

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований  
и Красноярского краевого фонда поддержки научной  
и научно-технической деятельности

# **РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Материалы международной научной конференции

Научный редактор  
Е.А. Ваганов

Красноярск  
СФУ  
2014

**УДК 528.8**  
**ББК 26.8с51**  
**Р 326**

**Редакционная коллегия:**

Ваганов Евгений Александрович — академик РАН, д-р. биолог. наук, ректор СФУ;  
Цибульский Геннадий Михайлович — д-р. техн. наук, профессор, директор ИКИТ СФУ, заведующий кафедрой "СИИ";  
Носков Михаил Валерианович — д-р. физ-мат. наук, профессор;  
Кашкин Валентин Борисович — д-р. техн. наук, профессор;  
Харук Вячеслав Иванович — д-р. биолог. наук, профессор, заведующий кафедрой "ГИС";  
Маглинец Юрий Анатольевич — канд. техн. наук, профессор, руководитель НУЛ"ИПКМ".

Р 326 Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы международной науч. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. за вып. А.В. Машукова – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 366 с.  
ISBN 978-5-7638-3109-2 (экспресс-издание)

Сборник содержит научные статьи, подготовленные на основе материалов Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли»: современные и перспективные системы регионального дистанционного зондирования, методы и алгоритмы обработки изображений, мониторинг окружающей среды, природных и антропогенных объектов и явлений.

Конференция проходила в городе Красноярске, в институте космических и информационных технологий Сибирского федерального университета с 23 по 26 сентября 2014г.

Цель конференции – обсуждение проблематики построения и развития региональных систем дистанционного зондирования Земли из космоса и их роли в решении социально-экономических задач регионов.

В статьях сохранен авторский стиль.

Полная версия материалов опубликована на сайте Научной библиотеки СФУ и РУНЭБ.

**УДК 528.8**  
**ББК 26.8с51**

© Сибирский федеральный университет, 2014  
© Институт космических и информационных технологий СФУ, 2014

ISBN 978-5-7638-3109-2 (экспресс-издание)

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

УДК 528.8.04, 528.88

## ВОЗМОЖНОСТИ И ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОГО СЕРВИСА ВЕГА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ РЕГИОНАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Е. А. Лупян<sup>(1)</sup>, С. А. Барталев<sup>(1)</sup>, В. А. Толпин<sup>(1)</sup>, Ю. С. Крашенинникова<sup>(1)</sup>,  
А. Ю. Оксюкевич<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГБУН «Институт космических исследований Российской академии наук»

<sup>(2)</sup>ООО "ИКИЗ"

e-mail: [info@smis.iki.rssi.ru](mailto:info@smis.iki.rssi.ru), [org@iki-z.ru](mailto:org@iki-z.ru)

Работа посвящена обсуждению возможностей спутникового сервиса Вега для организации регионального дистанционного мониторинга. В статье обсуждаются основные возможности сервиса, обеспечивающего сегодня пользователям не только быстрый и удобный доступ к большим объемам постоянно и оперативно обновляющейся информации, но и достаточно развитый инструментарий для ее анализа.

*Ключевые слова: дистанционный мониторинг, спутниковые технологии наблюдения Земли, экологический мониторинг, методы обработки данных, спутниковые данные, распределенные информационные системы, региональный мониторинг/*

### **Введение**

Спутниковые системы дистанционного мониторинга сегодня являются одним из наиболее эффективных и действенных методов получения информации о состоянии различных природных и антропогенных объектов. Следует отметить, что в последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в развитии методов и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Именно в этот период появились и стали активно использоваться комплексы наблюдения Земли нового поколения появление которых открыло новую эру спутникового дистанционного зондирования и позволило, в том числе и в России, создать принципиально новые, высоко автоматизированные технологии работы с данными ДЗЗ [1]. Это позволило начать активно создавать и внедрять как специализированные системы дистанционного мониторинга, ориентированные на решение задач контроля конкретных явлений и процессов, так и региональные системы мониторинга, обеспечивающие наблюдение и контроль различных процессов и явлений в пределах одной территории. При этом во многих случаях для региональных систем стало выгодно не строить свои специальные технологии для решения задач мониторинга конкретных групп объектов и явлений, а использовать уже созданные и развивающиеся в рамках специализированных систем мониторинга подходы, информационные продукты и услуги. Эффективность этого подхода мы постарались продемонстрировать в настоящей работе на примере анализа возможностей использования специализированного информационного сервиса ВЕГА для решения задач регионального дистанционного мониторинга.

