,4 м (около 10°C). В начале условного периода охлаждения на территории Перми температура грунта на глубине 3,2 м имеет самое низкое значение в мае – 4,2°C. Однако это значение выше, чем на глубинах 1,6 и 2,4 м. Затем данная характеристика линейно возрастает и не зависит от температуры наружного воздуха, поскольку пик температуры воздуха приходится на июль, после – идет на спад, в то же время температура грунта увеличивается и достигает своего максимума осенью.

Для охлаждения малоэтажных зданий необходима температура грунта не менее 2°C [2], таким образом применение грунта в качестве кондиционирования подходит для территории Перми, поскольку значения ниже не отмечаются.

Пик среднего количества дней со значимыми осадками фиксируется в июне и июле в количестве 9 дней. В крайние месяцы сезона (май, сентябрь) осадки выпадали реже, в среднем 5 дней за месяц, в августе – 8 дней.

В теплый период года оптимальная температура воздуха для жилой комнаты составляет 22–25°C [3]. В связи с этим были выделены дни, когда максимальная температура наружного воздуха равнялась 25°C и более (таблица), чтобы рассмотреть актуальность использования кондиционеров. В среднем за весь исследуемый период отмечается 31 день с температурой выше 25°C. При этом в отдельные сезоны наблюдается существенное отклонение от данного значения. Например, в 2016 г. зафиксировано в два раза больше дней с необходимой температурой воздуха, при которой нужно охлаждать помещения. В сентябре температура воздуха достаточно комфортная, значений выше 25°C не отмечается, поэтому кондиционирование не требуется. Значения в мае и июне примерно одинаковые, июль является самым теплым, что характерно для этого месяца в Перми, т.к. на него приходится пик температуры воздуха. Август имеет большой показатель за счет значений в 2016 г., что является аномалией.

Для детального изучения необходимости использования охлаждения зданий на территории Перми был рассмотрен самый жаркий год из исследуемого периода – 2016. Для определения продолжительности временного интервала, когда температура воздуха выше 25°C потребовались данные срочного разрешения. В мае, июне и августе продолжительность периода с температурой выше 25°C в среднем составляет три срока, в июле – два. Выявляется зависимость, что с июня по август увеличивается число дней, но не увеличивается число сроков с жарой. Максимум длительности повышенной температуры воздуха наружного воздуха отмечается четыре срока подряд в 11, 14, 17 и 20 ч местного времени, в редких случаях – один срок. Чаше всего в мае повышенная температура воздуха фиксируется в 14 и 17 ч, в июне и июле – в 17 ч, в августе – в 14 и 17 ч, при этом в некоторые дни температура воздуха 25°C и более регистрируется в 11 ч, что приводит к расширению по времени использования кондиционера.

Таким образом, в теплый период кондиционирование в Пермском крае необходимо применять с 14 по 20 ч местного времени, в аномально жаркие годы – с 11 ч. Температура грунта и метеорологические параметры, исследованные за 2014–2019 гг. указывают на возможность использования специального оборудования (тепловых насосов) в качестве регулирования микроклимата в помещении. Тем не менее, для более детального изучения темы необходимо увеличить временной и пространственный ряд наблюдений.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Уропор. Системы внутреннего климата. Геотермальные системы. 2019. [Электронный ресурс] – URL: <http://wiki.masterwatt.ru/files/TD/k/Uponor/Uponor2.pdf> (дата обращения: 01.06.2022).
2. Разновидности и принцип работы тепловых насосов. Innotech технологии. [Электронный ресурс] – URL: <http://texnoved.ru/teplnasos/> (дата обращения: 06.06.2022).
3. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные.
4. Параметры микроклимата в помещениях. Дата введения 1999-03-01. Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс».

## Features of power grid accidents from the wind loads on the example of PJSC Rosseti of the Center and the Volga Region

Loktionov O.A., Zabelin M.A.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

E-mail: [LoktionovOA@yandex.ru](mailto:LoktionovOA@yandex.ru)

The analysis of the accident rate of power facilities in Russia demonstrates that the reliability of the power grid elements is influenced not only by design, operational reasons, but also by factors of weather and climatic phenomena influence, in particular extreme events. According to the largest electric grid company PJSC Rosseti, one of the key causes of accidents in the electric power industry, for which up to half of technological failures are currently recorded, occur as a result of the impact of climatic factors, among which wind exposure plays a leading role (17% of the total accidents).

As part of the study, the analysis of the features of accidents on the power transmission lines of PJSC Rosseti of the Center and the Volga region for the period 2012-2021 as a result of the impact of wind loads was carried out and quantitative distributions were formed in the context of various parameters. As initial data on the technical condition of the networks, summary data on emergency outages in the context of each power district over the past 10 years in the Kaluga, Vladimir, Tula, Ryazan, Ivanovo, Nizhny Novgorod, Kirov regions, as well as Mari El and Udmurtia were used. Using this information, a script was developed that, according to keywords, allowed identifying those accidents that are directly related to the wind load, and on their basis to form a new array with information on the voltage class of the object and the total duration of power supply interruption. To simplify the analysis, the information obtained on technological violations is classified by energy districts throughout the territory.

The main parameter determining the effect of wind loads on power lines is the maximum wind speed averaged over a 10-minute time interval between the observation periods, as the most representative characteristic that allows taking into account sharp gusts of wind. Data on 3-hour time intervals from 2012 to 2021 for more than 70 weather stations were used as initial data. It should be emphasized that the potential absence of a weather station in the studied area of the region is compensated by analyzing the adjacent territories in order to identify the nearest suitable hydrometeorological service points.

The process of determining the values of maximum wind speeds for each technological violation over a 10-year period of time consisted in approximating the time of the accident to the previous urgent observation interval for the nearest weather station and fixing the required value within the estimated energy district. According to the estimates obtained, the distribution of accidents is estimated according to such parameters as: voltage class and duration of power supply interruptions depending on wind speed.

In the case of distribution of technological violations due to the impact of wind loads in the context of voltage classes of power lines in research region, it was found that the largest shares correspond to voltage classes of 10 kV and 0.4 kV, which allows us to consider objects of this voltage class as the most common and vulnerable. The distribution of the power supply interruptions duration due to wind exposure in the context of voltage classes demonstrates that the lower the voltage class of power lines, the, first of all, the greater the me-

dian value for the duration of overflows corresponds to it. In addition, the higher the voltage class, the closer the mode is to the minimum values, which indicates a high stability of the power lines and a rapid recovery to normal operation.

Studies on the assessment of trends in the main causes of technological failures at power grid facilities in Russia and abroad show that the structure of failures is multifaceted and nonlinear, and from the point of view of quantitative characteristics, it is recommended to evaluate using model estimates of the probability of failure-free operation based on the cumulative Weibull distribution function.

*The study was carried out with the support of the RNF project No. 18-79-10255.*

## Особенности аварийности линий электропередачи от воздействия ветровых нагрузок на примере ПАО «Россети Центра и Приволжья»

Локтионов О.А., Забелин М.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия  
E-mail: LoktionovOA@yandex.ru

**А**нализ аварийности объектов энергетики в России демонстрирует, что на надежность элементов электроэнергетических систем влияют не только конструктивные, эксплуатационные причины, но и факторы воздействия погодных и климатических явлений, в частности экстремальных явлений [1]. По данным ПАО «Россети» [2], одной из ключевых причин аварий в электроэнергетике, для которой в настоящее время фиксируется до половины технологических сбоев происходят в результате воздействия климатических факторов, среди которых ведущую роль играет воздействие ветра.

На рисунке 1а приведена круговая диаграмма распределения долей технологических нарушений, которая показывает, что порядка 17% аварий произошли в результате воздействия ветровых нагрузок на объекты электросетевого хозяйства. Наиболее восприимчивым объектом электросетевого комплекса, по данным АО «СО ЕЭС» [3], к проявлению нагрузок климатического характера на территории России относятся линии электропередачи (ЛЭП), а именно (в порядке убывания доли): провода и кабели – 38%, изоляторы – 23%, опоры – 9% и арматура – 3%. Негативное проявление в виде технологических нарушений на данных объектах, безусловно, связано с высокой пространственной рассредоточенностью ЛЭП.



**Рис. 1.** Распределение долей технологических нарушений: а) по причинам (данные ПАО «Россети»); б) по объектам/элементам (по данным АО «СО ЕЭС»).

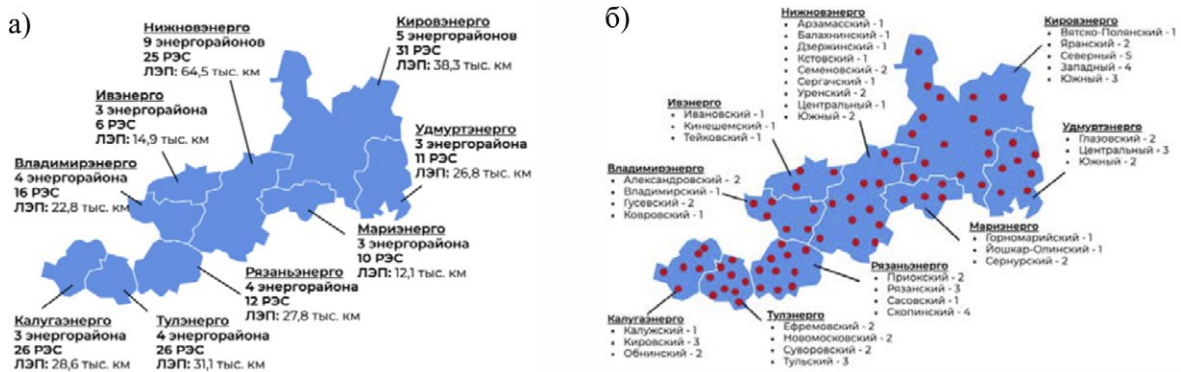
В рамках исследования проведен анализ особенностей аварийности на линиях электропередачи ПАО «Россети Центра и Приволжья» (рисунок 2а) за период 2012-2021 гг. в результате воздействия ветровых нагрузок и сформированы количественные распределения в разрезе различных параметров. Территориальный охват данной ДЗО ПАО «Россети» составляет 38 энергорайонов с суммарной протяженностью ЛЭП – 226,7 тысяч км.

В качестве исходных данных о техническом состоянии сетей использованы сводные данные об аварийных отключениях в разрезе каждого энергорайона за последние 10 лет в Калужской, Владимирской, Тульской, Рязанской, Ивановской, Нижегородской, Кировской областях, а также Марий Эл и Удмуртии. За рассматриваемый промежуток времени для них зафиксировано более чем 500 тысяч аварий для которых приведены сведения о предполагаемой организационной и технической причине нарушений. С использованием этих сведений разработан скрипт, который, по ключевым словам, позволил идентифицировать те аварии, которые непосредственно связаны с ветровой нагрузкой, и на их базе

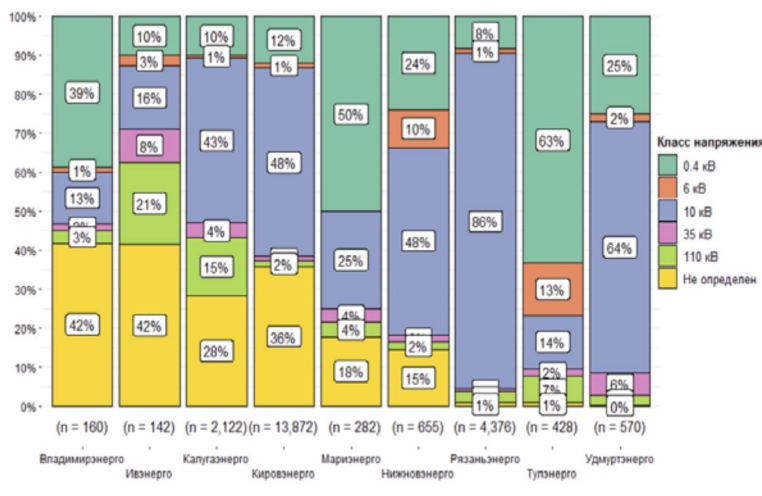
сформировать новый массив с информацией по классу напряжения объекта и суммарной длительностью прекращения электроснабжения. Для упрощения анализа полученные сведения по технологическим нарушениям классифицированы по энергорайонам в рамках всей территории.

Основным параметром, обуславливающим воздействие ветровых нагрузок на ЛЭП, выбрана максимальная скорость ветра, осредненная за 10-ти минутный интервал времени между сроками наблюдений, как наиболее репрезентативная характеристика, позволяющая учитывать резкие порывы ветра. Для этого сформировано распределение метеостанций на территории рассматриваемых 9 субъектов с географической привязкой к энергорайону (рисунок 2б). В качестве исходных данных использованы сведения по 3-х часовым временным интервалам с 2012 по 2021 год для более чем 70 метеостанций. Необходимо подчеркнуть, что потенциальное отсутствие метеостанции в исследуемом районе региона компенсировано за счет анализа прилегающих территорий с целью идентификации ближайших подходящих пунктов гидрометеослужбы.

В качестве неопределенности при реализации данной процедуры можно отметить, что сведения метеопараметров частично отсутствуют для некоторых метеостанций на территории 9 субъектов в БД МЦД-ВНИИГМИ [4], что может быть решено за счет использования срочных метеонаблюдений из других источников или данных реанализа Climate Data Store Copernicus, например, ERA5 [5].



**Рис. 2.** Карта расположения на территории ПАО «Россети Центра и Приволжья»: а) региональных энергосистем б) метеостанций (по данным ВНИИГМИ-МЦД).



**Рис. 3.** Доли технологических нарушений по причине воздействия ветровых нагрузок в разрезе классов напряжения ЛЭП для ПАО «Россети Центра и Приволжья».

Процесс определения значений максимальных скоростей ветра для каждого технологического нарушения за 10 летний период времени заключался в приближении времени аварии к предшествующему срочному интервалу наблюдения для ближайшей метеостанции и фиксации необходимого значения в рамках оцениваемого энергорайона. По полученным оценкам оценено распределение аварий по таким параметрам, как: класс напряжения и длительность перерывов электроснабжения в зависимости от скорости ветра.

В случае распределения технологических нарушений по причине воздействия ветровых нагрузок в разрезе классов напряжения ЛЭП для ПАО «Россети Центра и Приволжья», приведенных на рисунке 3, установлено, что наибольшие доли соответствуют классам напряжения 10кВ и 0,4кВ, что позволяет рассматривать объекты данного класса напряжения, как наиболее распространенные и уязвимые.

Распределение длительности перерывов электроснабжения по причине воздействия ветра в разрезе классов напряжения, приведенное на рисунке 4 демонстрирует, что чем ниже класс напряжения у ЛЭП, тем, в первую очередь, большее медианное значение по длительности перерывов ему соответст-



вует. Помимо этого, чем выше класс напряжения, тем ближе располагается мода к минимальным значениям, что свидетельствует о высокой устойчивости ЛЭП и быстром восстановлении к нормальному режиму функционирования.

Исследования по оценке тенденций изменения основных причин технологических отказов на объектах электросетевого комплекса в России и зарубежных странах показывают, что структура отказов многогранна и нелинейна, и с точки зрения количественных характеристик, рекомендуется проводить оценку с помощью модельных оценок вероятности безотказной работы на базе кумулятивной функции распределения Вейбулла [6].

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 18-79-10255.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Klimenko V.V., Kondratyeva O.E., Tereshin A.G., Fedotova E.V., Loktionov O.A., Voronkova E.M. *Wind Regime Change over the Russian Territory and the Accident Rate of Overhead Power Lines. Doklady Physics*, 2021, 66(3), pp. 80–87. DOI: 10.1134/S1028335821030034
2. *Годовые отчеты ПАО «Россети» (2010-2021) [Электронный ресурс]* URL: <https://rosseti.ru/investors/info/year/>
3. Лишуды А.В. АО «СО ЕЭС». *Участие в расследовании аварий, сбор информации об авариях и иных технологических нарушениях, анализ причин аварийности. Участие в контроле за техническим состоянием объектов электроэнергетики [Электронный ресурс]* URL: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf\\_5\\_231018\\_prez\\_05\\_inv.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_5_231018_prez_05_inv.pdf)
4. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». *Свидетельство о государственной регистрации БД № 2014620549 [Электронный ресурс]* URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#onucanie-массива-данных>
5. Copernicus Climate Data Store. *ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present [Электронный ресурс]* URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>
6. Клименко В.В., Кондратьева О.Е., Локтионов О.А., Федотова Е.В. *Влияние меняющихся ветровых нагрузок на надежность воздушных линий электропередачи в различных регионах России. Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, №1, Т.504, с. 58-65. DOI: 10.31857/S2686740022030105*

## СЕКЦИЯ 9

Инструментальная  
и информационно-  
измерительная  
инфраструктура  
региональных  
исследований  
окружающей среды

## SESSION 9

Instrumental  
and Information  
and Measuring  
infrastructure  
of a Regional  
Environmental  
Study

## Multichannel geophysical recorder for monitoring processes in the earth's crust and geophysical exploration

Malyshkov S.Yu.<sup>1</sup>, Gordeev V.F.<sup>1</sup>,  
Krutikov V.A.<sup>1</sup>, Shtalin S.G.<sup>2</sup>, Polivach V.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems  
SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics, Tomsk, Russia

E-mail: [sersh@asu.tusur.ru](mailto:sersh@asu.tusur.ru)

In connection with the intensive development of new territories and the increasing anthropogenic load on the environment, necessary to create new environmentally friendly means and methods for controlling dangerous geological processes becomes. This paper shows the possibilities of the Earth's natural pulsed electromagnetic field (PEEMF) method for solving a wide range of problems in engineering geology, geophysics, and fundamental research in the field of Earth sciences and the prospects for its further development.

The concept of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth (ENEMF) was introduced by Alexander A. Vorobyov at the end of the 60s of the last century. He also put forward the hypothesis that impulses can arise in the earth's crust as a result of the processes of converting tectonic energy into electromagnetic energy [1]. It was expected that an increased intensity of the flow of electromagnetic pulses would be observed on the immediately before and at the time of strong earthquakes, first due to the accumulation of energy, and then the destruction of rocks in the epicentral regions of the source of the event. And exactly the first studies were done on the possibilities of the ENPEMF method for controlling processes in the earth's crust in the Tomsk scientific school [2].

New possibilities in the progress of the method appeared with the development of a series of multichannel geophysical recorders certified as a measuring instrument [3]. The ability to fine-tune the amplification paths of the measuring channels and link each measurement to the current time made the method of geophysical surveys using a network of recorders, some of which record background values possible to develop.

In our papers [4, 5], a new method for separating spatio-temporal variations of ENPEMF is substantiated and proposed, which is suitable both for predicting exogenous and endogenous processes in the monitoring mode and for mapping structural heterogeneities in the earth's crust when solving problems of engineering geology and geophysics. As noted

earlier, the ENPEMF method is based on the registration of signals that depend on the properties of the emitting material and the effects on it. The proposed method of monitoring and exploration combines the positive aspects of electrical and seismic methods. This significantly reduces the complexity, cost and timing of geophysical work.

A positive result of the work was obtained in the Caucasus, the Urals, Siberia, Kamchatka, Finland and Vietnam. At present, the ENPEMF method is included in the Program for Comprehensive Interdisciplinary Research of the Natural Environment of the Arctic Tundras of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, implemented on the basis of the research station "Ostrov Bely". It is expected the solution of a wide range of tasks will allow not only to create a new series of equipment for research in the Far North but adapt the ENPEMF method for geocryological surveys. A comprehensive study of atmospheric-lithospheric relationships, latitudinal features of the formation of the Earth's electromagnetic fields and regional effects will open up new possibilities for the ENPEMF method for solving a wide range of problems in the field of Earth sciences.

*The work was carried out within the framework of the state task of IMCES SB RAS.*

#### REFERENCES:

1. Vorobyov A.A. *Tectonoelectric phenomena and the emergence of a natural pulsed electromagnetic field of the Earth - ENIEMF - Tomsk, 1979, - 585 p. - The manuscript was presented by the Tomsk Polytechnic Institute. Dep. in VINITI: Part 1 - No. 4296-79 - 202 p.; Part 2 - No. 4297 - 79 - 149 pages; Part 3 - No. 380-80 - 243 p. (in Russian)*
2. Vorobyov A.A. *On the possibility of electrical discharges in the bowels of the Earth // Geology and Geophysics. 1970. No. 12. S. 3-13. (in Russian)*
3. *Malyshkov Yu P and Malyshkov S Yu 2009 Russian Geology and Geophysics 50 pp 115-130.*
4. *Malyshkov Yu.P., Malyshkov S.Yu., Gordeev V.F., Shtalin S.G., Polivach V.I., Krutikov V.A., Zaderigolova M.M. Earth's Natural Electromagnetic Noises: Their Deep-Seated Origin, Effect on People, Recording and Application in Geophysics// Horizons in World Physics. 2015, v.283, pp. 43-127.*
5. *Gordeev V.F, Malyshkov S.Yu, Shtalin S.G, Polivach V.I and Krutikov V.A. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters// IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 48. 012026. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012026.*

## Многоканальный геофизический регистратор для мониторинга процессов в земной коре и геофизической разведки

Малышков С.Ю.<sup>1</sup>, Гордеев В.Ф.<sup>1</sup>, Крутиков В.А.<sup>1</sup>, Шталин С.Г.<sup>2</sup>, Поливач В.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

E-mail: [msergey@imces.ru](mailto:msergey@imces.ru)

**В** связи с интенсивным освоением новых территорий и увеличивающейся антропогенной нагрузкой на окружающую среду возникает необходимость создания новых экологически чистых средств и методов контроля опасных геологических процессов. В настоящей работе показаны возможности метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) для решения широкого круга задач инженерной геологии, геофизики и фундаментальных исследований в области наук о Земле и перспективы его дальнейшего развития.

Понятие о естественном импульсном электромагнитном поле Земли (ЕИЭМПЗ) введено Воробьевым в конце 60-х годов прошлого столетия. Им же была высказана гипотеза, что импульсы могут возникать в земной коре в результате процессов преобразования тектонической энергии в электромагнитную [1]. Ожидалось, что повышенная интенсивность потока электромагнитных импульсов будет наблюдаться накануне и в момент сильных землетрясений, вначале за счет накопления энергии, а затем разрушения горных пород в эпицентральных районах очага события. И именно в Томской научной школе были поставлены первые исследования по возможностям метода ЕИЭМПЗ для контроля процессов в земной коре [2]. Источниками естественных электромагнитных полей, на регистрации которых базируется метод мониторинга по параметрам ЕИЭМПЗ, являются неоднородности структуры грунтов, разнонапряженные структуры, трещины и микротрещины. В результате механоэлектрических преобразований под действием деформационных волн из нижней мантии, приливных сил, микросейсмических колебаний, ветровой и техногенной нагрузки на этих источниках возникают импульсные электромагнитные поля, которые и создают естественный электромагнитный фон литосферного происхождения [3]. Импульс-



ные электромагнитные поля могут меняться как при изменении напряженно-деформированного состояния грунтов, так при изменении воздействия на источники полей.

Почти одновременно с поиском предвестников землетрясений метод ЕИЭМПЗ начал применяться и в геофизической разведке. В основном он использовался при изучении оползневых процессов [4]. Нельзя сказать, что в решении инженерно-геологических задач метод получил признание и широкое применение. Причины скептицизма были в низкой воспроизводимости результатов измерений. Поток регистрируемых импульсов носит шумовой характер, в структуре ЕИЭМПЗ значительную долю составляют импульсы от грозových разрядов, интенсивность импульсного потока из литосферы зависит не только от состояния геологической среды, но и от сейсмического, тектонического и антропогенного воздействия на нее и непрерывно меняется. Предложенные в конце 20 века приборные и методические решения не нашли применения в практике производства геофизических работ.

Новые возможности в развитии метода появились с разработкой сертифицированных, как средство измерения, серии многоканальных геофизических регистраторов [5]. Возможность точной настройки усилительных трактов измерительных каналов и привязки каждого измерения к текущему времени позволило разработать метод геофизических исследований с использованием сети регистраторов, часть из которых регистрирует фоновые значения [6].

В наших работах [7,8] обоснован и предложен новый способ выделения пространственно-временных вариаций ЕИЭМПЗ, пригодный как для прогноза экзогенных и эндогенных процессов в режиме мониторинга, так и для картирования структурных неоднородностей в земной коре при решении задач инженерной геологии и геофизики. Как отмечалось ранее, метод ЕИЭМПЗ основан на регистрации сигналов, которые зависят от свойств излучающего материала и воздействий на него. Предложенный способ мониторинга и разведки совмещает в себе положительные моменты электроразведочных и сейсморазведочных способов. По сравнению с сейсморазведкой предлагаемый способ не требует специальной подготовки профилей, взрывных работ, выполняется несколькими операторами в пешем варианте или с использованием любого вида наземного транспорта. При этом значительно снижается трудоемкость, себестоимость и сроки выполнения геофизических работ.

В настоящее время наиболее распространенное применение в промышленности получила система мониторинга НДС (напряженно-деформированного состояния) грунтов и прогноза экзогенных процессов. В режиме мониторинга экзогенных процессов для объединения данных измерений и обеспечения распределенного доступа пользователей к мониторингу и анализу в 2010 г. была спроектирована и реализована автоматизированная система контроля геодинамических процессов, которая используется ПАО «Газпром» для прогноза активизации оползней. Также метод применяется для поиска активных геологических разломов и зон трещиноватости, представляющих опасность промышленным объектам атомной промышленности и предприятиям ТЭК. Положительный результат работ получен на Кавказе, Камчатке, Финляндии и Вьетнаме. В настоящее время метод ЕИЭМПЗ включен в Программу комплексных междисциплинарных исследований природной среды арктических тундр Ямало-Ненецкого автономного округа, реализуемой на базе научно-исследовательского стационара «Остров Белый». Главные поставленные задачи:

- Исследование источников, механизмов формирования и анализ пространственно-временной структуры параметров литосферной составляющей ЕИЭМПЗ в экстремальных условиях высоких широт.
- Адаптация метода ЕИЭМПЗ для картирования активных разрывных нарушений в условиях слабой современной сейсмичности Арктики.
- Оценка вклада естественной дегазации газовых месторождений в общую эмиссию метана с Арктических территорий.
- Проверка возможности метода ЕИЭМПЗ для картирования элементов экзогенной геодинамики в условиях криолитозоны.
- Исследование возможностей метода для поиска криогенных образований и оценки несущей способности мерзлых грунтов.
- Мониторинг локальных неоднородностей геодинамической природы верхней части геологического разреза с одновременным использованием магнитных и электрических компонент.
- Исследование динамики многолетнемерзлых грунтов в период ускоренных изменений климата и усиления антропогенной нагрузки.

Исследование динамики геокриологических процессов и влияния тектонических нарушений на скорость деградации мерзлоты в период ускоренных изменений климата и усиления антропогенной нагрузки необходимо для обеспечения задач проектирования и эксплуатации социальных и промышленных объектов, в том числе, объектов добычи, транспортировки и переработки полезных ископаемых. В результате выполнения проекта будет решаться одна из наиболее актуальных задач в проблеме устойчивого развития высокоширотных территорий Российской Федерации – предупреждающий контроль несущей способности многолетнемерзлых грунтов. Ожидается, что решение поставленных задач позволит не только создать новую серию оборудования для исследований в районах Крайнего Севера и адап-



тировать метод ЕИЭМПЗ для геокриологических изысканий. Комплексное исследование атмосферно-литосферных связей, широтных особенностей формирования электромагнитных полей Земли и региональных эффектов позволит открыть новые возможности метода ЕИЭМПЗ для решения широкого круга задач в области наук о Земле.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Воробьев А.А. Тектоноэлектрические явления и возникновение естественного импульсного электромагнитного поля Земли - ЕИЭМПЗ - Томск, 1979, - 585 с. - Рукопись представлена Томским политехническим институтом. Деп. в ВИНТИ: Часть 1 - № 4296-79 - 202 с.; Часть 2 - № 4297 - 79 - 149 с.; Часть 3 - № 380-80 - 243 с.
2. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. 1970. № 12. С. 3-13.
3. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли. // Геология и геофизика. 2009. № 2. С. 152-172.
4. Матов Ш.Р., Саломатин В.Н., Яворович Л.В. Выявление степени деформации участков оползня методом регистрации импульсов электромагнитного поля // Инженерная геология. 1983. № 2. С. 98-101.
5. Шталин С.Г., Гордеев В.Ф., Малышков С.Ю., Поливач В.И., Малышков Ю.П. Регистратор импульсных электромагнитных полей для мониторинга геодинамических процессов и геофизической разведки // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 32-37.
6. Способ геофизической разведки: пат. 2414726 Рос. Федерация: МПК G01V 3/08 (2006/01) Малышков Ю.П., Малышков С.Ю., Шталин С.Г., Гордеев В.Ф., Поливач В.И. -20.03.2011, Бюл. №8.
7. Malyshkov Yu.P., Malyshkov S.Yu., Gordeev V.F., Shtalin S.G., Polivach V.I., Krutikov V.A., Zaderigolova M.M. Earth's Natural Electromagnetic Noises: Their Deep-Seated Origin, Effect on People, Recording and Application in Geophysics // Horizons in World Physics. 2015, v.283, pp. 43-127.
8. Gordeev V.F., Malyshkov S.Yu., Shtalin S.G., Polivach V.I. and Krutikov V.A. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 48. 012026. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012026.

## Monitoring of greenhouse gases fluxes at scientific-researcher field station Mukhrino, Khanty-Mansiysk

Dmitrichenko A.A.<sup>1</sup>, Dyukarev E.A.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, Russia

E-mail: dekot@mail.ru

West Siberian peatlands contain large reserves of carbon and in their natural state are an effective sink for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and a significant source of methane (CH<sub>4</sub>) [Yu, 2011; Liss et al., 1981]. The response of peatlands to climate change lasts several decades. Continuous long-term monitoring helps to detect ongoing changes in peatland functioning (such as biodiversity, net primary production, greenhouse gas emissions, carbon and nitrogen uptake levels, hydrology) and determine the influence of external factors (climate, hydrology) affecting peatland ecosystems [Berglund, 2003; Joosten, 2015; Callaghan et al., 2020; Tsyganov et al., 2021]. In order to collect comprehensive observations of peat bogs, a research field station "Mukhrino" was opened in the middle taiga zone of Western Siberia in 2009 [Dyukarev et al., 2021a, 2021b]. The research focus is to study the impact of climate change on the carbon cycle, hydrology and biodiversity of bog ecosystems.

Field station "Mukhrino" is located in the central part of Western Siberia in the Middle Taiga bioclimatic zone, 20 km southwest of Khanty-Mansiysk, on the second terrace of the left bank of the Irtysh River (near the confluence with the Ob River). The study area is located in the northeastern part of the complex of pristine Mukhrino bog, which has a total area of ~75 km<sup>2</sup>. The vast area to the southwest is represented by peat and lake landscapes of the Kondinsky Lowland, interspersed with forests along rivers. The territory of the Mukhrino field station occupies ~1 km<sup>2</sup>, is provided with a system of broad wooden trails 2 km long, a power supply

complex (solar panels and a wind generator) and permanent sites for hydrometeorological monitoring and biodiversity monitoring of various elements of peat ecosystems.

Automated monitoring of carbon dioxide fluxes at the oligotrophic ridge-hollow complex is carried out since 2017 to the present using a portable atmospheric-soil measuring complex with two transparent cameras. The automatic cameras were placed in the mochachin and on the ridge of the oligotrophic bog complex.

In 2015, a mast with equipment was installed in a representative part of the Mukhrino bog to obtain continuous ecosystem-scale data on greenhouse gas exchange and energy fluxes using the turbulent pulsation method (eddy-covariance - EC) [Alekseychik et al., 2017]. Measurements using the same facility were continued, and in 2019 the station was augmented with a Liñor LI-7700 methane analyzer. In 2021, the EC station was upgraded. A new mast 7 m high was installed, with CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O LI-7200 and CH<sub>4</sub> LI-7700 gas analyzers (Licor Biogeosciences, USA) and an ultrasonic uSonic-3 Cage MP anemometer (Metek, Germany) mounted on it. The station outprint increased to an area with a radius of 100-300 m. The average daily variations for the summer season 2021 are shown in Fig. 2. Net ecosystem exchange (F<sub>CO2</sub>) has a clear diurnal course with negative values of fluxes in the daytime. The specific methane flux (F<sub>CH4</sub>) shows two maxima in the diurnal course - at 7 h and 18 h local time (UTC +5).

Comparison of NEE estimations obtained at EC measurements in 2015 with NEE data from chamber observations shows that EC data are 1.8-3.5 times higher than NEE obtained at hollow site due to impact of pine trees photosynthesis which is not registered by the chamber method.

At present, the system of observations of greenhouse gas fluxes at the field station "Mukhrino" continues to expand. In 2022, a 10 m mast was installed in a pine-shrub sphagnum bog with a set of equipment to implement the turbulent pulsation method. It is planned to install the EC station in a mixed forest massif at a height of 40 m from the surface, as well as to place three chamber systems with 8 cameras each in different parts of the Mukhrino peatland.

## Организация мониторинга потоков парниковых газов на научно-исследовательской полевой станции «Мухрино», Ханты-Мансийск

Дмитриченко А.А.<sup>1</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: dekot@mail.ru

Болота Западной Сибири содержат огромные запасы углерода и в естественном состоянии являются эффективным стоком для углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и значительным источником метана (CH<sub>4</sub>) [Yu, 2011; Лисс и др., 1981]. Реакция торфяников на изменение климата растянута во времени на несколько десятилетий. Непрерывный долгосрочный мониторинг помогает обнаружить изменения в функционировании торфяных болот (такие как биоразнообразие, чистая первичная продукция, выбросы парниковых газов, уровень поглощения углерода и азота, гидрология) и определить влияние внешних факторов на экосистемы торфяных болот [Berglund, 2003; Joosten, 2015; Callaghan et al., 2020; Tsyganov et al., 2021]. С целью организации комплексных наблюдений за торфяными болотами в 2009 году в средней таежной зоне Западной Сибири была открыта научно-исследовательская полевая станция "Мухрино" [Dyukarev et al., 2021a, 2021b]. Фокус исследований направлен на изучение влияния изменения климата на углеродный цикл, гидрологию и биоразнообразие болотных экосистем.

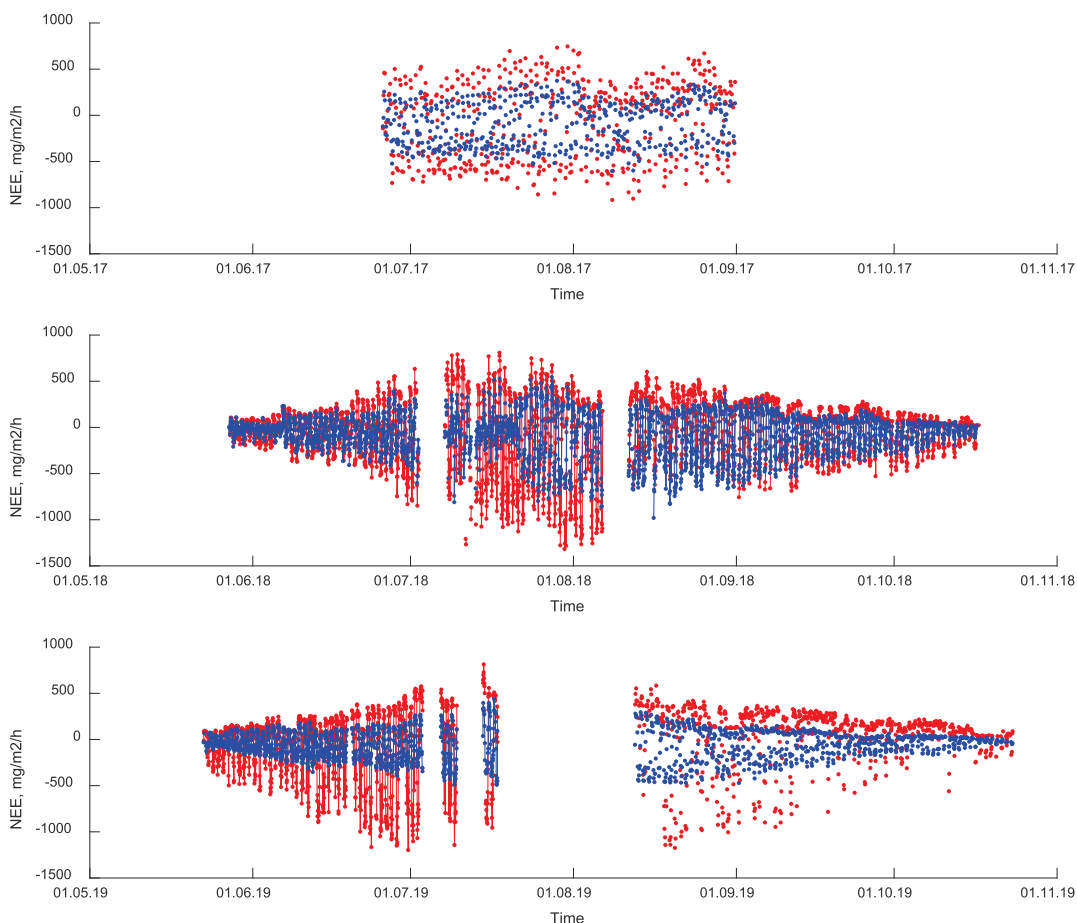
Полевая станция "Мухрино" расположена в центральной части Западной Сибири в биоклиматической зоне средней тайги, в 20 км к юго-западу от города Ханты-Мансийска, на второй террасе левого берега реки Иртыш (недалеко от слияния с рекой Обь). Район исследований расположен в северо-восточной части комплекса нетронутого болота Мухрино, общая площадь которого составляет ~75 км<sup>2</sup>. Обширная территория к юго-западу представлена торфяными и озерными ландшафтами Кондинской низменности, перемежающимися с лесами вдоль рек. Территория полевой станции "Мухрино" занимает ~1 км<sup>2</sup>, обеспечена системой широкополосных дорожек длиной 2 км, комплексом энергоснабжения (солнечные батареи и ветрогенератор) и постоянными участками гидрометеорологического мониторинга и мониторинга биоразнообразия различных элементов торфяных экосистем.

### Автоматические камерные измерения потоков углекислого газа

Автоматизированный мониторинг потоков углекислого газа на олиготрофном грядово-мочажинном комплексе проводится в 2017 г по настоящее время с помощью портативной атмосферно-почвен-

ной измерительного комплекса (АПИК) с двумя прозрачными камерами. Автоматические камеры были размещены в мочажине и на гряде олиготрофного болотного комплекса. АПИК способна измерять и регистрировать следующие характеристики окружающей среды: температуру воздуха ( $T_a$ ) и влажность (RH) (на высоте 2 м над землей и у поверхности земли), ФАР (фотосинтетическая активная радиация; входящая солнечная радиация в спектральном диапазоне 400-700 нм), содержание углекислого газа и давление водяного пара в пробах воздуха. Система включает двухканальный газоанализатор Li-7000 (Li-COR Biogeosciences, США) и две измерительные камеры объемом 120 л. Камеры закрываются на 5 минут каждый час (или 3 часа в 2017 году) для обеспечения измерения потока. В остальное время они остаются открытыми. Воздух для пробы непрерывно прокачивается через камеру и газоанализатор в течение периода наблюдений с помощью мембранного насоса 7006ZVR (Gardner Denver Thomas GmbH, Германия) со скоростью потока ~2 л/мин. Результаты измерений непрерывно сохраняются в АПИК и передаются на веб-сервер.

Автоматизированная система работала в режиме измерения с июля по август в 2017 году и с мая по октябрь в 2018 и 2019 годах. Поток  $CO_2$  рассчитывался с помощью специализированного программного модуля, разработанного в Matlab (MathWorks, США) с использованием линейной модели изменения концентрации в камерах в течение первых двух минут отбора данных. Временные ряды рассчитанных значений потоков  $CO_2$ , которые в прозрачной камере представляют собой величину чистого экосистемного обмена приведены на рис. 1. Для получения непрерывных записей данных, экстраполяции их на другие периоды, когда экспериментальные данные отсутствуют, и расчета годового углеродного бюджета экосистемы использовалась модель общего углеродного обмена экосистемы [Dyukarev, 2017]. Измеренная общая NEE была разделена на компоненты валовой первичной продукции (GPP) и общего дыхания экосистемы (ER). Модель была откалибрована с использованием всех доступных наборов данных о потоках углекислого газа в 2017-2019 годах [Dyukarev et al., 2019].



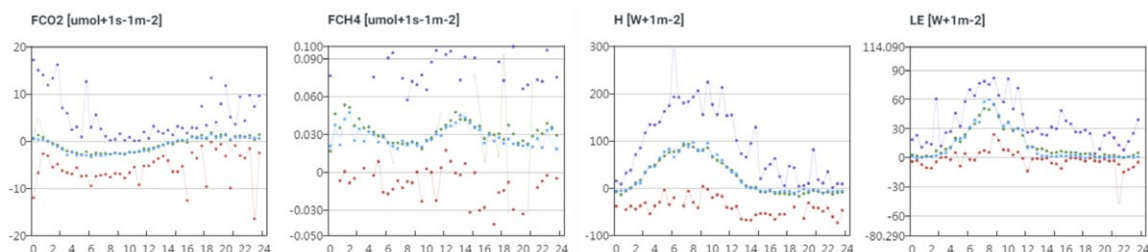
**Рис. 1.** Временной ход чистого экосистемного обмена (NEE) в 2017, 2018 и 2019 гг. по данным камерных измерений на гряде (красный) и мочажине (синий) ГМК болота Мухрино.

Результаты полевых измерений потоков  $CO_2$  на грядово-мочажинном комплексе в сочетании с предложенной математической моделью позволили адекватно оценить показатели NEE, ER и GPP для грядово-мочажинных участков на олиготрофном болоте в зоне средней тайги Западной Сибири. Кумулятивные показатели поглощения  $CO_2$  превышают кумулятивные показатели дыхания на обоих экспе-

риментальных участках. Средняя за три года вегетационного периода NEE на пологом участке была значительно выше ( $-91,9 \text{ гС м}^{-2}$ ), чем на грядовом участке ( $-13,6 \text{ гС м}^{-2}$ ). Показатели GPP и ER на участке гряды были выше, чем на участке мочажины [Dyukarev, 2021b].

### Измерения потоков методом турбулентных пульсаций

В 2015 году в репрезентативной части болота Мухрино была установлена мачта с оборудованием для получения непрерывных данных экосистемного масштаба по обмену парниковыми газами и потоками энергии [Alekseychik et al., 2017] с помощью метода турбулентных пульсаций (eddy-covariance - EC). На момент установки это была первая постоянно действующая EC станция в радиусе около 1000 км. Аппаратура состояла из анализатора  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  LI-7500 (Licor Biogeosciences, США) и трехмерного ультразвукового анемометра Gill R3 (Gill Instruments Ltd, Великобритания). В течение первого сезона измерения проводились с мая по август 2015 года и обеспечили соответствующее покрытие данных о потоке за весь вегетационный период. Данные EC обрабатывались с помощью программного обеспечения EddyUH [Mammarella et al., 2016]. Была отмечена сходимость энергетического баланса на уровне 99%, что указывает на хорошее качество данных. Высота установки датчика 4 м над уровнем поверхности болота позволила получить зону 70-процентного футпринта с радиусом около 89-202 м в зависимости от типа стратификации атмосферы. В 2015 году кумулятивный NEE за май-август составил  $-202 \text{ гС м}^{-2}$ .



**Рис. 2.**

Осредненный суточный ход потоков углекислого газа (FCO<sub>2</sub>), метана (FCH<sub>4</sub>), явного (H) и скрытого тепла (LE) за июль-сентябрь 2021 г. по данным EC станции на ГМК болота Мухрино. Приведены среднее, медианное, минимальное, максимальное значения. Время по UTC.

Измерения с использованием той же установки были продолжены, а в 2019 году станция была дополнена анализатором метана Licor LI-7700. В 2021 г. станция EC была модернизирована. Была установлена новая мачта высотой 7 м, на ней монтированы газоанализаторы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  LI-7200 и  $\text{CH}_4$  LI-7700 (Licor Biogeosciences, США) и ультразвуковой анемометр uSonic-3 Sage MP (Metek, Германия). Футпринт станции увеличился до области радиусом 100-300 м. Средние за летний сезон 2021 г. графики суточного хода приведены на рисунке 2. Чистый экосистемный обмен (FCO<sub>2</sub>) имеет явный суточный ход с отрицательными значениями потоков в дневное время. Удельный поток метана показывает два максимума в суточном ходе – в 7 ч и 18 ч местного времени (UTC +5).

Сравнение оценок NEE, полученных при EC измерениях в 2015 году, с данными NEE по результатам камерных наблюдений показывает, что данные EC в 1,8-3,5 раза превышают NEE, полученные камерным методом. Вероятно, разница вызвана не учетом фотосинтеза и дыхания сосен, которые не регистрируются камерным методом.

В настоящий момент систем наблюдений за потоками парниковых газов на полевой станции "Мухрино" продолжает расширяться. В 2022 г. установлена 10 м мачта на участке сосново-кустарничкового сфагнового болота с комплексом оборудования для реализации метода турбулентных пульсаций. Планируется установка EC станции в массиве смешанного леса на высоте 40 м от поверхности, а также размещение трех камерных систем с 8 камерами каждая на различных участках болотного массива.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лусс О.Л., Березина Н.А. Болота Западно-Сибирской равнины. М.: Наука, 1981. 208 с.
2. Alekseychik, P.; Mammarella, I.; Karpov, D.; Dengel, S.; Terentieva, I.; Sabrekov, A.; Glagolev, M.; Lapshina, E. Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with eddy covariance technique in a West Siberian bog. *Atmos. Chem. Phys.* 2017, 17, 9333-9345. doi: 10.5194/acp-2017-43.
3. Berghlund, B.E. Human impact and climate changes - synchronous events and a causal link? *Quarter. Internat.* 2003, 105(1), 7-12.
4. Callaghan, T.V.; Kulikova, O.; Rakhmanova, L.; Topp-Jorgensen, E.; Labba, N.; Kuhmanenm L.-A.; Kirpotin, S.; Shadyko, O.; Burgess, H.; Rautio, A.; Hindshaw, R.S.; Golubyatnikov, L.L.; Marshall, G.J.; Lobanov, A.; Soromotin, A.; Sokolov, A.; Soklova, N.; Filant, P.; Johansson, M. Improving dialogue among researchers, local and indigenous peoples and decision-makers to address issues of climate change in the North. *Ambio*, 2020, 49, 1161-1178. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01277-9>.



5. Dyukarev E., Filippova N., Karpov D., Shnyrev N., Zarov E., Filippov I., Voropay N., Avilov V., Artamonov A., Lapshina E. Hydrometeorological dataset of West Siberian boreal peatland: a 10-year record from the Mukhrino field station // *Earth Syst. Sci. Data*, 2021a, 13, 2595–2605, <https://doi.org/10.5194/essd-13-2595-2021>.
6. Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Filippov I., Bleuten W., Khoroshavin V., Ganasevich G., Meshcheryakova A., Vesala T., Lapshina E. The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia: the Mukhrino bog case study // *Land* 2021b, 10(8), 824; <https://doi.org/10.3390/land10080824>.
7. Dyukarev, E.; Godovnikov, E.; Karpov, D.; Kurakov, S.; Lapshina, E.; Filippov, I.; Filippova, N.; Zarov, E. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog. *Geogr., Env., Sust.*, 2019, 12(2), 227–244. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-77>.
8. Dyukarev, E.A. Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites. *Agricult. and Forest Meteorol.* 2017, 239, 236–248. doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.011.
9. Joosten, H. Peatlands, climate change mitigation and biodiversity conservation: An issue brief on the importance of peatlands for carbon and biodiversity conservation and the role of drained peatlands as greenhouse gas emission hotspots. *Nordic Council of Ministers*, 2015, 2015727.
10. Mammarella, I.; Peltola, O.; Nordbo, A.; Järvi, L.; Rannik, Ü. Quantifying the uncertainty of eddy covariance fluxes due to the use of different software packages and combinations of processing steps in two contrasting ecosystems. *Atmos. Meas. Tech.*, 2016, 9, 4915–4933. doi:10.5194/amt-9-4915-2016
11. Tsyganov, A.N.; Zarov, E.A.; Mazei, Y.A.; Kulkov, M.G.; Babeshko, K.V.; Yushkovets, S.Y.; Payne, R.J.; Ratcliffe, J.L.; Fatyunina, Y.A.; Zazovskaya, E.P.; Lapshina, E.D. Key periods of peatland development and environmental changes in the middle taiga zone of Western Siberia during the Holocene. *Ambio*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01545-7>
12. Yu Z. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications // *The Holocene*. 2011. Vol. 21(5), P. 761–774. doi:10.1177/0959683610386982

## Microclimate monitoring network based on Soil-Atmosphere Measurement Complexes

Dyukarev E.A.<sup>1,2</sup>, Kurakov S.A.<sup>1,2</sup>, Voropay N.N.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

<sup>3</sup>V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: [dekot@mail.ru](mailto:dekot@mail.ru)

Microclimate is a complex of climatic conditions organized by local landscape. Air and soil temperature, solar radiation, wind speed, and moisture conditions are significant factors that form ecological patterns in plant and animal communities. The importance of the influence of microclimate on growth and die-off, soil respiration, and nutrient cycling is one of the components of modern ecological research.

Russia has a network of weather stations of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Rosgydromet), organized to conduct global, comprehensive, systematic, continuous observations of the natural environment. Weather stations must be located in an area that is open and typical of the surrounding terrain. However, on the territory of Siberia their network is extremely sparse and not regular. Weather stations are located in open areas mainly in river valleys, and the information obtained at them does not fully reflect the situation in the forest, mires and mountain landscapes represented on the territory.

In order to provide ecological and landscape studies with meteorological information, a network of automated observation points has been forming at the Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems (IMCES SB RAS) since 2005, where basic meteorological characteristics are registered. The network of microclimatic monitoring that we are developing is focused on continuous observations in typical landscapes in key areas located in different natural-climatic zones. Historically, various projects have formed clusters of observation sites, usually located close to each other, but characterized by different local landscape conditions. Microclimatic monitoring is organized in the areas of forest-marsh complexes in Western Siberia, mountain-bottom landscapes of the Baikal region.

Atmospheric-soil measuring complexes (ASMC) are used for monitoring. ASMC is intended for mobile and stationary long-term automatic measurements and registration of the main parameters of the atmosphere,

soils and water. ASMC can be equipped with sensors for soil and air temperature, snow cover height and temperature, ground water level, precipitation, wind speed and direction, soil and air humidity, solar radiation characteristics, carbon dioxide concentration, etc. The difference from the existing measuring systems is the combination of low power consumption, wide range of sensors, autonomous operation mode, operability in a wide range of operating conditions and low price. Autonomous controller-recorder with analog or digital interface allows to use ASMC as in the basic configuration with the possibility of data transmission in online mode, and in the vandal-proof configuration (measuring only temperature and humidity of air and soil) with data accumulation inside the device. ASMC software gives the possibility of visual presentation of data series, which are exported into a text format. The ASMC is capable of continuously measuring microclimate characteristics for several years, even under the most extreme conditions. Therefore, the instrument can be used to create extensive specialized networks of field measurements providing essential data on microclimatic conditions shaping biological processes under climate change conditions.

## Сеть микроклиматического мониторинга на базе атмосферно-почвенных измерительных комплексов

Дюкарев Е.А.<sup>1,2</sup>, Кураков С.А.<sup>1</sup>, Воропай Н.Н.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>3</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: [dekot@mail.ru](mailto:dekot@mail.ru)

**М**икроклимат — это комплекс климатических условий на небольших пространствах, обусловленных особенностями местности. Температура воздуха и почвы, солнечная радиация, скорость ветра, условия увлажнения являются значимыми факторами, формирующими экологические закономерности в сообществах растений и животных. Важность влияния микроклимата на такие экологические процессы, как рост и отмирание растений, дыхание почвы, круговорот питательных веществ, является одним из компонентов современных экологических исследований.

В России существует сеть метеорологических станций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), организованная для проведения глобальных, комплексных, системных, непрерывных наблюдений за состоянием природной среды. Метеостанции должны размещаться на открытом и типичном для окружающей местности участке. Однако, на территории Сибири их сеть крайне разрежена и не регулярна. Метеостанции расположены на открытых участках в основном в долинах рек, и получаемая на них информация не в полной мере отражает ситуацию в представленных на территории лесных, болотных, горных ландшафтах.

Для обеспечения экологических и ландшафтных исследований метеорологической информацией в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) с 2005 г формируется сеть автоматизированных наблюдательных пунктов, где регистрируются основные метеорологические характеристики – температура и влажность воздуха, температура почвы. Развиваемая нами сеть микроклиматического мониторинга ориентирована на проведение непрерывных наблюдений в типичных ландшафтах на ключевых участках (КУ), расположенных в различных природно-климатических зонах. Исторически сложилось, что в рамках различных проектов формировались кластеры из наблюдательных пунктов, как правило, расположенных близко друг от друга, но характеризующихся различными локальными ландшафтными условиями. К настоящему моменту микроклиматический мониторинг организован на территории лесоболотных комплексов в Западной Сибири, горно-котловинных ландшафтов Прибайкалья.

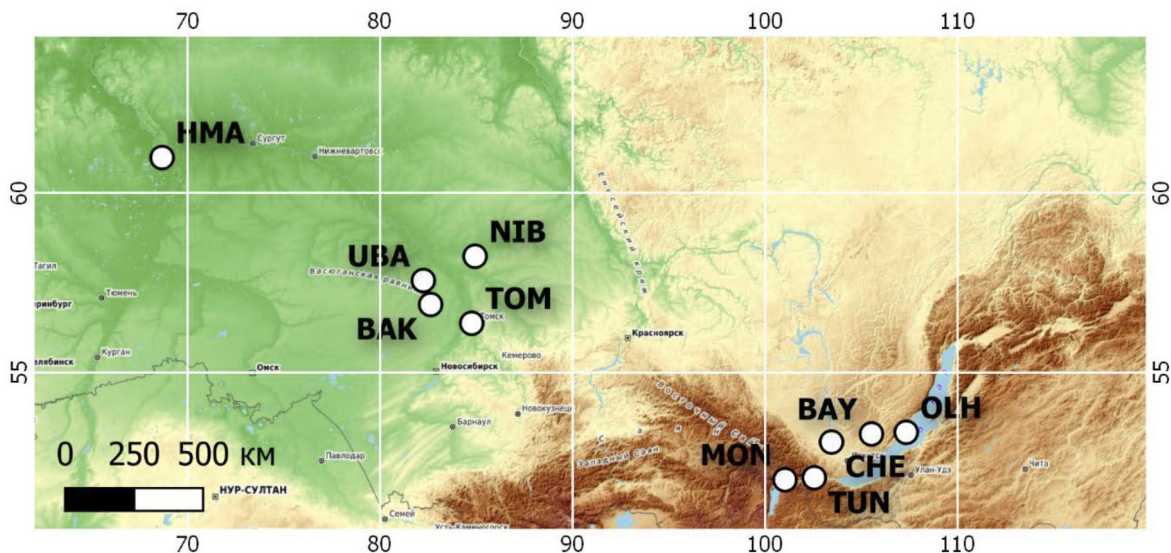
Для измерения используются атмосферно-почвенные измерительные комплексы (АПИК) производства ИМКЭС СО РАН. АПИК предназначен для мобильных и стационарных долговременных автоматических измерений и регистрации основных параметров атмосферы, почвогрунтов и водоемов. АПИК может быть укомплектован датчиками температуры почвы и воздуха, высоты и температуры снежного покрова, уровня болотных (грунтовых) вод, сумм атмосферных осадков, скорости и направления ветра, влажности почвы и воздуха, характеристик солнечной радиации, концентрации углекислого газа и пр. Отличие от уже имеющихся измерительных систем заключается в сочетании низкого энергопотребления, широкого набора подключаемых датчиков, автономного режима работы, работоспособности в широком диапазоне условий эксплуатации и низкой цены. Автономный контроллер-регистратор с аналоговым или цифровым интерфейсом позволяет использовать АПИК как в базовой комплектации (с полным набором датчиков для измерения указанных характеристик) с возможностью передачи

данных в он-лайн режиме, так и в антивандальной комплектации (измерение только температуры и влажности воздуха и почвы) с накоплением данных внутри прибора. Программное обеспечение АПИК дает возможность визуального представления рядов данных, которые экспортируются в текстовый формат. АПИК способен непрерывно измерять характеристики микроклимата в течение нескольких лет даже в самых экстремальных условиях. Поэтому прибор можно использовать для создания обширных специализированных сетей полевых измерений, предоставляющих важнейшие данные о микроклиматических условиях, формирующих биологические процессы в условиях изменения климата.

Данные наблюдений, как правило, считываются с АПИК при посещении наблюдательных пунктов один или два раза в год и затем обрабатываются в научных организациях. Хранение и предварительная обработка результатов осуществляется на сервере в ИМКЭС СО РАН. Для АПИК снабженных системой удаленной передачи данных доступна визуализация текущих значений измеряемых характеристик, их временного хода за последние 1, 7 и 30 дней на сайте <http://apik.imces.ru>.

Ключевые участки (Рис. 1), в которых развернута сеть из 4-10 наблюдательных пунктов (НП), включают:

- КУ Ханты-Мансийский (НМА) в северной тайге Западной Сибири (стац. Мухрино, Ханты-Мансийск, ХМАО-Югра) – 9 НП;
- КУ Нибегинский (НИВ) в средней тайге (болото Центральное, пос. Нибегинский, Верхнекетский район Томской области) - 4 НП;
- КУ Усть-Бакчарский (УБА) в южной тайге (Кинзяровское болото, пос. Усть-Бакчар, Чаинский район Томской области) – 4 НП;
- КУ Бакчарский (БАК) в южной тайге (Бакчарское болото, Иксинское болото, Бакчарский район Томской области) – 13 НП;
- КУ Томский (ТОМ) в южной тайге (Томский район Томской обл) – 6 НП;
- КУ Тункинский (ТУН) в горной котловине в Южной Сибири (Тункинский район Респ. Бурятия) – 20 НП;
- КУ Мондинский (МОН) в горной котловине в Южной Сибири (Тункинский район Респ. Бурятия) – 2 НП
- КУ Ольхонский (ОЛН) в степных ландшафтах Прибайкалья - 4 НП;
- КУ Черемховский (СНЕ) на Иркутско-Черемховской равнине и предгорьях Саян – 9 НП.
- КУ Баяндаевский (БАУ) – 3 НП



**Рис. 1.** Схема расположения ключевых участков сети микроклиматического мониторинга.

Наблюдательные площадки каждого КУ в Западной Сибири (Ханты-Мансийский, Нибегинский, Усть-Бакчарский, Томский) включают несколько болотных экосистем разного типа (заболоченный лес, сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям), осоково-сфагновая топь, грядово-мочажинный и/или грядово-озерковый комплексы) и реперные площадки с минеральной почвой (открытого и/или облесенного типов) (Киселев, 2016, Киселев и др., 2019; Voropaу et al., 2019).

В рамках комплексных географических исследований ИГ СО РАН с 2007 г. проводятся наблюдения на КУ Тункинский и Ольхонский, с 2009 г. – на КУ Мондинский. В 2020 г. АПИК были установлены на КУ Черемховский и Баяндаевский. Наблюдения проводятся в разных ландшафтах с сезоннотальными и сезонномерзлыми почвами. Причем, в первом случае, это в основном заболоченные участки, где слой органики составляет 20-80 см, а положительные температуры проникают не глубже 1-1,2 м. Во втором – минеральные почвы, промерзающие до 1,5-3 м в зависимости от наличия и типа растительности.



На КУ Ольхонский в рамках Крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» на побережье оз. Байкал размещены 4 НП с наиболее полным комплексом измеряемых микроклиматических характеристик – скорость и направление ветра, атмосферное давление, приходящая солнечная радиация, сумма осадков, температура почвы, высота и температура снежного покрова.

На КУ Черемховский работы начаты в рамках проекта РФФИ 20-04-00142 «Состав стабильных изотопов углерода органического вещества почв как индикатор ландшафтно-климатических изменений: пространственно-временная изменчивость в почвах Байкальского региона в позднем плейстоцене и голоцене»

Кроме вышеперечисленных КУ, отдельные комплексы АПИК и кластеры АПИК развернуты в Томской области (Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа РАСХ, Томск), Новосибирской области (Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск), природном парке Нумто Ханты-Мансийского АО (ОАО Сургутнефтегаз, Сургут), Ямало-Ненецком АО (Научный центр изучения Арктики, Салехард), Алтайском крае (Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул), республике Тыва (Томский государственный университет, Томск; Тувинский государственный университет, Кызыл), Восточном Прибайкалье (Институт физического материаловедения СО РАН, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Бурятский государственный университет, Улан-Уде; Заповедное Подлеморье, Усть-Баргузин), Якутии (Институте Мерзлотоведения СО РАН им. П.И.Мельникова, Якутский государственный университет, Якутск), о. Сахалин (Филиал Дальневосточного федерального университета, Южно-Сахалинск). Всего к 2022 г. изготовлено более 400 АПИК, которые установлены практически по всей Северной Евразии.

## Determination of cumulus clouds based on continuous automatic measurements of global horizontal irradiance using an unshaded pyranometer

Zolotov S.Yu., Zuev S.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [sergey-zo@yandex.ru](mailto:sergey-zo@yandex.ru)

Now, active research is being carried out to separate direct and diffuse solar irradiance from the global horizontal irradiance. To fully determine these components, it is necessary to simultaneously use several instruments in such measurements, which include unshaded and shaded pyranometers, and an actinometer. One solution for these measurements is to eliminate the shaded pyranometer and actinometer. In this case, only an unshaded pyranometer will be involved in the measurements, and cumulus clouds will act as a natural shading screen.

One important feature of cumulus clouds is their high optical density, as well as the presence of clear sky patches between individual clouds. This feature makes it possible to determine both a completely open solar disk and a completely closed one during the movement of clouds.

An unshaded pyranometer receives a time series consisting mainly of measured  $Q$  of diffuse and direct radiation. With this time series of global horizontal irradiance, a variational analysis is carried out, according to the results of which  $Q$  are determined, at which the moment of the presence of cumulus clouds is detected, and the stability of the state of such points is additionally assessed.

The presence of cumulus clouds leads to the formation of a very heterogeneous time series. We will use this feature in the analysis of a series of global horizontal irradiance, which will allow us to determine the presence of cumulus clouds automatically almost in real time.

In the proposed method for detecting cumulus clouds, the previously proposed approach is used, which makes it possible to abandon the use of the clear-sky model. This approach makes it possible to reduce the length of the series for analysis to a 21-minute moving window, in which a search is made for inhomogeneous intervals in the global horizontal irradiance time series with  $V_{21} \geq 0.33$ . Also, differences can be found by analyzing the series for a 3-minute window ( $\pm 1$  minute near the analyzed point), which moves within a 21-minute sample, according to the condition  $V_3 \geq 0.33$ .

To check the facts of the presence of cumulus cloudiness, the results of the described detection algorithm were compared according to the global horizontal irradiance data for the warm period (May–September 2020). As a series of global horizontal irradiance, we took a continuous series of measurements from the CM-11 pyranometer (Kipp & Zonen, Netherlands) of the geophysical observatory of the IMCES SB RAS (Tomsk). The detection results were verified using visual control by color panoramic images of the All sky camera close to the pyranometer. In addition, one-hour visual observations of the state of the sky were used.



# Определение кучевой облачности на основе непрерывных автоматических измерений суммарной радиации с помощью незатененного пиранометра

Золотов С.Ю., Зуев С.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: sergey-zo@yandex.ru

В настоящий момент проводятся активные исследования для выделения из суммарной солнечной радиации  $Q$  ее компонент: прямой  $S$  и рассеянной  $D$ . Для полноценного определения этих компонент необходимо одновременно задействовать в таких измерениях сразу несколько приборов, в которые входят незатененный, затененный пиранометры и актинометр. При этом актинометр и теневой экран пиранометра необходимо постоянно нацеливать на Солнце вручную или с помощью следящей системы.

Одним из решений для проведения данных измерений является отказ от затененного пиранометра и актинометра. В этом случае в измерениях будет задействован только незатененный пиранометр, а в качестве естественного затеняющего экрана будут выступать кучевые облака.

Одной важной особенностью кучевых облаков  $Cu$  является их высокая оптическая плотность, а также наличие участков ясного неба между отдельными облаками. Данная особенность позволяет при движении облаков определять как полностью открытый солнечный диск, так и полностью закрытый. Причем, находиться в этих двух состояниях солнечный диск будет большую часть времени. Частота смены таких состояний зависит от занимаемой площади кучевых облаков на небосводе (балла облачности), а также от скорости их движения.

Воспользуемся фактами, что при кучевых облаках прозрачность атмосферы практически не меняется, а рассеянная радиация меняется очень медленно. В этом случае с помощью незатененного пиранометра будет получаться временной ряд, состоящий из измеренных точек суммарной радиации  $Q = S' + D$ . С данным временным рядом проводится вариационный анализ, по результатам которого определяются точки  $Q$ , в которых детектируется момент присутствия кучевой облачности, а также дополнительно оценивается стабильность состояния таких точек.

При проведении вариационного анализа ряда суммарной радиации необходимо оценивать как частоту смены степени покрытия солнечного диска облаками разной плотности, так и скорость их перемещения в зените над точкой наблюдения.

Замечено, что при слоистообразных облаках ( $Cs$ ,  $As$ ) и безоблачным небе коэффициент вариации близок к нулю. При наличии волнистообразной облачности ( $Cc$ ,  $Ac$ ,  $Sc$ ,  $St$ ) коэффициент вариации ряда суммарной радиации находится на уровне своей значимости.

Коэффициент вариации ряда суммарной радиации оказывается значимым и очень высоким во время прохождения кучевообразной облачности ( $Ac\ cuf.$ ,  $Sc\ cuf.$ ,  $Cu$ ), что определяется особенностью таких облаков полностью закрывать солнечный диск или делать солнце полностью открытым для пиранометра в момент измерения.

Наличие кучевых облаков приводит к формированию очень неоднородного временного ряда. Будем использовать данную особенность при анализе ряда суммарной радиации, что позволит определять наличие кучевой облачности автоматически практически в режиме реального времени.

Для корректного анализа имеющегося неоднородного временного ряда необходимо привести его к стационарному виду. Для данной процедуры большинство исследователей используют какую-либо модель ясного неба с дальнейшим применением амплитудного и вариационного анализов на различных временных интервалах с помощью стандартных статистических процедур [1].

В предлагаемом методе для детектирования кучевой облачности применяется ранее предложенный подход, позволяющий отказаться от использования модели ясного неба [2]. Этот подход позволяет сократить длину ряда для анализа до двадцати одного минутного скользящего окна, в котором проводится поиск неоднородных интервалов на временном ряде суммарной радиации.

В рамках данного подхода рассчитывается коэффициент вариации 21-минутной выборки суммарной радиации  $V_{21}$ . Статистический анализ сопоставления значений  $V_{21}$  и данных визуальных наблюдений определил, что значение  $V_{21} \geq 0,33$  характеризует присутствие кучевых облаков с вероятностью около 80%. Такое значение коэффициента  $V_{21} = 0,33$  в статистическом анализе есть порог между однородными и неоднородными выборками. Для детекции кучевой облачности достаточно провести поиск неоднородных временных интервалов на временном ряде  $Q$  с использованием 21-минутного скользящего окна.

Практическое применение данного метода показало, что схожие вариационные характеристики могут иметь слоистые  $St$  и слоисто-дождевые  $Ns$  облака. Это связано с большой чувствительностью ко-

эфициента вариации к небольшим изменениям низких средних значений анализируемой выборки. Для уменьшения или полного исключения таких ошибок необходимо задействовать расчет дополнительного критерия.

Характерной особенностью кучевых облаков являются их четкие неразмытые края и горизонтальные основания. В имеющейся выборке исследуемого 21-минутном ряде определим значения  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$ , что соответствуют значениям суммарной радиации при открытом солнце и полностью заслоненном облаком. У кучевых облаков переход между этими значениями, как правило, происходит за короткое время (1-2 минуты). Таким образом, если внутри анализируемой 21-минутной выборки имеются резкие перепады между значениями  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$ , то это есть признак присутствия кучевой облачности. Такие перепады можно обнаружить, например, анализируя коэффициент вариации 3-минутного окна (плюс и минус одна минута от точки анализа), скользящего внутри 21-минутной выборки, по условию  $V_3 \geq 0,33$ .

Если для какой-либо точки временного ряда суммарной радиации одновременно выполняются условия  $V_{21} \geq 0,33$  и  $V_3 \geq 0,33$ , то это означает присутствие на небе кучевой облачности. В этом случае соседние с ней точки являются потенциальными кандидатами для присутствия в стабильном состоянии солнечного диска  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$ , которые также тестируются на выполнение этих двух условий.

Дополнительно, для исключения случаев, при которых формируются низкие средние значения  $Q$ , проверяется отношение  $Q_{\max}/Q_{\min}$ , которое при кучевой облачности должно быть не менее 3. Также, для исключения случаев анализа нестабильного состояния солнечного диска и/или значительного изменения рассеянной радиации, связанного с быстрым изменением балла облачности, эти потенциальные точки  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$  тестируются на стабильность своего состояния путем сравнения их с предыдущим или последующим состоянием.

Для проверки фактов наличия кучевой облачности было проведено сравнение результатов описанного алгоритма детекции по данным суммарной радиации за теплый период (май–сентябрь 2020 года). В качестве ряда суммарной радиации был взят непрерывный ряд измерений от пиранометра SM-11 (Kipp & Zonen, Нидерланды) геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (Томск). Результаты детектирования проверялись с использованием визуального контроля по цветным панорамным изображениям All sky камеры MBK-1653ц (БайтЭрг, Россия), установленной в непосредственной близости от пиранометра. Кроме того, использовались одночасовые визуальные наблюдения за состоянием неба.

Результаты детекции кучевой облачности приведены в Таблице 1. В данной таблице обобщены все случаи срабатывания детектора за весь период с мая по сентябрь 2020 года. Тип облаков и балл облачности определялись визуально на момент детекции согласно принятой в мировой практике системе классификации.

Согласно данным из Таблицы 1, точность определения кучевой облачности составляет 78%. Основную погрешность в алгоритм детекции вносят облака высокого яруса, что приводит нас к поиску дальнейшего усовершенствования этого метода.

**Таблица 1.**

Количество детектированных случаев наличия на небе кучевых облаков в период с мая по сентябрь 2020 года.

Тип облачности	Балл облачности									Итого, шт.	Итого, %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
<i>Cu</i>	77	701	1277	1941	1450	1555	1208	636	131	8976	78,22
<i>Cu-Cb</i>	0	0	2	0	7	27	8	2	0	46	0,40
<i>Cu-Sc</i>	0	0	2	2	8	31	14	24	4	85	0,74
<i>Cu-Ac</i>	0	13	59	197	210	220	173	253	40	1165	10,15
<i>Cu-Ci</i>	0	79	191	169	134	94	110	58	14	849	7,40
<i>Cb-Cu</i>	0	0	4	0	0	24	20	50	31	129	1,12
<i>Sc-Cu</i>	0	0	23	2	8	36	16	26	4	115	1,00
<i>Ac-Cu</i>	0	18	4	37	14	10	3	13	12	111	0,97
Итого, шт.	77	811	1562	2348	1831	1997	1552	1062	236	11476	
Итого, %	0,67	7,07	13,61	20,46	15,96	17,40	13,52	9,25	2,06		

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Badescu V., et al. Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models // *Renew Sustain Energy Rev.* 2012. V. 16. P. 1636–1656.
2. Zuev S.V., Krasnenko N.P. Simplified method for monitoring of Cumulus clouds using global horizontal irradiance // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. V. 386. P. 012044.

# Instrumentation of meteorological observations in IMCES SB RAS

Tikhomirov A.A., Korolkov V.A., Kobzev A.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [tikhomirov@imces.ru](mailto:tikhomirov@imces.ru)

A retrospective of the development of meteorological instrument-making at IMCES SB RAS is presented beginning from the creation of experimental prototypes of automated complexes for operational measurement of optical and meteorological characteristics of the atmosphere (1970s–1980s) during tests of different laser systems to the development and creation of a number of meteorological instruments, including ultrasonic automatic weather stations (UAWS) of different purposes and spatially distributed information and measuring systems on the basis of these stations. Some of the weather stations developed are included in the State Register of Measuring Instruments [1].

Information about developed UAWS AMK-03 is presented, as well as its modification AMK-04, which is certified and entered in the state register of measuring instruments, as well as its analogues of the portable complexes. One of them is mounted on various vehicles and has an automatically deployable 4-meter mast.

The description of the meteorological complex GOR-3/1m is given. It includes 4 ultrasonic thermoanemometers of reduced dimensions. The complex measures temperature fluctuations and wind velocity components in four spatially spaced by 30–35 cm regions in the atmosphere. It determines not only the standard parameters of atmospheric turbulence in each individual measurement area, but also the statistical characteristics of the instantaneous spatial derivatives of turbulent pulsations along each of the axes of the Cartesian coordinate system.

The development of an optical precipitation gauge is shown. It provides information on the distribution of particles by size and falling velocity, as well as determines the type, intensity and precipitation amount.

Information on the development of the information-measurement system (IMS) is presented. It was designed to detect dangerous meteorological phenomena in the region, which have been actively developing in the last decade. The IMS includes various meteorological instruments that were created at the Institute. The basis of such systems are masts on several levels (3–5), located UAWS. The information received via an Ethernet network or GPRS channel to a server located on the territory of the Institute.

The latest development of the Institute is an experimental sample of the autonomous AMS ArktikMeteo. It was designed to work in remote and hard-to-reach areas with difficult climatic conditions. There are used optical, acoustic and electronic measurement methods in sensors of AMS ArktikMeteo. Signals from the sensors of meteorological values are fed into the data collection, assimilation and transmission system, which packages them accordingly and transfers them to an external server for storage. The transmission of measuring information is carried out via cable channel, cellular and satellite communication channels and is carried out in automatic mode with a period set by the user, or in the "at the request of the user" mode. The autonomy of the AMS operation (up to one year) is provided by a combined power supply system, which includes batteries, solar panels and a generator powered by hydrogen fuel cells (consumable substance - methanol). The AMS also includes service systems that provide automatic continuous monitoring of the functioning of sensors for measuring meteorological quantities and their automatic calibration.

## REFERENCE:

1. Tikhomirov A.A., Korolkov V.A., Smirnov S.V., et al. *Meteorological Observation and Their Instrumental Support in IMCES SB RAS // Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35. No 4. P. 456–466.

# Метеорологические наблюдения и их приборное обеспечение в ИМКЭС СО РАН

Тихомиров А.А., Корольков В.А., Кобзев А.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [tikhomirov@imces.ru](mailto:tikhomirov@imces.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Основной составляющей мониторинга состояния окружающей среды являются наблюдения. ВМО отмечает [1], что "наблюдения обладают основополагающим значением для нашего понимания того, каким образом система Земли: её атмосфера, океаны, пресноводные водоемы, суша и биосфера – формирует погоду, климат и гидрологические условия". В свою очередь, количество и качество получаемых данных неразрывно связано с уровнем развития технического и технологического обеспечения этих наблюдений.

ИМКЭС СО РАН, ведущий сроду историю с 1972 г., когда было организовано СКБ научного приборостроения "Оптика" СО АН СССР в течение 1972-1992 гг. (первый этап развития Института) осуществлял, главным образом, приборное обеспечение фундаментальных исследований по атмосферной оптике [2-4]. На этом этапе также проводилась разработка новых технических средств, которые включали: оптико-метеорологические системы и комплексы для сопровождения полигонных испытаний специальных лазерных систем; лидары наземного, самолетного и космического базирования и другие приборы для экологического и метеорологического мониторинга окружающей среды [2, 4]. Создание новых автоматических метеорологических станций (АМС) и систем, использующих акустические и оптические методы измерений, остается приоритетным научно-техническим направлением Института в настоящее время в связи с недостаточным обеспечением сети постов Росгидромета современными приборами и оборудованием.

Самостоятельные метеорологические наблюдения в Институте начали проводиться после того, как его возглавил чл.-корр. РАН М.В. Кабанов в ноябре 1992 г. Им была сформулирована концепция регионального климато-экологического мониторинга Сибири [5], которая стала главным научным направлением на втором этапе развития Института (1992-2003 гг.) [3, 4]. Для реализации этой концепции в Институте в 1994 г. с помощью Западно-Сибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЗСУГМС) была создана метеостанция II разряда, на которой начались метеорологические наблюдения. В настоящее время такие наблюдения продолжаются в Геофизической обсерватории, имеющей широкий набор измерительных средств как стандартных, так и созданных в Институте. Разрабатываемое в Институте оборудование используется во многих научных и образовательных учреждениях и ведомствах страны для проведения атмосферных исследований и метеорологических наблюдений, включая Росгидромет и Минобороны России.

В статье представлены основные результаты развития в Институте, как метеонаблюдений, так и работ по созданию приборов для метеорологического мониторинга, начиная от экспериментальных образцов до выпуска сертифицированных серийных изделий с помощью индустриального партнера – ООО "Сибаналитприбор".

## 1. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ИМКЭС

### 1.1. Организация метеорологической станции в КТИ НП «Оптика»

После перехода СКБ НП "Оптика" в статус КТИ НП "Оптика" (1992 г.) академиком В.Е. Зуевым перед вновь назначенным директором КТИ чл.-корр. РАН М.В. Кабановым была поставлена задача сформировать самостоятельное научное направление Института [3], который до этого решал задачи по конструкторско-технологическому обеспечению фундаментальных исследований по атмосферной оптике и созданию экспериментальных приборов и устройств по хоздоговорам ИОА [2]. Основываясь на решениях конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро [6], М.В. Кабанов выбрал основой научных исследований КТИ самостоятельное проведение фундаментальных и прикладных исследований региональных климато-экологических процессов в окружающей среде [3, 4]. Для развития этого направления в марте 1993 г. было подписано Соглашение между Президиумом СО РАН и Администрацией Томской области о совместной поддержке региональной научно-технической программы "Климато-экологический мониторинг Сибири" на территории Томской области (руководитель программы М.В. Кабанов, головной исполнитель КТИ НП "Оптика") [3]. Концепция этой программы была изложена в [5], в ней для информационно-аналитического обеспечения мониторинга предлагалась, в частности, организация метеорологических наблюдений на базе стационарного пункта (метеостанции) в восточной части Томского Академгородка на территории базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА и КТИ НП "Оптика".



После обращения М.В. Кабанова в ЗСУГМС его руководством было принято решение оказать содействие и помощь в укомплектовании и установке приборов и оборудования на метеорологической площадке создаваемой метеостанции. В результате научно-организационных и инженерно-технических мероприятий, проведённых в 1993-1994 гг., 6 октября 1994 г., была официально открыта ведомственная метеостанция II разряда Томск КТИ "Оптика" (акт ЗСУГМС от 06.10.1994). Начальником станции был назначен В.Н. Генин, имевший большой опыт работы в гидрометеослужбе в Арктике.

Открытая метеостанция стала составной частью Климато-экологической обсерватории, в которой помимо метеонаблюдений проводились также наблюдения за атмосферным электричеством и УФ радиацией. В 2002 г. обсерватория получила статус структурного подразделения Института – Сибирская климато-экологическая обсерватория (СКЭО).

Обсерватория продолжила проводить регулярные метеорологические, актинометрические, в том числе УФ-метрические, и атмосферно-электрические наблюдения, измерения общего содержания озона и приземных концентраций некоторых парниковых и загрязняющих малых газовых составляющих атмосферы, исследования в области атмосферной акустики, обеспечивая тем самым информационной продукцией исследования климатических изменений и загрязнения окружающей природной среды в региональном, мезо- и микромасштабах, их экологических последствий. На базе обсерватории начали проводиться испытания новых приборов, методик и технологий, предназначенных для климато-экологического мониторинга, а студенты томских университетов проходят учебные практики.

### **1.2. Геофизическая обсерватория (2007 г. – настоящее время)**

В 2006-2007 гг. территория, на которой располагалась метеостанция, была передана в состав Особой экономической зоны г. Томска, и метеорологические наблюдения были продолжены на наблюдательных площадках непосредственно на территории ИМКЭС. Преемником СКЭО стала Геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС), открытая 23 марта 2007 г.

В настоящее время ГО ИМКЭС [6] является стационарным пунктом наблюдений за состоянием окружающей среды, полигоном для экспериментальных геофизических, метеорологических и экологических исследований, испытаний и сравнений технических характеристик новых приборов и технологий климато-экологического мониторинга, разработанных как в ИМКЭС, так и в других учреждениях. Оборудование ГО используется для проведения учебных исследовательских работ и практик школьников, студентов и аспирантов таких вузов, как НИ ТГУ и НИ ТПУ.

В обсерватории проводятся инструментальные и визуальные метеорологические, спектрофотометрические (актинометрические), атмосферно-электрические, аэрозольные спектрометрические, газоаналитические, дозиметрические и радиометрические наблюдения [8]. Режимы наблюдений являются либо непрерывными, либо периодическими в зависимости от их вида и решаемых задач.

Обсерватория является неофициальным пунктом наблюдений Росгидромета за общим содержанием озона и УФ-излучением, результаты которых ежедневно передаются в ГГО им. А.И. Воейкова и ЦАО Росгидромета, а затем поступают в мировой центр данных в Канаду. Данные метеонаблюдений ГО активно используются в лаборатории климатологии атмосферного состава ИОА и лаборатории биоинформационных технологий ИМКЭС.

Инфраструктура ГО [7] располагается на территории и в зданиях ИМКЭС СО РАН, имеет две основные наблюдательные площадки, несколько лабораторных помещений с измерительно-регистрирующей аппаратурой и приборным оборудованием для камеральной обработки материалов полевых (экспедиционных) исследований. Кроме того, обсерватория участвует в отработке методик и проведении экспериментов по аэрологическому зондированию пограничного слоя атмосферы с использованием доплеровского содара, привязного змейкового аэростата и беспилотного летательного аппарата (БПЛА) коптерного типа, а также проводит совместные с Томским политехническим университетом экспериментальные исследования динамики характеристик естественной радиоактивности и ионизирующих излучений атмосферы и почвы.

### **1.3. Исследование турбулентной структуры ветрового потока внутри городской застройки по данным измерений в Геофизической обсерватории**

В 2019 г. в ГО ИМКЭС по инициативе и с участием сотрудников МГУ и ИФА РАН был создан и начал измерения автоматизированный информационно-измерительный метеорологический комплекс. Его основное назначение – получение данных о температуре воздуха, скорости и направлении ветра, включая его вертикальную составляющую, с высоким временным разрешением (до 80 Гц), необходимых для изучения атмосферной турбулентности приземного слоя в условиях сильно пересечённой местности. Это так называемый "городской каньон", представленный элементами городской разновысотной застройки и небольшими лесными участками с высокими до 30 м деревьями. В состав комплекса вошли семь метеостанций АМК-03 (см. подраздел 2.3), территориально разнесённых на 20-30 м и размещённых на разных высотах (от двух до 28 м) [9].

Проведённые эксперименты позволили уточнить теорию подобия Монина – Обухова (ТПМО), которая предполагает подстилающую поверхность с однородным распределением аэродинамической и температурной шероховатости, а также стационарность турбулентных потоков по горизонтали и в при-



земном слое атмосферы [10]. Над неоднородными ландшафтами эти условия нарушаются [11]. В ТПМО рассматриваются связи между первыми и вторыми статистическими моментами термогидродинамических величин, в то время как в неоднородном ландшафте значительную роль в формировании турбулентного режима играют так называемые когерентные структуры, при наличии которых возникает связь между вторыми и третьими моментами [12, 13]. Предполагается, что в однотипных неоднородных ландшафтах (например, в городских каньонах) существуют универсальные формы зависимостей между статистическими моментами метеовеличин, в которых безразмерные константы могут быть связаны с геометрическими параметрами конкретной местности. Выявление таких зависимостей способствует разработке новых методов параметризации обмена импульсом и скалярными характеристиками между неоднородной поверхностью и атмосферой.

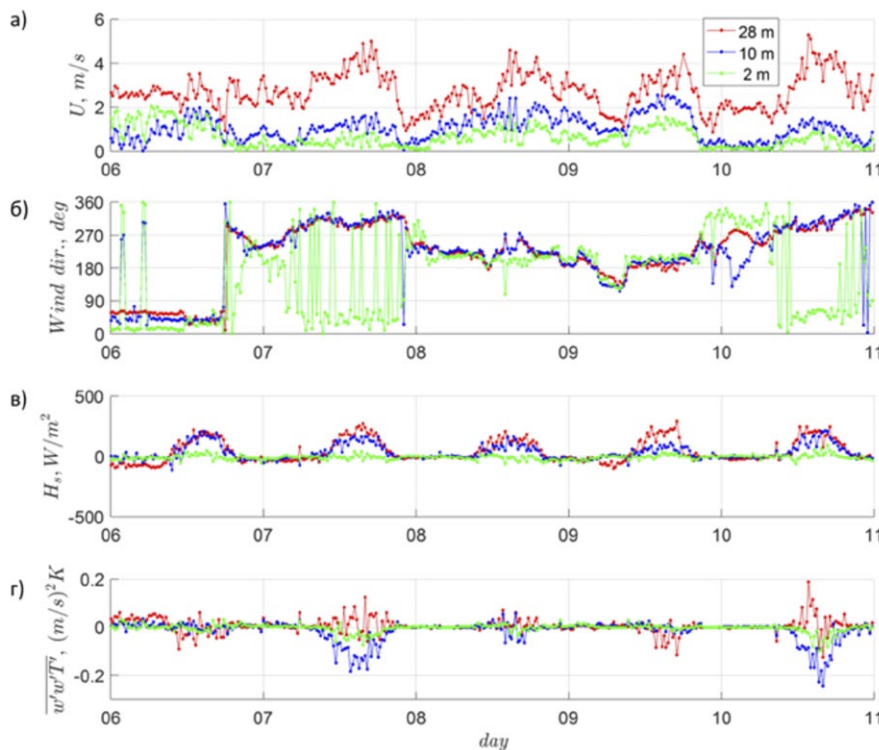
Для описания когерентных структур в атмосферном пограничном слое (АПС) в [13, 14] предложена так называемая бимодальная модель с параметризацией потока потенциальной температуры  $w'w'\theta'$  по типу конвективной адвекции (здесь и далее черта над символами означает временное усреднение). Третьи моменты  $(w')^3$  и  $w'w'\theta'$  связаны с потоком потенциальной температуры  $w'\theta'$  и, соответственно, с вертикальным потоком явного тепла через соотношение

$$\overline{w'w'\theta'} = C_w S_w \sqrt{(\overline{w'})^2 \overline{w'\theta'}}, \quad (1)$$

где  $S_w = \frac{\overline{(w')^3}}{[\overline{(w')^2}]^{3/2}}$  – коэффициент асимметрии распределения вертикальной скорости ветра,  $C_w$  – безразмерный коэффициент. Третьи моменты вычисляются по измерениям высокочастотных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра  $w'$  и потенциальной температуры  $\theta'$ .

В [12] экспериментально показано, что такая параметризация третьих моментов может быть применена и для устойчивого АПС при взаимодействии набегающего потока с сильно неоднородным ландшафтом на примере лесной поляны. Если значения  $C_w$  по данным пульсационных измерений окажутся порядка 1, то это будет свидетельствовать в пользу наличия когерентных структур (крупных вихрей) и их определяющего вклада в вертикальные турбулентные потоки.

В качестве примера ниже представлены результаты измерений АМК-03, расположенных в ГО ИМ-КЭС [9, 15] в условиях, подобных городскому каньону, на трёх высотах (2, 10 и 28 м). По направлению ветра выделены два режима (рис. 1): при натекающем потоке с северо-западного направления ( $300^\circ \pm 30^\circ$ ), идущем через препятствие, наблюдается поворот ветра на высоте 2 м относительно натекающего потока почти на  $90^\circ$  (режим 1); при натекающем потоке с юга ( $190^\circ \pm 20^\circ$ ), идущем без препятствия, поворота ветра на высоте 2 м не наблюдается (режим 2).

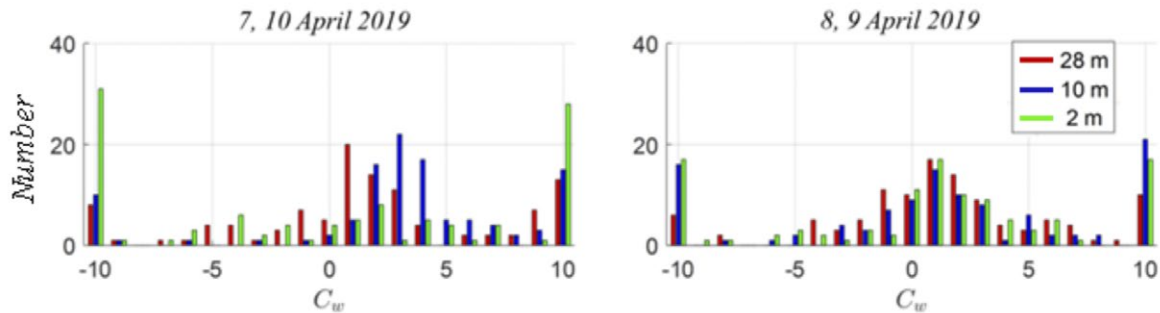


**Рис. 1.** Параметры натекающего потока и характеристики турбулентности с 20-минутным осреднением для периода с 6 по 10 апреля 2019 г.: а) скорость горизонтальной компоненты ветра  $U$ ; б) направление ветра; в) турбулентный поток явного тепла  $H_s$ ; г) третий момент  $w'w'T'$ , где  $T'$  – пульсации термодинамической температуры, К.

Выявлены следующие закономерности: наблюдается всплеск третьего момента  $\overline{w'w'T'}$  (поток потока явного тепла) в отрицательную область на высоте 10 м при наличии поворота ветра на высоте 2 м на фоне суточного хода  $\overline{w'w'T'}$ . На высоте 2 м всплески  $\overline{w'w'T'}$  наблюдаются, но их абсолютные значения меньше в разы, чем на 10 м. Это можно объяснить явлением адвекции (переносом тепла сверху), наблю-

даемым на высоте 10 м за препятствием. Но на высоте 2 м переноса тепла уже нет. Суточный ход вертикального потока явного тепла при разных режимах не имеет значительных различий.

На рис. 2 показано распределение безразмерного коэффициента пропорциональности  $C_w$  из уравнения (1) для двух вышерассмотренных режимов ветровых потоков.



**Рис. 2.**

Распределение коэффициента пропорциональности  $C_w$  для двух режимов (слева – режим 1, справа – режим 2). В крайних точках просуммированы значения, выходящие за границу шкалы.

У безразмерного коэффициента  $C_w$  при режиме 1 более выражен максимум распределения на высоте 10 м, где область максимума распределения находится в интервале  $3 \pm 1$ , содержащем 50% значений. А при режиме 2 на высоте 10 м область максимума распределения, находящаяся в равном по ширине интервале  $1 \pm 1$ , содержит 31% значений. Более подробный анализ приведён в [15].

Таким образом, была подтверждена возможность применения параметризации третьего момента  $w'w'\theta'$  для условий городского каньона. Экспериментально показано, что во внутренней области приземного слоя на высоте 10 м третий момент  $w'w'\theta'$  выражается через поток потенциальной температуры  $w'\theta'$  с распределением коэффициента пропорциональности  $C_w$ , свидетельствующим о наличии когерентных структур.

Описанные эксперименты проводились при поддержке гранта РФФИ 21-17-00249.

Осенью 2021 г. на границе лесного массива ГО установлена 40-метровая мачта (вместо 28-метровой), что позволит получать более репрезентативные данные о набегающем ветровом потоке и проводить градиентные метеорологические, радиационные и газоаналитические измерения над и внутри лесного полога в условиях "городского каньона".

## 2. ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

### 2.1. Метеорологическое обеспечение полигонных испытаний (1972-1987 гг.)

Одной из главных научно-технических задач, поставленных при организации Института (тогда СКБ НП "Оптика" СО АН СССР), было создание комплексов аппаратуры для дистанционного оперативного определения параметров атмосферы с использованием лазерных источников [2]. В состав автоматизированных комплексов входили оптико-электронные приборы, измеряющие: наклонную прозрачность атмосферы (лидар), горизонтальную прозрачность, атмосферную рефракцию, структурную постоянную флуктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2$  а также ЭВМ, обеспечивающая автоматизацию обработки результатов измерений и управление работой перечисленных измерителей [16, 17]. Также в комплексы включались многоуровневые метеостанции, измеряющие основные метеорологические величины: скорость и направление ветра, атмосферное давление и относительную влажность на нескольких высотных уровнях (2 и 10 м). В них использовались стандартные метеодатчики, которые выпускались тогда советской промышленностью. Всего было разработано и изготовлено около десятка модификаций комплексов (АОИПА, СОИПА и др.), которые были поставлены на полигоны МО СССР, для оптико-метеорологического обеспечения испытаний и корректировки характеристик лазерных локационных и силовых систем, работающих в атмосфере [17].

### 2.2. Метеорологическое приборостроение в 90-е годы

В связи с конверсией оборонной промышленности СССР в конце 80-х - начале 90-х годов прошлого века в России было практически прекращено производство метеорологических приборов. Поэтому в Институте было налажено мелкосерийное производство простейших гидрометеорологических приборов: флюгер Вильда, лебедка гидрометрическая, метеорологические мачты различных типов и др., которые поставлялись на метеостанции Росгидромета. Одновременно с этим началась разработка новых приборов, использующих акустические и оптические методы для измерения метеорологических величин: оптический измеритель влажности воздуха [18], ультразвуковые термоанемометры [19], оптический осадкомер [20], корабельный измеритель метеорологической дальности видимости [21] и др.

### 2.3. Ультразвуковые термоанемометры и метеостанции на их основе

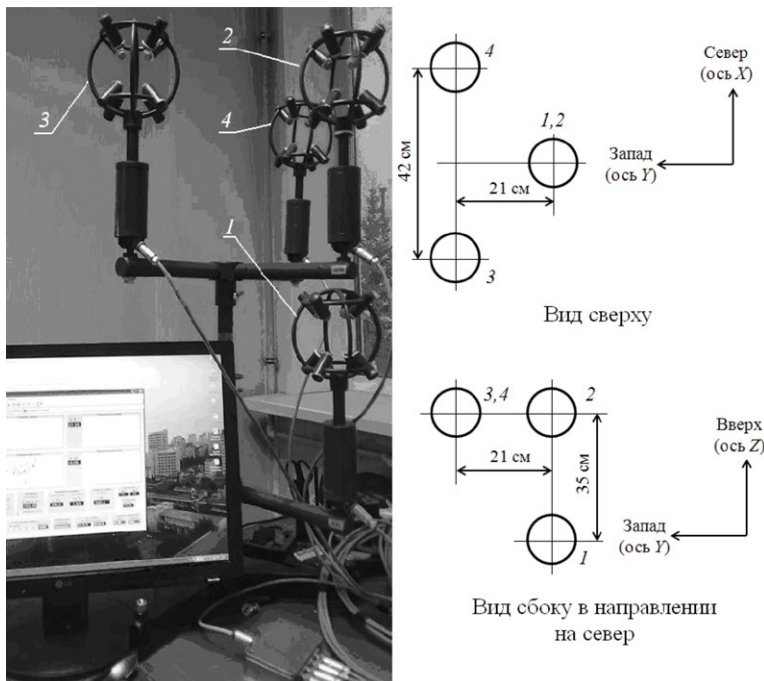
Основными достоинствами акустического (ультразвукового) метода измерений параметров ветра являются [22]: высокая чувствительность и малая инерционность измерений (частота определения мгновенных значений скорости ветра может достигать 200 Гц); определение турбулентных характеристик атмосферы. Возможно получение дополнительной информации о скорости распространения звука и пульсаций температуры воздушного потока. В конструкции приборов, использующих этот метод, отсутствуют механические вращающиеся элементы.

Первая модификация экспериментального образца ультразвукового термоанемометра (УТА) оригинальной конструкции, предназначенного для измерения мгновенных значений температуры и трехкомпонентного вектора скорости ветра с частотой опроса до 10 Гц, была разработана в Институте в 1996 г. [2, 19]. На основе этого УТА была создана ультразвуковая автоматическая метеостанция (УАМС) АМК-03 и ее различные модификации, конструкция и технические характеристики которой представлены в [22-26]. Разработано специальное программное обеспечение для УАМС [27]. В этой конструкции УТА расстояние  $S_i$  между электроакустическими преобразователями (ЭАП) (излучателями и приемниками ультразвуковых волн) составляет ~145 мм. Жесткость конструкции УТА обеспечена тем, что арматура, на которой размещены ЭАП, представляет собой два трубчатых кольца, ориентированных вертикально относительно горизонта и ортогонально друг к другу. На этих кольцах закреплены корпуса восьми ЭАП [23].

УАМС АМК-03 занесена в Госреестр средств измерений (Свидетельство RU.C.28.007.A № 29530 от 15.05.2013) и серийно выпускается индустриальным партнером Института – ООО "Сибаналитприбор". В настоящее время УАМС модифицирована как АМК-04 с расширением диапазона измерения скорости ветра до 40 м/с (Свидетельство об утверждении типа средств измерений ОС.С.28.001.A № 77356 от 01.06.2020). Метрологическое обеспечение УАМС АМК-03 и АМК-04 осуществляется в соответствии с рекомендациями, изложенными в [28]. По программе "Импортозамещение" для институтов СО РАН было изготовлено более 10 различных модификаций метеостанций на основе УАМС АМК-03.

Также созданы переносные и мобильные модификации УАМС для метеообеспечения действий различных видов Вооруженных сил РФ под индексами 1Б65 и 1Б65Б [29], которые занесены в Госреестр средств измерений (Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 31023-11 от 15.09.2021).

Последней разработкой в создании УАМС является новый аппаратно-программный комплекс ГОР-3/1м для измерения турбулентных характеристик метеорологических полей [30], созданный по заказу ИОА СО РАН (рис. 3). В этой конструкции использованы 4 новых УТА УАМС-75, у которых расстояние  $S_i$  между ЭАП уменьшено до 75 мм, что позволяет регистрировать мелкомасштабные турбулентные неоднородности. Комплекс измеряет флуктуации температуры и компонент скорости ветра в четырех пространственно разнесенных на  $30 \div 35$  см областях в атмосфере. Он определяет не только стандартные параметры атмосферной турбулентности в каждой отдельной области измерений, но и статистические характеристики мгновенных пространственных производных турбулентных пульсаций вдоль каждой из осей декартовой системы координат. В УТА этой модификации используются современные микросхемы и процессор, а также новое ПО («МЕТЕО 4.0»).