### **Основные возможности и особенности спутникового сервиса Вега**

Сервис ВЕГА создан, поддерживается и развивается в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) как универсальный инструмент, ориентированный на работу со спутниковыми данными и результатами их обработки при решении задач исследования и мониторинга растительного покрова. Сервис был

создан и введен в эксплуатацию в 2011 году. В настоящее время на базе него созданы системы ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru/>), которая в основном ориентирована на решение задач исследования растительного покрова в рамках различных научных проектов, и ВЕГА-Pro (<http://pro-vega.ru/>), в основном используемая для решения прикладных задач, связанных с мониторингом лесной и сельскохозяйственной растительности.

Основной задачей системы ВЕГА является предоставление пользователям удобного удаленного доступа к постоянно пополняющимся архивам спутниковых данных и различным информационным продуктам, получаемым на их основе. При этом пользователям системы предоставляются не только возможности удобного поиска, выбора и получения архивной и оперативной информации, но и различные инструменты для ее анализа. Сервис ВЕГА создан и развивается, в первую очередь, как инструмент, позволяющий с наименьшими затратами анализировать информацию о состоянии растительного покрова, полученную на основе спутниковых данных как в отдельных точках или объектах (полях), так и на уровне регионов. Достаточно подробно с различными возможностями системы ВЕГА можно познакомиться в работах [2–3].

Сервис рассчитан на работу как с долговременными, так и оперативными пополняющимися архивами данных по всей территории Северной Евразии. Кроме собственных архивов данных сервис обеспечивает также возможность онлайн работы со спутниковой информацией, свободно предоставляемой различными информационными системами. Например, геопорталом Роскосмоса (<http://gptl.ru/>) [4], обеспечивающим, в частности, представление информации, получаемой на основе данных российских аппаратов ДЗЗ. ВЕГА обеспечивает также возможность работы и с различной сопутствующей информацией (например, статистическая, картографическая и метео- информация), необходимой для анализа состояния растительного покрова. Основные виды информации, предоставляемые системой из своих архивов пользователям, а также и регламенты их поступления в систему, приведены, в частности, в работе [3].

Система ВЕГА позволяет оперировать не только исходными спутниковыми изображениями, но и очищенными от шумов и влияния облачности временными композитами. Без таких данных невозможно проведение анализа временной динамики растительного покрова. Для создания таких продуктов были разработаны полностью автоматизированные методы обработки данных, позволившие как сформировать долговременные архивы однородных данных, так и обеспечить постоянное автоматическое обновление информации [1, 3, 5]. В системе имеется возможность работы с не реже, чем ежегодно обновляющимися картами растительного покрова, в том числе с картами растительного покрова, картами пахотных земель, картами земель, занятых озимыми культурами, картами земель, занятых парами и др. Особо следует отметить, что система ВЕГА организована таким образом, что она имеет полностью автоматизированные процедуры обработки данных на всех уровнях. Это позволяет получать однородную, максимально объективную информацию по всей территории, независимую от субъективного мнения отдельных специалистов, а также облегчает ее практическое использование. ВЕГА рассчитана на возможность распределенной работы с данными, в ней на основе различных web-технологий и технологии GEOSMIS [5] созданы интерфейсы позволяющие:

- проводить поиск и формировать наборы различных спутниковых данных;
- проводить анализ пространственных данных (картографический web-интерфейс);
- строить и анализировать пространственные, временные и спектральные ряды спутниковых измерений и результатов их обработки;

- автоматически формировать различные информационные продукты, характеризующие отклонения, наблюдающиеся в растительном покрове от нормальных, среднемноголетних значений;
- создавать различные пространственные объекты, вести их БД, производить для них расчет различных осредненных значений вегетационных индексов;
- анализировать различные табличные данные;
- автоматически формировать отчетные формы и бюллетени.