**Рис. 3.** Внешний вид комплекса ГОР-3/1м и схема размещения в нем УТА УАМС-75 (1–4).



#### 2.4. Метеостанции на летательных аппаратах

Для измерения контактным методом пространственно-временных вариаций полей температуры, атмосферного давления и влажности воздуха разработан экспериментальный образец портативной электронной метеостанции (ПЭМС), размещаемой на БПЛА (гексакоптере DJI модель S900) [31, 32]. В ПЭМС использованы малоинерционные электронные датчики для измерения перечисленных метеовеличин. Данные измерений ПЭМС передаются по радиоканалу на частоте 2,4 ГГц на наземный ноутбук. Датчики температуры и влажности размещались на высоте около 0,5 м над плоскостью вращения винтов БПЛА, чтобы уменьшить влияние их воздушных потоков на результаты измерений. Гексакоптер обеспечил измерение вертикальных профилей метеовеличин до высоты ~2 км с разрешением 10–15 м, которое зависело от скорости подъема БПЛА и постоянной времени метеодатчиков. Кроме того, была разработана модификация УАМС, размещаемая на привязном аэростате (ПУМС-БПЛА), которая могла подниматься на высоту до 1 км [32–34].

#### 2.5. Оптический осадкомер

Актуальной задачей приборного обеспечения метеонаблюдений является автоматизированное получение информации о выпадающих атмосферных осадках. Работа по созданию прибора, обеспечивающего получение данных о распределении частиц по размерам и скоростям падения и на их основе рассчитывать интенсивность и количество осадков, определять их вид и продолжительность выпадения, ведется в Институте с 2009 года. Созданы двухканальные и одноканальные экспериментальные образцы осадкомеров [35, 36], работа которых основана на принципе получения и анализа теневых изображений частиц осадков. Разработаны конструкция, программное обеспечение и оригинальная процедура калибровки прибора ОПТИОС, которая обеспечивает высокую точность измерений и имеет простую процедуру проведения [37]. Натурные испытания прибора проводятся в рутинном режиме [38].

Применение осадкомера ОПТИОС позволило провести анализ изменчивости параметров электрического состояния приземного слоя атмосферы во время ливней [38] и получить результаты мониторинга амбиентного эквивалента дозы  $\gamma$ -излучения плотности потока  $\beta$ -излучения во время выпадения дождя [40, 41].

#### 2.6. Информационно-измерительные системы на основе УЗТА и их программное обеспечение

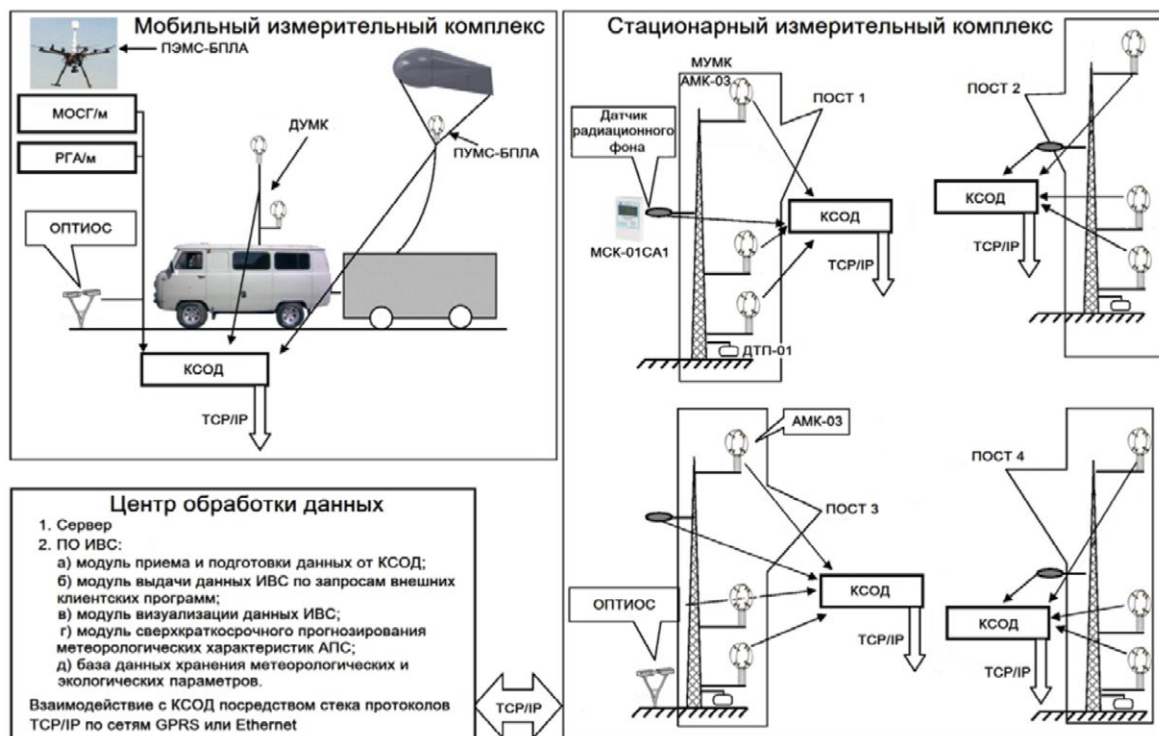
Следуя концепции М.В. Кабанова [5, 42], в конце 2000-х годов в Институте начали разрабатываться информационно-измерительные системы (ИИС) для обнаружения опасных метеорологических явлений (ОМЯ) в регионе [43]. Основу инструментальной части ИИС составляли территориально разнесенные на несколько десятков километров посты УАМС АМК-03, установленные на мачтах, коммутационные контроллеры для передачи измеряемых метеорологических величин [44] по сети Ethernet или GPRS каналу на сервер, располагаемый на территории Института [45, 46]. На сервере создавалась информационная база с высокой частотой обновления данных. Места для территориального размещения постов УАМС выбирались исходя из нескольких критериев: 1) нахождение в розе основных ветров Томской области; 2) близость расположения к стационарным источникам питания; 3) возможность использования сотовой связи для передачи данных с постов на сервер; 4) вандалозащищенность мест размещения аппаратуры.

Для прогнозирования метеорологических процессов использовалась мезомасштабная модель WRF и разработанный метод краткосрочного прогноза, основанный на применении алгоритмов калмановской фильтрации измеряемых АМК-03 метеовеличин [45]. Получены предварительные результаты работы модели WRF при усвоении непрерывных значений температуры и горизонтальных компонент скорости ветра, поступающих с постов УАМС.

Результаты работы одного из вариантов такой системы представлены в [47, 48]. Проведена сравнительная оценка результатов измерений давления, температуры, скорости и направления ветра на постах АМС, расположенных на территории ИМКЭС, в аэропорту Богашево, на стационаре в с. Курлек и в с. Половинка (на р. Обь). Рассчитаны автокорреляционные функции измеряемых метеовеличин для применения статистической интерполяции-экстраполяции этих величин, на территорию между постами ИИС. Было показано, что требуется предварительная обработка метеоданных и их статистическая обработка на постах измерений для уменьшения используемого трафика сотовой связи при передаче данных на сервер ИИС.

Дальнейшим развитием ИИС стала разработка и создание измерительно-вычислительной системы (ИВС) для реализации технологии мезомасштабного мониторинга состояния атмосферного пограничного слоя [49, 50]. Работа выполнялась в 2014–2016 гг. На рис. 4 приведена конфигурация этой ИВС, которая включала стационарный и мобильный измерительные комплексы. Стационарный комплекс состоял из 4-х территориально разнесенных многоуровневых мачт (МУМК) с размещенными на них АМК-03 (на уровнях 2, 10 и 30 м), датчики температуры почвы ДТП-01 и датчики радиационного фона. Вся информация, получаемая с перечисленных датчиков, поступала на контроллер сбора и предварительной обработки информации (КСОД), использующий промышленный компьютер, на котором производилась предварительная обработка полученных данных и вычислялись метеовеличины и их корреляционные моменты. Использование такого подхода позволило уменьшить интернет-трафик для пере-

даваемой информации в центр обработки данных (ЦОД) (внешний сервер с соответствующим программным обеспечением). Мобильный комплекс (МИК) включал: двухуровневую метеосистему (ДУМК), размещенную на крыше автомобиля; летающие метеостанции ПЭМС-БПЛА и ПУМС-БПЛА, описанные в подразделе 2.4. Кроме того, в состав МИК входили многокомпонентная оптическая система газоанализа (МОСГ/м) [51] и переносной измеритель концентрации паров ртути РГА/м [52]. Получаемая с устройств МИК информация также через КСОД передавалась в ЦОД.



**Рис. 4.**  
Конфигурация измерительно-вычислительной системы.

Состав метеодатчиков МУМК обеспечивал вычисление энергических и спектральных параметров турбулентности в АПС [33, 50], используемых для определения типа атмосферной стратификации (конвекция/инверсия/нейтральная) и восстановления вертикальных профилей температуры, скорости ветра, давления и влажности на высотах до несколько десятков или сотен метров (в зависимости от выявленной стратификации) [53].

#### 2.7. АМС АрктикМетео

В 2020 г. завершена разработка и изготовление экспериментального образца автономной АМС АрктикМетео, который предназначен для работы на удаленных и труднодоступных территориях со сложными климатическими условиями [54]. АМС обеспечивает измерение метеорологических величин, входящих в основной перечень Росгидромета: температура воздуха (минус 60 ... +55 °С), скорость (0,1 ... 60 м/с) и направление ветра (0 ... 360 гр), относительная влажность воздуха (15 ... 100 %), атмосферное давление (520 ... 800 мм рт. ст.), температура подстилающей поверхности (минус 60 ... +55 °С) и количество жидких атмосферных осадков (0 ... 500 мм). Кроме этого, АМС измеряет ряд метеовеличин дополнительного перечня: высота снежного покрова (2 ... 100 см), величина приходящей солнечной радиации (0,1 ... 1,6 кВт/м<sup>2</sup>) и профиль температуры почвы (минус 50 ... +55 °С) на глубинах от 10 до 100 см с шагом 10 см.

В метеорологических датчиках использованы оптические, акустические и электронные методы измерений. Сигналы с датчиков, измеряющих метеорологические величины, поступают в систему сбора, усвоения и передачи данных, которая пакетирует их соответствующим образом и передает на хранение на внешний сервер. Передача измерительной информации осуществляется по кабельному каналу, каналам сотовой и спутниковой связи и производится в автоматическом режиме с периодом, устанавливаемом пользователем, либо в режиме «по запросу пользователя». Автономность работы АМС (до одного года) обеспечивается комбинированной системой электропитания, которая включает: аккумуляторы, солнечные панели и генератор на топливных элементах (метанол). В состав АМС также входят сервисные системы, обеспечивающие в автоматическом режиме непрерывный контроль функционирования датчиков измерения метеорологических величин и их автоматической калибровки [54, 55]. Внешний вид вандализационно-защитной конфигурации АМС и результаты натурных испытаний в течение 2020-2021 гг. приведены в [56].

Данная разработка является универсальным решением для метеорологического обеспечения исследований в различных задачах. Модификация АМС АрктикМетео положена в основу прототипа стационарного пункта контроля программно-аппаратного комплекса для мониторинга и прогнозирования экологической обстановки на городских и промышленных объектах (ОКР "Палантир").

#### Заключение

Представленные материалы показывают историю развития и некоторые результаты, полученные при проведении в Институте метеорологических наблюдений. Геофизическая обсерватория служит стационарным пунктом наблюдений за состоянием окружающей среды, полигоном для экспериментальных геофизических, метеорологических и экологических исследований, проведения испытаний и сравнений технических характеристик новых приборов и технологий мониторинга, разработанных как в ИМКЭС, так и в других учреждениях. Совместно с сотрудниками ИФА РАН и МГУ проведено уникальное исследование турбулентной структуры ветрового потока внутри городского каньона, для которого использовано семь УАМС АМК-03, размещенных в ГО на высотах 2, 10, 28 м на расстояниях до 30 м друг от друга. При измерениях высокочастотных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра  $w'$  и потенциальной температуры  $\theta'$  определены потоки тепла и третьи моменты  $(w')^3$  и  $w'w'\theta'$  на разных высотах каньона в зависимости от направления ветра.

Разрабатываемые в Институте АМС и их составные части, основанные на использовании акустических и оптических методах измерений, доводятся до опытных образцов, сертифицируются и выпускаются серийно с помощью индустриального партнера. На основе УАМС АМК-03 создано несколько модификаций информационно-измерительных систем с территориально разнесенными многоуровневыми пунктами измерений. Эти ИИС являются основой для создания "штормового кольца" вокруг г. Томска. Разработана вандалозащищенная конструкция автономной АМС, работающей на удаленных территориях и измеряющей основные метеорологические величины, входящие в основной перечень Росгидромета, а также ряд дополнительных величин. АМС снабжена комбинированной системой электропитания, обеспечивающей ее автономную работу до 1 года, и системой передачи информации на удаленный сервер по кабельному каналу, каналам сотовой и спутниковой связи.

Контрольно-испытательная станция Института, включающая климатические камеры, камеры давления и влаги, аэродинамическую трубу, стенды для механических воздействий на приборы и др., обеспечивает проведение испытаний опытных образцов создаваемых приборов и оборудования на требования соответствующих ГОСТ. Сертифицированное метеорологическое оборудование ГО позволяет проводить длительные натурные испытания опытных образцов в различных погодных условиях.

*Представленная ретроспектива НИОКР кратко представляет перечень выполненных за 50-летний период работ, как по планам РАН и СО РАН и хоздоговорам, так и по госзаданиям ФАНО России и Минобрнауки России, а также по проектам РФФИ (№ 16-45-700562 p\_a, № 09-05-99014-p\_офи и № 11-05-98062-p\_сибирь\_a), ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 гг." (Соглашения от 05.06.2014 № 14.607.21.0030 и от 15.05.2018 № 14.607.21.0205), гранта РФФ № 21-17-00249.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. URL: <https://public.wmo.int/ru/наблюдения> (дата обращения 04.11.2021).
2. Кабанов М.В., Тихомиров А.А. Конструкторско-технологическое обеспечение фундаментальных исследований по атмосферной оптике: Итоги деятельности КТИ "Оптика" СО РАН за 25 лет // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 4-5. С. 382-402.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. 30 лет Институту оптического мониторинга СО РАН: основные этапы формирования и развития научного направления // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 6-11.
4. Кабанов М.В., Крутиков В.А., Тихомиров А.А. 40 лет Институту мониторинга климатических и экологических систем СО РАН: целевые задачи научных исследований // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25. № 2. С. 111-116.
5. Кабанов М.В. Климато-экологический мониторинг Сибири (КЭМС): программа физических исследований по локальным, региональным и глобальным изменениям в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 146-156.
6. Коптюг В.А. Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 года). Информационный обзор. Новосибирск: СО РАН, 1992. 62 с.
7. URL: <http://www.imces.ru/index.php?rm=news&action=view&id=899> (Дата обращения 20.04.2021).
8. Яковлев Г.А., Кобзев А.А., Смирнов С.В., Беляева И.В., Аршинов М.Ю., Яковлева В.С. Синхронный мониторинг  $\gamma$ -,  $\beta$ -фона и атмосферных осадков в геофизических обсерваториях ИМКЭС СО РАН И БЭЖ ИОА СО РАН // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 32. № 3. С. 165-179. doi: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-165-179.



9. Pashkin A.D., Repina I.A., Stepanenko V.M., Bogomolov V.I., Smirnov S.V., Telminov A.E. An experimental study of atmospheric turbulence characteristics in an urban canyon // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 386. 012035. doi:10.1088/1755-1315/386/1/012035.
10. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // *Труды ГЕОФИАН*. 1954. № 24 (151). С. 163-187.
11. Степаненко В.М., Репина И.А., Барсков К.В., Артамонов А.Ю., Богомолов В.Ю., Варенцов М.И., Гавриков А.В., Пашкин А.Д. Исследование структуры атмосферной турбулентности над неоднородным ландшафтом // *Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сб. тр. М.: Физматкнига, 2018. С. 81–93.*
12. Barskov K.V., Stepanenko V.M., Repina I. A., Artamonov A.Yu., Gavrikov A.A. Two regimes of turbulent fluxes above frozen small lake surrounded by forest // *Boundary-Layer Meteorology*. 2019. V. 173 No 3. P. 311–320. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00469-w>.
13. Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. Third-Order Transport and Nonlocal Turbulence Closures for Convective Boundary Layers // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1999. V. 56. P. 3463–3477.
14. Mironov D.V., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Zilitinkevich S.S. Comments on "a new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer" // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1999. V. 56 No 19. P. 3478–3481.
15. Пашкин А.Д., Репина И.А., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Смирнов С.В., Тельминов А.Е. Связь статистических характеристик турбулентности с когерентными структурами по результатам пульсационных измерений в городском каньоне // *Процессы в геосредах*. 2021 № 1 (27). С. 1020-1027.
16. Ваулин П.П., Кутелев А.Ф., Тихомиров А.А., Шапиро И.Я. Комплексы аппаратуры для исследования параметров атмосферы // *Тезисы докладов V Всесоюзн. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. IV. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР. 1978. С. 8-15.*
17. Тихомиров А.А. ИМКЭС СО РАН // Глава в монографии: Создатели российских лазеров / составитель Ю.В. Рубаненко, Е.В. Можелев. 448 с. М.: Столичная энциклопедия, 2016. С. 259-266.
18. Азбукин А.А., Бурков В.В., Корольков В.А. Малогабаритный оптический гигрометр многоцелевого назначения // *Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений: Коллективная монография / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во "Спектр" ИОА СО РАН, 1997. С. 196-202.*
19. Азбукин А.А., Бурков В.В., Корольков В.А. Автоматизированный метеокомплекс нового поколения // *Там же*. С. 208-217.
20. Солдаткин Н.П. Оптические приборы и методы контроля микрофизических параметров атмосферных осадков // *Там же*. С. 217-232.
21. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Солдаткин Н.П. Корабельный измеритель метеорологической дальности видимости // *Там же*. С. 243-253.
22. Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23. № 7. с. 585-600.
23. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // *Метеор. и гидрол.* 2006. № 11. С. 89-97.
24. Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Korol'kov V.A., Tikhomirov A.A., Shelevoi V.D. A field version of АМК-03 automated ultrasonic meteorological complex // *Russian meteorology and hydrology*. 2009. V. 34. No 2. P. 133-136.
25. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // *Датчики и системы*. 2012. № 3. С. 47-52.
26. Пат. 2319987 РФ. МПК G01W 1/02. Ультразвуковой термоанемометр с устройством автоматического восстановления точностных характеристик измерений / Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Шелевой В.Д.; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем; ООО Сибаналитприбор. – № 2006119583; заявл. 05.06.2006; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8.
27. Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 («МЕТЕО 3.0»): Свид. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2002612038. Роспатент / Богушевич А.Я.; Заявл. 3.12.2002.
28. Korolkov V.A., Telminov A.E., Tikhomirov A.A. Metrological Support of Ultrasonic Thermo-anemometers for Measurement of Pulsation Properties of Meteorological Parameters // *Atmos. Ocean Opt.* 2016. V. 29. No 1. P. 96-103.



29. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин // Вестник академии военных наук. 2008. № 3 (24). С. 144-148.
30. Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V. Hardware-software complex for studying the structure of the fields of temperature and wind turbulent fluctuations // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 479-485. doi: 10.1134/S1024856018050032.
31. Кураков С.А., Зуев В.А. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29. № 11. С. 994-999. doi: 10.15372/AOO20161114.
32. Korolkov V.A., Telminov A.E., Komarov A.I., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A. Pilot project of measuring and computing system for mesoscale monitoring of atmospheric boundary layer // Proc. of SPIE. 2015. V. 9680. P. 96805Z. doi: 10.1117/12.2205475.
33. Богусевич А.Я., Корольков В.А., Кураков С.А., Тельминов А.Е., Тихомиров А.А. Измерительные комплексы для определения вертикальных профилей метеорологических величин в атмосферном пограничном слое // Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга: методологические аспекты повышения качества функционирования / Сб. научных статей по материалам III Всероссийской научн.-практ. конференции "Академические Жуковские чтения" (25-27 ноября 2015 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА". 2016. С. 17-21.
34. Korolkov V.A., Pustovalov K.N., Tikhomirov A.A., Telvinov A.E., Antonovich V.V., Kobzev A.A. Measurement of meteorological quantities in the atmospheric boundary layer of the ultrasonic weather station AMK-03 on tethered balloon // Proc. of SPIE. 2018. V. 10833. P. 1083380. doi: 10.1117/12.2504430.
35. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24. № 11. С. 990-996.
36. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of the rate of fall of rain drops in measurements of their parameters by an optical rain gauge // Measurement Techniques. 2017. V. 59. No 11. P. 1175-1180. doi:10.1007/s11018-017-1111-9.
37. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е. Оптимизация процедуры калибровки оптико-электронного измерителя осадков // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 535-538.
38. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е. Измерение количества осадков с помощью оптического осадкомера в течение летнего периода 2020 г. // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34. № 2. С. 152-155.
39. Kalchikhin V, Kobzev A, Nagorskiy P, Oglezneva M, Pustovalov K, Smirnov S, Filatov D. Connected Variations of Meteorological and Electrical Quantities of Surface Atmosphere under the Influence of Heavy Rain // Atmosphere. 2020. Vol. 11, № 1. P. 1-11.
40. Yakovleva V, Zelinskiy A, Parovik R, Yakovlev G, Kobzev A. Model for Reconstruction of  $\gamma$ -Background during Liquid Atmospheric Precipitation // Mathematics. 2021. V. 9 (14). No 1636. P. 1-10.
41. Yakovleva V, Yakovlev G, Parovik R, Zelinskiy A, Kobzev A. Rainfall Intensity and Quantity Estimation Method Based on Gamma-Dose Rate Monitoring // Sensors. 2021. V. 21 (19), № 6411. P. 1-16.
42. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Смирнов С.В. Концепция сетевого мониторинга природно-климатических процессов в Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24. № 1. С. 7-14.
43. Тихомиров А.А., Азбукин А.А., Богомоллов В.Ю., Богусевич А.Я., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н. Информационно-измерительная система для обнаружения опасных метеорологических явлений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: Изд-во "Горная книга, 2009. № ОВ18. С. 124-130.
44. Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Коммутационный контроллер передачи метеорологических данных // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 166.
45. Богомоллов В.Ю., Богусевич А.Я., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н., Тихомиров А.А. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24. № 1. С. 52-59.
46. Тихомиров А.А., Богусевич А.Я., Корольков В.А., Кобзев А.А. Региональная информационно-измерительная система для мониторинга атмосферного приземного слоя и прогноза опасных метеорологических явлений // Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 5. С. 412-419.
47. Bogushevich A.Ya., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Correlation features for rows averaged values of meteorological parameters obtained from measurements in regional network of the automated ultrasonic weather stations // Proc. of SPIE. 2014. V. 9292. P. 92924O doi: 10.1117/12.2075378.



48. Bogushevich A.Ya., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Some Results of Operation of the Spatially Distributed Measuring Meteorological System Based on the Network of Ultrasonic Automatic Weather Stations // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015. V. 40. No 10. P. 699-706. doi: 10.3103/S1068373915100088.
49. Korolkov V.A., Telminov A.E., Komarov A.I., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A. Pilot project of measuring and computing system for mesoscale monitoring of atmospheric boundary layer // *Proc. of SPIE*. 2015. V. 9680. P. 96805Z. doi: 10.1117/12.2205475.
50. Bogushevich A.Ya., Korolkov V.A., Telminov A.E., Tikhomirov A.A. Multilevel ultrasonic complexes for monitoring of meteorological and turbulent parameters in the ground atmosphere // *Proc. of SPIE*. 2016. V. 10035. P. 100356T. doi: 10.1117/12.2249247.
51. Petrov D.V., Matrosov I.I., Tikhomirov A.A. Raman gas analyzer applicability to monitoring of gaseous air pollution // *Proc. of SPIE*. 2015. V. 9880. P. 96803C. doi: 10.1117/12.2205330.
52. bramochkin A.I., Korolkov V.A., Mutnitsky N.G., Tatur V.V., Tikhomirov A.A. Portable mercury gas analyzer with a lamp filled with natural mercury isotope mixture // *Proc. of SPIE*. 2015. V. 9680. P. 96803D. doi: 10.1117/12.2205335.
53. Bogushevich A.Ya. Methodology of monitoring the temperature and wind stratification in the atmospheric boundary layer based on multilevel ultrasonic measurements // *Proc. of SPIE*. 2015. V. 9680. P. 96806F. doi: 10.1117/12.2205698.
54. Korolkov V.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Pustovalov K.N., Telminov A.E., Tikhomirov A.A., Petrov D.V. Experimental prototype of automatic weather station ArcticMeteo // *Proc. of SPIE*. 2020. V. 11560. P. 1156058. doi: 10.1117/12.2575822.
55. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo: first field test results // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* V. 611 (2020) 012053 doi: 10/1088/1755-1315/611/1/012053.
56. Корольков В.А., Кобзев А.А., Тихомиров А.А. Новая модификация автономной метеостанции АрктикМетео // *Климатические риски и космическая погода: материалы Международной конференции, посвященной памяти Н.К. Кононовой (14-17 июня 2021 г.)*. 2021. Иркутск: Изд-во ИГВ. 1 CD-ROM. С. 334-342. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1956-5.2021.1-381>.

## Efficient Compression in the Logger of Measurement Data of a Sonic Anemometer-Thermometer about Atmospheric Turbulence and Software Implementation of their Processing

**Bogushevich A.Ya.**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: bay@imces.ru

Algorithms of effective compression of meteorological data measured by a sonic anemometer-thermometer and recorded in the non-volatile memory of a logger connected to this device are described. These algorithms were implemented in the BSI-04 logger, developed for use in conjunction with the new AMK-04 ultrasonic meter. For the highest density of stored data, this logger writes files in binary code containing ordered structures of information bytes with the maximum filling of the microSD card memory in its sectors (512 bytes each) and clusters (4096 bytes each). In addition, since the physical values of the stored parameters are real numbers (of the Float type) containing at least 4 bytes, they are written to BSI-04 after conversion to 2-byte integers (of the Word type).

The new software "SIMPA-logger" is described, designed to extract and process meteorological information from file data recorded on a memory card by the BSI-04 logger, which is part of the meteorological kit with a sonic anemometer-thermometer as a measure of the main atmospheric parameters. It was implemented as a cross-platform application for calculating meteorological parameters and characteristics of atmospheric turbulence, displaying them and saving them in various files.

*This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences).*

# Эффективное сжатие в логгере данных измерений ультразвукового анемометра-термометра об атмосферной турбулентности и программная реализация их обработки

Богушевич А.Я.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: bay@imces.ru

Современные ультразвуковые анемометры-термометры (УАТ), имеющие в своем составе микропроцессор, могут выдавать как мгновенные первичные данные своих измерений, так и, в более развитом их варианте, также вычисленные из них мгновенные значения метеорологических параметров. Наибольший объем информации, включающий не только средние значения метеорологических параметров, но и характеристики атмосферной турбулентности, достигается при статистической обработке на компьютере массивов мгновенных данных, используя специальное программное обеспечение [1].

С другой стороны, УАТ обычно применяются для непрерывных и заранее не ограниченных по времени автоматических измерений параметров атмосферы и не требуют постоянного присутствия оператора. При этом в условиях Сибири и Арктики эти приборы довольно часто размещаются в удаленных и труднодоступных местах, редко посещаемые человеком [2, 3]. В этом случае есть необходимость в автономном накоплении данных УАТ в энергонезависимой памяти подключаемого логгера. Накопленные логгером данные также обрабатываются на компьютере, но с задержкой, после получения доступа к ним.

С 2020 г. ООО «Сибаналитприбор» изготавливает УАТ нового поколения под наименованием АМК-04, в котором по сравнению с предыдущим аналогом АМК-03 применяются более современные электронные компоненты. В АМК-04 более мощный микропроцессор позволяет выдавать с частотой повторения  $F_{\text{д}}$ , устанавливаемой равной 10 или 80 Гц, не только первичные данные ультразвуковых измерений, но и вычисленные из них мгновенные значения метеорологических параметров. Для автономного накопления этих мгновенных метеорологических данных в ООО «Сибаналитприбор» был разработан логгер БСИ-04, в котором в качестве энергонезависимой памяти используются карточки микро SD объемом памяти не менее 4 Гбайт, форматируемые в FAT-32 с кластерами в 4096 байт.

В работе описываются реализованные в БСИ-04 алгоритмы сжатия метеорологической информации при ее записи на карточку памяти. Для наибольшей плотности сохраняемых данных здесь выполняется запись в двоичном коде файлов, содержащих упорядоченные структуры информационных байтов с максимальным заполнением ими памяти карточки микро SD по ее секторам в 512 байт и кластерам из 4096 байт.

Ниже для метеорологических параметров, измеряемых в АМК-04, используются обозначения:  $T$  - для температуры воздуха в  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V$  - для скорости горизонтального ветра в м/с;  $D$  - для направления горизонтального ветра в градусах;  $w$  - для вертикальной скорости ветра в м/с;  $P$  - для атмосферного давления в мм.рт.ст.;  $r$  - для относительной влажности воздуха в %. Значения этих параметров являются вещественными числами (типа Float), при записи которых требуется не менее 4-х байт. Поэтому в БСИ-04 они записываются после их преобразования в целые 2-х байтовые числа (типа Word). Для обозначения этих преобразованных значений здесь используются идентичные символы, дополнительно помечаемые значком  $\wedge$ , например, для  $T$  как  $T^{\wedge}$ . Применяемые алгоритмы преобразования вещественных значений метеорологических параметров в целые числа и обратно (при их чтении из файла), приведены в таблице 1.

Имя каждого создаваемого файла на карточке памяти формируется в БСИ-04 из даты и времени получения из УАТ его первых данных, сохраняемых в этом файле, в виде YYMMddhhmmss.bsi, где YY - символы двух последних цифр года измерений, MM - месяц, dd - день, hh - час, mm - минута, ss - секунда; bsi - применяемое расширение для имен файлов логгера. Если значения параметров MM, dd, hh, mm и ss оказываются меньше 10, то они в имени файла дополняются спереди символом нуля. Микропроцессор БСИ-04 в своей памяти формирует информационные блоки по 512 байт, предназначенные для записи на карточку памяти. Для предотвращения потери уже полученной информации, например, при случайном отключении электропитания, файлы при их записи дополняются периодически, по мере формирования в БСИ-04 очередного объема данных в 1 кластер (из 8 блоков по 512 байт). Запись текущего файла прекращается либо по истечению времени (обычно 6 часов), либо при отключении питания прибора.

В каждом файле в его самый первый блок из 512 байт включается символьная строка RMS-информации подключенного к логгеру навигационного приемника (GPS или Glonass) в том же виде, как она им выдается. Если навигационный приемник не подключен или в текущий момент не может выдать эту

информацию, например, из-за отсутствия связи со спутниками, то вместо нее используется строка из 56 байт, заполненная пробелами. В конце первого блока также записывается строка YUMMddhhmss, дублирующая имя файла. Используемые в БСИ-04 дата и время считываются из его внутреннего таймера, который автоматически синхронизируется с аналогичными данными навигационного приемника, привязанными к UTC. Кроме даты и времени наиболее важными в информации навигационного приемника являются значения широты и долготы места размещения УАТ.

**Таблица 1.**

Алгоритмы преобразования значений метеорологических параметров.

Параметр (X)	Алгоритм прямого преобразования $X \rightarrow X^{\wedge}$	Алгоритм обратного преобразования $X^{\wedge} \rightarrow X$	Максимальная погрешность при преобразованиях $X \leftrightarrow X^{\wedge}$	Допускаемый диапазон параметра при преобразованиях $X \leftrightarrow X^{\wedge}$
$T$	Округл. $(32678 + T*400)$	$(T^{\wedge} - 32678)/400$	+/- 0,0025 0С	-81,6 ÷ +81,6 °С
$V$	Округл. $(V*1000)$	$V^{\wedge}/1000$	+/- 0,001 м/с	0 ÷ 65,6 м/с
$D$	Округл. $(D*150)$	$D^{\wedge}/150$	+/- 0,0067 град	0 ÷ 360 град
$w$	Округл. $(32678 + w*400)$	$(w^{\wedge} - 32678)/400$	+/- 0,0025 м/с	-81,6 ÷ +81,6 м/с
$P$	Округл. $((P - 200)*100)$	$P^{\wedge}/100 + 200$	+/- 0,01 мм.рт.ст.	200 ÷ 855,3 мм.рт.ст.
$r$	Округл. $(r*500)$	$r^{\wedge}/500$	+/- 0,002 %	0 ÷ 131 %

**Таблица 2.**

Структура записи в БСИ-04 стандартного блока данных в 512 байт.

Номера байтов	Параметр	Число байт
1	День	1
2	Час	1
3	Минута	1
4	Секунда	1
5-6	Миллисекунда	2
7-8	Среднее по 60-и измерениям значение атмосферного давления $\langle P \rangle^{\wedge}$ , преобразованное в тип Word	2
9-10	Среднее по 60-и измерениям значение относительной влажности воздуха $\langle r \rangle^{\wedge}$ , преобразованное в тип Word	2
11-32	Резерв для записи показаний дополнительно подключаемых измерительных датчиков (до 11 устройств)	22
33-34	Мгновенное значение температуры воздуха $T^{\wedge}$ , преобразованное в тип Word	2
35-36	Мгновенное значение скорости горизонтального ветра $V^{\wedge}$ , преобразованное в тип Word	2
37-38	Мгновенное значение направления горизонтального ветра $D^{\wedge}$ , преобразованное в тип Word	2
39-40	Мгновенное значение скорости вертикального ветра $w^{\wedge}$ , преобразованное в тип Word	2
41-512	Далее циклическое повторение 59 раз параметров, записываемых с 33-го по 40-й байт	472

После первого блока файл дополняется стандартными блоками из 512 байт, структура записи которых приведена в таблице 2. В этих блоках первые 6 байт используются для временной синхронизации данных, далее записываются 4 байта с усредненными значениями давления  $\langle P \rangle^{\wedge}$  и влажности  $\langle r \rangle^{\wedge}$ . С 11-го по 32-й байт предусмотрена возможность записи показаний до 11 дополнительных датчиков (температуры почвы и/или воды, количества осадков, высоты снежного покрова, солнечной радиации и др.), которые могут подключаться к БСИ-04. В остальные 480 байт записываются 60 пакетов по 8 байт, содержащих мгновенные значения  $T^{\wedge}$ ,  $V^{\wedge}$ ,  $D^{\wedge}$  и  $w^{\wedge}$ . Для обеспечения синхронизации данных эти пакеты записываются в файлы всегда, даже если в них имеются не достоверные данные. В микропроцессоре АМК-04 выполняется диагностика достоверности текущих данных измерений. При этом если какой-либо вычисляемый параметр оказывается недостоверным, то для его значения им выдается фиксированное число, равное FF.

Стандартный блок при  $F_d = 10$  Гц соответствует записи данных УАТ, измеренных им за 6 секунд. При этом файл, содержащий 3600 блоков (стартовый и 3599 стандартных), записанных в 450 кластеров по 4096 байт, примерно соответствует 6 часам измерений (без 6 секунд) и имеет объем 1,8432 Мбайт. Соответственно, одна карточка памяти емкостью в 32 Гбайт позволяет в этом случае непрерывно нака-



плывать данные УАТ в течение 12 лет. Предложенный формат записи данных не привязан к частоте измерений  $F_a$ , но при ее увеличении до 80 Гц сокращается в 8 раз указанный выше срок полного заполнения карточки памяти.

Для извлечения метеорологической информации из файловых данных, записываемых на карточку памяти логгером БСИ-04, и ее обработки нами было создано новое программное обеспечение – приложение «СИМПА-логгер». Это приложение разработано на языке Free Pascal в свободно распространяемой среде кросс-платформенного программирования Lazarus и ориентировано на использование в операционных системах Linux и Windows. При этом оно имеет переключаемый кнопкой двуязычный англо-русский интерфейс.

Приложение «СИМПА-логгер» применяется на компьютере после переноса на его жесткий диск файлов из карточки памяти логгера БСИ-04 для решения следующих задач:

- извлечения из этих файлов архивной сжатой информации с мгновенными и усредненными значениями метеорологических параметров в оперативную память компьютера и обеспечения возможности ее просмотра на экране монитора в числовом и графическом виде, ее печати и сохранения в файлах;
- вычисления из считанных мгновенных данных измерений статистических характеристик метеорологических величин и параметров атмосферной турбулентности, с возможностью отображения результатов этих вычислений на экране монитора в числовом и графическом виде, их печати и сохранения в файлах;
- автоматического формирования и записи файлов 4-х типов (по выбору пользователя), являющихся стандартными в программе «МЕТЕО 3.0.М» [1, 2] при сохранении результатов работы ультразвукового анемометра-термометра в случае его прямого подключения к компьютеру.

*Настоящая работа выполнена по государственному заданию ИМКЭС СО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Ильичевский В.И., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // *Метеорол. гидрол.* 2006. № 11. С. 89–97.
2. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo. First field test results // *Proc. IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* V. 611. 2020. 012053. DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012053.
3. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 // *Метеорол. гидрол.* 2009. № 2. С. 101–106.

## Experimental multisensor oriented pyranometer

Zuev S.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

Multisensor pyranometers with special shadow screens [1, 2] can be used to equip remote autonomous sites of actinometric monitoring. Such devices measure global, diffuse, and direct normal irradiance with low errors and do not have any moving parts. IMCES SB RAS is developing a prototype of a multisensor oriented pyranometer that implements a patented method for measuring solar irradiance [3]. The sensors and the shadow screen of the pyranometer are positioned so that at any time at least one sensor is fully open to the Sun and measures the maximum solar irradiance  $Q_{max}$  and at least one sensor is fully closed to the Sun and measures the minimum value  $Q_{min}$ . As a result, we have

$$\begin{cases} Q_{max} = S^i + D - \Delta D; \\ Q_{min} = D - \Delta D, \end{cases} \quad (1)$$

where  $\Delta D$  is the part of the diffuse irradiance lost due to the shadow screen.

To reduce the shadow screen error,  $\Delta D \rightarrow 0$  is required. This is possible if the ratio of areas  $n = \frac{S}{S_{sc}} \rightarrow \infty$ , where  $S$  is the total area of the hemisphere,  $S_{sc}$  is the screen area. The shadow screen is constructed so that for site latitude  $\varphi = 45^\circ$  ratio  $n \geq 4$ , for latitude  $\varphi = 55^\circ$  ratio  $n \geq 5$ , and for latitude  $\varphi = 65^\circ$  ratio  $n \geq 8$ .

The pyranometer uses heat flow sensors d27 mm based on hyperbatteries of copper-constantan thermocouples. The number of sensors can be from 4 to 7 depending on the required frequency of measurements.

For all sensors, every 30 sec., 1-sec. measurements are averaged, among them  $Q_{max}$  and  $Q_{min}$  are determined, which are recorded to the flash memory. The memory can store data for 300 days or more. After the pyranometer is connected to a computer, the data are read and the diffuse, global and direct normal irradiances are calculated



$$D = \frac{n}{n-1} \cdot Q_{min},$$

$$Q = Q_{max} + \frac{1}{n-1} \cdot Q_{min}, \quad (2)$$

$$S = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{\cos z},$$

where  $z$  is the solar zenith angle.

The electronic and measuring parts of the pyranometer are in a sealed metal case with a  $d120$  mm. From above, thermocouple sensors and a shadow screen are covered with an acrylic hemispherical dome. The spectral range of the measured irradiance is  $0.36-2.3 \mu\text{m}$ , the measurement range is  $10-1500 \text{ W/m}^2$ . The response time of the sensors is no more than 10 sec. and instrumental measurement error of pyranometer is no more than 5%.

*The development and manufacture of the experimental multisensor oriented pyranometer was supported by the Russian Innovation Fund (Grant No. 74026). The study of the measurement method was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 121031300155-8).*

## Опытный образец многоэлементного ориентированного пиранометра

**Зуев С.В.**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

**П**отоки солнечной радиации являются основным источником многообразных процессов в атмосфере и приземной поверхности, и их изменение напрямую влияет на климат Земли и ее отдельных территорий. Более 99% приходящей к поверхности солнечной радиации сосредоточено в коротковолновой области спектра  $0,3 - 4 \mu\text{m}$ , поэтому особое значение имеет мониторинг суммарной  $Q$ , прямой  $S$  и рассеянной  $D$  радиации, связанных между собой как

$$Q = S \cdot \sin h + D, \quad (1)$$

где  $h$  – высота Солнца над горизонтом.

Стандартные измерения суммарной, рассеянной и прямой радиации проводятся одновременно с использованием трех приборов - незатененного и затененного пиранометров и актинометра, соответственно. При этом экран затененного пиранометра и актинометр необходимо постоянно нацеливать на Солнце вручную или используя специальные солнечные трекары. Такой способ довольно затратный и подходит в основном для стационарных электрофицированных пунктов наблюдения. Для оборудования удаленных автономных точек мониторинга перспективным является использование многоэлементных пиранометров со специальными теневыми экранами [1, 2], способных одновременно измерять потоки суммарной и рассеянной радиации с последующим расчетом прямой радиации. Такие пиранометры не имеют каких-либо подвижных частей, что особенно важно для работы в труднодоступных местах и в районах со сложными природно-климатическими условиями.

В ИМКЭС СО РАН ведется разработка опытного образца многоэлементного ориентированного пиранометра, реализующего запатентованный способ измерения солнечной радиации [3]. Пиранометр конструктивно состоит из измерительной и электронной частей. К первой относятся датчики и теневой экран специальной формы, расположенные таким образом, что в любой момент времени как минимум один датчик полностью открыт для Солнца и измеряет максимальную величину солнечной радиации  $Q_{max}$  и как минимум один датчик полностью закрыт от Солнца и измеряет минимальную величину солнечной радиации  $Q_{min}$ . Процесс измерения описывается системой уравнений

$$\begin{cases} Q_{max} = S + D - \Delta D; \\ Q_{min} = D - \Delta D, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Delta D$  – часть рассеянной радиации, перекрываемой теневым экраном.

Для минимизации влияния теневого экрана на результаты измерений, его размер и, следовательно, площадь должны быть как можно меньше, чтобы  $\Delta D \rightarrow 0$ . Такое требование выполняется, если размер экрана поставить в зависимость от географической широты места установки пиранометра. Тогда, чем больше будет отношение всей площади обзораемой полусферы к площади теневого экрана  $n = \frac{S}{S_{sc}} \rightarrow \infty$ , тем меньше будет величина  $\Delta D$  и меньше неопределенность состояния закрытых экраном участков небосвода. Конструктивно теневой экран представляет собой расположенную на полусфере перфорированную квадратами (с шагом  $10^\circ$ ) полосу с угловой шириной  $57^\circ$ . Верхняя и нижняя границы экрана соответствуют суточному ходу Солнца в дни летнего и зимнего солнцестояния для данной широты местности  $\pm 5^\circ$  с

каждой стороны (Рис. 1). Такая конструкция теневого экрана позволяет получать значения  $n \geq 5$  для широты  $55^\circ$ . Для широты  $45^\circ$  расчетное отношение площадей  $n$  будет не меньше 4, а для широты  $65^\circ$   $n \geq 8$ .



**Рис. 1.**  
1. Эскизный проект пиранометра.



**Рис. 2.**  
Термопарный датчик теплового потока  $d = 27$  мм.

В качестве чувствительных элементов пиранометра используются датчики теплового потока диаметром 27 мм на основе термопарных гипербатареи медь-константановых пар, выполненных по гальванической технологии [4] (Рис. 2). Количество используемых датчиков определяет частоту измерений солнечной радиации. При использовании 7-ми датчиков, расположенных в форме ромашки, теоретически обеспечиваются измерения практически с любой частотой. Для односекундных измерений на широте Томска в большинстве случаев достаточно 4–5 датчика.

Электронная часть пиранометра предназначена для записи, предварительной обработки, хранения и передачи по каналам связи измеренных значений  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$ . Алгоритм работы пиранометра заключается в следующем. Один раз в секунду все датчики последовательно опрашиваются. Полученные за 30 сек. для каждого датчика значения усредняются и среди них определяются максимальные  $Q_{\max}$  и минимальные  $Q_{\min}$  значения радиации, которые заносятся в энергонезависимую память. Объем памяти рассчитан на хранение данных измерений не менее чем за 300 суток. При подключении пиранометра к персональному компьютеру происходит чтение записанных в память пар значений  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$ , по которым рассеянная, суммарная и прямая радиация рассчитываются как

$$D = \frac{n}{n-1} \cdot Q_{\min},$$

$$Q = Q_{\max} + \frac{1}{n-1} \cdot Q_{\min}, \quad (3)$$

$$S = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau},$$

где  $\varphi$  – широта местности;

$\delta$  – склонение Солнца для данного дня года;

$\tau$  – часовой угол Солнца, отсчитываемый от момента истинного полудня.

Электронная часть пиранометра размещается в герметичном металлическом корпусе диаметром 120 мм с герметичными разъемами, расположенными сбоку. В верхней части корпуса располагаются до семи термопарных датчиков и теньевой экран, закрытые акриловым полусферическим куполом. Питание пиранометра в автономном режиме осуществляется от встроенного литий-тионилхлоридного элемента напряжением 3,6 В номинальной емкостью не менее 2300 мА·ч. В стационарном режиме используется внешний источник питания 5 В мощностью не менее 0,5 Вт.

*Основные характеристики опытного образца пиранометра:*

- Виды измеряемой солнечной радиации – суммарная, рассеянная и прямая.
- Спектральный диапазон измеряемой радиации 0,36–2,3 мкм.
- Диапазон измерений 10–1500 Вт/м<sup>2</sup>.
- Угол обзора по вертикали 180 град.
- Угол обзора по горизонтали 360 град.
- Время установления выходного сигнала (инерционность) не более 10 с.
- Погрешность измерения (инструментальная) не более 5%.
- Количество каналов измерения – 8.
- Количество хранимых усредненных значений – не менее 100000 на канал.

- Длина последовательного канала связи не менее 25 м.
- Скорость передачи данных по высокоскоростному каналу связи не менее 480 Мбит/с.
- Температура окружающего воздуха от -50 до +50° С.
- Класс пылевлагозащиты не ниже IP65.

*Разработка и изготовление опытного образца многоэлементного ориентированного пиранометра выполняются при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (грант № 74026); теоретические исследования способа измерения выполняются в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект № 121031300155-8).*

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. *Sunshine Pyranometer SPN1: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.delta-t.co.uk/product/spn1/>. (Дата обращения 31.05.2022).*
2. *Зуев С. В. Многоэлементный ориентированный измеритель характеристик солнечного излучения // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 06. С. 504-508. DOI: 10.15372/AOO20190615.*
3. *Патент РФ № 2682590. Способ измерения характеристик солнечного излучения. Бюл. № 8, 19.03.19.*
4. *Российские датчики теплового потока - 30 лет опыта: [Электронный ресурс]. URL: <https://teplomer.msk.ru/>. (Дата обращения 05.06.2022).*



## СЕКЦИЯ 10

Информационно-  
вычислительная  
инфраструктура  
региональных  
исследований  
окружающей  
среды

## SESSION 10

Information  
Computational  
Infrastructure  
of a Regional  
Environmental  
Study

### Детализация климатических трендов, оцененных методом квантильной регрессии с использованием данных наблюдений

Стерин А.М., Лавров А.С.

ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Россия  
E-mail: [sterin@meteo.ru](mailto:sterin@meteo.ru)

Предложенный впервые в работе [1] метод квантильной регрессии (Quantile Regression), далее обозначаемый МКР, нашел широкое применение в различных приложениях, в том числе в климатологии. В работах с участием авторов настоящей статьи [2, 3, 6], а также в многочисленных зарубежных публикациях (см., например, [4,5]) МКР использовался для оценки климатических трендов. МКР позволяет оценивать климатические тренды не только для условного математического ожидания значений метеовеличин, как это делается при использовании традиционного метода наименьших квадратов (МНК), а по всему диапазону квантилей значений метеовеличин от 0 до 1. При этом зависимость коэффициента квантильной регрессии (в нашем случае – климатического тренда) от значения квантиля носит название процесс-диаграммы. Как показывают исследования, значения полученного с помощью МКР климатического тренда и представленные на процесс-диаграмме, могут быть различными для различных значений квантиля. В частности, для квантилей, близких к 0 и к 1, значения МКР климатических трендов отражают долгопериодные тенденции изменения значений метеовеличин, близких к экстремальным и относящихся к левому и к правому «хвостам» распределений метеовеличин.

Во ВНИИГМИ-МЦД анализ климатических трендов, в частности, с использованием метода квантильной регрессии, проводится на основе эмпирических данных приземных метеорологических наблюдений и аэрологических наблюдений – радиозондирования атмосферы. Данные собираются и хранятся в архивах Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении (ЕГФД).

В предыдущих работах [2, 3] изложены результаты применения МКР для приземной температуры воздуха на метеорологических станциях по всей территории Российской Федерации. В упомянутых работах показаны и проанализированы различия проявления МКР трендов в различных регионах РФ. В работе [6] с применением МКР и метода k-MEANS кластерного анализа



выделены кластеры метеостанций, включающие станции со сходным проявлением МКР трендов. Детальным оценкам климатических трендов, полученных с помощью МКР применительно к температуре приземного воздуха по территории РФ, посвящена настоящая работа.

В докладе обсуждаются особенности предварительной обработки данных, целями которой являются формирование массива эмпирических данных, пригодного для последующих расчетов климатических трендов с применением МКР (переход от исходных значений к аномалиям, стандартизация аномалий, и т.д.).

На основании сформированного массива проведен расчет МКР трендов аномалий приземной температуры воздуха значений квантилей для более чем 1400 метеорологических станций территории РФ. С использованием процедуры кластерного анализа выделены 12 кластеров станций, схожих по проявлению МКР трендов.

Обобщения процесс-диаграмм станций отдельных кластеров рассмотрены для каждого из четырех сезонов года. Рассматриваются и обсуждаются состав метеорологических станций наблюдения, которые процедурой кластеризации отнесены к каждому из 12 выделенных кластеров, и особенности процесс-диаграмм МКР трендов температуры в этих кластерах. Подчеркивается, что при проведении кластеризации географические координаты станций не учитываются, тем не менее результатом кластеризации является выделение групп станций, расположенных географически достаточно компактно.

Наиболее детально рассмотрены и проанализированы результаты кластеризации станций, расположенных на территориях Западной Сибири и Алтая.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Koenker R. and Bassett G. Jr., 1978. *Regression Quantiles.*, *Econometrica*, vol. 46, No. 1, pp. 33-50
2. Sterin A.M., Lavrov A.S. 2020. *On long period trends estimates of upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression.* *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 11. Сер. "International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems"
3. Стерин А.М., Тимофеев А.А. 2016. *Об оценке трендов приземной температуры воздуха для территории России методом квантильной регрессии.* – *Метеорология и гидрология*, №6, с. 17-30
4. Fan Lijun, 2014. *Quantile Trends in Temperature Extremes in China.* – *Atmos. and Oceanic Sci. Lett.*, 2014, vol. 7, No. 4, pp. 304-308
5. Lee K, Baek H-J and ChunHo Cho Ch H., 2013. *Analysis of changes in extreme temperatures using quantile regression.* *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 49, pp. 313-323
6. Стерин А.М., Лавров А.С., 2022: *Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России.* *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8 №2, стр. 92-111, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-92-111.

## Detailing of climate trends estimated by quantile regression using observational data

**Sterin A.M., Lavrov A.S.**

RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

E-mail: [sterin@meteo.ru](mailto:sterin@meteo.ru)

The Method of Quantile Regression method, proposed for the first time in [1], hereinafter referred to as MQR, has found wide application in various applications, including climatology. In works with the participation of the authors of this article [2,3,6], as well as in numerous foreign publications (see, for example, [4,5]), the MQR was used to assess climate trends. This makes it possible to evaluate climate trends not only for the conditional mean value of meteorological parameters, as is done when using the traditional Least Squares Method (LSM), but over the entire range of quantiles of meteorological parameters from 0 to 1.

The dependence of the quantile regression coefficient (in our case, climate trend) from the quantile value is called a process diagram. Studies show that the values of the climate trend obtained using the MQR and presented on the process diagram can be different for different values of the quantile. In particular, for quantiles close to 0 and 1, the values of the MQR climatic trends that reflect long-term tendencies in changes of the values of meteorological parameters that are close to extremes, and thus, are belonging to the left and right "tails" of the distributions of meteorological parameters.

At VNIIGMI-WDC, the analysis of climate trends, in particular, using the quantile regression method, is carried out on the basis of empirical data from surface meteorological observations and upper-air observations - radio sounding of the atmosphere. Data are collected and stored in the archives of the Unified State Fund for Data on the State of the Environment and its Pollution (EGFD).

In previous works [2,3], the results of applying the MQR for surface air temperature at meteorological stations throughout the Russian Federation are presented. In the mentioned works, the differences in the manifestation of MQR trends in different regions of the Russian Federation are shown and analyzed. In [6], using MQR and the k-MEANS method of cluster analysis, clusters of meteorological stations were identified, including stations with similar manifestations of MQR trends. This work is devoted to the details of the assessments of climate trends obtained with the help of the MQR in relation to the surface air temperature over the territory of the Russian Federation.

The paper discusses the features of data preprocessing, the purpose of which is to form a dataset of empirical data suitable for subsequent calculations of climate trends using MQR (transition from initial values to anomalies, standardization of anomalies, etc.).

Based on the formed dataset, there was calculation of the MQR trends of the anomalies of the surface air temperature for the quantile values between 0 and 1. This calculation was carried out for more than 1400 meteorological stations on the territory of the Russian Federation. Using the cluster analysis procedure, 12 clusters of stations were identified that are similar in the manifestation of MQR trends.

Generalizations of the process diagrams of stations of individual clusters are considered for each of the four seasons of the year. The composition of meteorological observation stations, which are assigned to each of the 12 selected clusters by the clustering procedure, and the features of the MQR process diagrams of temperature trends in these clusters are considered and discussed. It is emphasized that the geographical coordinates of the stations are not taken into account during clustering. However, the result of clustering is in the selection of groups of stations that are located geographically rather compactly.

The results of clustering of stations located in the territories of Western Siberia and Altai are considered and analyzed in the paper in most detail.

#### REFERENCES:

1. Koenker R. and Bassett G. Jr., (1978): *Regression Quantiles.*, *Econometrica*, vol. 46, No. 1, pp. 33-50
2. Sterin A.M., Lavrov A.S.(2020): *On long period trends estimates of upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. II. Ser. "International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems"*
3. Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016): *Estimation of Surface Air Temperature Trends/ in Russia Using the Quantile Regression Method. ISSN 1068-3739, Russian Meteorology and Hydrology, vol. 41, no. 6, pp. 388-397. Ó Allerton Press, Inc., 2016*
4. Fan Lijun, (2014): *Quantile Trends in Temperature Extremes in China. – Atmos. and Oceanic Sci. Lett., 2014, vol. 7, No. 4, pp. 304-308*
5. Lee K, Baek H-J and ChunHo Cho Ch H., (2013): *Analysis of changes in extreme temperatures using quantile regression. Asia-Pacific J. Atmos. Sci. 49, pp. 313-323*
6. Sterin, A.I., Lavrov, A.S. (2022): *Using Quantile Regression to Estimate Spatial Patterns of Surface Temperature Trends over the Territory of Russia, Fundamental and Applied Climatology, vol. 8, no. 2, pp. 92-111, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-92-111.*



# Meteo+ software system for accumulation, systematization and analysis of the results of modeling short-term meteorological forecasts

Privezentsev A.I.<sup>1,2</sup>, Danilkin E.A.<sup>1</sup>, Shelmina E.A.<sup>1,3</sup>, Prokhanov S.A.<sup>1</sup>, Kizhner L.I.<sup>1</sup>,  
Fazliev A.Z.<sup>1,2</sup>, Starchenko A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russia

The use of computer support systems for scientific research allows research teams to move from routine manual work on information processing to the use of specialized software tools that improve the efficiency of the collection, accumulation, systematization and analysis of subject information. Scientific computer information systems are a subset of software systems having the functionality of providing scientific data and scientific computing resources. Such functionality makes it possible to set and solve complex scientific problems by combining the efforts of various scientific teams through the situational formation of scientific networks consisting of information and computing nodes with the data and computing resources necessary to solve the tasks.

Certain scenarios are explicitly programmed in the system, where for selected models, the output of some computational models is the input of others, so the output of the TSUNM3 model is the input of the CTM model, and the output of the WRF model is the input of the CAMx model. The input data for the TSUNM3 model are the actual results of the numerical weather forecast of the operational global model SL-AV [1], provided by the Hydrometeorological Center of the Russian Federation. At the same time, up-to-date observational data obtained using the modern instrumental base of the Center for Collective Use (CUC) "Atmosfera" of the Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences make it possible to evaluate the correctness and accuracy of the simulation results. The target audience of the developed scientific information and computing web system Meteo+ can be divided into three subgroups of users: 1) developers of mathematical models in computational geophysics; 2) meteorologists involved in the analysis and interpretation of numerical solutions; 3) undergraduates and graduate students studying meteorology in order to gain skills.

The target audience, within the framework of solving their specific tasks in practical activities, is engaged in the following generalized information tasks: searching, obtaining, analyzing, viewing, comparing, refining and personalizing certain numerical arrays of meteorological data for individual information needs. The software implementation of the Meteo+ system under consideration is under development using the following software technologies. The MariaDB database management system is used as a data and metadata storage system, the server part is implemented using the Python 3 language and the Django and Wagtail libraries, and the client part is implemented using HTML, CSS (UI Kit - Tabler), JavaScript (jQuery).

The report gives a brief overview of the architecture of the Meteo+ automated computing system and discusses in detail the results of creating the system's software core, client application, database, forecast module, and modules for updating forecast and measurement data.

## REFERENCE:

1. M. A. Tolstykh, R. Yu. Fadeev, V. V. Shashkin, G. S. Goiman, R. B. Zaripov, D. B. Kiktev, S. V. Makhnorylova, and V. G. Rogutov V.S. Multi-scale global atmospheric model PLAV: results of medium-range weather forecasts // *Meteorology and Hydrology*. - 2018, No. 11. — P.90-99.



# Программная система Meteo+ для накопления, систематизации и анализа результатов моделирования краткосрочных метеорологических прогнозов

Привезенцев А.И.<sup>1,2</sup>, Данилкин Е.А.<sup>1</sup>, Шельмина Е.А.<sup>1,3</sup>, Проханов С.А.<sup>1</sup>, Кижнер Л.И.<sup>1</sup>, Фазлиев А.<sup>3,2,1</sup>, Старченко А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский Национальный Исследовательский Государственный Университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева, Томск, Россия

<sup>3</sup>Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, Томск, Россия

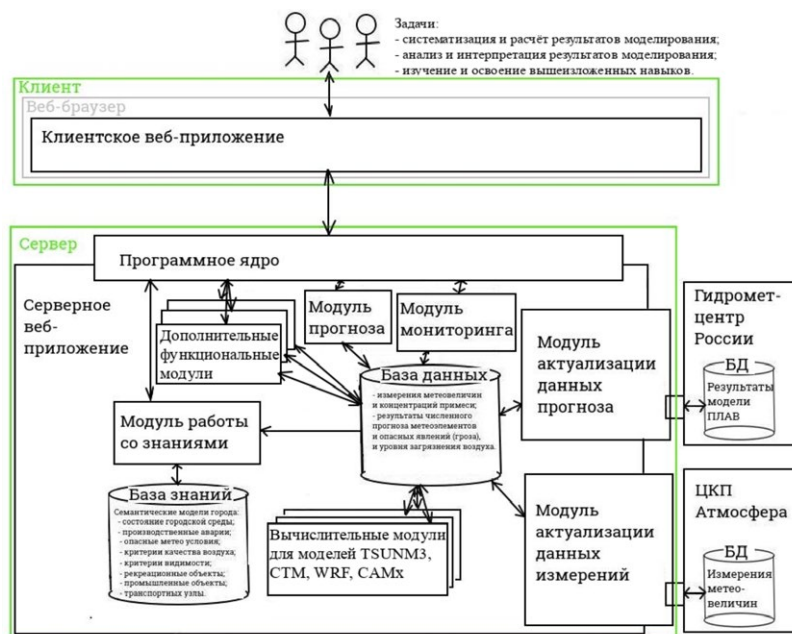
Применение систем компьютерной поддержки научных исследований позволяет научным коллективам перейти от рутинной ручной работы по обработке информации к использованию специализированных программных инструментов, позволяющих повысить эффективность процессов сбора, накопления, систематизации и анализа предметной информации. Научные компьютерные информационные системы являются подмножеством программных систем, имеющих функциональные возможности предоставления научных данных и научных вычислительных ресурсов. Такие функциональные возможности позволяют ставить и решать комплексные научные задачи с помощью объединения усилий различных научных коллективов посредством ситуативного формирования научных сетей, состоящих из информационно-вычислительных узлов с необходимыми для решения поставленных задач данными и вычислительными ресурсами.

С прикладной точки зрения научная информационно-вычислительная веб-система Meteo+ позволяет извлекать, накапливать, повторно использовать, визуализировать и адаптировать 1) метеорологические данные, предоставляемые Гидрометцентром РФ [1], 2) данные являющиеся результатами фиксированных вариантов сценариев краткосрочных метеорологических прогнозов по моделям (TSUNM3 [2], CTM [3]) и (WRF[4], CAMx [5]). Основу предлагаемой первой моделирующей системы составляет развиваемая негидростатическая мезомасштабная модель численного прогноза погоды TSUNM3 [2]. Эта модель использует систему трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики, тепло - и массопереноса в тропосфере и уравнение теплопроводности в верхнем слое почвы. Мезомасштабная модель прогнозирует составляющие скорости ветра и температурно-влажностные характеристики в пограничном слое атмосферы на 50 вертикальных уровнях (до 10000 м) над территорией 150×150 км и вложенной в нее области с основанием 50×50км (шаг сетки 1 км с центром в городе) на 24 часа. CTM (Chemical Transport Model) [3] на основе предсказанных TSUNM3 метеорологических полей рассчитывает в области 50×50км с разрешением 500м концентрации основных загрязнителей атмосферного воздуха – CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, PM10, PM2.5. Вторая система состоит из мезомасштабной метеорологической модели Weather Research and Forecasting [4] и модели CTM CAMx для расчета концентрации компонентов примеси с учетом химических взаимодействий между ними. Расчеты выполняются на многопроцессорных многоядерных вычислительных системах.

В системе явно запрограммированы определенные варианты сценариев, где для выбранных моделей выходные данные одних вычислительных моделей являются входными данными других, так выходные данные модели TSUNM3 являются входными данными модели CTM, а выходные данные модели WRF являются входными данными модели CAMx. Входными данными для модели TSUNM3 являются актуальные результаты численного прогноза погоды оперативной глобальной модели SL-AV [1], предоставляемые Гидрометцентром РФ. При этом актуальные данные наблюдений, полученные с применением современной приборной базы Центра коллективного пользования (ЦКП) "Атмосфера" Института оптики атмосферы СО РАН, позволяют оценивать корректность и точность результатов моделирования. Целевую аудиторию разрабатываемой научной информационно-вычислительной веб-системы Meteo+ можно разделить на три подгруппы пользователей: 1) разработчики математических моделей в вычислительной геофизике; 2) метеорологи, занимающиеся анализом и интерпретацией численных решений; 3) магистранты и аспиранты, занимающиеся изучением метеорологии с целью получения навыков.

На Рис. 1 представлена архитектура автоматизированной создаваемой вычислительной системы. В докладе представлены результаты создания программного ядра, клиентского приложения, база данных, и модулей прогноза, актуализации данных прогноза и измерений.

Вычислительная система Meteo+ предназначена для автоматизации практической деятельности метеорологов при выполнении задач мониторинга, прогноза и заблаговременного предупреждения опасных метеорологических условий, приводящих к существенному ухудшению качества атмосферного воздуха и видимости вблизи крупных городов, промышленных объектов и транспортных узлов, расположенных в средних и северных широтах. Для данной подгруппы основными информационными за-



**Рис. 1.**  
 Архитектура автоматизированной вычислительной системы Meteor+.

дачами являются задачи, связанные с анализом и интерпретацией метеорологических данных: получение и отображение данных внешних измерений и вычислений; просмотр, сравнение и публикации результатов внутренних вычислений; поддержка принятия решений в рамках предсказаний опасных погодных явлений и оценки качества приземного воздуха города.

Meteor+ также предназначена для автоматизации практической деятельности студентов и аспирантов, занимающихся изучением определенных аспектов метеорологии, при обучении и получении навыков работы с метеоданными. Для данной подгруппы основными информационными задачами являются следующие задачи: получение и отображение данных результатов измерений и вычислений; объяснения и пояснения происходящих рабочих процессов; индивидуальная оценка усвоения материала и корректировка обучения.

Целевая аудитория в рамках решения своих определенных задач в практической деятельности занимается следующими обобщенными информационными задачами: поиском, получением, анализом, просмотром, сравнением, доработкой и персонализацией под индивидуальные информационные потребности определенных числовых массивов метеоданных. Программная реализация рассматриваемой системы Meteor+ находится в стадии разработки с использованием следующих программных технологий. В качестве системы хранения данных и метаданных используется система управления базами данных MariaDB, серверная часть реализована с использованием языка Python 3 и библиотек Django и Wagtail, а клиентская часть реализована с использованием языков HTML, CSS (UI Kit - Tabler), JavaScript (jQuery).

Информационно-вычислительная веб-система Meteor+ позволяет хранить и анализировать множество готовых решений вычислительных моделей, сравнивая их с непосредственными актуальными измерениями. Графические веб-интерфейсы позволяют удобно и, независимо от платформы, подготавливать входные данные, а затем запускать новые вычисления для последующего анализа и интерпретации получаемых результатов в виде таблиц или графиков. Представленное программное решение в виде научной информационно-вычислительной веб-системы Meteor+ не предназначено для широкого круга пользователей, а является программным инструментом исключительно специализированных научных коллективов и подготовленных студентов, предназначенным для моделирования, визуализации и анализа данных краткосрочного прогноза погоды с выявлением опасных метеорологических условий и оценкой качества атмосферного приземного воздуха над городской агломерацией г. Томска.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-71-20042.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Махнорылова С.В., Мизяк В.Г., Рогутин В.С. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. — 2018, №11. — С.90-99.
2. Старченко А.В., Барт А.А., Кижнер Л.И., Данилкин Е.А. Мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 для исследования и прогнозирования состояния метеопараметров приземного слоя атмосферы над крупным населенным пунктом // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2020. № 66. — С. 35-55.

3. Starchenko A., Shelmina E., Kizhner L. Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, № 11. P. 1-15.
4. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-68CSTR. 2008. 100 p.
5. Стребкова Е.А., Старченко А.В. Моделирование качества атмосферного воздуха в Томске с помощью моделей WRF и CAMx // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXVII Международного симпозиума*. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. — С. 448-451.

## Calculation of the anthropogenic heat flux during the heating season in a metropolis (on the example of St. Petersburg)

Frolkis V.<sup>1,2,3</sup>, Evsikov I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

E-mail: VFrolkis@gmail.com

The anthropogenic heat flux (AHF) associated with energy consumption for heating buildings has a significant impact on the heat balance of urbanized areas and the intensity of the urban heat island. The energy consumption of the urban economy is highly dependent on meteorological conditions, as well as on their annual and daily trend and variations. This is especially true for the part of energy consumption that is spent on maintaining a comfortable indoor temperature. Using the open web mapping platform "OpenStreetMap" (OSM) and Technical and economic passports of apartment buildings a three-dimensional model of St. Petersburg was built. An inventory of anthropogenic heat flows was carried out by the difference between internal and external air temperatures on the basis of building codes and thermophysical properties of enclosing structures.

The OSM platform allows you to describe the exact contours of buildings, and in some cases has information about the height and type of the building. The website "System of classifiers of St. Petersburg" and data from Yandex.Maps allow filling in the missing information. The OSM project is an online resource containing cartographic information about city topography, geometry and materials of buildings, roads, plantations, etc. The database is stored on the server and permanently updated. The resource "System of classifiers of St. Petersburg" allows you to download useful information about residential buildings in the "csv" format. Information from Yandex.Maps is available only visually, through a browser.

On the basis of a three-dimensional model of buildings, the heat flow is calculated taking into account the outside air temperature and the normative resistance to heat transfer of enclosing structures (walls, roofs, windows). All calculations and coefficients are based on Sets of Rules.

The energy spent on maintaining the temperature inside buildings in a comfortable range enters the surrounding space in the form of anthropogenic heat flux (AHF). The share of building heat loss through ventilation by various sources is estimated at 20%. In Sets of Rules 50.13330.2012 in paragraph 10, the requirements for the consumption of thermal energy for heating and ventilation of buildings are described. The calculated value of the specific characteristic of the consumption of thermal energy for heating and ventilation of the building must be less than or equal to the normalized value  $q_{ot}^{TP}$ , W/(m<sup>3</sup> °C), which is indicated in the Sets of Rules. Thus, it is possible to estimate the upper limit of the heat loss of the building.

The computational grid covering the territory divides it into 30×30 m<sup>2</sup> cells and divides the buildings into separate parts, according to which the total heat flux inside each  $j$ -cell is calculated. Calculation of the AHF value from different parts of the elements of the enclosing structures that fall into the  $j$ -cell under consideration is proportional to the difference between the internal and external temperatures with a proportionality coefficient  $q_{ot,i}^{TP} V_i(j)$ , where  $V_i(j)$  is the volume of a part of the building of the  $i$ -type in the  $j$ -cell, m<sup>3</sup>. Summing up AHF from different parts of buildings in  $j$ -cell and calculating the average over all cells of the region, we obtain the average AHF.

As a result of model calculations, the total AHF from the territory of the Admiralteysky and Vasileostrovsky districts at an outside air temperature of -5 °C and an indoor temperature of +20 °C is 17.318·10<sup>6</sup> and 18.722·10<sup>6</sup> (W), and the specific density of AHF is 1.124 and 1.03<sup>6</sup> (W/(m<sup>2</sup>°C)). The proposed approach makes it possible to estimate the energy costs for heating buildings at various indoor and outdoor temperatures, as well as the economic and environmental effects of using various building materials on a metropolitan scale.



# Расчет антропогенного потока тепла за период отопительного сезона в мегаполисе (на примере Санкт-Петербурга)

Фролькис В.А.<sup>1,2,3</sup>, Евсиков И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>СПб. государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: VFrolkis@gmail.com

Антропогенный поток тепла, связанный с расходом энергии на отопление зданий, оказывает существенное влияние на тепловой баланс урбанизированных территорий и интенсивность городского острова тепла. Энергопотребление городского хозяйства существенно зависит от метеорологических условий, их годового и суточного хода. Особенно это касается той части энергопотребления, которая расходуется на поддержание комфортной температуры внутри помещений. Используя открытую веб-картографическую платформу «OpenStreetMap» (OSM) [1] и Технично-экономические паспорта многоквартирных домов [2], построена трехмерная модель Санкт-Петербурга. Проведена инвентаризация потоков антропогенного тепла по разности внутренней и внешней температур воздуха на основе строительных норм и теплофизических свойств ограждающих конструкций.

Городская застройка Санкт-Петербурга описывается с помощью трехмерного моделирования зданий с использованием, открытой веб-картографического ресурса “OpenStreetMap”. Платформа OSM позволяет описать точные контуры зданий, и в некоторых случаях имеет информацию о высоте и типе здания. Восполнить недостающую информацию позволяет сайт “Система классификаторов Санкт-Петербурга” [2] и данные с сайта Яндекс.Карты. Проект OSM является online-ресурсом, содержащим информацию о городской топографии, геометрии и материалах зданий, дате их постройки, дорогах, зеленых насаждениях и т.п. База данных хранится на сервере и постоянно обновляется и пополняется благодаря сообществу картографов, ГИС-профессионалов и инженеров. Информацию с OSM платформы можно свободно экспортировать в формате файлов, имеющих *xml*-структуру. Ресурс “Система классификаторов Санкт-Петербурга” позволяет скачивать полезную информацию о жилых зданиях в формате «csv». Информация с сайта Яндекс.Карты доступна только визуально, через браузер.

В качестве платформы для моделирования городской структуры используются программное обеспечение Rhinoceros и среда визуального программирования Grasshopper.

Чтобы преобразовать информацию из формата OSM в трехмерные объекты Rhinoceros, создан специальный скрипт в Grasshopper. Существует множество дополнительных плагинов, решающих поставленную задачу, такие как Elk2, Urbano, Gismo. Наиболее удобным и точным является Gismo. Во-первых, этот плагин считывает из *xml*-разметки файла OSM не только теги «building», но и «building:part». В некоторых случаях это позволяет получить более точную геометрию зданий. Во-вторых, при использовании этого плагина не требуется скачивать файл OSM, а только указать координаты центра моделируемой области и радиус. Все узлы (ноды) плагина являются открытыми, написаны на языке python, при желании их можно модифицировать. Так же добавлен алгоритм, который в случае отсутствия информации в OSM, использует информацию из файла Технично-экономических паспортов многоквартирных домов. Некоторые данные вручную уточнялись на базе Яндекс.Карт.

На базе трехмерной модели зданий производится расчет теплового потока с учетом наружной температуры воздуха и нормативного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций (стен, крыш, окон). В отличие от старого подхода, описанного в [3], учитывается расход на вентиляцию. Все расчеты и коэффициенты основаны на СП 50.13330.2012 [4].

Энергия, затраченная на поддержание температуры внутри зданий в комфортном диапазоне, поступает в окружающее пространство в виде антропогенного потока тепла (АПТ). Многочисленные эмпирические оценки и численные эксперименты показали, что АПТ может увеличивать температуру воздуха в городском покрывающем слое, расположенном между поверхностью и огибающей крыш зданий, и давать существенный вклад в интенсивность городского острова тепла, который определяется разностью температур между городскими и прилегающими сельскими территориями. Зимой рассчитанный по мезомасштабным атмосферным моделям вклад АПТ в интенсивность городского острова тепла может достигать 50–80%.

Доля АПТ, которая связана с энергией, потребляемой внутри зданий, существенно зависит от температуры воздуха снаружи помещений. Из-за влияния температуры атмосферного воздуха на энергопотребление и обратного влияния АПТ на температуру приземного воздуха в режиме отопления возникает отрицательная обратная связь между температурой воздуха и антропогенным потоком тепла.



Для оценки антропогенного потока тепла, как правило, используются три основных подхода: прямые измерения тепловых потоков; инвентаризация, которая заключается в суммировании всех потребителей энергии; дистанционные спутниковые измерения потоков теплового излучения с выделением антропогенных потоков по локальным метеорологическим данным.

Доля теплопотери здания через вентиляцию разными источниками оценивается в 20%. В пункте 10 СП 50.13330.2012 описаны требования к расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий. Расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии **на отопление и вентиляцию** здания должно быть меньше или равно нормируемого значения  $q_{от}^{тп}$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°C), указанного в СП. Таким образом, можно оценить верхнюю границу теплопотерь здания. В СП приводится таблица, определяющая  $q_{от}^{тп}$  по этажности и типу здания.

Величина  $t_{вн}$  – расчетная температура помещений (°C), принимаемая при расчете ограждающих конструкций групп зданий в соответствии с ГОСТ 30494–2011. Для жилых зданий, общежитий и гостиниц  $t_{вн}$  должна быть в интервале 20–22 °C, для лечебно-профилактических, дошкольных образовательных и общеобразовательных организаций, интернатов в интервале 16–21 °C. Исходя из этого, в качестве расчетного значения принимается  $t_{вн} = 20$  °C.

Расчетная сетка, покрывающая территорию мегаполиса, разбивает ее на ячейки 30×30 м<sup>2</sup> и делит здания на отдельные части, по которым считается суммарный поток тепла  $Q_F$  внутри каждой  $j$ -й ячейки. Расчет величины АПТ  $Q_F^i$  от разных частей элементов ограждающих конструкций, попадающих в рассматриваемую  $j$ -ю ячейку, осуществляется по формуле:

$$Q_F^i(j) = q_{от,i}^{тп}(t_{вн} - t_{нар})V_i(j),$$

где  $q_{от,i}^{тп}$  – расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания  $i$ -го типа, Вт/(м<sup>3</sup>·°C),  $t_{нар}$  – температура наружного воздуха, °C,  $V_i(j)$  – объем части здания  $i$ -го типа в  $j$ -й ячейке, м<sup>3</sup>.

АПТ  $Q_F^i(j)$  от разных частей зданий, попадающих в  $j$ -ю расчетную ячейку, определяется суммированием

$$Q_F'(j) = \sum Q_F^i(j).$$

В итоге получаем среднее значение АПТ  $Q_F'$  для рассматриваемой территории

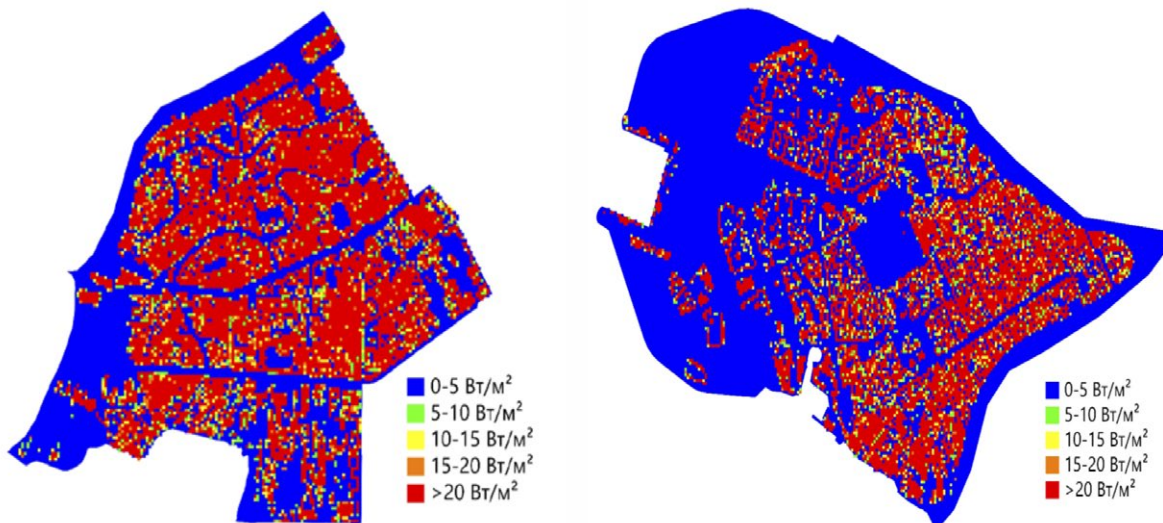
$$Q_F' = \frac{1}{N} \sum_j Q_F'(j),$$

где  $N$  – число ячеек расчетной сетки, покрывающей изучаемый регион.

В результате транспортировки тепла к зданиям по магистралям, расположенным под землей, определенная его доля (порядка 10%) теряется в виде тепловых стоков  $\Delta Q_{F,g}$ . Следовательно, средний АПТ должен быть увеличен на соответствующую величину теплового стока

$$Q_F = Q_F' + \Delta Q_{F,g}.$$

В результате модельных расчетов суммарный АПТ с территории Адмиралтейского и Василеостровского районов Санкт-Петербурга при наружной температуре воздуха –5 °C и температуре внутри помещений +20 °C составляет  $17.318 \cdot 10^6$  и  $18.722 \cdot 10^6$  (Вт), а удельная плотность АПТ равна 1.125 и 1.03<sup>6</sup> (Вт/(м<sup>2</sup>·°C)). На рисунке 1 приведены территориальные распределения АПТ для тех же условий.



**Рис. 1.** Карта распределения АПТ по территории Адмиралтейского (слева) и Василеостровского (справа) районов Санкт-Петербурга.

Предлагаемый подход позволяет оценить энергозатраты на отопление зданий при различных внутренних и наружной температурах, а также экономический и экологический эффекты от использования различных строительных материалов для любого мегаполиса, данные которого загружены в OSM и доступны во Всемирной паутине технико-экономические паспорта домов.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-05-00254.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *OpenStreetMap*. – URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 10.09.2021).
2. Система классификаторов Санкт-Петербурга. – URL: <https://classif.gov.spb.ru> (дата обращения: 12.06.2022).
3. Гинзбург А. С., Евсиков И. А., Фролькис В. А. Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга) // Известия РАН, сер. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – № 5. – С. 526-538. – DOI 10.31857/S0002351521050060.
4. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 10.09.2021).

## Creation of dendrochronological databases for monitoring regional environmental changes in the steppe belt of South Siberia

Taynik A.V.<sup>1</sup>, Myglan V.S.<sup>1</sup>, Barinov V.V.<sup>1</sup>, Vakhnina I.L.<sup>1,2</sup>, Oidupaa O.Ch.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Humanities Institute, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology RAS, Chita, Russia

<sup>3</sup>Tuva State University, Kyzyl, Russia

E-mail: [taynik\\_anna@mail.ru](mailto:taynik_anna@mail.ru)

The construction of long-term temperature reconstructions with high temporal resolution is essential for understanding the on-going climatic changes and their impact on natural and social processes. In order to assess the scale and causes of the ongoing global changes, it is necessary to know the history of climate development over the past millennia. Among the various indirect sources of climate change, tree-ring width (TRW) chronologies are of particular importance because woody plants are among the longest-lived organisms. Tree-ring chronologies by width and density of annual rings have a reference to the calendar time scale with high temporal resolution (per year, and using other parameters of annual rings - season (month)).

In recent decades, the number of studies aimed at studying the effects of climate change in the upper boundary of the forest and forest-steppe (steppe) zone by dendrochronological method has increased significantly in Russia. However, after analyzing the scientific literature, we have not found a single source in the public domain to which it would be possible to refer to monitor regional climate change. To change this situation, the staff of the Siberian dendrochronological laboratory decided to publish the results of many years of scientific work in the form of a series of databases with open access. The filling of databases served as tree-ring chronologies obtained for more than 10 years of collective work for forest-steppe zone of South Siberia.

Registration of the database is performed at Rospatent (Federal Service for Intellectual Property). Documents are submitted through the website of the Federal Institute of Industrial Property. Currently, the staff of the Siberian Dendrochronological Laboratory has published 6 databases for the steppe belt of southern Siberia:

1. "Network of reference tree-ring chronologies for forensic botanical (dendrochronological) examinations and dating of architectural structures in the Republic of Tyva". Certificate of state registration No. 2022620160. Consists of 24 tree-ring chronologies.
2. "Network of reference tree-ring chronologies for forensic botanical (dendrochronological) examinations and dating of architectural structures in the forest-steppe zone of the Republic of Buryatia". Certificate of state registration No. 2021623175. Consists of 10 tree-ring chronologies.
3. "Network of reference tree-ring chronologies for forensic botanical (dendrochronological) examinations and dating of architectural structures in the forest-steppe zone of Zabaikalsky Krai". Certificate of state registration No. 2021623176. Consists of 7 tree-ring chronologies.
4. "Long tree-ring chronology for common pine for forensic botanical (dendrochronological) examinations and dating of architectural structures in the southern and central regions of the Republic of Buryatia". Certificate of state registration No. 2022621012.

5. "A network of long tree-ring chronologies for common pine for forensic botanical (dendrochronological) examinations and dating of architectural constructions in the central districts of Zabaikalsky Krai". Certificate of state registration No. 2022621024.

6. "A network of long tree-ring chronologies for Dahurian larch for forensic botanical (dendrochronological) examinations and dating of architectural structures in the central and south-eastern regions of Zabaikalsky Krai". Certificate of state registration No. 2022621045.

All databases are publicly available on the website of the Siberian Dendrochronological Laboratory <https://www.sibdendro.com/dostignutye-rezultaty>. Any specialist can use these data and analyze regional environmental changes in these regions.

The work on the preparation of the material for the publication continues for: Omsk region, Altai Krai, Novosibirsk region, Tomsk region, Kemerovo region, Krasnoyarsk Krai, Republic of Khakassia and Irkutsk region.

In the course of research work the team of researchers will build a network of TRW chronologies covering the whole forest-steppe zone of South Siberia, the basis for which were samples taken from growing trees, architectural structures and the remains of dead tree trunks on the day surface. Completion of the publication of all planned materials will open access to dendrochronological sources of paleoclimatic information for the steppe and forest-steppe zones of Siberia, i.e. to reliable (unique) weather information about growing conditions of woody vegetation of southern Siberia for the last two millennia.

## Создание дендрохронологических баз данных для мониторинга региональных изменений окружающей среды в степном поясе Южной Сибири

Тайник А.В.<sup>1</sup>, Мыглан В.С.<sup>1</sup>, Баринов В.В.<sup>1</sup>, Вахнина И.Л.<sup>1,2</sup>, Ойдупаа О.Ч.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Гуманитарный Институт, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

<sup>3</sup>Тувинский государственный университет, Кызыл, Россия

E-mail: [tainik\\_anna@mail.ru](mailto:tainik_anna@mail.ru)

**П**остроение длительных температурных реконструкций с высоким временным разрешением крайне необходимо для понимания происходящих климатических изменений и их воздействия на природные и социальные процессы [1; 2 и др.]. Как правило, изменение климата проявляется в виде увеличения средней годовой температуры, что уже привело к изменению режимов температуры воздуха, осадков, стремительному росту числа экстремальных проявлений климата на региональном уровне [2 и др.]. Для того чтобы оценить масштабы и причины происходящих глобальных изменений необходимо знать историю развития климата за последние тысячелетия. Учитывая, что длина рядов наблюдений метеостанций, в большинстве случаев, не превышает полувековой интервал, для решения этой проблемы привлекаются природные архивы климатической информации [1; 3]. Среди различных косвенных источников изменения климата особое значение имеют древесно-кольцевые хронологии (дкх), поскольку древесные растения — одни из самых долгоживущих организмов. У отдельных видов возраст исчисляется тысячелетиями. Древесно-кольцевые хронологии по ширине и плотности годовых колец имеют привязку к календарной шкале времени с высоким временным разрешением (в год, а с использованием других параметров годовых колец – сезон (месяц)). Это приближает данные годовых колец к данным инструментальных наблюдений за температурой воздуха и осадками [4 и др.] и обеспечивает возможность проведения надежных климатических реконструкций за несколько последних тысячелетий [2; 1; 6].

Как правило, возраст дерева можно определить, посчитав годовые кольца — концентрические слои прироста древесины. У живых деревьев для анализа высверливают керны древесины, а у отмерших исследуют спилы. Дендрохронологический метод позволяет соотнести каждое годовое кольцо с календарным годом его формирования. Однако, резкие перепады температуры, содержания воды в почве, дефолиация листьев в результате объедания насекомыми и другие изменения условий роста могут привести к отсутствию или образованию ложных колец (флуктуации плотности древесины) в течение вегетационного сезона. Потому в дендрохронологии используется метод перекрестного датирования, основанный на анализе структуры и размеров годовых колец у большого числа деревьев, выросших в одном регионе. Как показал многолетний опыт работы, очень важно иметь сеть хронологий равномерно охватывающих территорию исследования, т.к. в отдельных дкх у всех деревьев на участке может выпасть кольцо.

В последние десятилетия в России значительно возросло количество исследований, направленных на изучение последствий изменений климата на верхней границе леса и лесостепной (степной) зоне дендрохронологическим методом. Однако проанализировав научную литературу мы не обнаружили в открытом доступе ни одного источника к которому можно было бы обратиться для мониторинга региональных изменений климата. Для изменения сложившейся ситуации сотрудники Сибирской дендрохронологической лаборатории решили опубликовать результаты многолетней научной работы в форме серии баз данных с открытым доступом. Наполнением баз данных послужили древесно-кольцевые хронологии полученные за более чем 10 лет работы коллектива для лесостепной зоны Южной Сибири.

Регистрация базы данных осуществляется в Роспатенте. Подача документов происходит через сайт Федерального института промышленной собственности (ФИПС). База данных состоит из таблиц. Первый лист – общее описание древесно-кольцевых хронологий (общая информация: название хронологии, авторы, тип данных, параметр годичного кольца, примечания и заметки, ключевые слова; описание участка сбора образцов: название участка, местонахождение, регион, широта, долгота, высота; описание коллекции образцов: кодовое обозначение коллекции, количество серий, год образования первого кольца, год образования последнего кольца, максимальная длина образца, средняя ширина годичного кольца; видовая принадлежность – порода; поддержка - номер гранта) (рис. 1). Второй лист, первый столбец – годы, второй столбец – стандартизированное значение прироста (рис. 2). Третий лист – документ PDF, содержащий результаты независимой проверки в программе COFESA (файл открывается командой: щелчок правой кнопкой мыши/объект Acrobat Document/открыть) (рис. 3). База данных реализована в табличном процессоре OpenOffice.org Calc. Формат файла таблицы является внутренним форматом OpenOffice.org Calc, с расширением .ods. Доступ и структурирование данных осуществляется стандартными инструментами «Сортировка», «Автофильтр» и т.д. В базе данных контроль ограничения целостности не осуществляется, пользователю предлагается самому следить за целостностью базы данных. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows 10. Вид и версия системы управления базой данных: OpenOffice.org Calc.

Общая информация	
1	Общая информация
2	Название хронологии
3	Авторы
4	Тип данных
5	Параметр годичного кольца
6	Примечания и заметки
7	Ключевые слова
8	
9	Описание участка сбора образцов
10	Название участка
11	Местонахождение (физико-географическое описание)
12	Регион
13	Широта (градусы, минуты с десятичными долями)
14	Долгота (градусы, минуты с десятичными долями)
15	Высота (м над ур. м.)
16	
17	Описание коллекции образцов
18	Кодовое обозначение коллекции (образцов)
19	Количество серий
20	Год образования первого кольца
21	Год образования последнего кольца
22	Максимальная длина образца
23	Средняя ширина годичного кольца
24	
25	Видовая принадлежность
26	Порода
27	
28	Поддержка
29	Номер гранта
30	
31	

Рис. 1.

Пример базы данных: древесно-кольцевая хронология Аг для степной зоны Республики Тыва. Лист 1.

В настоящее время сотрудниками Сибирской дендрохронологической лаборатории опубликовано 6 баз данных для степного пояса Южной Сибири:

1. "Сеть опорных древесно-кольцевых хронологий для проведения судебно-ботанических (дендрохронологических) экспертиз и датировки архитектурных построек в Республике Тыва". Свидетельство о государственной регистрации № 2022620160. Состоит из 24 древесно-кольцевых хронологий.
2. "Сеть опорных древесно-кольцевых хронологий для проведения судебно-ботанических (дендрохронологических) экспертиз и датировки архитектурных построек в лесостепной зоне Республики Бурятия". Свидетельство о государственной регистрации № 2021623175. Состоит из 10 древесно-кольцевых хронологий.
3. "Сеть опорных древесно-кольцевых хронологий для проведения судебно-ботанических (дендрохронологических) экспертиз и датировки архитектурных построек в лесостепной зоне Забайкальского края". Свидетельство о государственной регистрации № 2021623176. Состоит из 7 древесно-кольцевых хронологий.



Годы	Стандартизованная древесно-кольцевая хронология (индексы)
1755	1,022
1756	0,698
1757	1,426
1758	1,32
1759	1,142
1760	1,23
1761	1,118
1762	1,072
1763	1,145
1764	0,934
1765	1,065
1766	0,266
1767	0,356
1768	0,365
1769	0,74
1770	0,883
1771	0,303
1772	0,79
1773	1,038
1774	1,441
1775	1,169
1776	1,206
1777	1,145
1778	0,751
1779	0,982
1780	1,025
1781	1,007
1782	1,248
1783	1,531
1784	1,854
1785	1,475

**Рис. 2.** Пример базы данных: древесно кольцевая хронология Аг для степной зоны Республики Тыва. Лист 2.

Примечание: файл открывается командой - щелчок правой кнопкой мыши/объект Acrobat Document/открыть.

Year	Index	Description
1755	1,022	...
1756	0,698	...
1757	1,426	...
1758	1,32	...
1759	1,142	...
1760	1,23	...
1761	1,118	...
1762	1,072	...
1763	1,145	...
1764	0,934	...
1765	1,065	...
1766	0,266	...
1767	0,356	...
1768	0,365	...
1769	0,74	...
1770	0,883	...
1771	0,303	...
1772	0,79	...
1773	1,038	...
1774	1,441	...
1775	1,169	...
1776	1,206	...
1777	1,145	...
1778	0,751	...
1779	0,982	...
1780	1,025	...
1781	1,007	...
1782	1,248	...
1783	1,531	...
1784	1,854	...
1785	1,475	...

**Рис. 3.** Пример базы данных: древесно кольцевая хронология Аг для степной зоны Республики Тыва. Лист 3.

4. "Длительная древесно-кольцевая хронология по сосне обыкновенной для проведения судебно-ботанических (дендрохронологических) экспертиз и датировки архитектурных построек в южных и центральных районах Республики Бурятия". Свидетельство о государственной регистрации № 2022621012.

5. "Сеть длительных древесно-кольцевых хронологий по сосне обыкновенной для проведения судебно-ботанических (дендрохронологических) экспертиз и датировки архитектурных построек в центральных районах Забайкальского края". Свидетельство о государственной регистрации № 2022621024.

6. "Сеть длительных древесно-кольцевых хронологий по лиственнице даурской для проведения судебно-ботанических (дендрохронологических) экспертиз и датировки архитектурных построек в центральных и юго-восточных районах Забайкальского края". Свидетельство о государственной регистрации № 2022621045.

Все базы данных размещены в открытом доступе на сайте Сибирской дендрохронологической лаборатории <https://www.sibdendro.com/dostignutyje-rezultaty>. Любой специалист может воспользоваться этими данными и проанализировать региональные изменения окружающей среды в этих регионах.

Работа по подготовке материала к публикации продолжается для: Омской области, Алтайского края, Новосибирской области, Томской области, Кемеровской области, Красноярскому краю, Республики Хакасия и Иркутской области.

В ходе выполнения исследовательских работ коллективом исследователей будет построена сеть древесно-кольцевых хронологий охватывающая всю лесостепную зону Южной Сибири, основой для которой стали образцы, отобранные с произрастающих деревьев, архитектурных построек и остатков стволов отмерших деревьев на дневной поверхности. Завершение публикации всех запланированных материалов откроет доступ для всех желающих к дендрохронологическим источникам палеоклиматической информации для степной и лесостепной зон Сибири, т.е. к достоверной (уникальной) погодичной информации об условиях произрастания древесной растительности юга Сибири за последние два тысячелетия.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Büntgen U., Myglan V. S., Ljungqvist F. C., McCormick M., Di Cosmo N., Sigl M., Jungclaus J., Wagner S., Krusic P. J., Esper J., Kaplan J. O., de Vaan M. A. C., Luterbacher J., Wacker L., Tegel W., Kirilyanov A. V. *Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD / U. Büntgen, // Nature geoscience. – 2016. – Vol. 9. – Issue 3. – P. 231–U163.*
2. IPCC, 2013: *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley, Eds. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. – 1535 p.*
3. Kalugin I., Daryin A., Smolyaninova L., Andreev A., Diekmann B., Khlysmov O. *800-yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye lake sediments // Quaternary Research. – 2007. – Vol. 67. – P. 400–410.*
4. Fritts H. C. *Tree-ring and climate – London; New-York; San Francisco: Acad. Press, 1976. – 567 p.*
5. Ойдунаа О. Ч., Ваганов Е. А., Наурызбаев М. М. *Длительные изменения летней температуры воздуха и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране // Лесоведение. – 2004. – № 6. – С. 14–24.*
6. Myglan V. S., Oidupaa O. Ch., Vaganov E. A. *A 2367-year tree-ring chronology for the Altai-Sayan region (Mongun-Taiga mountain massif) / Myglan, V. S., // Archaeol. Ethnol. Anthropol. Eurasia. – 2012. – No. 40. – P. 76–83.*

## Web-mapping application for analysis of meteorological conditions and thermal comfort in Moscow megacity

Varentsov M.I.<sup>1,2,3,4</sup>, Samsonov T.E.<sup>1,3</sup>, Shurygina A.A.<sup>1</sup>, Kargashin P.E.<sup>1</sup>, Yarinich Y.I.<sup>1,2</sup>, Konstantinov P.I.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>4</sup>RUDN University, Moscow, Russia

E-mail: [mikhail.varentsov@srcc.msu.ru](mailto:mikhail.varentsov@srcc.msu.ru)

The problems of climate change and high-impact weather phenomena nowadays receives more and more attention from scientific community and general public. Such problems are especially relevant for urban areas due their high vulnerability to weather extremes as well as their impacts on atmospheric processes. Current progress in web technologies and growing interest to climate and environmental issues force rapid expansion of weather-focused web services and applications. However, such services focused on urban climate are very rare and have limited usability.

In this presentation, we share our experience in development of web-mapping application for urban climate monitoring & research for Moscow megacity in Russia. We aim to develop the web-application which provides observation-based evidence about current and historical weather conditions and human thermal comfort in Moscow region. Such application could be a valuable tool for atmospheric scientists, weather and climate enthusiasts, weather-focused media, popularization of science, education, etc. Previously, we developed “Mosclim” web application, which collects and maps observations at official weather stations of Roshydromet and crowdsourced observations at Netatmo citizen weather stations (Varentsov et al., 2020). Application backend includes software for automated data collection, PostgreSQL database, data preprocessing tools in-

cluding quality control for Netatmo data, and a request handler from the client side based on Node.js. The application frontend is based on the OpenLayers web mapping library and Bootstrap interface library.

Current stage of work is aimed to develop the new application version, “Mosclim 2.0”, and to supplement it with several interactive tools for data analysis. To determine the optimal list of such tools, a survey of potential users was conducted. Tools under development include a display of statistical moment of meteorological parameters (average, min / max, etc.); interactive time series plots; a display of the spatial anomalies (deviation from background); a selection of cartographic display method. Implementation of these tools required a deep redesign of the web application. The client-side interface has been redesigned using the *Vue* framework and the *Vuetify* interface library. *Plotly* library was used for interactive plots. To calculate statistical moments, a set of aggregating SQL queries to the database has been implemented.

New feature of “Mosclim 2.0” application is an on-fly calculation of the advanced human thermal comfort indices, UTCI (Universal Thermal Comfort Index) and PET (Physiological Equivalent Temperature). We developed a Python script which derives these indices from the meteorological observations using *pvlib* library for atmospheric radiation assessment and *pythermalcomfort* library for the final calculations. To demonstrate the capabilities of the web application, we implemented an interactive catalog of illustrative meteorological events, including temperature and thermal stress extremes, cases of pronounced urban heat island, intense precipitation, etc.

“Mosclim 2.0” application will be available on the Internet at <http://carto.geogr.msu.ru/mosclim> (for now, the old version of the web application is available there).