Отметим также, что формирование различных информационных продуктов, отчетов и бюллетеней возможно осуществлять с различным уровнем интеграции информации, т. е. информация может быть получена как по отдельной точке, так и осредненная по заданному объекту (полю), району или региону.

Кроме этого, в системе ВЕГА имеется достаточно развитый набор программных интерфейсов, обеспечивающих онлайн-предоставление данных в другие информационные системы. ВЕГА фактически обеспечивает возможность как автоматической, так и интерактивной работы с постоянно и оперативно пополняющимися архивами спутниковых данных и результатов их обработки. Естественно, такой инструмент может быть использован для организации работы с дистанционными данными по любому региону Северной Евразии.

### **Задачи регионального мониторинга, для решения которых могут быть использованы возможности спутникового сервиса ВЕГА**

Опыт эксплуатации системы ВЕГА показал, что предоставляемые ею информационные продукты и инструменты анализа данных могут быть использованы для решения следующих задач, возникающих при проведении регионального мониторинга:

- задачи мониторинга состояния лесных ресурсов;
- задачи мониторинга сельскохозяйственных земель;
- контроль влияния на растительный покров хозяйственной деятельности;
- оценка состояния и изменений животного мира региона (контроль кормовой базы);
- контроль последствий неблагоприятных природных явлений, в том числе наводнений;
- контроль и анализ динамики растительного покрова региона, связанной с крупномасштабными климатическими изменениями;
- контроль крупномасштабных комплексных изменений растительного покрова, вызванных хозяйственной деятельностью в регионе.

Перечисленные задачи и направления, конечно, не исчерпывают всех возможных задач, для решения которых в настоящее время может использоваться информация, предоставляемая системой ВЕГА. В докладе приведены конкретные примеры использования информационных продуктов системы для решения конкретных задач регионального дистанционного мониторинга.

### **Заключение**

Опыт использования системы ВЕГА для решения различных задач [2,6,7,8] показал, что она является готовым инструментом, который может быть использован в различных системах регионального мониторинга. Отметим также, что опыт развития различных специализированных и региональных систем на основе системы ВЕГА, информация о которых приведена, в частности, на сайте Созвездие-ВЕГА (<http://sozvezdie-vega.ru/>), позволяет также утверждать, что сервис может быть основой для создания и развития региональных систем дистанционного мониторинга. В случаях же когда в регионе уже создана система дистанционного мониторинга, она может

использовать сервис ВЕГА, как достаточно хороший источник постоянно обновляющейся информации.

Работа по созданию и развитию спутникового сервиса ВЕГА выполнялась при поддержке РАН (тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164), Фонда "Сколково" и гранта РФФИ 13-07-12116 офи\_м. В состав сервиса ВЕГА входят информационные продукты, отражающие повреждения наземных экосистем пожарами, полученные при поддержке гранта РФФИ 13-05-41420 РГО\_а. Временные ряды карт растительного покрова России, предоставляемые сервисом, и методики анализа динамики покрытой лесом площади выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389).

#### **Список литературы**

1. Лупян Е.А., Саворский В.П., Шокин Ю.И., Алексанин А.И., Назиров Р.Р., Недолужко И.В., Панова О.Ю. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 21–44.
2. Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности ("Вега") // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
3. Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7 (306). С. 581–586.
4. Носенко Ю.И., Лошкарев П.А. Единая территориально-распределенная информационная система ДЗЗ – проблемы, решения, перспективы (часть 1) // Геоматика. 2010. № 3. С. 35–43.
5. Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.
6. Барталев С.А., Ершов Д.В., Лупян Е.А., Толпин В.А. Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
7. Уваров И.А., Ершов Д.В., Крылов А.М., Барталев С.А., Лупян Е.А. Информационная система космического мониторинга санитарного состояния лесов ВЕГА-лесопатолог // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 171–182.
8. Смагин С.И., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Бурцев М.А., Верхотуров А.Л., Гирина О.А., Ефремов В.Ю., Крамарева Л.С., Прошин А.А., Толпин В.А. Информационная система работы с данными спутниковых наблюдений региона Дальнего Востока России для проведения научных исследований в различных областях знаний // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 1. С. 277–291.