*The study was supported by Russian Geographic Society under grant No. 03/2021-P.*

#### REFERENCE:

1. Varentsov M. I., Samsonov T. E., Kargashin P. E., Korosteleva P. A., Varentsov A. I., Perkhurova A. A., & Konstantinov P. I. (2020). Citizen weather stations data for monitoring applications and urban climate research: an example of Moscow megacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 611(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012055>

## Картографическое веб-приложение для анализа метеорологических условий и термического комфорта в Московском мегаполисе

Варенцов М.И.<sup>1,2,3,4</sup>, Самсонов Т.Е.<sup>1,3</sup>, Шурыгина А.А.<sup>1</sup>, Каргашин П.Е.<sup>1</sup>, Ярынич Ю.И.<sup>1,2</sup>,  
Константинов П.И.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

<sup>4</sup>Университет РУДН, Центр смарт технологий устойчивого развития городских экосистем в условиях глобальных изменений, Москва, Россия

E-mail: [mikhail.varentsov@srcc.msu.ru](mailto:mikhail.varentsov@srcc.msu.ru)

**П**роблемы изменения климата и экстремальных явлений погоды привлекают все больше научно-общественного внимания. Эти вопросы особо актуальны для крупных городов в силу их высокой уязвимости к погодным экстремумам, а также из-за их влияния на атмосферные процессы (Oke et al., 2017). Например, города особо уязвимы к волнам жары, которые дополнительно усиливаются за счет городского острова тепла. Это приводит к ухудшению условий термического комфорта и негативным последствиям для здоровья населения (Wong et al., 2013). Другой пример – интенсификация над городами конвективных процессов и связанных с ними осадков (Han et al., 2014; Liu, Niyogi, 2019).

Развитие веб-технологий и рост общественного интереса к вопросам погоды, климата и окружающей среды способствует развитию веб-сервисов, предоставляющих информацию в удобном для восприятия виде, чаще всего в формате веб-карт. Такие сервисы могут быть направлены на распространение информации о прогнозе погоды (например, [windy.com](http://windy.com), [yandex.ru/pogoda](http://yandex.ru/pogoda)), данных мониторинга (например, карта загрязнения воздуха ГПБУ «Мосэкомониторинг», [mosecom.mos.ru/karta/](http://mosecom.mos.ru/karta/)) или служить образовательным задачам и популяризации науки (например, сайт сети школьных метеостанций города Берген, Норвегия, [bergensveret.no](http://bergensveret.no)). Однако, ни один из известных авторов веб-сервисов открытого до-

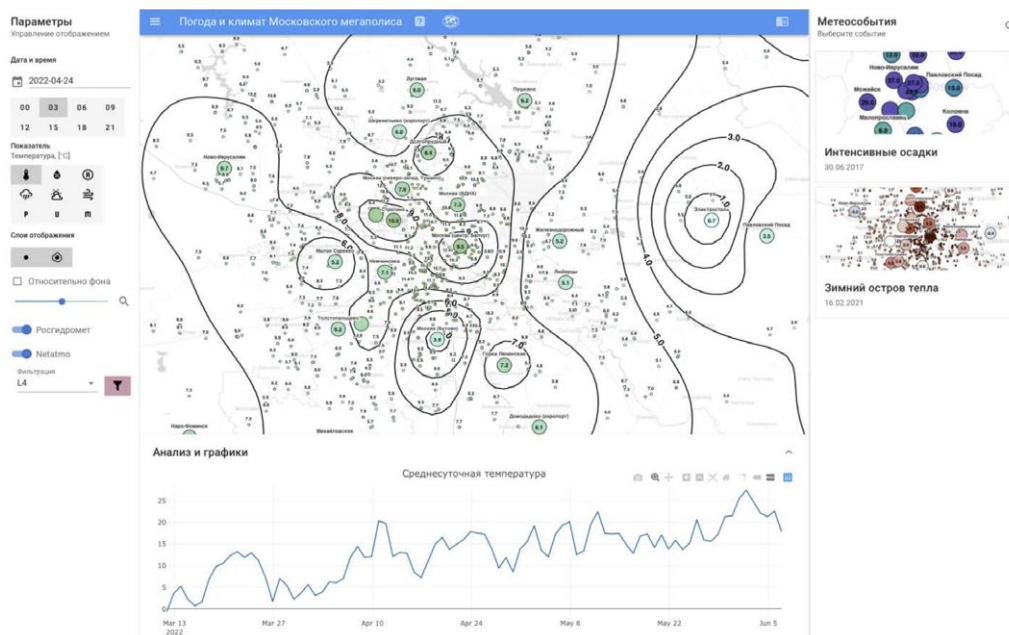
ступа не позволяет отображать на карте и анализировать фактические данные о погоде и климате городов России. Некоторые ресурсы (например, сайт ВНИИГМИ МЦД [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru); сайты [pogodaiklimat.ru](http://pogodaiklimat.ru) и [rp5.ru](http://rp5.ru)) предоставляют доступ к архивным наблюдениям на сети Росгидромета, но не позволяют отображать их на карте. Другие веб-сайты, напротив, включают модули картографического отображения, но только для метеоданных на текущий момент времени. Таким образом, научное сообщество, СМИ, специалисты в области образования и популяризации науки, и просто интересующиеся погодой граждане остаются без доступа к фактическим данным о погоде и климате в формате интерактивных веб-карт.

В данном исследовании рассмотрен опыт разработки картографо-аналитической системы, реализованной в форме веб-приложения “Mosclim 2.0” и направленной на предоставление фактической информации о погоде, климате и условиях термического комфорта в Московском регионе. Создание такой системы представляет собой следующий шаг развития ранее разработанного авторским коллективом веб-приложения “Mosclim” (Varentsov et al., 2020)

Первая версия веб-приложения создавалась для демонстрации потенциала использования данных персональных метеостанций Netatmo ([netatmo.com](http://netatmo.com)) для мониторинга метеорологических условий в мегаполисе. Число метеостанций Netatmo в крупных городах превышает несколько тысяч, что делает их наблюдения особо ценными для исследования городского климата (Meier et al., 2017; Varentsov et al., 2021) и улучшения прогноза погоды (Nipen et al., 2020). Первая версия веб-приложения имеет достаточно простые функциональные возможности. Она позволяет отображать на карте значения метеовеличин по данным метеостанций Netatmo и Росгидромета за выбранный срок наблюдений. Архитектура веб-приложения описана в работе (Varentsov et al., 2020). Его серверная часть включает в себя базу данных PostgreSQL; программы для сбора наблюдений Netatmo и Росгидромета через запросы к Netatmo Weather API и парсинг с веб-сайта [pogodaiklimat.ru](http://pogodaiklimat.ru) соответственно; набор программ для препроцессинга данных, включая модуль контроля качества данных Netatmo, а также обработчик запросов с клиентской части на базе Node.js ([nodejs.org/en/](http://nodejs.org/en/)). Клиентская часть включает в себя средства визуализации, реализованные с помощью функций картографической библиотеки OpenLayers ([openlayers.org](http://openlayers.org)) и элементы пользовательского интерфейса на базе библиотеки Bootstrap ([getbootstrap.com](http://getbootstrap.com)).

Текущий этап работы заключается в разработке новой версии веб-предложения “Mosclim 2.0”, предлагающей пользователю расширенный набор интерактивных инструментов анализа данных. Для определения оптимального списка таких инструментов проведен опрос потенциальных пользователей. В итоге, реализованы следующие опции:

- расчет и отображение на карте статистических моментов метеовеличин (среднее, мин/макс и т.д.) за различные временные периоды (сутки, месяцы, годы)
- построение графиков динамики метеовеличин на различных временных масштабах
- отображение отклонений метеовеличин от средних фоновых значений
- выбора способа картографического отображения (визуализация по исходным местоположениям или в форме интерполированных геополей)



**Рис. 1.**

Пример работы прототипа веб-приложения “Mosclim 2.0”. Показаны панель выбора данных, веб-карта, модуль построения графиков и картотека метеособытий.



Реализация этих инструментов потребовала глубокой переработки веб-приложения. Интерфейс клиентской части переработан на основе фреймворка *Vue* и библиотеки построения интерфейсов *Vueify*. Для построения графиков использована библиотека *plotly*. Интерполяция геополей реализована на клиентской стороне приложения средствами библиотеки *turfjs*. Для расчета статистических моментов реализован набор агрегирующих SQL-запросов к базе данных.

Кроме того, в новой версии веб-приложения реализована возможность отображения показатели термического комфорта, а именно индексов UTCI (Universal Thermal Comfort Index) и PET (Physiological Equivalent Temperature), основанных на энергобалансовых моделях человеческого организма. Стандартным инструментом для расчета этих индексов является ПО RayMan (Matzarakis и др., 2010). Оно позволяет рассчитывать их по данным стандартных метеонаблюдений, аппроксимируя радиационные потоки через балл облачности. Однако, это ПО не адаптировано для автоматизированной обработки данных. Поэтому в рамках веб-приложения реализован расчет индексов PET и UTCI на языке программирования Python. Для аппроксимации радиационных потоков использована библиотека *pvlib* (Holmgren и др., 2018) и набор упрощенных параметризаций, а для расчета индексов - библиотека *pythermalcomfort* (Tartarini, Schiavon, 2020).

Для демонстрации возможностей веб-приложения, в нем реализован интерактивный каталог показательных метеособытий, включающих экстремумы температуры и термического стресса, примеры ярко выраженного острова тепла Москвы, интенсивных осадков и их усиления над городом. Каталог реализован в форме картотеки и дополнен научно-популярным описанием метеособытий, а также естественных и антропогенных факторов их формирования.

Пример работы веб-приложения “Mosclim 2.0” показан на Рис. 1. В ближайшем времени планируется сделать его доступным в Интернете по адресу <http://carto.geogr.msu.ru/mosclim> (пока по данному адресу доступна старая версия веб-приложения).

*Исследование выполнено при поддержке Русского Географического Общества, грант № 03/2021-Р.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Han J.Y., Baik J.J., Lee H. Urban impacts on precipitation // *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2014. V. 50. № 1. P. 17–30.
2. Holmgren W., Hansen C., Mikofski M. *pvlib python: a python package for modeling solar energy systems* // *Journal of Open Source Software*. 2018. V. 3. № 29. P. 884.
3. Liu J., Niyogi D. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. № 1. P. 1–14.
4. Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model // *International Journal of Biometeorology*. 2010. V. 54. № 2. P. 131–139.
5. Meier F., Fenner D., Grassmann T., Otto M., Scherer D. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research // *Urban Climate*. 2017. V. 19. P. 170–191.
6. Nipen T.N., Seierstad I.A., Lussana C., Kristiansen J., Hov Ø. Adopting Citizen Observations in Operational Weather Prediction // *Bull Am Meteorol Soc*. 2020. V. 101. № 1. P. E43–E57.
7. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 pp.
8. Tartarini F., Schiavon S. *pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research* // *SoftwareX*. 2020. V. 12. P. 100578.
9. Varentsov M., Fenner D., Meier F., Samsonov T., Demuzere M. Quantifying Local and Mesoscale Drivers of the Urban Heat Island of Moscow with Reference and Crowdsourced Observations // *Frontiers in Environmental Science*. 2021. V. 9. № November. P. 1–21.
10. Varentsov M.I., Samsonov T.E., Kargashin P.E., Korosteleva P.A., Varentsov A.I., Perkhurova A.A., Konstantinov P.I. Citizen weather stations data for monitoring applications and urban climate research: an example of Moscow megacity // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 611. № 1. P. 012055.
11. Wong K. v., Paddon A., Jimenez A. Review of World Urban Heat Islands: Many Linked to Increased Mortality // *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2013. V. 135. № 2. P. 1–12

# Introduction to North Eurasian Thermal Comfort Indices Dataset (NETCID): New Gridded Database for the Biometeorological Studies

Konstantinov P.I.<sup>1</sup>, Varentsov M.I.<sup>1,2</sup>, Shartova N.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography/ Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute for Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>HSE University, International Landscape Ecology Laboratory, Moscow, Russia

E-mail: [kostadini@mail.ru](mailto:kostadini@mail.ru)

Global climate changes give us the important task of obtaining information about the spatial distribution of bioclimatic comfort indicators at the global or continental level. One of the most applicable tools can be based on reanalysis data (meteorological gridded data with global coverage). This issue is fully relevant for the territory of Northern Eurasia with its diverse climates, rapid environmental changes, and often sparse network of in situ observations. In this paper, we present a conceptually new dataset for the most popular thermal comfort indices, namely Heat Index (HI), Humidex (HUM), Wind Chill Temperature (WCT), Mean Radiant Temperature (MRT), Physiologically Equivalent Temperature (PET) and Universal Thermal Comfort Index (UTCI) derived from ERA-Interim reanalysis hourly data for the territory of Northern Eurasia (the area limited by 40°N-80°N, 10°W- 170°W). The dataset has horizontal resolution of 0.75°×0.75° (up to 79 km), temporal resolution of 3 hours, and covers the period from 1979 to 2018 (40 years), which corresponds to the standard of the World Meteorological Organization (WMO) in determining the parameters of the modern climate. Time series of indices are supplemented with a set of 8092 pre-calculated statistical parameters characterizing climatology of the thermal stress conditions. We further present several examples of the North Eurasian Thermal Comfort Indices Dataset (NETCID) data application, including analysis of the spatial heterogeneity of thermal stress conditions, assessment of their changes and analysis of specific extreme events. Presented examples demonstrate a pronounced difference between considered indices and highlight the need of their accurate selection for applied tasks. In particular, for the whole study areas HI and HUM indices show much smaller thermal stress repeatability and weaker trends of its changes in comparison to PET and UTCI indices. NETCID is available for free download at <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12629861>

## Разработка базы данных для исследования условий термического комфорта на территории Северной Евразии – North Eurasian Thermal Comfort Indices Dataset (NETCID): New Gridded Database for the Biometeorological Studies

Константинов П.И.<sup>1</sup>, Варенцов М.И.<sup>1,2</sup>, Шартова Н.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт Физики Атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>НИУ ВШЭ, Москва, Россия

E-mail: [kostadini@mail.ru](mailto:kostadini@mail.ru)

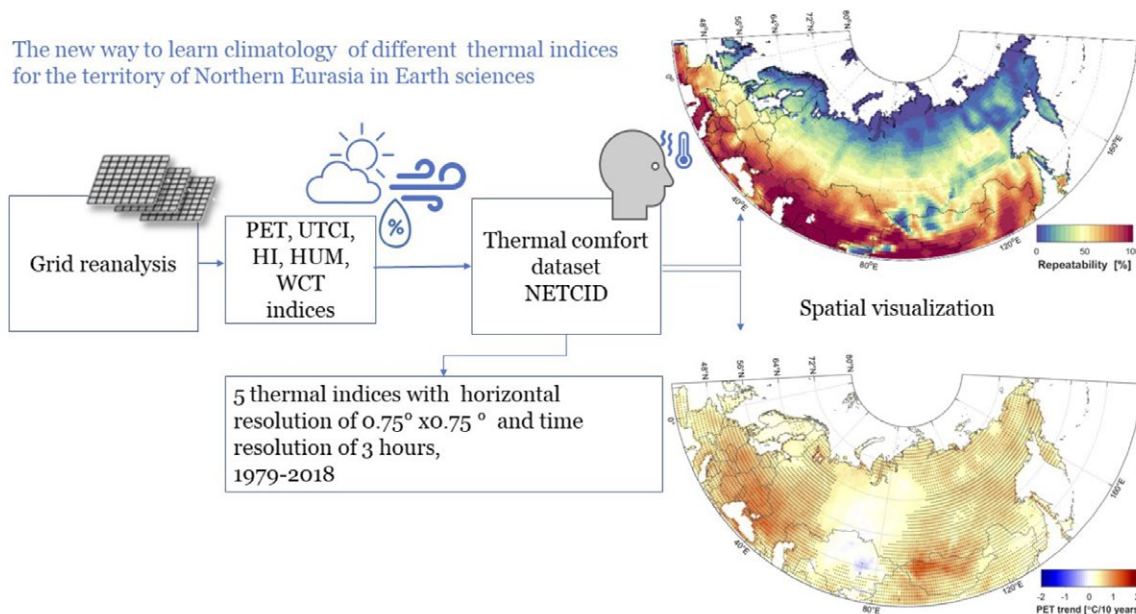
Глобальные изменения климата ставят перед нами важную задачу получения информации о пространственном распределении показателей биоклиматической комфортности на глобальном или континентальном уровне.

В современной климатологии задача хранения таких данных решается с помощью баз данных «ре-анализа» - массива данных метеорологических переменных, особым образом спроецированных на узлы координатной сетки. Этот подход в полной мере актуален для территории Северной Евразии с ее разнообразным климатом, быстрыми изменениями окружающей среды и часто разреженной сетью натурных наблюдений.

В данном докладе мы представляем концептуально новый набор данных для наиболее популярных индексов теплового комфорта, а именно «индекса жары – Heat Index (HI)», индекса жары и влажности - Humidex (HUM), индекса холодного дискомфорта (WCT), средней лучистой температуры (MRT), физиологически эквивалентной температуры (PET) и универсального индекса теплового комфорта (UTCI). Исходным материалом для расчета и моделирования данных индексов стали данные реанализа ERA-

Interim для территории Северной Евразии (географическая область, ограниченная 40°N-80°N, 10°W-170°W).

Представляемый набор данных имеет горизонтальное разрешение 0,75°×0,75° (до 79 км), временное разрешение 3 часа и охватывает период с 1979 по 2018 год (40 лет), что соответствует стандарту Всемирной метеорологической организации (ВМО) при определении параметров современного климата. Временные ряды индексов дополнены набором из 8092 предварительно рассчитанных статистических параметров, характеризующих климатологию условий тепловой/холодовой нагрузки.



В качестве примера мы также демонстрируем несколько примеров применения Северо-Евразийской базы данных о термическом комфорте (NETCID), включая анализ пространственной неоднородности условий теплового стресса, оценку их изменений и анализ конкретных экстремальных явлений. Приведенные примеры демонстрируют ярко выраженную разницу между рассмотренными показателями и подчеркивают необходимость их точного подбора для прикладных задач. В частности, для всей исследуемой территории показатели HI и HUM показывают значительно меньшую повторяемость тепловой нагрузки и более слабые тренды ее изменения по сравнению с показателями PET и UTCI.

В настоящее время база данных NETCID доступна для бесплатного скачивания по адресу <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12629861>.

## Software package for reconstruction of ground-based snow observation data

Martynova Yu.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [FoxyJ13@gmail.com](mailto:FoxyJ13@gmail.com)

**S**now has a strong local influence on the surface energy balance and contributes to the formation of atmospheric circulation anomalies. The state of the snow cover is assessed using ground and satellite observations. Snow depth and snow coverage of the territory visible from the weather station are measured on the weather stations of the WMO network.

Often the data series collected from weather stations have data gaps of different lengths. The researcher, depending on the context of the study and on the features of the meteorological variables used, can deal with these gaps in different ways: ignore; completely exclude years, seasons and other time intervals with gaps from the study; restore the integrity of the series using various methods.

This work is devoted to the design of an algorithm and the development on its basis of a software package for the reconstruction of observational data for snow coverage of the visible area of a meteorological station. The work was based on stations located within Western and Eastern Siberia. The snow cover here is characterized, as a rule, by stable occurrence in the winter period, the presence of a snowless period (in the summer sea-

son), as well as a rather fast transition from the state of absolute snow coverage of the territory to the snowless state and back.

The developed software package allows the reconstruction of observation data on snow coverage (expressed in points) for gaps of different length, with the reproduction of the seasonal variation of this parameter. The modular structure of the program code allows to easily adapt the program to different processed data formats, as well as to expand the set of techniques for data recovery.

*The research was carried out according to State project No. 121031300158–9.*

## Программный комплекс для восстановления данных наземных наблюдений за состоянием снежного покрова

**Мартынова Ю.В.**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [FoxyJ13@gmail.com](mailto:FoxyJ13@gmail.com)

Снег оказывает сильное локальное влияние на баланс поверхностной энергии и способствует формированию аномалий атмосферной циркуляции [1, 2]. Снежный покров приводит к понижению температуры за счёт увеличения альбедо, препятствует выделению тепла из почвы, может приводить к локальным изменениям высоты геопотенциала [3-5]. Всё это может приводить к усилению бароклинности на границе снежного покрова, что ведёт к перераспределению систем вихревой активности синоптического масштаба и к изменениям атмосферной циркуляции [6, 7]. Таким образом, снег играет важную роль в изменениях атмосферной циркуляции и изменчивости климата.

Состояние снежного покрова оценивается с помощью наземных и спутниковых наблюдений. В частности, измеряется глубина снежного покрова, его протяжённость, площадь и плотность покрытия.

На метеостанциях, входящих в сеть ВМО осуществляется измерение таких параметров как глубина снежного покрова и покрытие видимой с метеостанции территории снегом [8]. Здесь глубина снега представляет собой среднее значение, рассчитанное по трём проведённым на метеостанции замерам глубины, и выражается в сантиметрах. Покрытие снегом представляется в балльном виде от 0 до 10, где 0 обозначает полное отсутствие снега на обозримом пространстве, а 10 – полное покрытие его снегом, при этом глубина снежного покрова в роли не играет. Доступ к этим данным по каждой станции России и СНГ можно легко получить через портал ВНИИГМИ-МЦД Автоматизированной информационной системы обработки режимной информации, АИСОРИ (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>).

Часто ряды данных, собранных с метеостанций, имеют такой недостаток, как пропуски данных различной длины. Исследователь, в зависимости от контекста исследования и от особенностей используемых метеорологических переменных, может поступать с этими пропусками различным образом: игнорировать; полностью исключать годы, сезоны и другие интервалы времени из исследования; восстанавливать целостность ряда с помощью различных методов. У каждого из подходов, разумеется, есть своя область применимости. В частности, при исследовании экстремальных проявлений тех или иных метеорологических переменных предпочтительнее опираться на исходный ряд данных, а при исследованиях поведения переменных в климатических масштабах времени зачастую удобнее и надёжнее оперировать целостным рядом данных.

Данная работа посвящена созданию алгоритма и разработке на его основе программного комплекса для восстановления данных наблюдения за покрытием снегом видимой территории метеостанции. Эти данные могут иметь особенности в зависимости от своего географического расположения. Работа проводилась на основе станций, расположенных в рамках Западной и Восточной Сибири. Для снежного покрова здесь характерно, как правило, устойчивое залегание в зимний период, наличие бесснежного периода (в летний сезон), а также довольно быстрый переход от состояния абсолютного покрытия территории снегом к бесснежному состоянию и обратно. В рамках каждой отдельной станции не составляет труда восстановить данные для сезонов абсолютного покрытия снегом в случае, когда длина пропуска составляет не более одного-трёх дней особенно при наличии информации о глубине снежного покрова. В остальные сезоны и при иных длинах пропусков необходимо насколько это возможно воспроизвести временной ход величины, характерный в рассматриваемый сезон для рассматриваемой метеостанции.

Разработанный программный комплекс позволяет проводить восстановление данных наблюдений о покрытии снегом видимой со станции территории (выраженное в баллах) для пропусков разной длины, с воспроизведением сезонного хода этого параметра. Модульная структура программного кода позволяет легко адаптировать программу под различные форматы хранения обрабатываемых данных, а



также расширять набор методик для восстановления данных. На данном этапе развития программного комплекса конечный пользователь взаимодействует с ним через короткие понятные файлы с настройками, где он указывает пути к данным, а также список обрабатываемых станций. В процессе обработки по количеству указанных метеостанций создаются файлы в формате MS Excel, содержащие восстановленные и исходные ряды данных о балле покрытия снегом и его глубине, перечень всех обнаруженных интервалов с пропусками с отметкой о типе проведенного восстановления, а также средние многолетние значения балла покрытия снегом для каждого дня, определенные по исходному ряду данных. Кроме того, по всем обработанным за цикл станциям отдельным дополнительным файлом создаются две сводные таблицы, содержащие информацию о проведенных восстановлениях в общем за весь обработанный период, и информацию о количестве дней с пропусками для каждого года. Файл со сводной информацией позволяет практически мгновенно оценить качество исходных данных в контексте пропусков и ошибок, а также, возможно, выбрать для дальнейшей работы станции наилучшим образом соответствующие цели и контексту предполагаемого исследования пользователя.

*Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300158–9.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Barnett T.P., Dümenil L., Schlese U., Roeckner E., Latif M. *The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations // Journal of Atmospheric Sciences. 1989. V. 46. No. 5. P. 661–686.*
2. Cohen J., Rind D. *The effect of snow cover on the climate // Journal of Climate. 1991. V. 4. No. 7. P. 689–706.*
3. Cohen J., Entekhabi D. *The influence of snow cover on Northern Hemisphere climate variability // Atmosphere-Ocean. 2001. V. 39. No. 1. P. 35–53.*
4. Henderson G.R., Leathers D.J., Hanson B. *Circulation response to Eurasian versus North American anomalous snow scenarios in the Northern Hemisphere with an AGCM coupled to a slab ocean model // Journal of Climate. 2013. V. 26. No. 5. P. 1502–1515.*
5. Ye K., Wu R., Liu Y. *Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. No. 7. P. 2738–2753.*
6. Walsh J.E., Ross B. *Sensitivity of 30-day dynamical forecasts to continental snow cover // Journal of Climate. 1988. V. 1. No. 7. P. 739–754.*
7. Walland D.J., Simmonds I. *Modelled atmospheric response to changes in Northern Hemisphere snow cover // Climate Dynamics. 1996. V. 13. No. 1. P. 25–34.*
8. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, Выпуск 3, Часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Ленинград: Гидрометиздат, 1985 г., 301 с.*

## Development of a multispectral complex for monitoring the state of vegetation and soils

Guryleva A.V.<sup>1,2</sup>, Machikhin A.S.<sup>2</sup>, Batshev V.I.<sup>1,2</sup>, Kryukov A.V.<sup>1,2</sup>, Fomin D.S.<sup>3</sup>, Gresis V.O.<sup>1,4</sup>, Fomin D.S.<sup>3</sup>, Zolotukhina A.A.<sup>1,2</sup>, Bukova V.I.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Perm Research Institute of Agriculture UB RAS, Lobanovo, Russia

<sup>4</sup>RUDN, Moscow, Russia

E-mail: guryleva@bmstu.ru

Multispectrometers are used for a wide range of tasks, including solving climate and environmental problems, including monitoring the dynamics of coastline change [1], oil spills [2], determining the soil carbon status [3], monitoring soil degradation and desertification [4], use in the system for diagnosing forest fires [5] and the spread of pathogens of biotic stresses in agricultural vegetation [6], assessing the sequestration potential of vegetation [7], etc. Multispectral complexes consist of multispectral optical systems and software for recorded data digital processing the and interpreting of the spectral characteristics in accordance with the task.

Multispectral systems are characterized by image registration in several spectral channels. To obtain spectral images in modern systems, two main approaches are used, the first of which is to organize scanning over space or spectrum. With high spatial and spectral resolution, such systems have a number of limitations, including weight and size characteristics, data cube formation time, and requirements for carrier movement. Existing

systems with spatial separation of spectral channels are limited in the number of spectral channels due to the need to match the fields of view of individual optical systems or a rigid connection between spectral and spatial resolution, and, moreover, the complexity of technological implementation [8].

It is proposed to build a multispectral camera based on the non-contact measurement method of the spatial distribution of objects temperature and emissivity without scanning, described in RF patent No. 2721097 [9]. The method is distinguished by the possibility of simultaneous registration of images in all spectral channels formed on one radiation detector, without scanning over space or spectrum, and is implemented using an optoelectronic system consisting of an input objective, a microlens array, a light filter array and a matrix radiation detector.

The input lens collects radiation from the object and forms the main light beam, which is divided by the microlens raster into smaller ones that create identical images of the object in different parts of the sensor. Each individual image formed by the microlens raster lens corresponds to a separate light filter in the light filter raster installed between the microlens raster and the radiation receiver. The passage of light beams through light filters ensures the selection of narrow spectral channels from broadband radiation. The use of arrays of microlenses and light filters in a single optical system makes it possible to obtain spatially separated spectral images of an object without mechanical or spectral scanning.

As a basis for software for determining the agrochemical state of vegetation and soils, it is proposed to use databases of spectral characteristics correlated with known values, for example, such parameters as the content of micro-, meso- or macrolelements, moisture, organic substances, etc.

The scheme according to which the experiment was carried out is shown in Figure 1. Soil samples for the experiment were taken on the territory of the Perm Research Institute of Agriculture - PFRC UB RAS. For each sample, a comprehensive agrochemical analysis was carried out, including the determination of the humus content according to Tyurin (GOST 26213–91). For spectral analysis, a soil sample was placed on a table in a Petri dish 50 mm in diameter. The source of radiation in the form of a halogen lamp provided uniform illumination of the sample. The registration of spectral characteristics was carried out simultaneously, without moving the sample and illuminating the trays with devices: an acousto-optical hyperspectrometer developed by the STC UP RAS [10], an eight-channel multispectral CMS-V Silios Technology camera, and an OceanOptics Flame spectrometer in the visible range.

Hyper- and multispectral cameras recorded images (Fig. 2) in spectral channels in the ranges, respectively, from 460 to 820 nm with a step of 3 nm and from 500 to 850 nm with a step of 44 nm. The operating wavelength range of the spectrometer lies in the range from 340 to 1000 nm.

The resulting images were calibrated by the spectral frames of a white plate, verified by the spectrometer data and correlated with the data of an agrochemical study to search for correlations with soil organic matter.

As a result of the work, a scheme of a multispectral camera was proposed, which provides the possibility of registering and presenting cubes of spectral data to the operator in real time with a high frequency and spatial resolution. Approaches to the formation of databases that form the basis of the multispectral complex software are shown. The possibility of differentiation of soil samples by humus content in the range from 2 to 3% of both hyperspectral and multispectral equipment was revealed. Further research will be aimed at determining the wavelengths in the working spectral range of the multispectral camera that are most sensitive to the humus content in the soil.

*The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the Priority 2030 program, the Bauman GoGreen strategic project, the PRIOR/SN/NU/22/SP1/7 project.*

*The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the STC UP RAS.*

# Разработка мультиспектрального комплекса мониторинга состояния растительности и почв

Гурылева А.В.<sup>1,2</sup>, Мачихин А.С.<sup>2</sup>, Батшев В.И.<sup>1,2</sup>, Крюков А.В.<sup>1,2</sup>, Фомин Д.С.<sup>3</sup>, Гресис В.О.<sup>1,4</sup>,  
Фомин Д.С.<sup>3</sup>, Золотухина А.А.<sup>1,2</sup>, Букова В.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства филиал ПФИЦ УрО РАН, Лобаново, Россия

<sup>4</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

E-mail: guryleva@bmstu.ru

**М**ультиспектрометры используются для широчайшего круга задач, в том числе для решения климатических и экологических проблем, включая мониторинг динамики изменения береговой линии [1], разливов нефтепродуктов [2], определение углеродного статуса почвы [3], контроль деградации почв и опустынивания [4], использование в системе диагностики лесных пожаров [5] и распространения возбудителей биотических стрессов сельскохозяйственной растительности [6], оценке секвестрационного потенциала растительности [7] и др. Мультиспектральные комплексы состоят из мультиспектральных оптических систем и программного обеспечения, осуществляющего цифровую обработку регистрируемых данных и интерпретацию спектральных характеристик в соответствии с задачей.

Мультиспектральные системы отличаются регистрацией изображения в нескольких спектральных каналах. Для получения спектральных изображений в современных системах используется два основных подхода, первый из которых заключается в организации сканирования по пространству или спектру. При высоком пространственном и спектральном разрешении такие системы обладают рядом ограничений в том числе по массогабаритным характеристикам, времени формирования куба данных, а также требованиям к движению носителя. Существующие системы с пространственным разделением спектральных каналов ограничены в количестве спектральных каналов ввиду необходимости согласования полей зрения отдельных оптических систем или жесткой связи между спектральным и пространственным разрешением, и кроме того сложностью технологической реализации [8].

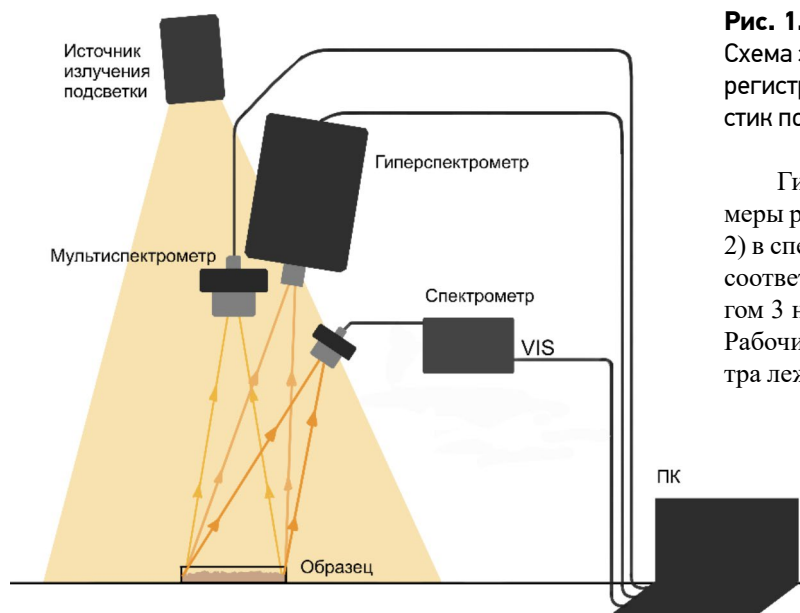
Предлагается построить мультиспектральную камеру на основе способа бесконтактного измерения пространственного распределения температуры и излучательной способности объектов без сканирования, описанного в патенте РФ № 2721097 [9]. Способ отличается возможностью одновременной регистрацией изображений во всех спектральных каналах, формируемых на одном приемнике изображения, без сканирования по пространственной или спектральной координате куба данных, и реализуется с помощью оптико-электронной системы, состоящей из входного объектива, раstra микролинз, раstra светофильтров и матричного приемника излучения.

Входной объектив собирает излучение от объекта и формирует основной световой пучок, который растр микролинз разделяет на меньшие, создающие идентичные изображения объекта в разных частях матричного приемника излучения. Каждому отдельному изображению, формируемому линзой раstra микролинз, соответствует отдельный светофильтр в растре светофильтров, установленном между растром микролинз и приемником излучения. Прохождением световых пучков через светофильтры, обеспечивается выделение узких спектральных каналов из широкополосного излучения. Использование растров микролинз и светофильтров в единой оптической системе позволяет получить пространственно разделенные спектральные изображения объекта без механического или спектрального сканирования.

В качестве основы программного обеспечения для определения агрохимического состояния растительности и почв предлагается использовать базы данных спектральных характеристик, соотнесенных с известными значениями, например, таких параметров как содержание микро-, мезо- или макроэлементов, влаги, органических веществ и т.д.

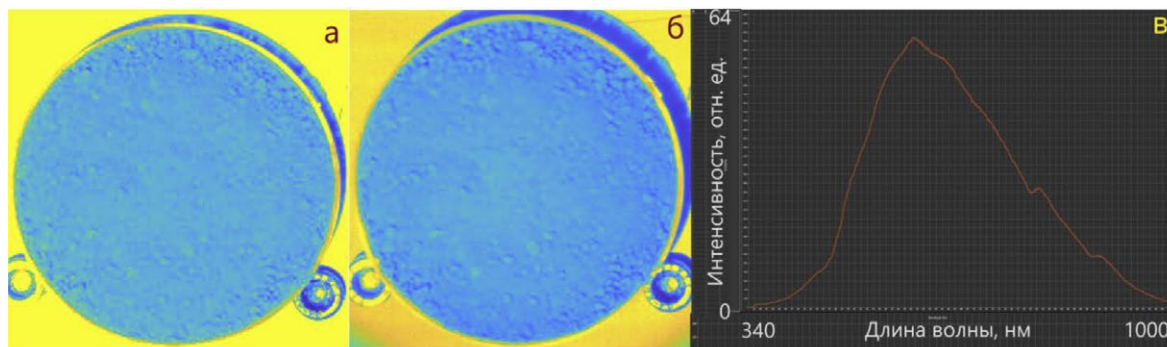
Схема, по которой проводился эксперимент, приведена на рисунке 1. Образцы почвы для эксперимента были отобраны на территории Пермского НИИСХ – ПФИЦ УрО РАН. Для каждой пробы был проведен комплексный агрохимический анализ, в том числе осуществлено определение содержания гумуса по Тюрину (ГОСТ 26213–91).

Для спектрального анализа образец почвы размещался на столе в чашке Петри диаметром 50 мм. Источником излучения в виде галогеновой лампы обеспечивалось равномерное освещение образца. Регистрация спектральных характеристик осуществлялась одновременно, без перемещения образца и подсветки тремя приборами – акустооптическим гиперспектрометром разработки НТЦ УП РАН [10], восьмиканальной мультиспектральной камерой CMS-V Silios Technology и спектрометром OceanOptics Flame видимого диапазона.



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда для регистрации спектральных характеристик почвенных образцов.

Гипер- и мультиспектральные камеры регистрировали изображения (рис. 2) в спектральных каналах в диапазонах, соответственно, от 460 до 820 нм с шагом 3 нм и от 500 до 850 с шагом 44 нм. Рабочий диапазон длин волн спектрометра лежит в пределах от 340 до 1000 нм.



**Рис. 2.** Спектральные изображения, формируемые мульти- (а) и гиперспектрометром (б), на длинах волн 633 нм и 632 нм, соответственно, почвенный образец со спектральной характеристикой (в), зафиксированной спектрометром.

Полученные изображения были откалиброваны по спектральным кадрам белой пластины, верифицированы данными спектрометра и соотнесены с данными агрохимического исследования, для поиска корреляций с органическим веществом почвы.

В результате работы была предложена схема мультиспектральной камеры, обеспечивающая возможность регистрации и предъявления оператору кубов спектральных данных в режиме реального времени с высокой частотой и пространственным разрешением. Показаны подходы к формированию баз данных, закладываемых в основу программного обеспечения мультиспектрального комплекса. Выявлена возможность дифференциации образцов почв по содержанию гумуса в диапазоне от 2 до 3 % как гиперспектральной, так и мультиспектральной аппаратурой. Дальнейшие исследования будут направлены на определения длин волн в рабочем спектральном диапазоне мультиспектральной камеры наиболее чувствительных к содержанию гумуса в почве.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, программа «Приоритет 2030», стратегический проект Ваупан GoGreen, проект ПРИОР/СН/НУ/22/СП1/7.*

*Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИТЦ УП РАН.*

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. McAllister E., Payo A., Novellino A., Dolphin T., Medina-Lopez E., *Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators // Coastal Engineering, Volume 174, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102>.*
2. Garcia-Pineda O. et al., "Classification of Oil Spill Thicknesses Using Multispectral UAS And Satellite Remote Sensing for Oil Spill Response // IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2019, pp. 5863-5866, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8900170.



3. Kusumo B.H., Sukartono, Bustan, (2018). *The rapid measurement of soil carbon stock using near-infrared technology // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 129(0), 012023–. doi:10.1088/1755-1315/129/1/012023*
4. Lamqadem A.; Saber H.; Pradhan B. (2018). *Quantitative Assessment of Desertification in an Arid Oasis Using Remote Sensing Data and Spectral Index Techniques // Remote Sensing, 10(12), 1862–. doi:10.3390/rs10121862*
5. Abdul Qadir; Nazimur Rahman Talukdar; Md Meraj Uddin; Firoz Ahmad; Laxmi Goparaju; Predicting forest fire using multispectral satellite measurements in Nepal // *Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021, doi:10.1016/j.rsase.2021.100539*
6. Galieni A., D'Ascenzo N., Stagnari F., Pagnani G., Xie Q., Pisante M. *Past and Future of Plant Stress Detection: An Overview From Remote Sensing to Positron Emission Tomography Frontiers in Plant Science, vol.11, 2021, DOI=10.3389/fpls.2020.609155*
7. Nunes L.J.R.; Raposo M.A.M.; Meireles C.I.R.; Pinto Gomes C.J.; Almeida Ribeiro, N.M.C. *Carbon Sequestration Potential of Forest Invasive Species: A Case Study with Acacia dealbata Link // Resources 2021, 10, 51. https://doi.org/ 10.3390/resources10050051*
8. Гурьева А.В. *Метод и средство контроля состояния сельскохозяйственной растительности. / дис. канд. тех. наук: 2.2.6: защищена 29.09.21, М., 2021. 159 с.*
9. Патент № 2721097 С1 Российская Федерация, МПК G01J 5/08, G01J 5/20. *Способ бесконтактного измерения пространственного распределения температуры и излучательной способности объектов без сканирования : № 2019139070 : заявл. 02.12.2019 : опубл. 15.05.2020 // А. С. Мачихин, В. И. Батшев, С. М. Неверов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН).*
10. Пожар В. Э., Мачихин А. С., Гапонов М. И. [и др.], *Гиперспектрометр на основе перестраиваемых акустооптических фильтров для БПЛА // Светотехника, №. 4, 2018, стр. 47-50.*

## Study of the phase state of precipitation based on ERA 5 reanalysis

**Pischalnikova E.V., Kalinin N.A., Sviyazov E.M., Zayakina M.A.**

Perm State University, Perm, Russia  
 E-mail: [sinoptik.perm@yandex.ru](mailto:sinoptik.perm@yandex.ru)

The phase state of atmospheric precipitation is of interest for study due to the difficulty of identifying a certain type of precipitation and the low quality of forecasting weather phenomena that depend on the phase of precipitation. Currently, there are many works that are devoted to the spatiotemporal distribution and conditions of various types of precipitation, analyzed using data from radio sounding and remote sensing of cloud cover, as well as hydrodynamic and synoptic-statistical methods [1–6]. For the territory of the Perm Territory, the phase state of precipitation is very diverse and sometimes atypical for the current season of the year.

The material for the study was the data of meteorological stations of the Perm Territory for the cold season of 2019–2020. The ERA5 reanalysis provided by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) by hour or monthly average was chosen as the main tool for studying the phase of precipitation. Microsoft Excel was used to process the data, and the ArcGIS software package was used to visualize the results and compare them with ERA5 data.

Analysis of the actual data on the phase state of precipitation showed that the solid phase of precipitation prevails, their maximum frequency was observed in February, the minimum - in March, the second most frequent phase - liquid - in March, the largest value was observed, the minimum - in February, the maximum of the mixed phase was observed in March. The territorial distribution of the frequency of occurrence of the phase state of precipitation has the following features: the highest frequency of solid precipitation is observed in the east of the region, the lowest - in the southwest. The frequency of liquid precipitation decreases in the direction from the northeast to the southwest, the mixed phase is evenly distributed over the territory.

Having considered how the ERA5 reanalysis reproduces the type of precipitation, and comparing the obtained results with the actual data of weather stations, we found that the maximum percentage of coincidences is observed in January, the minimum - in December and February. The total number of matches was 11644 terms. The highest percentage of coincidences – 71% of the cases when the reanalysis gave snow, coincided with the actual data of the ground observation network. It is followed by rain (4.3%), with less than a percent-



age of such types of precipitation as freezing rain, sleet, sleet and ice pellets. The «no precipitation» match is 24.0%. If we consider the distribution of coincidence of types by terms, then the picture does not fundamentally change. The maximum coincidence is observed for the «snow» type of precipitation with a maximum at 08:00 local time, the minimum coincidence is at 17:00. Let us consider another approach to compare ERA5 reanalysis data and data from the ground-based observation network. To do this, we take the information and visualize them using the ArcGIS software package. In this form, the reanalysis data is a certain interval, which includes several values of the type of precipitation. This approach demonstrates the erroneous distribution by reanalysis of both the type of precipitation and their presence.

Thus, research in the field of application of reanalysis to determine the phase state of precipitation should be continued on an extended sample and territory. Preliminary conclusions point to diurnal and intra-seasonal features of precipitation type identification by reanalysis.

## Изучение фазового состояния осадков на основе реанализа ERA5

Пицальникова Е.В., Калинин Н.А., Связов Е.М., Заякина М.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия  
E-mail: [sinoptik.perm@yandex.ru](mailto:sinoptik.perm@yandex.ru)

**Ф**азовое состояние атмосферных осадков вызывает интерес для изучения в связи со сложностью идентификации определенного вида осадков, например, ледяного дождя, а также ввиду низкого качества прогнозирования явлений погоды, зависящих от фазы осадков, таких как гололёд или налипание мокрого снега. В настоящее время существует множество работ, которые посвящены пространственно-временному распределению и условиям выпадения различных видов осадков, проанализированных с помощью данных радиозондирования и дистанционного зондирования облачного покрова, а также гидродинамических и синоптико-статистических методов [1–6]. Для территории Пермского края фазовое состояние осадков весьма разнообразно и порой нетипично для текущего сезона года.

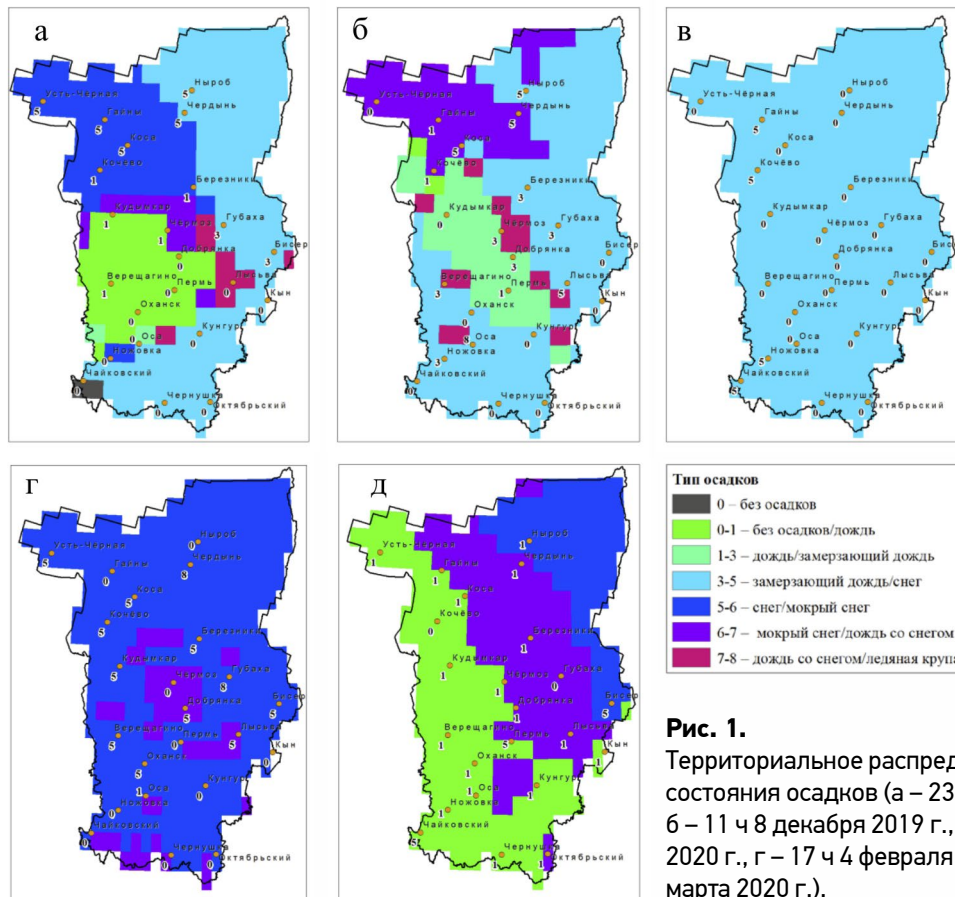
Материалом для исследования послужили данные метеорологических станций (МС) Пермского края за холодный сезон 2019–2020 гг., взятые с открытого сайта «Расписание погоды». В качестве основного инструмента для изучения фазового состояния осадков выбран реанализ ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) по часам или в среднем за месяц. Для обработки данных была использована программа Microsoft Excel, а для визуализации полученных результатов и сопоставления их с данными ERA5 использовался пакет программ ArcGIS.

Анализ фактических данных о фазовом состоянии осадков за исследуемый период показал, что преобладает твёрдая фаза атмосферных осадков, их максимальная повторяемость наблюдалась в феврале (90,3%), а минимальная – в марте (62,0%). Вторая по повторяемости фаза – жидкая, которая максимально наблюдалась в марте (17,5%), а минимально – в феврале (0,4%). Максимум смешанной фазы наблюдался в марте (20,1%). Территориальное распределение повторяемости фазового состояния осадков имеет следующие особенности: наибольшая частота выпадения твёрдых осадков наблюдается на востоке региона (МС Бисер и Губаха), наименьшая – на МС Чайковский (62%). Повторяемость жидких осадков уменьшается в направлении с северо-востока на юго-запад, с максимумом на МС Чайковский (18%). Смешанная фаза отмечалась на всех станциях, причем наибольшая повторяемость наблюдалась на МС Гайны, наименьшая – на МС Кунгур.

Рассмотрим, как реанализ ERA 5 воспроизводит тип осадков, и сравним полученные результаты с фактическими данными метеостанций. Максимальный процент совпадений отмечается в январе (54%), минимальный – в декабре и феврале (по 42%). Рассмотрим распределение совпадений данных реанализа и метеостанций по срокам. В целом, наблюдается суточный ход с двумя пиками в 8 и 20 ч местного времени (48,3 и 47,8% соответственно). Минимум совпадений наблюдается в 23 ч (43,1%). Общее число совпадений составило 11644. Наибольший процент совпадений (71) отмечался тогда, когда наблюдался снег. Затем идёт дождь (4,3%). Меньше процента составили такие типы осадков как замерзающий дождь, мокрый снег, дождь со снегом и ледяная крупа. Совпадение «без осадков» составляет 24,0%. Если рассмотреть распределение совпадения типов по срокам, то картина принципиально не различается. Максимальное совпадение наблюдается у типа осадков «снег» с максимумом в 8 ч (76,5%), минимальное – в 17 ч (66,3%).

Рассмотрим другой подход сравнения данных реанализа ERA5 с данными сети наземных наблюдений. Для этого исследуемую информацию визуализируем с помощью пакета программ ArcGIS. В 23 ч

местного времени 5 ноября 2019 г. (рисунок) на территории Пермского края наблюдались различные по фазовому состоянию типы осадков. Станции, расположенные на юге не наблюдали осадков – реанализ при этом показывал замерзающий дождь или снег, совпадение данных было только на МС Чайковский. На северо-западе данные совпадали за исключением Кочёво, где наблюдался дождь, а не снег. В срок 11 ч 8 декабря 2019 г. данные реанализа в большинстве случаев совпадали с фактическими данными. Стоит отметить, что около МС Оса ERA5 показал ледяную крупу, однако эта зона хотя и находится достаточно близко, но не включает в себя метеостанцию, которая отмечала этот вид осадков. 7 января 2020 г. в срок 5 ч на большинстве станций не отмечалось каких-либо осадков, при этом реанализ давал для всей территории Пермского края снег, хотя в нём заложен механизм, который позволяет фиксировать «без осадков», как уже было ранее показано на примере 5 ноября. В 17 ч 4 февраля 2020 г. по данным реанализа отмечались снег, мокрый снег и дождь со снегом, что в принципе согласовывалось с фактическими данными, кроме МС Оса, Чердынь и Губаха, которые передавали дождь и ледяную крупу соответственно. В 20 ч 13 марта 2020 г. на всей территории Пермского края отмечался дождь, кроме МС Пермь и Бисер, где наблюдался снег. Реанализ в данный срок показал, что на северо-востоке был снег, который, постепенно смещаясь на юго-запад, стал дождём со снегом, а затем дождём.



**Рис. 1.** Территориальное распределение фазового состояния осадков (а – 23 ч 5 ноября 2019 г., б – 11 ч 8 декабря 2019 г., в – 5 ч 7 января 2020 г., г – 17 ч 4 февраля 2020 г., д – 20 ч 13 марта 2020 г.).

Таким образом, исследования с целью определения фазового состояния выпадающих осадков с помощью реанализа необходимо продолжить на расширенной выборке, как по времени, так и по пространству, так как полученные предварительные выводы указывают на суточные и внутрисезонные особенности идентификации типа осадков.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-45-590021).*

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // *Лёд и снег*. 2011. Т. 51. Вып. 3. С. 199–224.
2. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 8. С. 27–35.
3. Смородин Б.Л., Калинин Н.А., Давыдов Д.В. Моделирование процесса изменения температуры капель при выпадении замерзающих осадков // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 9. С. 34–40.

4. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. С. 130–161.
5. Bourgouin P. A Method to Determine Precipitation Types // Weather and Forecasting. 2000. Vol. 15. P. 583–592.
6. Kalinin N.A., Sviyazov E.M., Pomortseva A.A., Pischalnikova E.V. Ice rains in the Middle Urals // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 611. DOI:10.1088/1755-1315/611/1/012038.

## Подход к автоматизации аналитической обработки пространственных данных для климатических исследований

Окладников И.Г.<sup>1</sup>, Титов А.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский филиал Институт вычислительных технологий СО РАН, Томск, Россия

Процесс анализа данных обычно представляется набором последовательных операций, начиная от выборки данных и заканчивая выводом результатов в требуемом формате. В зависимости от сложности метода исследования, такая последовательность может состоять из трёх и более вычислительных процедур с передачей результатов между ними. Для автоматизации этого процесса применяют специализированные программные продукты [1], одним из которых является Веб-ГИС «Климат» [2]. Программная среда Веб-ГИС «Климат» базируется на наборе вычислительных модулей, предоставляющих унифицированный программный интерфейс приложения (API) для пакетной обработки пространственных данных. Последовательность таких вычислительных модулей, где результаты работы одного модуля передаются на вход следующему, формирует вычислительный конвейер, соответствующий решаемой задаче (например, вычислению климатического индекса). Программная процедура выполнения обработки входных данных, согласно конвейеру, имеет название "обработчик".

В процессе разработки цифровой Веб-ГИС «Климат» была разработана первая версия базы метаданных, построенная на основе СУБД MySQL и предназначенная для хранения информации о доступных пользователю наборах пространственных данных и обработчиках [3]. В результате эволюционного развития платформы стала очевидной необходимость дополнения информации об обработчиках в базе метаданных описаниями вычислительных конвейеров, связанных с этими обработчиками. Внесение описаний вычислительных конвейеров, представленных в виде обобщенных ориентированных графов, в базу метаданных, добавляет гибкости и оперативности в расширении функциональности вычислительного ядра системы [4]. Новая версия базы метаданных состоит из 4 групп таблиц реляционной СУБД: наборы данных, обработчики, таблицы общие для наборов данных и обработчиков, и служебные таблицы. Для создания, модификации и использования вычислительных конвейеров, хранящихся в базе метаданных, был разработан специализированный визуальный редактор в рамках административной консоли Веб-ГИС «Климат». После создания (сборки) вычислительного конвейера, он связывается с соответствующими обработчиками в базе метаданных.

Вычислительное ядро Веб-ГИС «Климат» спроектировано для выполнения обработки многомерных геопространственных данных. Оно разработано на базе Python 3, а также ряда математических и графических программных пакетов, таких как NumPy (<https://numpy.org/>) and Matplotlib (<https://matplotlib.org/>). Последняя версия вычислительного ядра поддерживает параллельное выполнение конвейеров на нескольких вычислительных узлах, в том числе с учётом локальности данных. Размещение описания обобщенных вычислительных конвейеров в реляционной базе метаданных Веб-ГИС «Климат» обеспечивает эффективный механизм для добавления новых и доработки имеющихся модулей обработки пространственных данных.

Данная работа была поддержана проектом FWRG-2021-0004 базовой программы РАН.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ehbrecht, C., Landry Tom, Hempelmann Nils, Huard David, Kindermann Stephan. Projects based on the web processing service framework Birdhouse // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, Vol. XLII-4/W8, p. 43-47. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W8-43-2018.



2. Gordov E.P., Okladnikov I.G., Titov A.G., Voropay N.N., Ryazanova A.A., and Lykosov V.N. *Development of Information-computational Infrastructure for Modern Climatology // Russian Meteorology and Hydrology.* – 2018. – Vol. 43. – No.11. – P.722-728.
3. I. G. Okladnikov, E. P. Gordov, A. G. Titov *Development of climate data storage and processing model // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2016. 48, N 012030. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012030
4. Okladnikov I.G. *Representation of spatial data processing pipelines using relational database // Supercomputing frontiers and innovations,* 2021, Vol. 8, No. 4, p. 40-49.

## Approach to automation of spatial data processing for climate research

Okladnikov I.,<sup>1</sup> Titov A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Tomsk, Russia

### INTRODUCTION

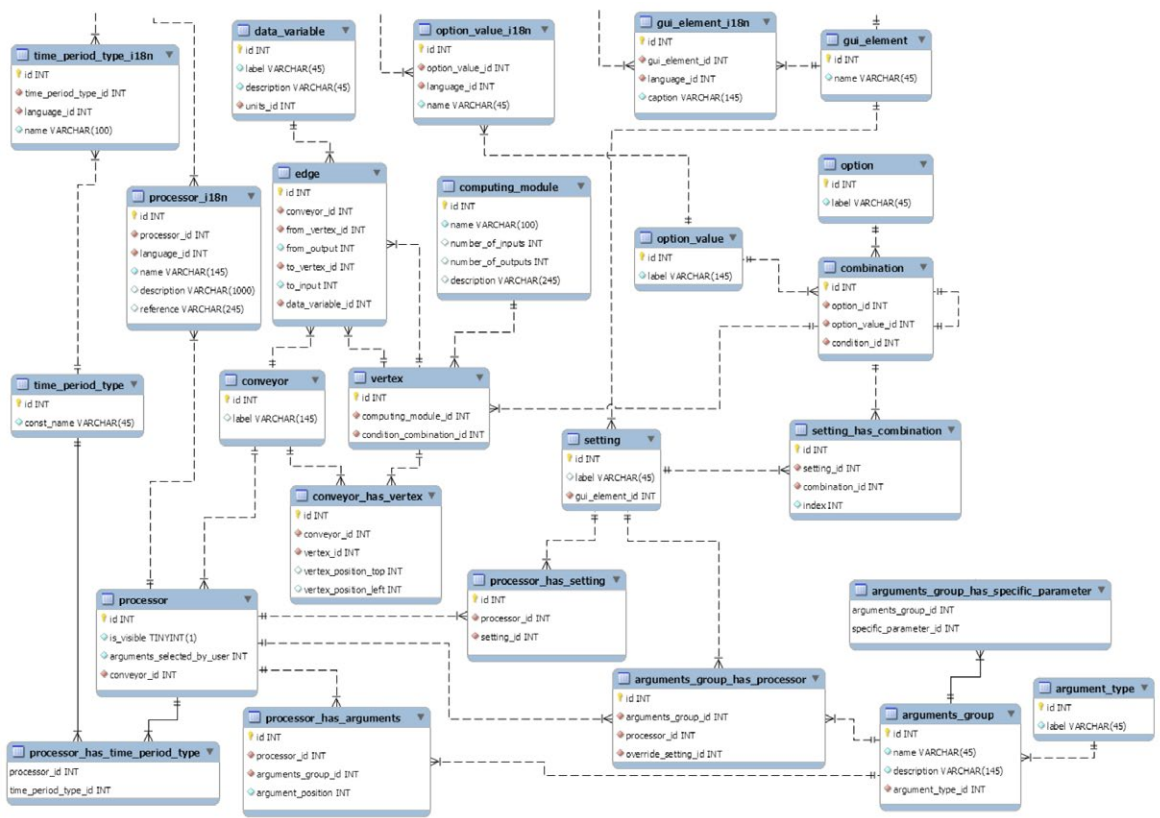
In most cases spatial data analysis process represents a set of sequential operations starting from data search and retrieval and ending with the result data output in the required format. Depending on the complexity of the research method chosen, such a sequence might consist of three or more relatively simple computational procedures where intermediate results are passed from one to another. To automate this process specialized software products aiming at eliminating the need for regular routine actions and thereby speeding up the research might be used [1]. One of such software products is the Web-GIS "Climate" [2]. The Web-GIS "Climate" framework is based on a set of computing modules that provides a unified programming interface (API) for batch processing of spatial data. A sequence of computing module calls where the results of one module are passed to the next forms a computing pipeline corresponding to the one of the climatic indices (for instance, "The number of frost days"). Such a pipeline for a specific program implementation is referred to as a "processor".

### METADATA DATABASE

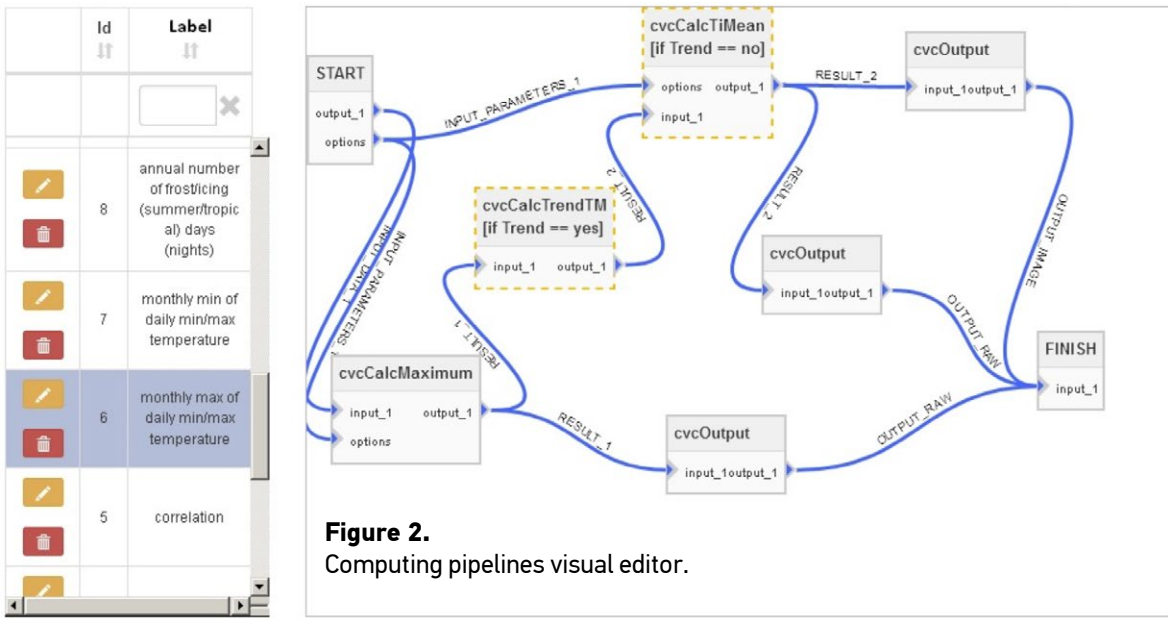
In the process of developing the Web-GIS "Climate", the first version of the metadata database was developed using MySQL DBMS and designed to store information about the spatiotemporal datasets and processors available to the end user [3]. As a result of the evolutionary development of the system it became obvious that the information about the processors in the metadata database should be extended using descriptions of the computing pipelines associated with these processors. The adding of the computing pipeline descriptions represented as generalized graphs to the metadata relational database provides flexibility and efficiency to the procedure of extending the computing backend functionality [4]. The new metadata database version developed consists of 4 groups of relational tables: datasets, processors (Fig. 1), tables common for datasets and processors, and utility tables which don't have relationships with other groups. To create, modify and use computing pipelines stored in the database a specialized visual editor as an integral part of the administrative web console of the Web-GIS "Climate" was developed (Fig. 2). Each vertex (either constant or conditional) of the pipeline generalized graph is represented by a rectangle with the name of the corresponding computing module while dataset passed from one module to another is assigned to each arc. Any pipeline can be modified by adding or removing vertices, arcs and labels. Once the computing pipelines are created, they are linked to the processors in the metadata database.

As an example the Figure 2 also depicts a generalized graph for the data processing pipeline for "Monthly maximum of daily minimum temperatures" index. The following constant vertices correspond to the computing modules: `cvcCalcMaximum`, which basically calculates the index at each point of the geographic grid, and `cvcOutput` which outputs the results of the computations in the format required. The yellow dashed line outlines the conditional vertices: `cvcCalcTrendTM` calculating the trend values, and `cvcCalcTiMean` calculating the average values of the index.

The `INPUT_DATA_1` arc corresponds to the dataset being processed, for example, the ERA-Interim reanalysis [5], the `RESULT_1` and `RESULT_2` arcs correspond to the intermediate result datasets, `OUTPUT_IMAGE` arc corresponds to the graphical calculation result (GeoTIFF), and `OUTPUT_RAW` arc corresponds to the calculation result in the binary format (NetCDF).



**Figure 1.** Metadata MySQL tables describing computing pipelines represented as generalized graphs.



**Figure 2.** Computing pipelines visual editor.

**COMPUTING BACKEND**

Web-GIS “Climate” computing backend is designed for performing multidimensional spatial data processing. It is developed using Python 3 as well as a number of mathematical and graphical software packages such as NumPy (<https://numpy.org/>) and Matplotlib (<https://matplotlib.org/>). It represents a complex standalone software including the following interrelated components:

1. Message broker (based on AMQP broker RabbitMQ, <https://www.rabbitmq.com/>),
2. Task manager (based on Celery queue manager, <http://www.celeryproject.org/>),
3. Result database (based on NoSQL Redis, <https://redis.io/>),
4. Computing backend manager,
5. Computing backend modules including:

- a. Spatial data access modules,
- b. Spatial data processing and analysis modules,
- c. Result output modules (creating files using NetCDF, ESRI Shapefile, geoTIFF formats).

The latest version of the computing backend supports the concurrent processing of several pipelines at the same time. Within the computing pipeline, the spatial data required are read from data archives, and processed using the backend modules according to computing pipeline description stored in the metadata database. The computing pipelines take into account data locality, i.e. using the computing system located close to where the data to be processed resides.

## CONCLUSION

Adding descriptions of generalized computing pipelines to relational metadata database of the Web-GIS “Climate” provides flexibility and efficiency to add new and revise existing spatial data processing modules. This also allows the computing pipelines to become scalable in support of multiprocessor systems. The current version of the computing backend allows effective performing of a number of complex spatial data processing tasks thus providing the basis for the following climate researches. The approach is substantially universal and might be applied to a variety of problem domains dealing with spatiotemporal data.

*Acknowledgments.* This study was supported under project FWRG-2021-0004 of a RAS Basic Research Program.

## REFERENCES:

1. Ehbrecht, C., Landry Tom, Hempelmann Nils, Huard David, Kindermann Stephan. *Projects based on the web processing service framework Birdhouse // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, Vol. XLII-4/W8, p. 43-47. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W8-43-2018.*
2. Gordov E.P., Okladnikov I.G., Titov A.G., Voropay N.N., Ryazanova A.A., and Lykosov V.N. *Development of Information-computational Infrastructure for Modern Climatology // Russian Meteorology and Hydrology.– 2018.– Vol. 43.– No.11.– P.722-728.*
3. I. G. Okladnikov, E. P. Gordov, A. G. Titov *Development of climate data storage and processing model // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. 48, N 012030. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012030*
4. Okladnikov I.G. *Representation of spatial data processing pipelines using relational database // Supercomputing frontiers and innovations, 2021, Vol. 8, No. 4, p. 40-49.*
5. Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., et al.: *The ERA Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the royal meteorological society 137(656), 553–597 (2011). https://doi.org/10.1002/qj.828*

# Development of a simulation approach towards representation of the natural climate variability for energy modeling

**Fedotova E.**

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia  
E-mail: [e.v.kasilova@gmail.com](mailto:e.v.kasilova@gmail.com)

The energy transition determines a qualitative change in the role of climatic variables in energy studies. That is related both to the non-stationarity of climatic characteristics due to the climate change and to the requirements towards the accuracy of energy equipment modeling. As a result, account for the climate effects on power equipment and power systems nowadays is getting increased attention of power engineers. Renewable power integration into existing power systems is crucial for the successful implementation of the energy transition. Natural variability plays a very important role in this process as has been shown by a number of recent research works.

A common approach towards accounting the climate data in energy modeling is the direct use of reanalysis archives. High quality of modern reanalysis data makes this approach quite well justified for the majority of practically important tasks. However, the possibility to take into account the natural climatic variability effects in practice is significantly limited by computational costs. At the same time, the influence of this factor on op-

eration of renewable power can be very significant. That is well studied effects for hydro power plants operation. Recently published works have reported similar effects for wind and solar power. In addition, the reanalyses are being developed as a climate research tool and are not intended for direct use in solving practical problems. Thus, validation and statistical corrections are desirable when reanalysis data are being used for energy problems.

The goal of this paper is to propose and implement an approach towards generation of representative climate data samples intended for use in energy modeling. The approach combines reanalysis data with station observations. Apart of validation, the station records allow to address long-term climatic dynamics research by reasonable computational costs.

The proposed approach is implemented using the following modules.

1. Preprocessing of observational data with the task to select the stations providing observations of a given quality. An R package has been developed to formalize and automate this procedure for meteorological stations of Russian observation network.

2. The pre-processed station records are being used to assess of the dynamics of the local climate and to select of representative locations and time-frames. Hierarchical clustering combined with trend analysis is has been implemented to study long-period climatic variability. At the same time, the use of a modular architecture ensures that other time series analysis techniques, such as wavelet analysis, can be added in a quite straightforward way.

3. Generation of reanalysis data samples for locations and periods defined at the previous step, with the temporal resolution required by an energy model. Implementation of this step combines the loading of data from the ERA5 archive using the Copernicus API and the processing of the resulting array using R language procedures based on the raster package.

4. Comparison of reanalysis data against observational data and evaluation of statistical correction. All necessary computational procedures were implemented based on regression models in R language.

The developed approach was used to model the operation of a combined heat and power plant across Russia. A hierarchical clustering algorithm was applied to the time series of daily air temperature over the territory of Russia to find areas with similar daily air temperature variations. The clustering results were used to select meteorological stations representative of each of the clusters, which allowed a detailed consideration of the features of CHP across the country.

Analysis of the wind speed dynamics across Russian territory during 1950–2021 has allowed to quantify long-term climate variabilities features. The result of this analysis has allowed to determine likely risks which are connected with development of wind generation in Russia and define design of an energy model intended to look for mitigation measures.

## Разработка подхода к учету естественной климатической изменчивости при моделировании энергетических систем

**Федотова Е.В.**

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

E-mail: [e.v.kasilova@gmail.com](mailto:e.v.kasilova@gmail.com)

**П**роцессы глобальной трансформации, идущие на протяжении последних десятилетий к мировой энергетике, приводят к качественному изменению роли климатических переменных. Это связано как с нарушением стационарности климатических характеристики из-за влияния современного изменения климата, так и с ужесточением требований к точности воспроизведения климатических характеристик при моделировании энергооборудования. В результате учет и прогнозирование влияния климата на динамику показателей работы энергетического оборудования и энергетических систем во все возрастающей мере становится областью ответственности специалистов-энергетиков.

Одной из самых сложных задач современных энергетических исследований является интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ), -- в первую очередь, ветровой и солнечной генерации -- в существующие энергосистемы. Мировой опыт эксплуатации ВИЭ свидетельствует о том, что фундаментальной составляющей эффективности ВИЭ, не менее важной, чем сами технологии генерации и распределения электроэнергии, становится разработка подходов к интеграции ВИЭ [1-4]. Последние исследования в этой области показывают, что успешное решение этой задачи может быть обеспечено только на основе междисциплинарного подхода, объединяющего энергетическое моделирование, климатологию, информационные технологии и экономику [1-2, 5].



На сегодня практически общепринятым подходом к формированию входных климатических данных для энергетического моделирования является непосредственное использование данных реанализа [6-8]. Высокое качество данных современных реанализов делают такой подход достаточно оправданным в для большинства практически важных задач. Однако, возможность учесть при этом влияние естественной климатической изменчивости на практике оказывается существенно ограничена вычислительными затратами. В то же время влияние этого фактора на работу ВИЭ может быть очень существенным, как хорошо известно из накопленного на сегодня опыта эксплуатации гидроэлектростанций и недавно опубликованных работ, рассматривающих похожие эффекты для ветровой и солнечной энергетики [1]. Кроме того, реанализы, строго говоря, не предназначены для непосредственного использования при решении практических задач и при их использовании желательно проводить валидацию и, при необходимости, статистическую коррекцию с использованием данных наблюдений.

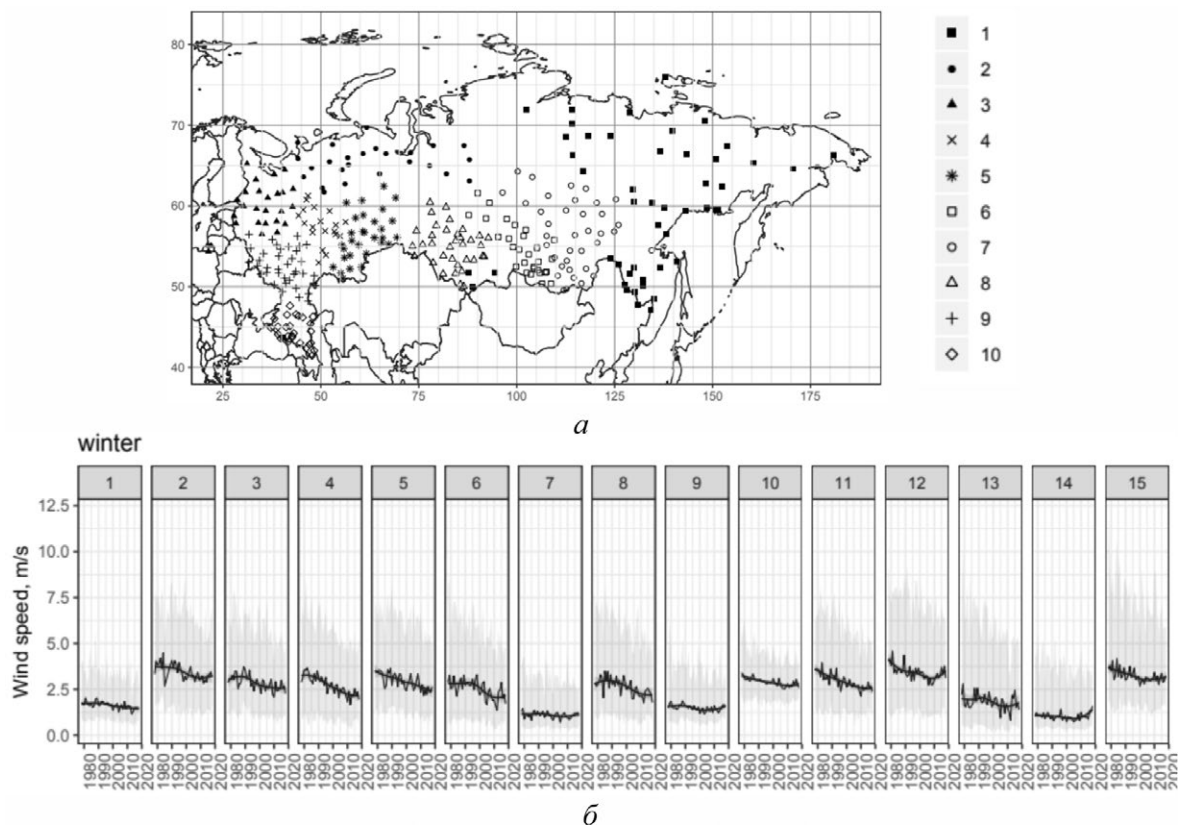
Задача настоящей работы заключается в разработке подхода к формированию репрезентативных выборок климатических факторов для использования в энергетическом моделировании. Наряду с использованием данных реанализа, при формировании входных климатических данных для энергетической модели используются данные станционных наблюдений. Это позволяет обеспечить разумный компромисс между детальностью исследования долговременной климатической динамики и вычислительными затратами.

Предложенный подход реализован в виде следующих модулей:

1. Предварительная подготовка данных наблюдений, задача которой состоит в выборе станций, располагающих наблюдениями заданного качества,

Для работы с архивами данных наблюдательной сети ВНИИГИ-МЦД (Всероссийский научно-исследовательский институт Международный центр данных) были использованы программные решения, формализующие и автоматизирующие предварительную обработку временных рядов, реализованные в виде пакета на языке R.

2. Исследование особенностей динамики на основе данных станционных наблюдений и выбор репрезентативных локаций и лет. Для исследования долгопериодической климатической изменчивости сейчас используется иерархическая кластеризация в сочетании с анализом трендов. При этом использование модульной архитектуры обеспечивает возможность включения других методов анализа временных рядов, например, вейвлет-анализа.



**Рис. 1.** Пример результатов кластеризации для средней скорости ветра: а — вид кластеров, б — динамика скорости ветра в каждом из кластеров зимой (светло-серая заливка обозначает диапазон изменений по кластеру, тонкая черная линия — среднее по кластеру значение, утолщенная черная — тренд, построенный методом локальных регрессий).



3. Формирование выборок данных реанализа для локаций и периодов, определенных на предыдущем шаге, со временным разрешением, необходимым для корректной работы энергетических моделей. Программная реализация этого шага сочетает загрузку данных из архива ERA5 помощью API системы Copernicus C3S и обработку полученного массива с помощью процедур на языке R, основанных на использовании пакета raster [9].

4. Сопоставление данных реанализа с данными наблюдений и проведение статистической коррекции данных реанализа. Валидация и статистическая коррекция реализованы на основе регрессионных моделей на языке R.

Разработанный подход был использован для моделирования работы теплоэлектроцентрали по территории России. Иерархический алгоритм кластеризации был применен к временным рядам суточной температуры воздуха по территории России чтобы найти районы с похожими суточными колебаниями температуры воздуха. Результаты кластеризации были использованы с тем, чтобы выбрать репрезентативные для каждого из кластеров метеорологические станции, что позволило детально рассмотреть особенности работы ТЭЦ по всей территории страны.

Вторым практическим приложением предложенного метода стало исследование динамики скорости ветра и подготовка входных данных для моделирования ветроустановок. Для средней и максимальной скорости ветра видов параметров была выполнена иерархическая кластеризация временных рядов (рис. 1).

В результате было показано, что для динамики скорости ветра характерны следующие особенности.

(1) Большинство станций на территории России зафиксировало снижение скорости ветра с 1970х до начала 2000х, что хорошо согласуется с известными результатами глобального анализа.

(2) Этот эффект значительно более для средней скорости, чем для максимальной.

(3) Изменение средней и максимальной скоростей ветра далеко не во всех регионах происходит синхронно: например, в Приморье с 2000х годов наблюдается выраженная тенденция к повышению максимальной скорости ветра при одновременном снижении средней скорости. Это означает, что функция распределения для скорости ветра, по всей видимости, не остается стабильной, и ее использование для прогнозных оценок требует осторожности.

(4) Наиболее значительное и продолжительное снижение скорости ветра наблюдалось на южном побережье Белого и Печорского морей, а также на юге Западной Сибири.

Из полученных эмпирических результатов следует, что для скорости ветра мультидекадные особенности естественной изменчивости в ближайшее десятилетие могут способствовать возрастанию ветропотенциала, компенсируя его снижение в результате развития глобальных процессов. Но при этом будет несколько возрастать и вероятность аварий, что в сочетании с ростом установленной мощности ВИЭ именно в тех регионах, где существуют определенные ограничения для перетоков электроэнергии может привести к снижению надежности электроснабжения, особенно в летние месяцы, когда из-за возрастания летних температур увеличивается как электропотребление так и величина его суточной амплитуды.

*Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 18-79-10255).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Deakin M, Bloomfield H, Greenwood D, Sheehy S, Walker S, Taylor PC. Impacts of heat decarbonization on system adequacy considering increased meteorological sensitivity. *Appl Energy* 2021;298.
2. Drew DR, Coker PJ, Bloomfield HC, Brayshaw DJ, Barlow JF, Richards A. Sunny windy Sundays. *Renew Energy* 2019;138:870-875.
3. Ilyushin P.V., Shepvalova O.V., Filippov S.P., Nekrasov A.A. Calculating the sequence of stationary modes in power distribution networks of Russia for wide-scale integration of renewable energy based installations. *Energy Reports* 2021;7:308-327.
4. Veselov F., Pankrushina T., Khorshev A. Comparative economic analysis of technological priorities for low-carbon transformation of electric power industry in Russia and the EU. *Energy Policy* 2021;156.
5. Wohland J, Brayshaw D, Pfenninger S. Mitigating a century of European renewable variability with transmission and informed siting. *Environ Res Lett* 2021;16(6).
6. Frysztacki, M. M., Hörsch, J., Hagenmeyer, V., & Brown, T. (2021). The strong effect of network resolution on electricity system models with high shares of wind and solar. *Applied Energy*, 291 doi:10.1016/j.apenergy.2021.116726
7. Hofmann et al., (2021). *atlite: A Lightweight Python Package for Calculating Renewable Power Potentials and Time Series*. *Journal of Open Source Software*, 6(62), 3294, <https://doi.org/10.21105/joss.03294>
8. Staffell, I., & Pfenninger, S. (2016). Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*, 114, 1224–1239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>
9. Hijmans R (2022). *\_raster: Geographic Data Analysis and Modeling. Rpackage version 3.5-15, https://CRAN.R-project.org/package=raster*

# Creation of a prototype digital twin of a local forest area, as an element of the climate monitoring system

Kanev A.I., Yakubov A.R., Chumachenko S.I., Terekhov V.I.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The tasks of analyzing, monitoring and forecasting the development of forest tracts for many years are not extremely relevant. On the contrary, interest in them is constantly growing, not least due to the international dependence of climate change and the expected speed of measuring the volume of carbon observations, emissions of harmful substances. To solve this problem, a large number of optimal models have been created that are based on initial data that provide answers to the questions posed, but their results are based on an increase in the initial parameters for the main region, which allows obtaining only generalized collection volumes. In turn, the method of expert evaluation of areas allows you to get estimates that are close to sensations. This approach requires the involvement of individuals to conduct research in certain regions of our country.

The creation of a dual regularity of a forest area should determine the described problems by creating the first digital model of a forest area (describing its structure, functionality and evolution), namely, an exact double consisting of digital models and information links with a local forest area. This makes it possible to automate the inventory of a forest area, to promote various scenarios for the development of forest stands up to 100 years with different forest management methods, and to analyze the absorption capacity for a period of up to 50 years. Based on the calculation of the proposed forest area, technologies for ground and air laser powerful use of unmanned aerial vehicles (UAVs) with installed laser scanners are used. As a result, such a cloud of points is formed that describes the relative position of objects in complex areas and their shapes.

Comparison of the obtained three-dimensional structure of the forest area with the video sequence of observation (from UAV), it is possible to completely restore the captured area using modeling technologies. The modeling process is calculated from a small amount of data processing using machine transformation algorithms to accurately transform point clouds into rendered 3D tree structures. The created complex of models is created for processing large amounts of data, which allows using their processing on high-performance computing resources. At the same time, on the first collected cloud segment, individual objects are segmented into geographic coordinates, i.e. open object and its position in space. After that, the segmented subset of points by coordinates is compared with the video sequence to highlight the type of object (tree/non-tree) and the definition of the species (now its flexibility of four species: pine, birch, axis), as well as the main taxation parameters (tree height, thickness). trunk, crown volume, etc.).

The combination of these parameters allows you to create a digital derivative of the tree and position it in space. After processing all the segmented objects, a large 3D replica of the forest area, which can be visualized with the help of reality assessment tools and the emergence of various questions related to the appearance of trees in various manifestations, for example, forest fire simulation. detection of detection of forest areas, it is necessary to monitor their development and clarify digital twins, as well as processes that are not taken into account in digital models of forest areas (for example, illegal logging).

Thus, in a standard way, a double regularity in the choice of frequency is determined, which makes it possible to obtain natural feedback, scenario modeling of the dynamics of forest areas is carried out to improve the quality of forestry operation, analysis and justification of the choice of a forest management and forest management strategy in the operation and characteristics of forests in the Russian Federation with climate control functions.

## REFERENCES:

1. Grabarnik P. Ya. et al. *Integration of simulation models for a comprehensive assessment of forest ecosystem services: methodological approaches // Mathematical biology and bioinformatics*. - 2019. - T. 14. - No. 2. - S. 488-499.
2. Eroshenkova D.A. et al. *Automated determination of forest characteristics using a deep learning neural network // International Conference on Neuroinformatics*. - Springer, Cham, 2019. - S. 295-302.
3. Temnkova D. N. et al. *Multifunctionality and biodiversity of forest ecosystems // Journal &quot;Forest Science&quot;*. - 2019. - no. 5.
4. Lukina N. V. et al. *Biodiversity-forming and climate-regulating functions of forests: current issues and prospects for research // Problems of forest science*. - 2020. - T.
5. Terekhov V. et al. *Classification of Tree Species by Trunk Image Using Conventional Neural Network and Augmentation of the Training Sample Using a Telegram-Bot // International Conference on Neuroinformatics*. - Springer, Cham, 2021. - C. 210-216.

# Создание прототипа цифрового двойника локального участка леса, как элемента системы климатического мониторинга

Канев А.И., Якубов А.Р., Чумаченко С.И., Терехов В.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Задачи анализа, мониторинга и прогнозирования развития лесных массивов многие годы не теряют своей актуальности. Напротив, интерес к ним в последнее время постоянно растет, что не в последнюю очередь связано с международной обеспокоенностью изменением климата и необходимостью постоянной оценки объемов углеродных выбросов, производимых промышленностью. Для решения этих задач создано большое количество аналитических моделей, которые на основе исходных данных могут дать ответы на поставленные вопросы, однако их результаты основаны на статистически полученных параметрах для исследуемого региона, что позволяет получать лишь обобщенные выводы. В свою очередь, метод экспертной оценки участка позволяет получать оценки, близкие к идеальным. Такой подход требует личного присутствия экспертов на участке проведения измерений, что ограничивает зону исследований, а порой и к невозможности проведения измерений ввиду труднодоступности многих регионов нашей страны.

Создание цифрового двойника локального участка леса должно решить описанные проблемы, путем создания сначала цифровой модели лесного участка (описывающего его структуру, функционал и эволюцию), а затем и собственно цифрового двойника состоящего из цифровой модели и информационных связей с локальным участком леса. Это позволит автоматизировать таксацию лесного участка, промоделировать различные сценарии развития лесных насаждений до 100 лет при разных способах ведения лесного хозяйства и провести анализ поглотительной способности углерода на период до 50 лет.

В основе цифрового моделирования локального участка леса лежит использование технологий наземного и воздушного лазерного сканирования с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с установленными лазерными сканерами. В результате такой съемки формируется облако точек, описывающих взаимное расположение объектов на участке сканирования и их форму. Сопоставив полученную трехмерную структуру лесного участка с видеорядом съемки (также получаемой с БПЛА), можно полностью воссоздать отснятый участок с помощью технологий моделирования. Сам процесс моделирования состоит из нескольких этапов обработки полученных данных с использованием алгоритмов машинного обучения для точной конвертации облака точек в трехмерные структуры деревьев с последующей визуализацией. Создаваемый комплекс моделей изначально проектируется под обработку больших объемов данных, что подразумевает их обработку на высокопроизводительных вычислительных системах. При этом на первом этапе полученное облако точек сегментируется на отдельные объекты, у которых определяются географические координаты, т.е. появляется объект и его положение в пространстве. После этого сегментированное подмножество точек по координатам сопоставляется с видеорядом для классификации типа объекта (дерево/не дерево) и определения его породы (сейчас поддерживается четыре породы: ель, сосна, береза, осина), а затем определяются основные таксационные параметры (высота дерева, толщина ствола, объем кроны и пр).

Совокупность этих параметров позволяет создать цифровую копию дерева и позиционировать его в виртуальном пространстве. После обработки всех сегментированных объектов создается цифровая трехмерная копия лесного участка, которую можно визуализировать с помощью средств виртуальной реальности и исследовать различные вопросы, связанные с влиянием деревьев друг на друга в различных ситуациях, например симуляции лесного пожара. Регулярное сканирование лесных участков позволит наблюдать их развитие и уточнять цифровой двойник, а также отслеживать процессы, не учтенные в цифровой модели лесного участка (например, незаконные вырубки).

Таким образом, цифровой двойник локального участка леса позволяет получать автоматизированную оценку запасов древесины, проводить сценарное моделирование динамики лесных массивов для повышения качества эксплуатации лесного хозяйства, анализировать и обосновывать выбор стратегии ведения лесного хозяйства и лесопользования в эксплуатационных и защитных лесах РФ с позиций их климаторегулирующих функций.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Грабарник П. Я. и др. *Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы // Математическая биология и биоинформатика. – 2019. – Т. 14. – №. 2. – С. 488-499.*



2. Eroshenkova D. A. et al. Automated determination of forest-vegetation characteristics with the use of a neural network of deep learning // *International Conference on Neuroinformatics*. – Springer, Cham, 2019. – С. 295-302.
3. Тебенькова Д. Н. и др. Мультифункциональность и биоразнообразие лесных экосистем // *Журнал "Лесоведение"*. – 2019. – №. 5.
4. Лукина Н. В. и др. Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // *Вопросы лесной науки*. – 2020. – Т. 3. – №. 4. – С. 1-90.
5. Terekhov V. et al. Classification of Tree Species by Trunk Image Using Conventional Neural Network and Augmentation of the Training Sample Using a Telegram-Bot // *International Conference on Neuroinformatics*. – Springer, Cham, 2021. – С. 210-216.

## Automatic meteorological station dataset storage based on PostgreSQL DBMS and approach to providing online access to them

Titov A.G.<sup>1,2</sup>, Bogomolov V.Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Tomsk, Russia

E-mail: [titov@scert.ru](mailto:titov@scert.ru)

The tasks of monitoring of environmental parameters, and, in particular, meteorological parameters, imply usage of the specialized scientific equipment, such as automatic meteorological stations that transfer real time observation data (air temperature, humidity, wind speed, etc.) to the data storage. As a rule such data represent a set of text or binary files corresponding to the observation period defined. It should be noted that data obtained from the modern sensors form huge archives especially when taking into consideration time periods greater than one year. Since it's well known that calculation of climatic parameters requires time periods greater than 30 years to be used, the problem of meteorological data streams handling as well as providing unified application interface to them along with corresponding graphical user interface, is still of great importance. To realize the task described, the PostgreSQL DBMS was chosen since it has built-in capabilities that allow working with georeferenced data. Thus, meteorological database consists of 6 main tables.

The PostgreSQL database structure developed for meteorological data obtained from automatic meteorological stations provides technological basis for regional system designed for collection, storage and online dissemination of the datasets required by the end user. The transition made from the source data in text and binary formats to the relational DBMS allows using unified SQL queries to perform effective search and retrieval of the data the user needs, as well as to develop graphical user interface based on web mapping technologies.

*Acknowledgments.* This study was supported under project # FWRG-2021-0004 of a RAS Basic Research Program.

## Организация хранения данных автоматизированных метеорологических комплексов в СУБД PostgreSQL и обеспечение доступа к ним

Титов А.Г.<sup>1,2</sup>, Богомолов В.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Томск, Россия

E-mail: [titov@scert.ru](mailto:titov@scert.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

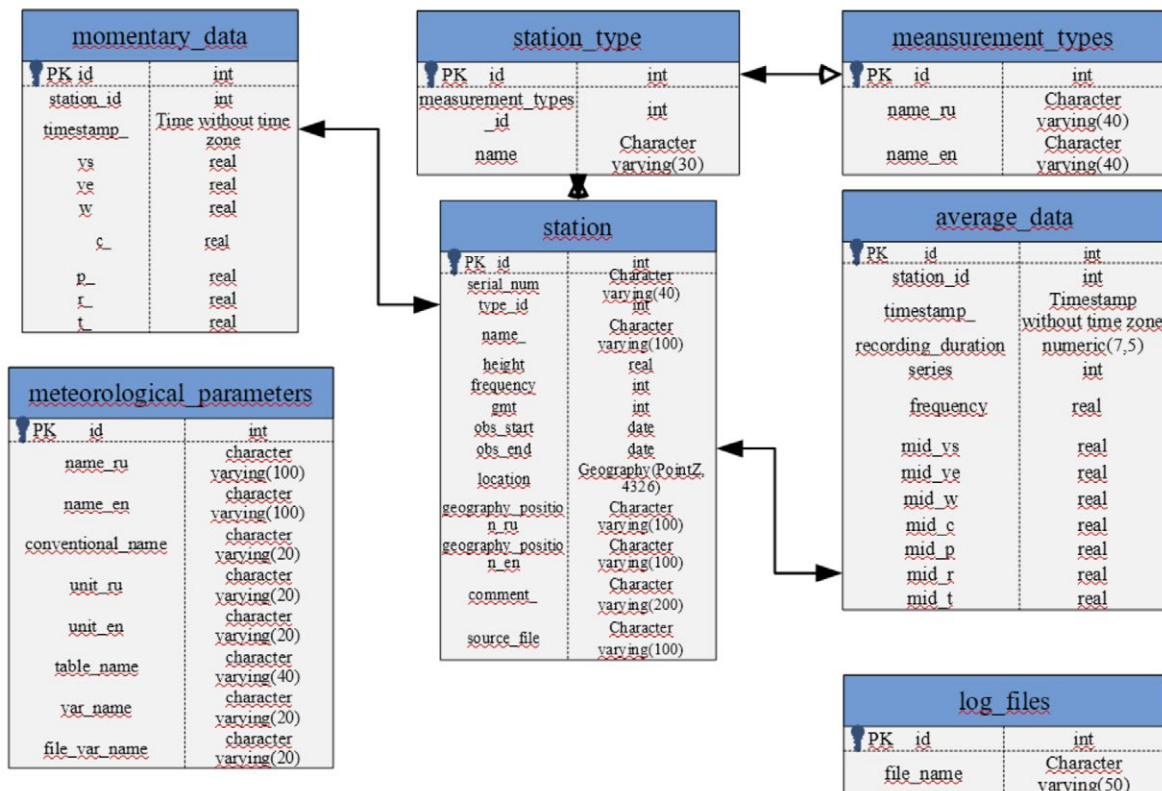
Задачи мониторинга параметров окружающей среды, и, в частности, метеорологических параметров, подразумевают использование оборудования, такого как автоматизированные метеорологические комплексы (АМК), передающих данные наблюдений (температура атмосферы, влажность, скорость ветра на различных вертикальных уровнях, и т. д.) в режиме квазиреального времени, в систему хранения

данных. Как правило, эти данные представляют собой набор текстовых или бинарных файлов, соответствующих конкретному периоду наблюдений. Следует отметить, что данные, получаемые от современных метеорологических датчиков, характеризуются высокой частотой измерений (десятки тысяч записей в час), что обуславливает большой объем потоковых данных (десятки и сотни гигабайт), получаемых за интервалы времени длительностью больше года. Принимая во внимание, что для расчета оценок климатических характеристик используются 30-летние и более интервалы, задача организации хранения данных метеорологических наблюдений, обеспечения унифицированного интерфейса доступа к ним, а также соответствующего графического интерфейса пользователя, является весьма актуальной.

В работе [1] представлено программное обеспечение для хранения и обработки суточных метеорологических данных, для их последующего использования в проектах SWAT (Soil and Water Assessment Tool, [2]). База метеорологических данных реализована на основе реляционной СУБД MS Access. Структура представленной базы данных достаточно очевидна, одна таблица используется для хранения описаний метеорологических станций, оставшиеся 5 таблиц используются для хранения значений метеорологических параметров, таких как температура, количество осадков и т. д. При этом каждому параметру соответствует своя таблица, а переменной величиной является идентификатор станции. Интерфейс пользователя позволяет просматривать и редактировать как данные описаний станций, так и данные наблюдений, а также импортировать и экспортировать их в форматы \*.xls, .csv, txt. Также интерфейс позволяет запускать вычислительные процедуры, такие как «Среднесуточная температура точки росы за каждый месяц» и пр.

В техническом докладе австралийских авторов [3] представлена разработанная ими на основе ПО MS Access структура базы метеорологических данных, которые были получены начиная с 1931 года. В данной работе каждой автоматизированной метеорологической станции соответствует своя таблица, первичным ключом которой является поле временной метки (timestamp). Статистическая обработка данных производится ежечасно, с автоматической рассылкой отчетов в государственные организации.

Интересной является работа [4], в которой описана попытка применить стандарты систем управления потоками данных (Data Stream Management System) к хранению и предоставлению доступа к метеорологическим данным. В данном проекте для решения этой задачи применялся продукт SQLStream (<https://sqlstream.com/>), при этом использовались две отдельные базы данных: одна база данных PostgreSQL, для хранения статической информации, такой как описание метеорологических станций (идентификатор, географические координаты, высота над уровнем моря, и т. п.), и вторая база данных SQLStream, пополняемая в режиме квазиреального времени. Фактически, база данных SQLStream состоит из одной таблицы Data, с полями (<идентификатор станции>, <наименование переменной>, <значение переменной>). Результаты на момент выполнения данного исследования оказались несколько неоднозначными. В то время как система управления потоками данных оказалась эффективнее в плане



**Рис. 1.** Структура базы метеорологических данных АМК.

id	name_en	name_ru
2	Thermodynamic temperature	Термодинамическая температура
3	Average atmospheric pressure	Среднее значение атмосферного давления
4	Average value of relative air humidity	Среднее значение относительной влажности воздуха
5	The average value of the speed of the horizontal wind component	Среднее значение скорости горизонтальной компоненты ветра
6	Maximum value of the horizontal wind component	Максимальное значение горизонтальной компоненты ветра
7	Average value of the vertical component of the wind	Среднее значение вертикальной компоненты ветра
8	Mean value of the meridional (southern) component of the horizontal wind	Среднее значение меридианальной (южной) компоненты горизонтального ветра
9	Mean zonal (eastern) component of the horizontal wind	Среднее значение зональной (восточной) компоненты горизонтального ветра
10	Temperature	Температура
11	The value of the meridional (southern) component of the horizontal wind	Значение меридианальной (южной) компоненты горизонтального ветра
12	The value of the zonal (eastern) component of the horizontal wind	Значение зональной (восточной) компоненты горизонтального ветра
13	Vertical wind speed	Вертикальная компонента ветра
14	Atmosphere pressure	Атмосферное давление
15	Relative humidity	Значение относительной влажности воздуха

var_name	unit	unit_en	table_name	file_var_name	conventional_name
mid_t	градусы Цельсия	degree Celsius	average_data	T	T
mid_p	мм.рт.ст.	mm Hg	average_data	P	P
mid_r	%	%	average_data	r	NULL
v	м/с	m/s	average_data	V	avg_Uuv
vmax	м/с	m/s	average_data	Vmax	NULL
mid_w	м/с	m/s	average_data	w	NULL
mid_vs	м/с	m/s	average_data	Vs	NULL
mid_ve	м/с	m/s	average_data	Ve	NULL
t_	градусы Цельсия	degree Celsius	momentary_data	T	T
vs	м/с	m/s	momentary_data	Vs	avg_v
ve	м/с	m/s	momentary_data	Ve	avg_u
w	м/с	m/s	momentary_data	w	avg_w
p_	мм.рт.ст.	mm Hg	momentary_data	P	P
r_	%	%	momentary_data	r	NULL

**Рис. 2.**  
Таблица meteorological\_parameters.

получения постоянных обновлений от метеорологических станций, ее оказалось гораздо сложнее администрировать, а также потребовалось выполнить большой объем дополнительных работ для обеспечения рутинных операций SQL.

В данной работе представлен прототип универсального решения на основе СУБД PostgreSQL, разработанного в ИМКЭС СО РАН, для географически распределенной системы автоматизированных метеорологических комплексов.

## СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ

Для реализации поставленной задачи была выбрана СУБД PostgreSQL, которая имеет встроенную функциональность для работы с геопривязанными данными. База метеорологических данных состоит из 6 основных таблиц (Рис. 1).

Таблица **measurement\_types** содержит базовые типы измерений: атмосфера, почва, океан. Таблица **station\_type** содержит имеющиеся типы автоматизированных метеорологических станций/комплексов (например, «АМК-03»), также она содержит столбец **measurement\_types\_id** – идентификатор типа измерений. Таблица **station** содержит следующие столбцы: **id** – уникальный идентификатор станции; **serial\_num** – серийный номер станции; **type\_id** – идентификатор типа станции; **name** – текстовое название; **height\_ta** – высота размещения станции; **frequency** – частота измерения; **gmt** – время по Гринвичу; **obs\_start** и **obs\_end** – время начала и завершения всех записей для станции; **location** – географические координаты; **geography\_position** – географическое месторасположение станции (адрес и координаты); **comment** – столбец для заметок. Следует отметить, что используемый термин «станция» однозначно определяется 5 параметрами: **serial\_num**, **type\_id**, **height\_ta**, **frequency**, **location**. При изменении хотя бы одного из этих параметров (смена месторасположения, замена самого прибора, корректировка высоты), будет заведена новая станция с уникальным идентификатором (**id**). В таблице **momentary\_data** хранятся непосредственно данные мгновенных измерений со всех метеорологических станций, она таким образом является самой большой по объему. Таблица **average\_data** содержит усредненные данные наблюдений, пересылаемые станцией однократно за установленный интервал времени. На Рис. 2 представлены поля таблицы **meteorological\_parameters**, где **var\_name** – наименования столбцов из таблиц **momentary\_data** и **average\_data**, **unit** – физические единицы измерения. Эта таблица содержит метаданные, необходимые для функционирования графического интерфейса пользователя.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная структура базы данных для метеорологических данных, получаемых с датчиков автоматизированных метеорологических комплексов, является технологической основой для региональной системы сбора, хранения и предоставления доступа к этим данным. Переход от исходных текстовых и бинарных файлов, генерируемых АМК, к реляционной СУБД, позволяет использовать унифицированные SQL-запросы для поиска и выборки данных, необходимых пользователю, и разработать на их основе интуитивно-понятный графический интерфейс.

*Благодарности. Данная работа была поддержана проектом № FWRG-2021-0004 базовой программы РАН.*

### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Hrast Essenfelder, Arthur. SWAT Weather Database: A Quick Guide. 2018. doi: 10.13140/RG.2.1.4329.1927. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Arthur-Hrast-Essenfelder-2/publication/294535100\\_SWAT\\_Weather\\_Database/data/5756f68e08aef6cbe35f4e5b/WeatherDatabase-QuickGuide.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arthur-Hrast-Essenfelder-2/publication/294535100_SWAT_Weather_Database/data/5756f68e08aef6cbe35f4e5b/WeatherDatabase-QuickGuide.pdf)*
2. *Oñate-Valdivieso, F.; Bosque Sendra, J. Semidistributed hydrological model with scarce information: Application to a large south american binational basin. J. Hydrol. Eng. 2014, 19, 1006–1014.*
3. *F. Zhou, D.J. Smith and S. Khan. An Automated Weather Database System / CSIRO Land and Water, CSIRO Land and Water Technical Report 19/02, May 2002. URL: [https://www.researchgate.net/publication/271770165\\_An\\_Automated\\_Weather\\_Database\\_System](https://www.researchgate.net/publication/271770165_An_Automated_Weather_Database_System)*
4. *Axel Lewenhaupt, Richard Nysäter, Magnus Olsson, and Tobias Reinhammar. Weather data application using SQLstream. 2015. URL: <https://www.kth.se/social/files/558023ecf27654759601639d/10.pdf>*



## СЕКЦИЯ 11

Программа  
«Будущее Земли»  
и Инициатива  
«Будущее Северной  
Евразии»

## SESSION 11

Future Earth  
Program and Northern  
Eurasia Future  
Initiative

### Relationship of cold air outbreaks characteristics in the Russian Arctic with cyclonic activity and leading modes of climatic variability

Narizhnaya A.I.<sup>1</sup>, Chernokulsky A.V.<sup>1,2</sup>,  
Akperov M.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geography RAS, Moscow, Russia  
E-mail: [augustea@mail.ru](mailto:augustea@mail.ru)

The climate change observed in recent decades, particularly in the Arctic, affects the intensity and frequency of occurrence of such phenomena as marine cold air outbreaks (MCAOs) that are characterized by an intensive advection of sufficiently dry and cold air masses onto the relatively warm sea surface. Thermodynamic characteristics of MCAOs experience considerable changes on long-term scale. In particular, these changes may be due to changes in circulation regimes. Because of global warming and an increase in greenhouse gases concentration in the atmosphere, the trajectories of extratropical cyclones are shifting poleward, which increases the frequency of MCAOs occurrence. The connection of MCAOs with the leading modes of climatic variability is also found.

In this study, we analyzed the link of the characteristics of MCAOs over the seas of the western and eastern regions of the Russian Arctic (Barents and Kara Seas, Laptev, East Siberian and Chukchi Seas) with characteristics of cyclonic activity, leading modes of climate variability in the Northern Hemisphere (NH) (like NAO, AMO, PDO, ENSO), Kola temperature, and the entire NH surface air temperature (SAT).

The following results were obtained:

- In this study the relationship of MCAO characteristics with atmospheric circulation, in particular, with the patterns of cyclonic activity, is analysed. It is shown that in the western seas, the revealed changes in the characteristics of MCAOs are partly associated with changes in cyclonic activity in the region, namely, with the weakening of cyclones in winter and intensification in spring. At the same time, for the western region it was revealed that most cyclones, in the rear part of which strong intrusions are formed, originate directly over the Barents Sea or to the west, over the regions of the North Atlantic. While in the eastern region, cyclones

associated with strong MCAOs are most often formed directly over the inland seas of the Eastern Arctic and the nearby territories of the Far East.

- The modes of NH climate variability have a significant impact on the characteristics of MCAOs. In the positive phases of NAO and AMO a general weakening of MCAOs is expected (correlation coefficients are -0.17 and -0.25, respectively). For the PDO index, significant positive correlations (about 0.2) were obtained for both seasons of the year, and even for the remote western region.
- MCAO characteristics in the western and eastern regions oppositely respond to changes in NH SAT. In particular, we found predominantly negative correlation of MCAOs in the western seas with NH SAT (with the correlation coefficient -0.4). That is, a decrease in the intensity of cold air outbreaks with a general increase in air temperature can be expected. In contrast, a positive connection was found for the eastern seas (with the correlation coefficient of about 0.3). Here, an increase in NH SAT leads to reduce the ice-covered areas, which is a necessary condition for the formation of MCAOs.

*The study has been supported by the Russian Science Foundation (№ 18-77-10072).*

## Связь характеристик холодных вторжений в Российской Арктике с циклонической активностью и ведущими модами климатической изменчивости

Нарижная А.И.<sup>1</sup>, Чернокульский А.В.<sup>1,2</sup>, Акперов М.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

E-mail: [augustea@mail.ru](mailto:augustea@mail.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в последние десятилетия изменения климата в Арктике влияют на интенсивность и частоту повторяемости таких явлений, как холодные вторжения (ХВ) – интенсивной адвекции достаточно сухой и холодной воздушной массы на морскую поверхность [9]. В морях Российской Арктики холодные вторжения обычно связаны с адвекцией воздуха из приполярных областей, покрытых морским льдом, в более низкие широты [5], но также ХВ в Арктике могут развиваться при адвекции воздуха с холодного континента.

Изменение характеристик ХВ может быть связано в том числе с изменением циркуляционных режимов. В частности, в [2] было показано, что в связи с глобальным потеплением и увеличением содержания парниковых газов в атмосфере отмечается смещение траекторий внетропических циклонов с последующим увеличением частоты повторяемости ХВ. При этом, некоторые исследования показали, что тенденции экстремальных ХВ не обязательно следуют за локальными тенденциями средней температуры [14]. Также, в ряде работ показана связь ХВ с ведущими модами климатической изменчивости. Например, [13] показали, что ХВ над Лабрадорским морем тесно связаны с положительной фазой североатлантического колебания.

В данной работе для морей западного и восточного региона Российской Арктики (Баренцево и Карское моря, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) проанализировано изменение характеристик ХВ в связи с изменениями циклонической активности и изменениями ведущих мод климатической изменчивости внетропических широт Северного полушария.

### ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

В данной работе для выявления явлений ХВ использовался индекс М, рассчитанный как вертикальный градиент потенциальной температуры между морской поверхностью и высотой 800 гПа [4]. В качестве исходных данных для расчета индекса использовались 6-часовые данные реанализа Era-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с [3] за период 1979–2018 гг. Все случаи с ХВ разделялись по интенсивности на слабые, умеренные и сильные. Вся территория морей Российской Арктики была разделена на два региона, по которым в дальнейшем проводилось осреднение индекса М: западную часть, охватывающую преимущественно моря Баренцево и Карское (66° с.ш - 84° с.ш; 10° в.д - 120° в.д), и регион Восточно-Сибирского и Чукотского морей (66° с.ш-84° с.ш; 120° в.д-160° в.д).

Для анализа взаимосвязи ХВ с циклонической активностью использовались данные, полученные в [11] – данные с 6-часовым разрешением реанализов ERA-Interim, MERRA2, NCEP-CFSR и JRA [12] за 30-летний период 1981-2010 годов.

Проанализирована корреляция характеристик ХВ с ведущими модами климатической изменчивости, включая Северо-Атлантическое колебание, Атлантическое мультидесятилетнее колебание, Эль-Ниньо – Южное колебание, Тихоокеанское десятилетнее колебание [6, 10, 15]. Отдельно рассматривается значение средней глобальной температуры [8] и океанографические данные Кольского Меридиана (температура морской воды на меридиане 33,5° в.д. от Кольского полуострова до 75° с.ш.) [7].

Для данного исследования для регионов западной и восточной Российской Арктики были отобраны сроки с умеренными и интенсивными ХВ ( $M > 3K$ ). Для этих сроков в выбранных областях проводился анализ поля на наличие циклонического образования – если циклон (центральная его часть или периферия) находился над рассматриваемым регионом во время развития ХВ, то оценивались траектории данного циклона для выявления места его появления и разрушения. Чтобы определить связь характеристик ХВ в выбранных регионах с ведущими модами климатической изменчивости для осеннего (октябрь–декабрь) и зимнего сезона (январь–март) были построены корреляции среднего значения индекса  $M$ , а также повторяемости ХВ той или иной интенсивности, с индексами климатической изменчивости.

По результатам работы были получены следующие **результаты**:

- Проанализирована связь характеристик холодных вторжений с циклонической активностью. Показано, что в западных морях выявленные изменения характеристик холодных вторжений связаны в том числе с изменением циклонической активности в регионе, а именно — с ослаблением циклонов в зимний период и интенсификацией в весенний. При этом для западного региона выявлено, что большинство циклонов, в тылу которых формируются сильные вторжения, зарождаются непосредственно над Баренцевым морем или западнее, над районами Северной Атлантики. В то время, как для восточного района показано, что циклоны, с которыми связаны сильные холодные вторжения, чаще всего формируются непосредственно над внутренними морями Восточной Арктики и близлежащими территории Дальнего Востока.
- Моды климатической изменчивости внетропических широт Северного полушария оказывают значимое влияние на характеристики холодных вторжений. Было показано, что в положительные фазы Североатлантического колебания и Атлантического мультидесятилетнего колебания следует ожидать ослабления холодных вторжений и уменьшения их интенсивности, а в отрицательную – наоборот (коэффициенты корреляции составляют -0,17 и -0,25, соответственно). Для индекса Тихоокеанского десятилетнего колебания значимые положительные корреляции (порядка 0,2) были получены для обоих сезонов года, причем даже для акваторий западных морей, которые находятся в удалении от Тихого Океана.
- Получен противоположный отклик характеристик холодных вторжений на изменение полушарной температуры: преимущественно отрицательный (коэффициент корреляции в среднем -0,4) для западных морей, то есть здесь можно ожидать уменьшения интенсивности холодных вторжений при общем увеличении температуры воздуха (отрицательная корреляция также получена для связи холодных вторжений с притоком теплой воды из Атлантики), и положительной (коэффициент корреляции около 0,3) для восточных — здесь повышение температуры воздуха способствует сокращению площади льда, что является необходимым условием для образования холодных вторжений.

*Исследование выполнено при поддержке РФФ № 18-77-10072.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Карсаков А.Л. Некоторые результаты обобщения океанографических наблюдений на вековом разрезе «Кольский меридиан» за период 1900-2005 гг. // Вопросы промысловой океанологии. – М: Изд-во ВНИРО, 2007. - Выпуск 4. № 2. – С. 136-158.
2. Чернокульский А.В., Мохов И.И. Сравнение современных глобальных климатологий облачности // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 235–243.
3. Dee D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the royal meteorological society. – 2011. – Т. 137. – №. 656. – С. 553-597.
4. Fletcher J., Mason S., Jakob C. The climatology, meteorology, and boundary layer structure of marine cold air outbreaks in both hemispheres // Journal of Climate. – 2016. – Т. 29. – №. 6. – С. 1999-2014.
5. Inoue J., Hori M. E., Takaya K. The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly // Journal of Climate. – 2012. – Т. 25. – №. 7. – С. 2561-2568.
6. Jones P. D., Jónsson T., Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland // International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society. – 1997. – Т. 17. – №. 13. – С. 1433-1450.
7. Kent E. C. et al. Observing requirements for long-term climate records at the ocean surface // Frontiers in Marine Science. – 2019. – Т. 6. – С. 441.

8. Kennedy J. J. et al. An ensemble data set of sea surface temperature change from 1850: The Met Office Hadley Centre HadSST. 4.0. 0.0 data set // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2019. – T. 124. – №. 14. – C. 7719-7763.
9. Kolstad E. W., Bracegirdle T. J. Marine cold-air outbreaks in the future: an assessment of IPCC AR4 model results for the Northern Hemisphere // *Climate Dynamics*. – 2008. – T. 30. – №. 7-8. – C. 871-885.
10. Mantua N. J., Hare S. Pacific-Decadal Oscillation (PDO) // *Encyclopedia of global environmental change*. – 2002. – T. 1. – C. 592-594.
11. Polyakov I. V. et al. Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875–2000 // *Journal of Climate*. – 2003. – T. 16. – №. 12. – C. 2067-2077.
12. Schwartz C., Garfinkel C. I. Relative roles of the MJO and stratospheric variability in North Atlantic and European winter climate // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2017. – T. 122. – №. 8. – C. 4184-4201.
13. Thompson D. W. J., Wallace J. M. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode // *Science*. – 2001. – T. 293. – №. 5527. – C. 85-89.
14. Vavrus S. et al. The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming // *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2006. – T. 26. – №. 9. – C. 1133-1147.
15. <http://climexp.knmi.nl>

## Review of factors affecting the capacity of the NSR in the context of economic development of the Russian Federation and climate change

**Kostikova O.N., Merkin L.A.**

Scientific-Technological University "Sirius", Federal Territory Sirius, Russia  
E-mail: [kostikovaolesya@mail.ru](mailto:kostikovaolesya@mail.ru)

We live in the epoch of global warming taking place on our planet. Climate change research has found its reflection in climate models, which are being calibrated and refined. The scientific community has focused its interest in global climate change related to its warming and it is predicted that the temperature increase on our planet is only increasing. Winters are getting warmer, floods, fires, and extreme weather events are shaking the planet in different parts of it. Positive or negative effects of climate impacts occurring in our environment in the near future will clearly affect the socio-economic component of countries.

Economic development of regions and countries obviously depends to a large extent on geographical and climatic factors. This paper considers the mutual influence of geographical, climatic and economic factors on the cargo turnover of one of the most important transport corridors of the Russian Federation - the Northern Sea Route (NSR).

The NSR is the shortest sea route between European Russia and the Far East, which passes through the seas of the Arctic Ocean (Kara, Laptev, East Siberian, and Chukchi Seas) and the Pacific Ocean (Bering Sea). The length of the way from the Kara Gates to the Provideniya Bay is about 5600 km. Based on the UN Convention on the Law of the Sea, there is a special regime for navigation along the NSR routes, which is under the jurisdiction of the Russian Federation [4].

The geographical location of Russia is generally favorable for the development of the logistics process on the routes of the Northern Sea Route. The Northern Sea Route is an alternative to the routes passing through the Suez and Panama canals. The distance from Murmansk to Yokohama through the Suez Canal is 24 thousand km, and through the NSR - about 11 thousand km. From St. Petersburg to Vladivostok along the Northern Sea Route - 14 thousand km, through the Suez Canal - 23 thousand km, around Africa - almost 30 thousand km. Reducing the distance allows great savings on fuel, more competent logistics, and it also reduces the payback time of ships.

Despite the obvious logistic advantages of the NSR, for various macroeconomic reasons the NSR cargo turnover has undergone dramatic changes over the past 35 years: from the maximum values reached in the Soviet era (1980s), through the deep drop in the 1990s and early 2000s, to the revival at the turn of 2010s and the new historical maximum in 2020s.

At the same time, in our view, the analysis and forecasting of the further development of the NSR cargo turnover should be carried out in the context of the ongoing global climate changes. The purpose of this work is, firstly, to review the existing literature on climatic factors affecting the functioning of the NSR, and we are interested in the dynamics of both average and extreme values of these factors; secondly, we formulate the ba-



sis for a future integrated mathematical model designed to predict the dynamics of economic indicators of NSR functioning (in particular, cargo turnover and average cost of shipping a ton of cargo) in conditions of global climate change, in order to adopt the best possible solutions in the context of climate change.

## Обзор факторов, влияющих на пропускную способность СМП, в условиях развития экономики Российской Федерации и изменения климата

Костикова О.Н., Меркин Л.А.

Научно-Технологический университет «Сириус», Федеральная территория Сириус, Россия  
E-mail: kostikovaolesya@mail.ru

**М**ы живем в эпоху глобального потепления происходящего на нашей планете. Исследования в области климатического изменения нашли свое отражение в климатических моделях, которые калибруются и уточняются. Научное сообщество сосредоточило свой интерес в вопросах глобальных изменений климата, связанных с его потеплением и по прогнозам – увеличение температуры на нашей планете только возрастает. Зимы становятся теплее, наводнения, пожары, экстремальные погодные явления сотрясают планету в разных ее частях. Положительные или отрицательные последствия климатического воздействия, происходящие в окружающей нас среде в ближайшей перспективе будут отчетливо влиять на социально – экономическую составляющую стран.

Развитие экономики регионов и стран, очевидно, в значительной степени зависит от географических и климатических факторов. В настоящей работе рассматривается взаимное влияние географических, климатических и экономических факторов на грузооборот одного из важнейших транспортных коридоров Российской Федерации – Северного морского пути (СМП).

СМП является кратчайшим морским путём между Европейской Россией и Дальним Востоком, который проходит по морям Северного Ледовитого океана (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское моря) и Тихого океана (Берингово море). Длина пути от Карских Ворот до бухты Провидения составляет около 5600 км. Исходя из Конвенции ООН по морскому праву, для плавания по трассам СМП предусмотрен особый режим, который находится в юрисдикции РФ [4].

Географическое положение России в целом благоприятствует развитию логистического процесса на трассах следования Северного морского пути. Северный морской путь является альтернативой путям, проходящим через Суэцкий и Панамский каналы. Расстояние из Мурманска в Иокогаму через Суэцкий канал составляет 24 тыс. км, а через СМП — около 11 тыс. От Санкт-Петербурга до Владивостока по Северному морскому пути - 14 тыс. км, через Суэцкий канал – 23 тыс. км, вокруг Африки – почти 30 тыс. км. Сокращение расстояния позволяет сильно экономить на топливе, вести более грамотную логистику и также это сокращает время самоокупаемости судов.

Несмотря на явные логистические преимущества СМП, в силу различных макроэкономических причин, грузооборот СМП за последние 35 лет претерпел драматические изменения: от максимальных значений, достигнутых в советскую эпоху (1980-е гг.), через глубокое падение в 1990-е и начало 2000-х гг., до возрождения в на рубеже 2010-х и новый исторический максимум в 2020-х.

При этом, с нашей точки зрения, анализ и прогнозирование дальнейшего развития грузооборота СМП должны осуществляться в контексте происходящих глобальных изменений климата. Задачей настоящей работы является, во-первых, обзор существующей литературы в отношении климатических факторов, влияющих на функционирование СМП, причем нас интересует динамика как средних, так и экстремальных значений этих факторов; во-вторых, мы формулируем основы будущей интегрированной математической модели, предназначенной для предсказания динамики экономических показателей функционирования СМП (в частности, грузооборота и средней стоимости транспортировки тонны груза) в условиях глобальных изменений климата, с целью принятия оптимальных управленческих решений при организации логистических потоков в районах СМП.

В первую очередь, глобальное потепление усилило тенденцию таяния арктического льда. Северный морской путь (СМП) будет полностью очищаться ото льда, а значит, судоходство по нему будет круглогодичным и без применения ледокольной проводки к 2050 году [1].

Отметим тот факт, что площадь очищаемой территории от ледовых образований в летний период увеличилась и стала более обширной. По наблюдениям в 70-80-е годы прошлого столетия очищение акваторий арктических морей в летний период составляла примерно 1/3 всей занимаемой ими площади, то в текущем десятилетии – площадь увеличилась до 2/3 части всей акватории. В Карском море и море Лаптевых — это событие наступает в конце июля, в Восточно - Сибирском море – в середине авгу-

ста, в юго-западной части Чукотского моря – в начале июля. Повторяемость полного очищения акваторий морей от ледовых образований, в среднем стала наступать в начале сентября. Полное очищение морей ото льда в Карском и Чукотском морях составляет 90%, в море Лаптевых – 75% и в Восточно-Сибирском море – 60% отсюда следует, что арктическая логистика – трассы Северного морского пути имеет тенденцию к улучшению и становится возможным применение различных логистических схем, которые в том числе способствуют повышению безопасности судоходства и оптимизации маршрутов следования [2].

В течение года в Арктике отмечалась преобладающая повторяемость воздушных потоков с южной составляющей, и формирование во всех месяцах положительных аномалий температуры воздуха. Наиболее высокие среднемесячные значения аномалий температуры отмечались в холодные месяцы года (октябрь-май), а низкие аномалии отмечались в тёплые месяцы (июнь-ноябрь). Западный сектор Арктики внёс наибольший вклад в формирование температурного фона. В нём преобладали наиболее крупные среднегодовые положительные аномалии температуры воздуха. Более низкие значения аномалий сформировались в 2021 г. в восточном секторе. В акватории СМП в 2021 г. во всех морях преобладал положительный фон температуры воздуха. Наиболее высокие средние годовые значения с положительными аномалиями температуры воздуха до 2-4 °С отмечались в районе морей Карского и Лаптевых, а наиболее низкие в Чукотском море 1-2 °С. По сравнению с 2020 г., понижение температурного фона произошло во всех морях российской Арктики, наибольшее понижение отмечено в Чукотском и Карском морях. Особенно ярко понижение аномалий температуры воздуха произошло в октябре-ноябре 2021 г. В соответствии с развитием атмосферных процессов в летний период 2021 г. наблюдалось быстрое и полное очищение акваторий большинства арктических морей – юго-западной части Карского, Лаптевых, западной части Восточно-Сибирского. В некоторых районах морей сохранились остаточные льды, это явилось основной особенностью осеннего сезона 2021 г. В середине сентября остаточные льды сохранялись в трёх районах СМП – в северо-восточной части Карского (23%), восточной части Восточно-Сибирского (23%) и юго-западной части Чукотского моря (6%) [2]. По статистическим данным представленным в таблице 1 приводятся статистические характеристики площади распространения морского льда морей (ПРМЛ) морей Российской Арктики в сентябре по данным NSIDC и ААНИИ (в скобках). Прежде всего, отметим, что для восточных морей отмечаются значительные расхождения между NSIDC и ААНИИ в средних многолетних оценках ПРМЛ (S). Для Чукотского моря расхождение более чем в 2 раза. Очень высокой является межгодовая изменчивость ПРМЛ для всех морей, которая близка к их средним значениям, а в Баренцевом море оценка среднеквадратического отклонения (СКО) даже превышает среднюю оценку S. По оценкам СКО заметных расхождений между NSIDC и ААНИИ нет. Также сравнительно близкие оценки отмечаются в угловых коэффициентах тренда. Вклад линейных трендов в дисперсию (R<sup>2</sup>) значений ПМЛ, исключая тренд для Баренцева моря, значителен для всех морей. Максимальный вклад дает Чукотское море (0,67 по NSIDC и 0,58 по ААНИИ). Поскольку индекс тренда не зависит от площади, то его наибольшие оценки наблюдаются в Чукотском море, т.е. здесь уменьшение ПРМЛ идет с максимальной скоростью. При этом морю с самой большой ПРМЛ (Восточно-Сибирское, NSIDC), имеющему наибольший коэффициент тренда, соответствует минимальный индекс тренда [3].

**Таблица 1.**

Статистические характеристики площади распространения морского льда морей Российской Арктики за период 1979–2021 гг. в сентябре по данным NSIDC и ААНИИ (в скобках).

Море	S, 10 <sup>6</sup> км <sup>2</sup> /год	СКО, 10 <sup>6</sup> км <sup>2</sup> /год	T <sub>r</sub> , 10 <sup>5</sup> км <sup>2</sup> /год	R <sup>2</sup>	I <sub>тp</sub>
Баренцево	0,03 (0,05)	0,046 (0,058)	-0,001 (-0,002)	0,15 (0,23)	-180,3 (-189,8)
Карское	0,20 (0,15)	0,14 (0,138)	-0,007 (-0,007)	0,41 (0,44)	-154,2 (-210,5)
Лаптевых	0,34 (0,22)	0,20 (0,155)	-0,012 (-0,008)	0,51 (0,46)	-148,0 (-164,4)
Восточно-Сибирское	0,68 (0,36)	0,35 (0,268)	-0,002 (-0,017)	0,44 (0,58)	-137,8 (-198,6)
Чукотское	0,26 (0,11)	0,18 (0,112)	-0,013 (-0,007)	0,67 (0,58)	-211,4 (-272,9)

Аппроксимация трендов, представленных в таблице 1, до нулевых значений ПРМЛ не представляет сложности. Однако при этом следует учитывать неустойчивость трендов во времени. При изменении длины временного ряда тренд может появляться, исчезать, менять свою интенсивность и даже знак [3]. В связи с этим необходимым условием является проверка степени устойчивости линейного тренда во времени. Данная проверка осуществлялась следующим образом. Помимо основного тренда за 1979–2021 гг. рассчитывались последовательно тренды за предшествующий десятилетний период, т.е. начиная с 1979–2011 гг. и заканчивая 1979–2020 гг. В результате для каждого моря за сентябрь был получен набор из 10 трендов, из которого выбирались оценки максимального и минимального трендов. Понятно, устойчивость основного тренда тем выше, чем меньше от него отличаются эти тренды [3].

В таблице 2 приводятся оценки выхода на безледный режим морей Российской Арктики на основе аппроксимации линейных трендов по данным NSIDC и ААНИИ. Следует отметить исключительно высокую устойчивость трендов ПРМЛ ААНИИ. Максимальное расхождение в оценках выхода на безледный режим по минимальному и максимальному трендам составляет всего 4 года. Самое раннее очищение от льда в сентябре происходит в Чукотском море (2016 г.), самое позднее в море Лаптевых (2026 г.) Явное лидерство Чукотского моря связано с его малой площадью и непосредственным влиянием притока теплых вод из Тихого океана через Берингов пролив [3].

**Таблица 2.**

Оценки выхода на начальный год безледного режима в сентябре морей Российской Арктики на основе аппроксимации линейного тренда по данным NSIDC и ААНИИ.

Море	NSIDC			ААНИИ		
	Мах. тренд	Основной тренд	Min. тренд	Мах. тренд	Основной тренд	Min. Тренд
Баренцево	2019	2024	2031	2022	2023	2026
Карское	2021	2028	2041	2019	2020	2020
Лаптевых	2024	2029	2040	2026	2026	2027
Восточно-Сибирское	2026	2031	2043	2020	2022	2024
Чукотское	2016	2020	2027	2012	2016	2016

Анализ межгодовой изменчивости сентябрьской ПРМЛ в морях РА показал, что довольно четкое разделение на периоды повышенной и пониженной ледовитости можно провести в 2005 г. Поэтому были рассчитаны оценки средних значений и стандартных отклонений ПРМЛ морей за периоды 1979–2004 и 2005–2012 гг. по обоим архивам, которые представлены в табл. 3. Нетрудно видеть, что согласно архиву ААНИИ расхождение в оценках как средних значений, так и СКО, огромное. Так, для Чукотского моря ледовитость в 2005–2021 гг. уменьшилась на порядок, в Карском море – в 7,1 раз. Наименьшее уменьшение произошло в море Лаптевых (3,4 раза). Изменчивость временных рядов также сильно уменьшилась. Наибольшее уменьшение отмечается в Чукотском море (4,2 раза), наименьшее – в море Лаптевых (1,6 раза). Расхождения в оценках средних и СКО по данным NSIDC также имеют место, но они значительно меньше [3].

За последние годы наметилась тенденция к увеличению объемов перевозок по Северному морскому пути. Важно отметить, что 2019 и 2020 годы ознаменовались годами Госкорпорацией «Росатом». В данный временной период были организованы экспериментальные рейсы атомного лихтеровоза «Севморпуть» для перевозки контейнеризированной рыбопродукции по Северному морскому пути. В 2019 году было перевезено 8,5 тыс. тонн в рефрижераторных контейнерах и 66 контейнеров с другими грузами из Петропавловска-Камчатского в Санкт-Петербург. В 2020 году – более 6,5 тыс. тонн в рефрижераторных контейнерах из порта Восточный и Петропавловска-Камчатского в Санкт-Петербург. Также было отмечено, что выходу на необходимую экономическую эффективность препятствует отсутствие постоянной загрузки с запада на восток для судов, осуществляющих перевозку рыбы из ДФО в центральные регионы России по Северному морскому пути, а также недостаточно развитая инфраструктура морских портов в непосредственной близости от границ Севморпути для единовременной обработки крупных партий рефрижераторных контейнеров [5].

На основании рассмотренных выше данных и климатических моделей, нами в настоящее время разрабатывается интегрированная модель динамики экономических показателей функционирования СМП в условиях изменения климата. Общие характеристики этой модели сводятся к следующему.

Строятся функции вероятностного распределения толщины льда на различных участках СМП для каждого месяца года. Параметры этих функций распределения изменяются во времени в связи с глобальным потеплением климата: математические ожидания в целом уменьшаются, а дисперсии и моменты более высокого порядка могут также и увеличиваться, что соответствует увеличению «амплитуды» экстремальных условий ледовой обстановки. Использование данного математического аппарата позволяет формулировать количественные характеристики ледовой обстановки гораздо более точно, чем традиционные качественные показатели (легкие / средние / тяжелые ледовые условия).

На основе этих функций распределения можно получать функции распределения экономических показателей функционирования СМП, в частности: проходимости СМП в целом и отдельных его участков в различные сезоны года; стоимости перевозки тонно-километра грузов различных типов (на этот показатель напрямую влияет факт наличия или отсутствия необходимости ледокольной проводки). Далее, в контексте прогнозируемых макроэкономических показателей развития экономики Российской Федерации в целом и северных регионов в частности, можно прогнозировать интегральные потребности и стоимости грузооборота по СМП и его участкам, с возможностью выявления потенциальных не-



соответствий между спросом и предложением, и оптимизации принятия управленческих решений по их устранению.

Например, помимо собственно СМП, целесообразно рассматривать транспортный коридор Большого Северного морского пути, который будет включать в себя западную часть - Архангельскую и Мурманскую области, г. Санкт-Петербург, собственно СМП (от пролива Карские Ворота до Берингова пролива), а также дальневосточную часть от границы СМП на Чукотке до Владивостока.

Наконец, отдельной целью моделирования является прогнозирование таяния льдов в Центральном арктическом бассейне, которое теоретически может привести к возможности осуществления навигации через высокие широты Арктики, по кратчайшему маршруту (дуге большого круга) между Мурманском и Беринговым проливом. Если это произойдет, это будет означать радикальные экономические, международно-правовые и геополитические изменения во всем арктическом регионе, возможные последствия которых еще предстоит изучить.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Архив новостей портала Морские вести России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.morvesti.ru/news/1679/92030/> (дата обращения 14.04.22)*
2. *Миронов Е.У., Клячкин С.В., Макаров Е.И., Юлин А.В., Афанасьева Е.В. Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправдываемости ледовых прогнозов // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 40-53. DOI:10.24412/2658-4255-2021-4-40-53.*
3. *Малинин В.Н., Вайновский П.А. К оценке сроков полного очищения морей Российской Арктики от льда в летний период // Российская Арктика. 2022. № 16. С. 08-23. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-1-08-23*
4. *Бабич С.В., Яковлева А.А. Транспортно-логистический потенциал северного морского пути в евразийском экономическом пространстве // Российская Арктика 2019, № 4. С. 5-14/*
5. *Информационный портал RO-ARCTIC [Электронный ресурс]. URL: <https://pro-arctic.ru/01/04/2021/resources/43178/> (дата обращения 14.06.22)*



# Залежные экосистемы в степном биоме России: углеродные потоки и бюджет

Голубятников Л.Л., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
E-mail: golub@ifaran.ru

Степи относятся к засушливым экосистемам, растительный покров которых сформирован в основном разнообразными травяными сообществами. На территории России степные экосистемы занимают около 1.7 млн. км<sup>2</sup> (менее 10% территории страны) и расположены между 44° и 57° N. Степной биом России образует полосу шириной до 500 км вытянутую в широтном направлении от западной границы страны до Алтая на востоке и занимает ряд межгорных котловин в Забайкальском крае, южной части Красноярского края, Иркутской области, в республиках Бурятия, Хакассия, Тыва. Степные экосистемы России подразделяются на луговые, настоящие, сухие и опустыненные.

Для степных экосистем характерен дефицит влаги, который нарастает от луговых степей к опустыненным. По данным (Мордкович, 2014) большая часть атмосферных осадков (75–85%) на степной территории России выпадает в теплый период года. Годовое количество осадков уменьшается от 430 мм в луговых степях до 150 мм в опустыненных. Испаряемость с открытой водной поверхности в степях России возрастает от 650 мм/год в луговых степях до 800 мм/год в опустыненных. В степном регионе России годовые суммы температур приземного воздуха выше 10°C находятся в диапазоне от 1900°C до 2600°C.

На значительной части степного биома сформировались почвы с высоким содержанием органического вещества – черноземы и каштановые. Высокая концентрация органического вещества в почвах степных экосистем определяет как высокий уровень их плодородия, так и значительный вес в глобальном депонировании углерода. В результате того, что в степях сформировались высоко плодородные почвы, значительная часть территории степного биома распахана и используется для выращивания сельскохозяйственных культур. Нераспаханные степные площади используются в качестве пастбищ и сенокосов (Чибилев, 2016).

Часть распаханных территорий по разным причинам на определенных этапах развития земледелия прекращали обрабатывать. Зброшенные пахотные земли образуют залежи. Изменение системы землепользования в России в 90-х гг. прошлого столетия привело к самому существенному увеличению площади залежных земель. Прекращение распашки земель в степной зоне запускает восстановительную сукцессию, в ходе которой на месте пашен начинают формироваться степные экосистемы. Время восстановления степных экосистем после снятия антропогенной нагрузки составляет от 10 до 60 лет и более, в зависимости от природных особенностей экосистемы, истории ее пахотного использования и условий восстановления (Люри и др., 2010; Смелянский, 2012).

В природных экосистемах количество фитомассы, растительных остатков и органического вещества почвы остается в среднем постоянным (Титлянова, 2000). Любые изменения в системе землепользования на определенной территории влияют на содержание и интенсивность потоков углерода в экосистемах этой территории. Перевод целинных земель в пахотные угодья приводит к снижению фитомассы и первичной биологической продукции растительного покрова, т.к. значения этих характеристик в агроэкосистемах ниже, чем в целинных экосистемах. Ежегодное изъятие растительного материала (в виде урожая), ранее служившего источником пополнения почвенного углерода, и изменение структуры почв при распашке, которая способствует усилению процессов минерализации органического вещества почвы, приводят к значительным потерям органического углерода экосистемы (Титлянова и др., 1998; Титлянова, 2000). В зависимости от климатических условий, степени и характера изменений в землепользовании через некоторое время после распашки устанавливается новый стационарный уровень содержания органического углерода в почвах (Six et al., 2002). Потери органического углерода за период переходного режима могут составлять от 10 до 40% от их начального запаса. По оценке, приведенной в работе (Титлянова и др., 1998), потери органического углерода из пахотных почв Западной Сибири за период с 1930 по 1990 гг. составили 1.12 ГтС или 29% их исходного запаса.

На залежных экосистемах в процессе восстановления степного растительного покрова возрастают его продуктивность и фитомасса как надземной, так и подземной его частей. Увеличивается количество поступающего в верхний почвенный горизонт органического вещества. В тоже время происходит обогащение органическим веществом более глубоких слоев почвы вследствие значительного увеличения количества почвенного детрита в экосистеме и более активного перемешивания растительных остатков почвенной фауной. Согласно результатам исследования (Курганова и др., 2010), при выведении пахотных почв России из сельскохозяйственного использования скорость аккумуляции углерода в бывшем пахотном слое (0–20 см) варьировала от 4.2 до 484 гС/м<sup>2</sup> в год в зависимости от типовой принадлежно-

сти почв и длительности периода восстановления, составляя в среднем  $99 \pm 14 \text{ гС/м}^2$  в год. Общее накопление углерода в почвенном слое 0–20 см вследствие изменения землепользования в 1990–2004 гг. в России составило 184–673 МтС.

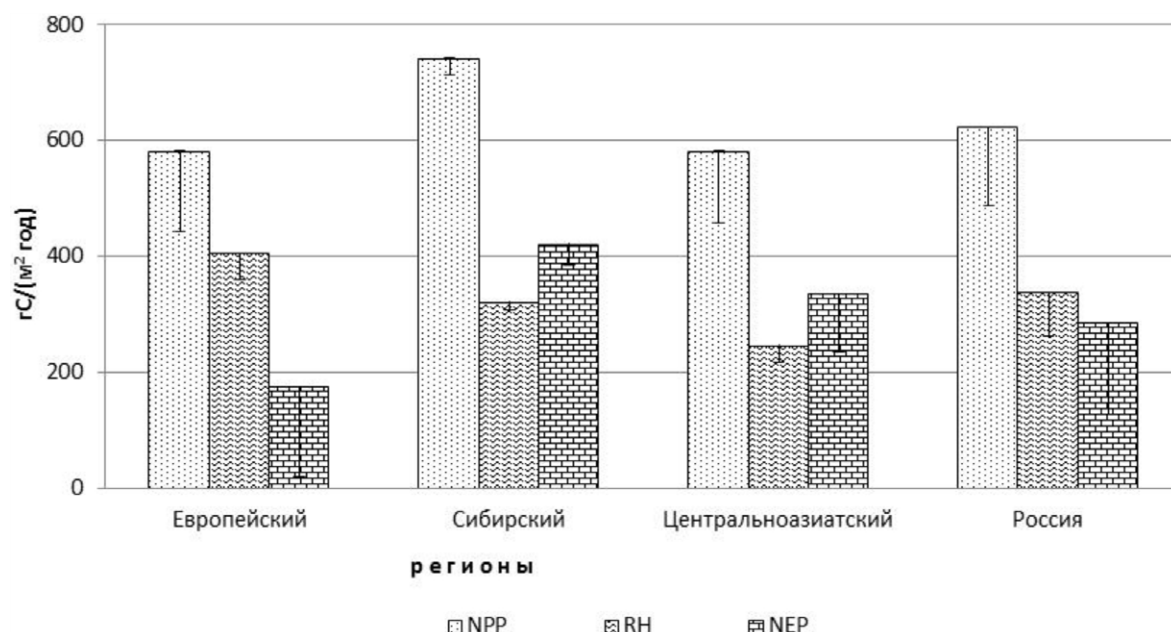
В настоящей работе оценены потоки углерода и углеродный баланс залежных экосистем степного биома России. Площади залежных степных экосистем рассчитаны на основе данных статистических отчетов о наличии и распределении земель в субъектах Российской Федерации (РФ) на 1 января 2020 года Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии и бюллетеней о состоянии сельского хозяйства РФ в 2020 году Федеральной службы государственной статистики. Оценки первичной биологической продукции исследуемых экосистем получены на основе геоинформационно-аналитического метода с использованием базы данных эмпирически измеренных значений этой величины. Оценки гетеротрофного почвенного дыхания залежей рассчитаны на основе регрессионной T&P-модели и с учетом доли гетеротрофного дыхания в общем потоке диоксида углерода из почв травяных экосистем.

Согласно выполненным расчетам, на начало 2020 г. общая площадь залежных экосистем в степных регионах России составила 177 тыс. км<sup>2</sup>. Большая часть (54%) залежных степных экосистем расположена в Азиатской части России. Общая площадь вторично-степных экосистем, которые появились на месте заброшенных пахотных земель, в Сибирском и Центральноазиатском регионах России составляют 26 и 29 тыс. км<sup>2</sup>, соответственно.

Согласно полученным результатам залежные экосистемы степного биома России ежегодно аккумулируют  $110 \pm 24 \text{ МтС}$ . Изучаемые степные экосистемы Европейского региона России депонируют  $47 \pm 11 \text{ МтСгод}^{-1}$  или 42% общего количества суммарной продуктивности залежных степных регионов России. В Центральноазиатском регионе рассматриваемые степные экосистемы абсорбируют  $30 \pm 6 \text{ МтСгод}^{-1}$  или 27% общего количества первичной биологической продукции залежей в степных регионах России. Залежные степные экосистемы Сибирского региона ежегодно депонируют  $34 \pm 1 \text{ Мт}$  атмосферного углерода или 31% общего количества первичной продукции залежей в степных регионах России.

Выполненные расчеты показали, что в результате гетеротрофного дыхания из почв залежных степных экосистем России в атмосферу ежегодно поступает  $60 \pm 14 \text{ МтС}$ . Эмиссия диоксида углерода в процессе гетеротрофного дыхания из почв рассматриваемых залежных экосистем степного биома Европейского региона составляет  $33 \pm 4 \text{ МтСгод}^{-1}$ . В Центральноазиатском регионе из исследуемых экосистем в атмосферу поступает до  $13 \pm 2 \text{ МтСгод}^{-1}$ . Залежные степные экосистемы Сибирского региона ежегодно в результате гетеротрофного дыхания эмитируют  $15 \pm 1 \text{ МтС}$  углерода.

Полученные результаты указывают на то, что залежные степные экосистемы России ежегодно депонируют около 50 МтС. Сток атмосферного углерода в залежные экосистемы степного биома Европейского, Сибирского и Центральноазиатского регионов России составляет, соответственно, 28%, 38% и 34% годового депонирования углерода залежными экосистемами.



**Рис. 1.**

Интенсивности потоков углерода в залежных экосистемах степного биома в регионах России (среднее значение и стандартное отклонение): NPP – первичная биологическая продукция, RH – гетеротрофное дыхание, NEP – углеродный баланс.

Интенсивности потоков углерода в залежных экосистемах степного биома России представлены на рис. 1. Проведенное исследование показало, что залежи степной зоны обладают высоким углероддепонирующим потенциалом, являясь значимым стоком диоксида углерода атмосферы.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФА им. А.М.Обухова РАН "Моделирование влияния изменений климата на экологические процессы и системы" (1021032424681-6), Государственного задания ФИЦ ПНЦБИ РАН (рег. № 122040500037-6), при поддержке проекта "Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически-активных веществ (Углерод в экосистемах: Мониторинг)" в рамках ФНТП в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 годы.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Швиденко А.З., Сапожников П.М. Изменение общего пула органического углерода в залежных почвах России в 1990–2004 гг. // Почвоведение. 2010. № 3. С. 361–368.
2. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А. и др. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС. 2010. 416 с.
3. Мордкович В.Г. Степные экосистемы. Новосибирск: Академическое издательство Гео. 2014. 170 с.
4. Смелянский И. Сколько в степном регионе России залежей? // Степной бюллетень. 2012. № 36. С. 4–7.
5. Титлянова А.А. Освоение лесостепной и степной зон Западной Сибири увеличило эмиссию углерода // Степной бюллетень. 2000. №8. С.35–37.
6. Титлянова А.А., Булавко Г.И., Кудряшова С.Я. и др. Запасы и потери органического углерода в почвах Сибири // Почвоведение. 1998. № 1. С. 51–59.
7. Чибилёв А.А. Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия. М., Оренбург: Институт степи РАН/РГО. 2016. 324 с.
8. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soil // Plant and Soil. 2002. V. 241. P. 155–176.

## Abandoned cropland ecosystems of steppe biome for Russia: carbon fluxes and budget

**Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.**

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

Steppes are arid grassland ecosystems. In Russia, the territory with steppe ecosystems is vast with area approximately  $1.7 \times 10^6$  km<sup>2</sup> and located between 44° N and 57° N. The steppe biome of Russia forms a strip up to 500 km wide stretching in the latitudinal direction from the western border of the country to Altai in the east and occupies a number of the intermontane depressions in the Trans-Baikal Territory, the southern part of the Krasnoyarsk Territory, the Irkutsk Region, in the Republics of Buryatia, Khakassia, Tyva. Climate in the steppe regions ranges from temperate semi-arid to sharply continental. Variability of climatic characteristics determines the zonality and contrast of the soil cover and vegetation in steppe ecosystems.

Soils with a high content of organic matter (chernozems and kastanozems) have formed on a significant part of the steppe biome. The high concentration of soil organic matter in steppe ecosystems determines both their high level of fertility and their significant contribution to global carbon sequestration. As a result of the fact that highly fertile soils have formed in the steppes, most of the steppe biome are used in agriculture as arable land, pastures and hayfields.

As a result of changes in the land use system in Russia in the 90s of the last century, large areas of the agricultural lands were abandoned in steppe biome of Russia. Steppe vegetation has restored on former croplands over the last three decades. Now secondary (restored) steppes have formed on abandoned croplands. The aim of this study is to evaluate the carbon fluxes and C–CO<sub>2</sub> balance in abandoned croplands of steppe biome in Russia.

Using a database of Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography and Federal Service for State Statistic, we have estimated the areas for abandoned croplands in steppe biome. According to our calculations, restored steppes on abandoned croplands occupy in Russia about  $177 \times 10^3$  km<sup>2</sup>.

Using the geoinformation-analytical method we estimated the mean annual biological productivity of the steppe ecosystems under study. Our calculations have shown that the restored steppe ecosystems on abandoned croplands accumulate  $110 \pm 24$  Mt C–CO<sub>2</sub> per year in Russia. The average net productivity values amount to  $622 \pm 136$  gCm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup> for these ecosystems.

Based on the T&P-model and the root contribution to the soil respiration in grass ecosystems, we have obtained the estimates for heterotrophic respiration from soils of the restored steppe ecosystems on abandoned croplands in Russia. The average value of heterotrophic soil respiration for the steppe ecosystems under study amounts to  $338 \pm 76$  gCm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>. We have estimated heterotrophic respiration from soils of these ecosystems in Russia as  $60 \pm 14$  MtC per year.

According to our estimation, the restored steppe ecosystems which were formed on abandoned croplands in Russia are a significant sink of carbon dioxide from the atmosphere. The intensity of this carbon flux in the ecosystems under study can be estimated as  $285 \pm 159$  gCm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>. The total absorption of carbon dioxide in the restored steppe ecosystems on abandoned croplands of Russia is evaluated as  $50 \pm 28$  Mt C–CO<sub>2</sub> per year.

*This work was carried out within the framework of the state assignment (reg. no. 1021032424681-6, reg. no. 122040500037-6) and project "Development of the Research and Educational Center for monitoring climate-active substances (Carbon in Ecosystems: Monitoring)" within the framework of the Federal Scientific and Technological Program in the field of environmental development of the Russian Federation and climate change for 2021-2030.*



# СОДЕРЖАНИЕ

## СЕКЦИЯ 2      МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ SESSION 2      MONITORING OF CLIMATE CHANGES OVER NORTHERN EURASIA

<b>Тенденции климатических изменений на территории северной Евразии в XX-XXI веках</b> Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Мирсаева Н.А., Шанталинский К.М., Исмагилов Н.В., Николаев А.А. ....	3
<b>Investigation of Rossby wave breaking features in the region of jet streams</b> Gochakov A.V., Antokhina O.Yu., Krupchatnikov V.N., Martynova Yu.V. ....	5
<b>Исследование особенностей обрушения волн Россби в районе струйных течений</b> Гочаков А.В., Антохина О.Ю., Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н. ....	6
<b>The seasonal and multi-year variability of turbulent exchange between the seas of the western sector of russian Arctic and the atmosphere</b> Romanenko V.A. ....	8
<b>Сезонная и многолетняя изменчивость турбулентного энергообмена между морями западного сектора российской Арктики и атмосферой</b> Романенко В.А. ....	9
<b>Assessment of thunderstorm activity above 60° North latitude in the Russian Federation</b> Kravets K.A., Nечepurenko O.E. ....	10
<b>Оценка грозовой активности выше 60° Северной широты в РФ</b> Кравец К.А., Нечепуренко О.Е. ....	11
<b>Complex analysis of the variability of the undisturbed electric field in Tomsk</b> Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M., Oglezneva M.V., Smirnov S.V. ....	13
<b>Комплексный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля в г. Томске</b> Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Смирнов С.В. ....	14
<b>Long-term changes in Siberia snow cover characteristics according to different data sets</b> Matyukhina A.A., Voropay N.N., Martynova Yu. ....	16
<b>Многолетние изменения характеристик снежного покрова в Сибири по разным наборам данных</b> Матюхина А.А., Воропай Н.Н., Мартынова Ю. ....	17
<b>Microphysical characteristics frontal cloud systems of different types with the presence of embedded convection according to CloudSat satellite</b> Zhukov D.F., Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. ....	20
<b>Микрофизические характеристики фронтальных облачных системах различных типов с наличием затопленной конвекции по данным космического аппарата CloudSat</b> Жуков Д.Ф., Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. ....	21
<b>Assessment of greenhouse gas emissions from the natural and disturbed areas in the southern part at the Priobskoye field</b> Kaverin A.A., Belkova D.D., Kaverina A.V. ....	24
<b>Оценка эмиссии парниковых газов с естественных и нарушенных участков на территории южной части Приобского месторождения</b> Каверин А.А., Белькова Д.Д., Каверина А.В. ....	25
<b>Long-term changes in hydrothermal conditions in Siberia</b> Voropay N.N., Ryzanova A.A. ....	28
<b>Многолетние изменения гидротермических условий на территории Сибири</b> Воропай Н.Н., Рязанова А.А. ....	29
<b>Verification of reconstructed total precipitation from GPM IMERG data in the south of Western Siberia</b> Kartavykh M.S., Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. ....	30
<b>Верификация восстановленных сумм осадков по данным GPM IMERG для территории юга Западной Сибири</b> Картавых М.С., Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. ....	31
<b>The cyclone activity monitoring on North Atlantic and European region based on ESIMO indicators</b> Viazilova N.A. ....	33
<b>О мониторинге циклонической активности в Северной Атлантике и европейском регионе на основе показателей ЕСИМО</b> Вязилова Н.А. ....	34
<b>Extratropical cyclones of the North Atlantic and atmospheric circulation oscillations based on reanalysis ERA</b> Vyazilova N.A., Viazilov A.E. ....	35

<b>Внетропические циклоны Северной Атлантики и колебания атмосферной циркуляции по данным реанализа ERA5</b>	
Вязилова Н.А., Вязилов А.Е. ....	36
<b>Analysis of Changes in Surface Air Temperature in the Northern Hemisphere in Different Climatic Periods</b>	
Alympieva M.A., Morozova S.V., Polyanskaya E.A. ....	38
<b>Анализ изменения приповерхностной температуры воздуха Северного полушария в различные климатические периоды</b>	
Алимбиева М.А., Морозова С.В., Полянская Е.А. ....	39
<b>Analysis of the temporal and spectral dynamics of air temperature recorded at the Mikhnevo observatory in 2021</b>	
Riabova S.A. ....	41
<b>Анализ временной и спектральной динамики температуры воздуха, зарегистрированной на обсерватории «Михнево» в 2021 г.</b>	
Рябова С.А. ....	42
<b>Distribution of Temperature and Humidity in the Atmospheric Boundary Layer over the Siberian Region</b>	
Lomakina N.Ya., Lavrinenko A.V. ....	44
<b>Распределение температуры и влажности в пограничном слое атмосферы Сибирского региона</b>	
Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В. ....	45
<b>Tendencies in the variability of climatic values in permafrost zone of Western Siberia in the XXI century</b>	
Kharyutkina E.V., Martynova Yu.V., Moraru E.I., Loginov S.V. ....	47
<b>Тенденции в изменении климатических величин в зоне многолетнемерзлых пород Западной Сибири в XXI веке</b>	
Харюткина Е.В., Мартынова Ю.В., Морару Е.И., Логинов С.В. ....	48
<b>Зависимость между разрядами молний и очагами возгораний на территории Западной Сибири за 2016-2021 гг.</b>	
Харюткина Е.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н. ....	50
<b>Relationship between lightning discharges and hotspots for the territory of Western Siberia during 2016-2021</b>	
Kharyutkina E.V., Moraru E.I., Pustovalov K.N. ....	51
<b>СЕКЦИЯ 3 КЛИМАТИЧЕСКОЕ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>	
<b>SESSION 3 CLIMATE AND WEATHER MODELING</b>	
<b>Improving the skill of seasonal SL-AV Forecasts for the Northern Eurasia through statistical correction</b>	
Khan V.M., Tishchenko V.A. ....	54
<b>Повышение успешности сезонных прогнозов ПЛАВ для региона северной Евразии посредством статистической коррекции</b>	
Хан В.М., Тищенко В.А. ....	55
<b>Implementation of SL-AV 072L96 model for long range prediction of weather anomalies</b>	
Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Travova S.V., Mzyak V.G., Rogutov V.S., Goyman G.S., Alipova K.A., Zaripov R.B. ....	57
<b>Особенности реализации модели ПЛАВ 076L96 для долгосрочного прогноза аномалий погоды</b>	
Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Шашкин В.В., Травова С.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Гойман Г.С., Алипова К.А., Зарипов Р.Б. ....	57
<b>An atmospheric boundary layer perspective on urban climates in the pan-Arctic towns</b>	
Igor Esau ....	59
<b>Numerical simulation of severe weather phenomena on the territory of Western Siberia</b>	
Zolotov S.Yu., Loginov A.S. ....	63
<b>Численное моделирование опасных погодных явлений на территории Западной Сибири</b>	
Золотов С.Ю., Логинов А.С. ....	64
<b>Numerical modeling of Arctic river heat influence on the sea ice state</b>	
Gradova M., Golubeva E. ....	66
<b>Численное моделирование влияния тепла арктических рек на состояние морского льда</b>	
Градова М.А., Голубева Е.Н. ....	67
<b>Estimation of methane fluxes to the atmosphere from the Arctic shelf seas</b>	
Malakhova V.V., Golubeva E.N. ....	69
<b>Оценка потоков метана в атмосферу из морей Арктического шельфа</b>	
Малахова В.В., Голубева Е.Н. ....	70
<b>Simulation results using the new INMCM-SibCIOM climate model</b>	
Gradov V.S., Platov G.A., Volodin E.M. ....	72
<b>Результаты моделирования с помощью новой климатической модели INMCM-SibCIOM</b>	
Градов В.С., Платов Г.А., Володин Е.М. ....	73

<b>Numerical study of the Arctic Oscillation index influence on the characteristics of atmospheric blockings</b> Borovko I.V., Gradov V.S., Krupchatnikov V.N. ....	75
<b>Численное исследование влияния индекса Арктической Осцилляции на характеристики атмосферных блокирований</b> Боровко И.В., Градов В.С., Крупчатников В.Н. ....	76
<b>A modeling study of the variability of the Siberian Arctic seas state in the 21 century</b> Golubeva E., Kraineva M. ....	78
<b>Исследование изменчивости состояния морей сибирского сектора Арктики в 21 столетии на основе численного моделирования</b> Голубева Е.Н., Крайнева М.В. ....	78
<b>Generation of a bipolar rectangular grid for simulating equatorial dynamics with a low resolution ocean model</b> Onoprienko V.A., Blagodatskikh D.V., Mortikov E.V., Yakovlev N.G. ....	81
<b>Построение дипольной прямоугольной сетки для воспроизведения экваториальной динамики океана в модели невысокого пространственного разрешения</b> Оноприенко В.А., Благодатских Д.В., Мортиков Е.В., Яковлев Н.Г. ....	82
<b>Polar lows evaluation based on the COSMO-CLM Russian Arctic hindcast</b> Platonov V., Akhtamyanyanov R. ....	83
<b>Оценка воспроизведения полярных мезоциклонов на основе модельного архива COSMO-CLM Russian Arctic hindcast</b> Платонов В.С., Ахтамьянов Р.А. ....	84
<b>Influence of ocean initial data on the quality of the INM RAS climate model seasonal hindcasts</b> Tarasevich M.A., Volodin E.M. ....	87
<b>Влияние начальных данных океана на качество ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН</b> Тарасевич М.А., Володин Е.М. ....	88
<b>Evaluation of the INM RAS climate model skill in decadal predictions for up to 5 years</b> Vorobyeva V.V., Volodin E.M., Gritsun A.S. ....	91
<b>Исследование качества декадных прогнозов климатической модели ИВМ РАН на срок до 5 лет</b> Воробьева В.В., Володин Е.М., Грицуц А.С. ....	92
<b>Влияние концентрации ядер конденсации на прогноз радиационных потоков в моделях COSMO-Ru и ICON-Ru</b> Хлестова Ю.О., Чубарова Н.Е., Шатунова М.В., Ривин Г.С. ....	95
<b>The impact of cloud condensation nuclei number concentration on the numerical prediction of radiative fluxes in the COSMO-Ru and ICON-Ru models</b> Khlestova Yu.O., Chubarova N.E., Shatunova M.V., Rivin G.S. ....	96
<b>Ensemble medium-range weather forecast system based on the SLAV model</b> Mizyak V., Tolstykh M., Alipova K.A., Rogutov V.S., Goiman G.S. ....	98
<b>Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ</b> Мизьяк В.Г., Толстых М.А., Алипова К.А., Рогутов В.С., Гойман Г.С. ....	99
<b>Short-range forecast of the risk level of hazardous convective weather events in the Ural region with publication on the online web map service</b> Shikhov A.N., Abdullin R.K., Tarasov A.V., Perminov S.I. ....	102
<b>Краткосрочный прогноз уровней риска возникновения конвективных опасных явлений погоды на Урале с публикацией на картографическом веб-сервисе</b> Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Тарасов А.В., Перминов С.И. ....	103
<b>Numerical modeling of extreme ice loads on the example of freezing rain in Vladivostok</b> Leonov I.I., Cheresnyuk S.V. ....	105
<b>Численное моделирование сверхнормативных гололедных нагрузок на примере замерзающего дождя во Владивостоке</b> Леонов И.И., Черешнюк С.В. ....	106
<b>Influence of Novaya Zemlya bora on processes in the ocean and heat exchange with the atmosphere: results of ocean-atmosphere-sea-waves coupled modeling</b> Shestakova A.A. ....	108
<b>Влияние новоземельской боры на процессы в океане и теплообмен с атмосферой: результаты совместного моделирования океана, атмосферы и морского волнения</b> Шестакова А.А. ....	108
<b>Prediction of habitat suitability for <i>Gentianopsis barbata</i> (Froel.) Ma in the Southern Urals under climate change</b> Kutueva A.G., Fedorov N.I., Muldashev A.A. ....	111

<b>Прогноз влияния климатических изменений на пригодность условий местообитания <i>Gentianopsis barbata</i> (Froel.) Ма на Южном Урале</b> Кутуева А.Г., Федоров Н.И., Мулдашев А.А. ....	112
<b>Verification of the simplified snow cover model on the surface of a mountain glacier during the accumulation season</b> Drozhdov E.D., Tоропов P.A., Turkov D.V. ....	114
<b>Верификация упрощенной модели снежного покрова на поверхности горного ледника в сезон аккумуляции</b> Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Турков Д.В. ....	115
<b>СЕКЦИЯ 4      СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЁВ</b> <b>SESSION 4      STRUCTURE AND DYNAMICS OF GEOPHYSICAL BOUNDARY LAYERS</b>	
<b>The influence of suspended snow particles on the friction velocity in large-eddy simulation model</b> Bychkova V.I., Mortikov E.V., Debolskiy A.V. ....	118
<b>Влияние взвешенных снежных частиц на расчет скорости трения в вихреразрешающей модели</b> Бычкова В.И., Мортиков Е.В., Дебольский А.В. ....	119
<b>Improvements of PBL scheme in INMCM5 climate model</b> Debolskiy A.V., Mortikov E.V., Glazunov A.V., Volodin E.M. ....	122
<b>Улучшения в параметризации турбулентного перемешивания в модели INMCM5</b> Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Володин Е.М. ....	123
<b>A simple description of turbulent transport in a stably stratified fluid and its application to modeling the thermohydrodynamics and biogeochemistry of inland waters</b> Gladskikh D.S., Mortikov E.V., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I., Ostrovsky L.A. ....	126
<b>Простое описание турбулентного переноса в устойчиво стратифицированной жидкости и его применение к моделированию термогидродинамики и биогеохимии внутренних водоемов</b> Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Соустова И.А., Троицкая Ю.И., Островский Л.А. ....	127
<b>Submesoscale structures in the boundary layer of the atmosphere: dynamics and influence on dust emission from the underlying surface of arid zones in the south of Russia</b> Vazaeva N., Chkhetiani O., Kramar V. ....	129
<b>Субмезомасштабные структуры в пограничном слое атмосферы: динамика и влияние на эмиссию пыли с подстилающей поверхности аридных зон юга России</b> Вазеева Н.В., Чхетиани О.Г., Крамар В.Ф. ....	130
<b>Численное моделирование и исследование переходных периодов атмосферного пограничного слоя</b> Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В. ....	132
<b>Numerical modeling of the transitional periods in atmospheric boundary layer</b> Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V., Glazunov A.V. ....	132
<b>Experimental study of atmospheric boundary layer vertical structure with contact and remote measurements</b> Artamonov A., Repina I., Gavrikov A. ....	135
<b>Экспериментальные исследования вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя с использованием контактных и дистанционных измерений</b> Артамонов А.Ю., Репина И.А., Гавриков А.В. ....	136
<b>Modelling of the atmospheric boundary layer over sea ice in the presence of leads</b> Chechin D.G., Lüpkes C., Debolskiy A.V., Makhotina I.A., Shestakova A.A. ....	138
<b>Моделирование атмосферного пограничного слоя над морским льдом при наличии разводий</b> Чечин Д.Г., Люпкес К., Дебольский А.В., Махотина И.А., Шестакова А.А. ....	139
<b>Parametrization of energy exchange between atmospheric boundary layer and urbanized underlying surface</b> Kolennikova M.A., Varentsov M. I., Stepanenko V.M. ....	141
<b>Методы параметризации энергообмена пограничного слоя атмосферы с урбанизированной подстилающей поверхностью</b> Коленникова М.А., Варенцов М.И., Степаненко В.М. ....	142
<b>Experimental studies of the effect of thermal inhomogeneity on turbulence characteristics (coherent structures) in an urban canyon in summer and winter</b> Pashkin A.D., Repina I.A., Stepanenko V.M., Bogomolov V.Yu., Smirnov S.V., Tel'minov A. ....	144
<b>Экспериментальные исследования влияния термической неоднородности на характеристики турбулентности (когерентные структуры) в городском каньоне в летний и зимний период</b> Пашкин А.Д., Репина И.А., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Смирнов С.В., Тельминов А.Е. ....	145
<b>The contribution of synoptic scale fluctuations to the variability of turbulent heat fluxes on the surface of the oceans in the Northern hemisphere from 1979 to 2018</b> Moraru E.I., Loginov S.V. ....	147



<b>Вклад флуктуаций синоптического масштаба в изменчивость турбулентных потоков тепла на поверхности океанов Северного полушария с 1979 по 2018 гг.</b>	
Морару Е.И., Логинов С.В.....	148

**СЕКЦИЯ 5 СОСТАВ АТМОСФЕРЫ, ПЕРЕНОС ЗАГРЯЗНЕНИЙ И ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**  
**SESSION 5 AIR COMPOSITION, POLLUTION TRANSPORT AND CLIMATE CHANGE**

<b>Numerical modeling of the influence of wind speed and temperature inversions on the air quality in the city</b>	
Starchenko A.V., Kizhner L.I., Danilkin E.A., Shelmina E.A., Prokhanov S.A., Odintsov S.L., Strebkova E.A. ....	151
<b>Численное моделирование влияния скорости ветра и температурных инверсий на качество воздуха в городе</b>	
Старченко А.В., Кижнер Л.И., Данилкин Е.А., Шельмина Е.А., Проханов С.А., Одинцов С.Л., Стребкова Е.А.....	152
<b>On estimation of the emissions of atmospheric gas impurities and turbulence parameters in the simulation of impurities transport processes</b>	
Davydova M., Elanskiy N.F., Mukhartova Yu., Postyliakov O., Ponomarev N., Chekina V., Shilkin A. ....	154
<b>Об оценке эмиссий атмосферных газовых примесей и параметров турбулентности при моделировании процессов переноса примесей</b>	
Давыдова М.А., Еланский Н.Ф., Мухартова Ю.В., Постыляков О.В., Пономарев Н.А., Чекина В.Н., Шилкин А.В. ....	155
<b>Model study of the heterogeneous vegetation cover effect on the transport of gas polluting emissions in the atmospheric surface layer</b>	
Mukhartova Yu., Novikova E., Olchev A. ....	157
<b>Модельное исследование влияния неоднородного растительного покрова на перенос газовых загрязняющих выбросов в приземном слое атмосферы</b>	
Мухартова Ю.В., Новикова Е.В., Ольчев А.В. ....	158
<b>Tritium activity in precipitation in Tomsk</b>	
Markelova A.N., Kalashnikova D.A., Simonova G.V. ....	160
<b>Активность трития в атмосферных осадках г. Томска</b>	
Маркелова А.Н., Калашникова Д.А., Симонова Г.В.....	161
<b>Use of synchrotron <math>\mu</math>XRF to study microparticles in lake bottom sediments, on the example of searching for traces of the «millennium eruption» in the Lake Bele (Khakassia) varves sediments</b>	
Darin A.V., Darin F.A., Sorokoletov D.S., Rakshun Ya.V., Rogozin D.Yu. ....	162
<b>Использование синхротронного <math>\mu</math>РФА для изучения микрочастиц в озерных донных отложениях, на примере поиска следов «извержения тысячелетия» в варвных осадках оз.Беле (Хакасия)</b>	
Дарьин А.В., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Рогозин Д.Ю. ....	163
<b>Using ERA5 Reanalysis to Interpret Data from Laser Polarization Sounding of Aircraft Contrails</b>	
Loktyushin O.Yu., Bryukhanov I.D., Pustovalov K.N., Ni E.V., Samokhvalov I.V. ....	165
<b>Использование реанализа ERA5 для интерпретации данных лазерного поляризационного зондирования конденсационных следов самолетов</b>	
Локтюшин О.Ю., Брюханов И.Д., Пустовалов К.Н., Ни Е.В., Самохвалов И.В. ....	166
<b>Analysis of large-scale wildfires and atmospheric parameters in Yakutia in 2021</b>	
Tomshin O.A., Solovjev V.S.....	168
<b>Анализ катастрофических лесных пожаров и параметров атмосферы в Якутии в 2021 г.</b>	
Томшин О.А., Соловьев В.С. ....	169
<b>The influence of wind speed on the variations of the daily average carbon monoxide concentration in the Moscow air basin</b>	
Alexandrov G.G., Ginzburg A.S. ....	172
<b>Влияние скорости ветра на вариации среднесуточной концентрации угарного газа в воздушном бассейне Москвы</b>	
Александров Г.Г., Гинзбург А.С. ....	172
<b>Atmospheric electrical variability in the Tunkinsky District of the Republic of Buryatia</b>	
Oglezneva M.V., Nagorskiy P.M., Pustovalov K.N., Sat A.A. ....	174
<b>Электрическая изменчивость атмосферы в Тункинском районе Республики Бурятия</b>	
Оглезнева М.В., Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Сат А.А. ....	175
<b>Long-range transport impacts on near-surface methane seasonal variations in Arctic</b>	
Shtabkin Yu.A., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Fedorova E.I. ....	178
<b>Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации приземного метана в Арктике</b>	
Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Федорова Е.И.....	178
<b>The 2020 spring lockdown's impact on Moscow air quality in comparison with some other regions of the world</b>	
Khlestova Yu.O., Ginzburg A.S. ....	181

<b>Влияние весеннего карантина 2020 года на качество воздуха в Москве по сравнению с другими регионами мира</b>	
Хлестова Ю.О., Гинзбург А.С. ....	182
<b>Changes in the oxygen content in the near-surface air of Moscow</b>	
Ginzburg A.S., Vinogradova A.A., Pomelova M.A. ....	184
<b>Современные изменения содержания кислорода в приземном воздухе Москвы</b>	
Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Помелова М.А. ....	185
<p><b>СЕКЦИЯ 6</b> ОТКЛИК НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ</p> <p><b>SESSION 6</b> RESPONSE OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF NORTHERN EURASIA TO CLIMATE CHANGE</p>	
<b>Seasonal and long-term variation in water chemistry of drained part of the Great Vasyugan Mire</b>	
Kharanzhevskaya Yu.A. ....	187
<b>Особенности гидрохимического режима осушенного участка Васюганского болота</b>	
Харанжевская Ю.А. ....	188
<b>Distribution of species of the Bryum Hedw. genus on the foreland of the Maly Aktru glacier (Severo-Chuisky range, Central Altai Mountains)</b>	
Chernova N.A., Belova M.N. ....	190
<b>Распространение видов р. Bryum Hedw. на форленде ледника Малый Актру (Северо-Чуйский хребет, Центральный Алтай)</b>	
Чернова Н.А., Белова М.Н. ....	191
<b>Ecological peculiarities of Cypripedium guttatum Sw. in the Southern Evenkia («Tunguskiy» reserve)</b>	
Raiskaya Yu.G., Timoshok E.N. ....	193
<b>Экологические особенности Cypripedium guttatum Sw. в Южной Эвенкии (Заповедник «Тунгусский»)</b>	
Райская Ю.Г., Тимошок Е.Н. ....	194
<b>Response of Boreal conifers on recent climatic changes inferred from oxygen and hydrogen stable isotopes in tree rings</b>	
Taynik A.V., Zharkov M.S., Fonti M.V., Trushkina T.V., Barinov V.V., Bondarev, A.I., Kirdeyanov A.V., Arzac A., Saurer M., Churakova (Sidorova) O.V. ....	196
<b>Отклик бореальных хвойных на текущие изменения климата по данным стабильных изотопов кислорода и водорода в годичных кольцах</b>	
Тайник А.В., Жарков М.С., Фонтини М.В., Трушкина Т.В., Баринин В.В., Бондарев А.И., Кирдянов А.В., Арцак А., Саурер М., Чуракова (Сидорова) О.В. ....	197
<b>ГИС инвентаризация приледниковых озер Алтая в пределах России, Монголии и Китая</b>	
Бородавко П.С., Корф Е.Д., Мельник М.А., Волкова Е.С., ....	199
<b>GIS inventory of glacial lakes in the Altai Mountains within Russia, Mongolia and China</b>	
Borodavko P.S., Korf E.D., Melnik M.A., Volkova E.S. ....	200
<b>Lithological-geochemical and biological response of lacustrine sedimentation systems to weather-climatic changes (on the example of Gorny Altai lakes)</b>	
Darin A.V., Babich V.V., Markovich T.I., Darin F.A., Rakshun Ya.V., Карачурина С.Е., Rudaya N.A. ....	202
<b>Литолого-геохимический и биологический отклик систем озерного осадкообразования на погоднo-климатические изменения (на примере озер Горного Алтая)</b>	
Дарьин А.В., Бабич В.В., Маркович Т.И., Дарьин Ф.А., Ракшун Я.В., Карачурина С.Е., Рудая Н.А. ....	203
<b>Features of absorption of elements by plants in post-pyrogenic and neighboring sites of the Bakcharsky mire</b>	
Gashkova L.P. ....	206
<b>Особенности поглощения элементов растениями на постпирогенных и соседних с ними участках Бакчарского болота</b>	
Гашкова Л.П. ....	207
<b>Spatial and temporal dynamics of swamp forest in the marginal part of Bakchar bog</b>	
Sinyutkina A. ....	208
<b>Пространственно-временная динамика заболоченного леса в окраинной части Бакчарского болотного массива</b>	
Синюткина А.А. ....	209
<b>Effect of snow cover depth on the temperature sensitivity of soil respiration during the cold season</b>	
Khoroshaev D.A., Kurganova I.N., Lopes de Gerenuy V.O. ....	212
<b>Влияние высоты снежного покрова на температурную чувствительность дыхания почв в зимний период</b>	
Хорошаев Д.А., Курганова И.Н., Лопес де Герену В.О. ....	213
<b>Dynamics of decomposition of peat-forming plants in drained and pyrogenic peatlands</b>	
Nikonova L.G., Golovatskaya E.A. ....	215

<b>Динамика разложения растений-торфообразователей в осушенных и пирогенных торфяниках</b> Никонова Л.Г., Головацкая Е.А. ....	216				
<b>Многолетняя пространственно-временная изменчивость потоков метана на примере южнотаежного черноольшаника в Тверской области</b> Ильясов Д.В., Глухова Т.В., Вомперский С.Э., Суворов Г.Г., Головченко А.В., Манучарова Н.А., Степанов А.Л. ....	219				
<b>Spatio-temporal variability of methane fluxes in boreo-nemoral alder swamp (European Russia): results of eight years of observations</b> Ilyasov D.V., Glukhova T.V., Vompersky S.E., Suvorov G.G., Golovchenko A.V., Manucharova N.A., Stepanov A.L. ....	219				
<b>Temporal variability of carbon dioxide, sensible and latent heat fluxes in forests and peatland ecosystems</b> Satosina E.M., Olchev A.V. ....	222				
<b>Временная изменчивость потоков диоксида углерода явного и скрытого тепла в лесных и болотных экосистемах</b> Сатосина Е.М., Ольчев А.В. ....	223				
<b>Estimation of the of the cold period contribution to the annual CO<sub>2</sub> flux from soils in a temperate continental climate</b> Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A., Zhmurin V.A. ....	225				
<b>Оценка вклада холодного периода в формирование годового потока CO<sub>2</sub> из почв в условиях умеренно-континентального климата</b> Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А., Жмурин В.А. ....	226				
<b>Climatic and antropogenic changes of Don river flow</b> Grechushnikova M.G., Varenцова N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Povalishnikova E.S., Kharlamov M.A. ....	229				
<b>Климатические и антропогенные изменения стока в бассейне р. Дон</b> Гречушников М.Г., Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Повалишников Е.С., Харламов М.А. ....	230				
<b>Impact of long-term changes in hydrometeorological conditions of the Mozhaysk reservoir on the winter phytoplankton</b> Kalenichenko V., Erina O., Goncharov A., Puklakov V. ....	232				
<b>Влияние многолетних изменений гидрометеорологических условий Можайского водохранилища на зимнее фитопланктонное сообщество</b> Калениченко В.М., Ерина О.Н., Гончаров А.В., Пуклаков В.В. ....	233				
<b>Peculiarities of tree-ring series in larch affected by the ground fire of 1908</b> Sapozhnikova V.A., Ageev B.G., Gruzdev A.N., Savchuk D.A. ....	235				
<b>Особенности серий колец лиственниц, пораженных низовым пожаром 1908 года</b> Сапожникова В.А., Агеев Б.Г., Груздев А.Н., Савчук Д.А. ....	236				
<b>Применение метода Blue Intensity для дендроклиматических исследований территории Сибири</b> Агапова В.В., Кирдянов А.В., Арсак А. ....	239				
<b>Application of the Blue Intensity method for dendroclimatic studies of Siberia</b> Agapova V.V., Kirdyanov A.V., Arzac A. ....	240				
<b>Peculiarities of forming and functioning of Siberian stone pine forests of Altai</b> Timoshok E.N., Timoshok E.E., Raiskaia Yu.G. ....	242				
<b>Особенности формирования и функционирования кедровых лесов Алтая</b> Тимошок Е.Н., Тимошок Е.Е., Райская Ю.Г. ....	243				
<b>Changes in climate and vegetation of the Nomto-Nur lake basin (East Sayan) over the past 700 years</b> Volchatova E.V., Bezrukova E.V. ....	245				
<b>Изменения климата и растительности бассейна озера Номто-Нур (Восточный Саян) за последние 700 лет</b> Волчатова Е.В., Безрукова Е.В. ....	246				
<b>The effect of pyrogenic influence on the temperature sensitivity of soil organic matter mineralization</b> Filimonenko E., Uporova M., Kolmakov A., Soromotin A., Kurganova I., Lopes-De-Gerenyu V. ....	248				
<b>Оценка влияния пирогенного воздействия на температурную чувствительность минерализации органического вещества почв</b> Филимоненко Е.А., Упорова М.А., Колмаков А.А., Соромотин А.В., Курганова И.Н., Лопес-Де-Гереню В.О. ....	249				
<table border="1" style="background-color: #d4b87d; width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;"><b>СЕКЦИЯ 7</b></td> <td style="padding: 5px;">ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СУШИ: НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><b>SESSION 7</b></td> <td style="padding: 5px;">PROCESSES ON THE LAND SURFACE: OBSERVATIONS, MODELS AND DATA ASSIMILATION</td> </tr> </table>		<b>СЕКЦИЯ 7</b>	ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СУШИ: НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ	<b>SESSION 7</b>	PROCESSES ON THE LAND SURFACE: OBSERVATIONS, MODELS AND DATA ASSIMILATION
<b>СЕКЦИЯ 7</b>	ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СУШИ: НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ				
<b>SESSION 7</b>	PROCESSES ON THE LAND SURFACE: OBSERVATIONS, MODELS AND DATA ASSIMILATION				
<b>Nonlinear wave diffusion of heat into soils according to the Bakcar swamp and the Badar send deposit massif (Tunka basin)</b> Lapina L.E., Dyukarev E.A., Voropay N.N. ....	251				

<b>Нелинейная волновая диффузия тепла в почву по данным Бакcharского болота и массива песчаных отложений Бадар (Тункинская котловина)</b>	
Лапина Л.Э., Дюкарев Е.А., Воропай Н.Н. ....	251
<b>On the ratio of the amplitudes of annual fluctuations in air temperature and soil surface temperature</b>	
Lapina L.E., Uspensky I.M. ....	254
<b>О соотношении амплитуд годовых колебаний температуры воздуха и температуры поверхности почвы</b>	
Лапина Л.Э., Успенский И.М. ....	255
<b>A spatio-temporal river water level model based on satellite altimetry data (Kolyma River case study)</b>	
Semenova N.K., Zakharova E.A., Krylenko I.N., Sazonov A.A., Lisina A.A. ....	257
<b>Построение пространственно-временной модели уровня воды на основе альтиметрических данных (на примере реки Колыма)</b>	
Семенова Н.К., Захарова Е.А., Крыленко И.Н., Сазонов А.А., Лисина А.А. ....	258
<b>Influence of meteorological conditions on the maximum spring floods of mountain rivers</b>	
Kirsta Y.B., Troshkova I.A. ....	261
<b>Влияние метеорологических условий на максимумы весенних половодий горных рек</b>	
Кирста Ю.Б., Трошкова И.А. ....	262
<b>Climate-driven changes in the inflow to the Mozhaysk reservoir</b>	
Akhmerova N., Ayzel G., Erina O., Sokolov D. ....	264
<b>Климатически обусловленные изменения притока воды в Можайское водохранилище</b>	
Ахмерова Н.Д., Айзель Г.В., Ерина О.Н., Соколов Д.И. ....	265
<b>Influence of drainage on seasonal freezing depth of peat soils</b>	
Dyukarev E.A., Preis Yu.A. ....	267
<b>Влияние осушения на глубину сезонного промерзания торфяных почв</b>	
Дюкарев Е.А., Преис Ю.И. ....	268
<b>Seasonal runoff forecasting using a combination of hydrological and weather forecasts</b>	
Moreido V.M., Gartsman B.I. ....	270
<b>Прогнозирование речного стока на месяц и сезон путем совмещения гидрологических и метеорологических прогнозов</b>	
Морейдо В.М., Гарцман Б.И. ....	270
<b>Modelling the dynamics of snow cover formation in the field areas of the European territory of Russia</b>	
Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Shurkhno E.A. ....	274
<b>Моделирование динамики формирования снежного покрова на полевых участках Европейской территории России</b>	
Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А. ....	275
<b>Scenario assessments of changes in terrestrial water balance components in the 21st century</b>	
Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev E.E. ....	277
<b>Сценарные оценки изменения составляющих водного баланса суши в XXI веке</b>	
Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. ....	278
<b>Spatio-temporal variability of statistical characteristics of atmospheric turbulence in urban conditions</b>	
Drozd I.D., Gavrikov A.V., Stepanenko V.M., Repina I.A., Artamonov A.Yu., Pashkin A.D. ....	280
<b>Пространственно-временная изменчивость статистических характеристик турбулентности в условиях городской застройки</b>	
Дрозд И.Д., Гавриков А.В., Степаненко В.М., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д. ....	282
<b>CN composition of the soils at the southern part of Priobskoye field</b>	
Belkova D.D., Kaverin A.A., Zarov E.A. ....	283
<b>Содержание углерода и азота в почвах территории южной части Приобского месторождения</b>	
Белькова Д.Д., Каверин А.А., Заров Е.А. ....	284
<b>Applicability of the description of the hydrophysical characteristics of soils by various pedotransfer functions</b>	
Ryazanova A.A., Bogomolov V.Yu. ....	286
<b>Применимость описания различными педотрансферными функциями гидрофизических характеристик почвогрунтов</b>	
Рязанова А.А., Богомолов В.Ю. ....	286
<b>Калибровка речного стока в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ с использованием искусственных нейронных сетей</b>	
Чернышев Р.В., Криницкий М.А., Степаненко В.М., Медведев А.И. ....	288
<b>Calibration of river runoff in the INM RAS-MSU land surface model using artificial neural networks</b>	
Chernyshev R., Krinitskiy M., Stepanenko V., Medvedev A. ....	290
<b>Sampling methods for dissolved methane in Arctic lakes</b>	
Shornikova A.V., Fedorova I.V. ....	292



<b>Методы отбора проб метана в арктических озерах</b>	
Шорникова А.В., Федорова И.В. ....	293
<b>Approximation of the soil temperature by piecewise-continuous function</b>	
Lapina L.J., Kaverin D.A., Pastuhov A.V., Chebanova M.K. ....	295
<b>Аппроксимация температуры почв кусочно-непрерывными функциями</b>	
Лапина Л.Э., Каверин Д.А., Пастухов А.В., Чебанова М.К. ....	295
<b>Geo-information cartographic analysis of forest landscape dynamics in the mountainous framing of the Kurai depression (Southeast Altai)</b>	
Karabatov D.A. ....	298
<b>Геоинформационно-картографический анализ динамики лесных ландшафтов горного обрамления Курайской впадины (юго-восточный Алтай)</b>	
Карабатов Д.А. ....	299
<b>The influence of external parameters on the evapotranspiration in the INM RAS – MSU land surface model</b>	
Medvedev A., Stepanenko V., Bogomolov V. ....	300
<b>Влияние внешних параметров на величину эвапотранспирации в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ</b>	
Медведев А.И., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю. ....	301
<b>Validation of the temperature of sandy soil in the block of the active layer of the land of the INM RAS-MSU model according to field observations</b>	
Shuklina E.S., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Bogomolov V.Yu. ....	304
<b>Валидация температуры песчаной почвы в блоке деятельного слоя суши модели ИВМ РАН-МГУ по данным натурных наблюдений</b>	
Шуклина Е.С., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А., Богомолов В.Ю. ....	305
<b>Modeling of the hydrological regime of the river Tom</b>	
Razarenova A.D., Krylenko I.N. ....	307
<b>Моделирование водного режима реки Томи</b>	
Разаренова А.Д., Крыленко И.Н. ....	308
<b>Numerical simulation of methane emission from the Rybinsk reservoir with the one-dimensional LAKE 3.0 model and the model sensitivity study</b>	
Lomov V.A., Stepanenko V.M., Gladskikh D.S., Mortikov E.V. ....	311
<b>Численное воспроизведение потоков метана из Рыбинского водохранилища с помощью одномерной модели LAKE 3.0 и исследование модели на чувствительность к внешним параметрам</b>	
Ломов В.А., Степаненко В.М., Гладских Д.С., Мортиков Е.В. ....	312
<b>Spread of a cold wave in the snow during the preparation of ski slopes by salting</b>	
Frolov D.M., Rzhantsyn G.A., Cherkasova V.A., Sokratov S.A., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E. ....	314
<b>Распространение волны холода в снегу при подготовке горнолыжных трасс засаливанием</b>	
Фролов Д.М., Ржаницын Г.А., Черкасова В.А., Сократов С.А., Кошурников А.В., Гагарин В.Е. ....	314
<b>Expected response of Lake Glubokoe thermal regime to climate warming during the 21st century</b>	
Erina O., Tereshina M., Sokolov D. ....	317
<b>Ожидаемый отклик характеристик термического режима озера Глубокого на потепление климата в течение XXI века</b>	
Ерина О.Н., Терешина М.А., Соколов Д.И. ....	317
<b>Parameterization of the groundwater level and subsurface runoff in the land surface model</b>	
Bogomolov V., Dyukarev E., Stepanenko V., Ryazanova A.A. ....	320
<b>Параметризация уровня грунтовых вод и подповерхностный стока в модели деятельного слоя суши</b>	
Богомолов В.Ю., Степаненко В.М., Дюкарев Е.А., Рязанова А.А. ....	320

<b>СЕКЦИЯ 8</b>	ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, РЕГИОНАЛЬНЫЕ РИСКИ И СОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ
<b>SESSION 8</b>	EXTREME CLIMATIC EVENTS, REGIONAL RISKS AND SOCIO-ECONOMIC IMPACTSE

<b>Digital twin for environment</b>	
Viazilov E.D. ....	323
<b>Цифровой двойник для окружающей среды</b>	
Вязилов Е.Д. ....	324
<b>Impact of Moscow city on intense summer precipitation</b>	
Yarinich Yu.I., Varentsov M.I., Platonov V.S., Stepanenko V.M. ....	326
<b>Влияние Москвы на интенсивные летние осадки</b>	
Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С., Степаненко В.М. ....	327

<b>Joint anomalies in the atmospheric and lithospheric processes in the Tomsk region</b> Cheredko N.N., Malyshkov S.Yu., Gordeev V.F., Tartakovskiy V.A., Kabanov M.M. ....	329
<b>Совместные аномалии в атмосферных и литосферных процессах в Томской области</b> Черedyko H.H., Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Тартаковский В.А., Кабанов М.М. ....	330
<b>Extreme summer precipitation in Siberia in 2015–2021</b> Cheredko N.N., Volkova M.A., Kuzhevskaya I.V., Chursin V.V. ....	332
<b>Экстремальные летние осадки в Сибири в 2015–2021 гг.</b> Черedyko H.H., Волкова М.А., Кужевская И.В., Чурсин В.В. ....	333
<b>Analysis of flood-hazardous situations in the mountainous areas of the Baikal region</b> Kichigina N.V., Voropay N.N. ....	336
<b>Анализ паводкоопасных ситуаций в горных районах Байкальского региона</b> Кичигина Н.В., Воропай Н.Н. ....	336
<b>Thunderstorm activity over Western Siberia</b> Gorbatenko V.P., Gromova A.V., Zhuravlev G.G. ....	339
<b>Грозовая активность над Западной Сибирью</b> Горбатенко В.П., Громова А.В., Журавлев Г.Г. ....	339
<b>Research of the accident rate connection for the electric grid with climatic factors for the European territory of Russia</b> Voronkova E.M. ....	342
<b>Исследование связи аварийности электросетевого хозяйства с климатическими факторами для Европейской территории России</b> Воронкова Е.М. ....	342
<b>Features of convective cloud systems that caused windthrow in the forest zone of European Russia and Ural region based on Meteosat satellite images</b> Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Yarinich Yu.I. ....	345
<b>Особенности конвективных облачных систем, вызывающих ветровалы в лесной зоне Европейской территории России и Урала, по спутниковым данным Meteosat</b> Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ярынич Ю.И. ....	346
<b>Using ERA5 reanalysis data to refine climate maps for the electric power industry</b> Nesviatipaska A.I., Chereshnyuk S.V., Leonov I.I. ....	349
<b>Использование данных реанализа ERA5 для уточнения карт климатического районирования для электроэнергетики</b> Несвятипаска А.И.1, Черешнюк С.В.2, Леонов И.И.1,2, ....	349
<b>Meteorological conditions for the use of ground heat for cooling low-rise buildings</b> Vasilets E.A., Pischalnikova E.V. ....	351
<b>Метеорологические условия использования тепла грунта для охлаждения малоэтажных зданий</b> Василец Е.А., Пищальникова Е.В. ....	352
<b>Features of power grid accidents from the wind loads on the example of PJSC Rosseti of the Center and the Volga Region</b> Loktionov O.A., Zabelin M.A. ....	354
<b>Особенности аварийности линий электропередачи от воздействия ветровых нагрузок на примере ПАО «Россети Центра и Приволжья»</b> Локтионов О.А.1, Забелин М.А.2, ....	355

**СЕКЦИЯ 9** ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ  
ИНФРАСТРУКТУРА РЕГИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
**SESSION 9** INSTRUMENTAL AND INFORMATION AND MEASURING INFRASTRUCTURE  
OF A REGIONAL ENVIRONMENTAL STUDY

<b>Multichannel geophysical recorder for monitoring processes in the earth's crust and geophysical exploration</b> Malyshkov S.Yu., Gordeev V.F., Krutikov V.A., Shtalin S.G., Polivach V.I. ....	358
<b>Многоканальный геофизический регистратор для мониторинга процессов в земной коре и геофизической разведки</b> Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Крутиков В.А., Шталин С.Г., Поливач В.И. ....	359
<b>Monitoring of greenhouse gases fluxes at scientific-researcher field station Mukhrino, Khanty-Mansiysk</b> Dmitrichenko A.A., Dyukarev E.A. ....	361
<b>Организация мониторинга потоков парниковых газов на научно-исследовательской полевой станции «Мухрино», Ханты-Мансийск</b> Дмитриченко А.А., Дюкарев Е.А. ....	362
<b>Microclimate monitoring network based on Soil-Atmosphere Measurement Complexes</b> Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Voropay N.N. ....	365

<b>Сеть микроклиматического мониторинга на базе атмосферно-почвенных измерительных комплексов</b> Дюкарев Е.А., Кураков С.А., Воропай Н.Н. ....	366
<b>Determination of cumulus clouds based on continuous automatic measurements of global horizontal irradiance using an unshaded pyranometer</b> Zolotov S. Yu., Zuev S.V. ....	368
<b>Определение кучевой облачности на основе непрерывных автоматических измерений суммарной радиации с помощью незатененного пиранометра</b> Золотов С.Ю., Зуев С.В. ....	369
<b>Instrumentation of meteorological observations in IMCES SB RAS</b> Tikhomirov A.A., Korolkov V.A., Kobzev A.A. ....	371
<b>Метеорологические наблюдения и их приборное обеспечение в ИМКЭС СО РАН</b> Тихомиров А.А., Корольков В.А., Кобзев А.А. ....	372
<b>Efficient Compression in the Logger of Measurement Data of a Sonic Anemometer-Thermometer about Atmospheric Turbulence and Software Implementation of their Processing</b> Bogushevich A.Ya. ....	382
<b>Эффективное сжатие в логгере данных измерений ультразвукового анемометра-термометра об атмосферной турбулентности и программная реализация их обработки</b> Богушевич А. Я. ....	383
<b>Experimental multisensor oriented pyranometer</b> Zuev S.V. ....	385
<b>Опытный образец многоэлементного ориентированного пиранометра</b> Зуев С.В. ....	386

**СЕКЦИЯ 10** ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РЕГИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
**SESSION 10** INFORMATION COMPUTATIONAL INFRASTRUCTURE OF A REGIONAL ENVIRONMENTAL STUDY

<b>Детализация климатических трендов, оцененных методом квантильной регрессии с использованием данных наблюдений</b> Стерин А.М., Лавров А.С. ....	389
<b>Detailing of climate trends estimated by quantile regression using observational data</b> Sterin A.M., Lavrov A.S. ....	390
<b>Meteo+ software system for accumulation, systematization and analysis of the results of modeling short-term meteorological forecasts</b> Privezentsev A.I., Danilkin E.A., Shelmina E.A., Prokhanov S.A., Kizhner L.I., Fazliev A.Z., Starchenko A.V. ....	392
<b>Программная система Meteo+ для накопления, систематизации и анализа результатов моделирования краткосрочных метеорологических прогнозов</b> Привезенцев А.И., Данилкин Е.А., Шельмина Е.А., Проханов С.А., Кижнер Л.И., Фазлиев А., Старченко А.В. ....	393
<b>Calculation of the anthropogenic heat flux during the heating season in a metropolis (on the example of St. Petersburg)</b> Frolkis V., Evsikov I. ....	395
<b>Расчет антропогенного потока тепла за период отопительного сезона в мегаполисе (на примере Санкт-Петербурга)</b> Фролькис В.А., Евсиков И.А. ....	396
<b>Creation of dendrochronological databases for monitoring regional environmental changes in the steppe belt of South Siberia</b> Taynik A.V., Myglan V.S., Barinov V.V., Vakhnina I.L., Oidupaa O.Ch. ....	398
<b>Создание дендрохронологических баз данных для мониторинга региональных изменений окружающей среды в степном поясе Южной Сибири</b> Тайник А.В., Мыглан В.С., Баринов В.В., Вахнина И.Л., Ойдупаа О.Ч. ....	399
<b>Web-mapping application for analysis of meteorological conditions and thermal comfort in Moscow megacity</b> Varentsov M.I., Samsonov T.E., Shurygina A.A., Kargashin P.E., Yarinich Y.I., Konstantinov P.I. ....	402
<b>Картографическое веб-приложение для анализа метеорологических условий и термического комфорта в Московском мегаполисе</b> Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Шурыгина А.А., Каргашин П.Е., Ярынич Ю.И., Константинов П.И. ....	403
<b>Introduction to North Eurasian Thermal Comfort Indices Dataset (NETCID): New Gridded Database for the Biometeorological Studies</b> Konstantinov P.I., Varentsov M.I., Shartova N.V. ....	406

<b>Разработка базы данных для исследования условий термического комфорта на территории Северной Евразии – North Eurasian Thermal Comfort Indices Dataset (NETCID): New Gridded Database for the Biometeorological Studies</b>	
Константинов П.И., Варенцов М.И., Шартова Н.В. ....	406
<b>Software package for reconstruction of ground-based snow observation data</b>	
Martynova Yu.V. ....	407
<b>Программный комплекс для восстановления данных наземных наблюдений за состоянием снежного покрова</b>	
Мартынова Ю.В. ....	408
<b>Development of a multispectral complex for monitoring the state of vegetation and soils</b>	
Guryleva A.V., Machikhin A.S., Batshev V.I., Kryukov A.V., Fomin D.S., Gresis V.O., Fomin D.S., Zolotukhina A.A., Bukova V.I. ....	409
<b>Разработка мультиспектрального комплекса мониторинга состояния растительности и почв</b>	
Гурылева А.В., Мачихин А.С.2, Батшев В.И., Крюков А.В., Фомин Д.С., Гресис В.О., Фомин Д.С., Золотухина А.А., Букова В.И. ....	411
<b>Study of the phase state of precipitation based on ERA 5 reanalysis</b>	
Pischalnikova E.V., Kalinin N.A., Sviyazov E.M., Zayakina M.A. ....	413
<b>Изучение фазового состояния осадков на основе реанализа ERA5</b>	
Пищальникова Е.В., Калинин Н.А., Свиязов Е.М., Заякина М.А. ....	414
<b>Подход к автоматизации аналитической обработки пространственных данных для климатических исследований</b>	
Окладников И.Г., Титов А.Г. ....	416
<b>Approach to automation of spatial data processing for climate research</b>	
Okladnikov I., Titov A. ....	417
<b>Development of a simulation approach towards representation of the natural climate variability for energy modeling</b>	
Fedotova E. ....	419
<b>Разработка подхода к учету естественной климатической изменчивости при моделировании энергетических систем</b>	
Федотова Е.В. ....	420
<b>Creation of a prototype digital twin of a local forest area, as an element of the climate monitoring system</b>	
Kanev A.I., Yakubov A.R., Chumachenko S.I., Terekhov V.I. ....	423
<b>Создание прототипа цифрового двойника локального участка леса, как элемента системы климатического мониторинга</b>	
Канев А.И., Якубов А.Р., Чумаченко С.И., Терехов В.И. ....	424
<b>Automatic meteorological station dataset storage based on PostgreSQL DBMS and approach to providing online access to them</b>	
Titov A.G., Bogomolov V.Yu. ....	425
<b>Организация хранения данных автоматизированных метеорологических комплексов в СУБД PostgreSQL и обеспечение доступа к ним</b>	
Титов А.Г., Богомолов В.Ю. ....	425
<b>СЕКЦИЯ 11 ПРОГРАММА «БУДУЩЕЕ ЗЕМЛИ» И ИНИЦИАТИВА «БУДУЩЕЕ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ»</b>	
<b>SESSION 11 FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE</b>	
<b>Relationship of cold air outbreaks characteristics in the Russian Arctic with cyclonic activity and leading modes of climatic variability</b>	
Narizhnaya A.I., Chernokulsky A.V., Akperov M.G. ....	429
<b>Связь характеристик холодных вторжений в Российской Арктике с циклонической активностью и ведущими модами климатической изменчивости</b>	
Нарижная А.И.1, Чернокульский А.В.1,2, Акперов М.Г.1 ....	430
<b>Review of factors affecting the capacity of the NSR in the context of economic development of the Russian Federation and climate change</b>	
Kostikova O.N., Merkin L.A. ....	432
<b>Обзор факторов, влияющих на пропускную способность СМП, в условиях развития экономики Российской Федерации и изменения климата</b>	
Костикова О.Н, Меркин Л.А. ....	433
<b>Залежные экосистемы в степном биоме России: углеродные потоки и бюджет</b>	
Голубятников Л.Л., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О. ....	437
<b>Abandoned cropland ecosystems of steppe biome for Russia: carbon fluxes and budget</b>	
Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. ....	439
Содержание.....	441