## **РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ**

Б. И. Беляев

НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко»

Белорусского государственного университета

e-mail: [remsens@mail.ru](mailto:remsens@mail.ru)

Описываются многолетние исследования природных образований Земли в оптическом диапазоне длин волн. Рассматриваются результаты разработки и создания приборов и видеоспектральных систем наземного, авиационного и космического базирования для изучения земной поверхности спектральными методами, лабораторные и полетные калибровки аппаратуры.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, авиакосмические системы, калибровки приборов и систем, спектрометры, спектрорадиометры.*

### **Введение**

Измерение, преобразование и анализ физических параметров световых полей объектов составляет основу дистанционных оптических методов изучения природных образований. Измеряемыми параметрами в этих исследованиях являются: пространственные, временные и угловые зависимости энергетических, спектральных и поляризационных характеристик поля излучения Земли и объектов на ее поверхности и в атмосфере.

Методы и системы дистанционного зондирования, использующие видеоспектральную информацию об объектах, находят все более широкое применение в научных исследованиях, в экономике (ГИС и производственно-хозяйственная инфраструктура), в сельском и лесном хозяйстве, экологии, в отслеживании и контроле чрезвычайных ситуаций (пожары, наводнения, природные и техногенные катастрофы) и т.д.

В данной работе описывается системный подход развития основных элементов аэрокосмического мониторинга природных образований (методы, аппаратура, метрология, результаты обработки и представления данных), необходимых для эффективного решения как фундаментальных, так и прикладных задач.

### **Спектрометры и спектрорадиометры для дистанционной диагностики состояния сред и объектов**

В настоящее время в НИИПФП БГУ разработаны, созданы и широко используются в натурных экспериментах микропроцессорные спектрометрические модули (МС). Создано несколько модификаций модулей МС. В модулях с МС-02 по МС-07 использовалась оптическая схема Эберта – Фасти на спектральный диапазон 0,4–0,8 мкм со спектральным разрешением 7,0 нм.

Исходя из опыта разработки спектрополяризационных методов диагностики состояния различных объектов и создания малогабаритной бортовой и полевой оптоэлектронной аппаратуры дистанционного зондирования, в НИИПФП БГУ были разработаны и изготовлена линейка многофункциональных приборов от МС-08 до МС-12 с комплектом специальных насадок и специальным программным обеспечением. Приборы (в комплекте с ПК) можно использовать для проведения

измерений в лабораторных, наземных, полевых условиях, а также с борта летательных аппаратов [1].

Основные характеристики спектрорадиометров сведены в таблице.

**Таблица**

**Основные характеристики спектрорадиометров**

Характеристики	МС-08	МС-09 (10)	МС-11 (12)
Спектральный диапазон, нм	350-1050	340-1070	350-1070
Спектральное разрешение, нм	2	1,2	2
Число каналов	1024	2048	3648
Детектор	Фотодиодная линейка	ПЗС линейка	ПЗС линейка
Диспергирующий элемент, (штр./мм)	Многосекционная вогнутая решетка, (120)	Многосекционная вогнутая решетка, (120)	Многосекционная вогнутая решетка, (120)
Вес оптического модуля, кг	4,0	3,7	3,2

Для расширения функциональных возможностей средств ДЗЗ и повышения точности диагностики состояния объектов в НИИПФП БГУ разработан и создан широкодиапазонный полевой спектрорадиометр ПСР-02 на диапазон 0,35–2,5 мкм со спектральным разрешением 2 нм в области 0,35-1,05 мкм и 10 нм для поддиапазона 1,05-2,5 мкм.

С помощью созданных приборов проведен большой объем исследований по выявлению связей между оптическими характеристиками и физическими параметрами изучаемых объектов. Исследованы связи оптических характеристик внутренних водоемов с уровнем эвтрофирования, содержанием фитопланктона и минеральных взвесей. Разработаны методики определения уровня минерального питания сельскохозяйственных растений, оценки фитосанитарного состояния посевов картофеля, определения биомассы зерновых культур [1].

### **Спектрально-энергетические наземные и полетные калибровки приборов и систем**

Повышение требований к точности измерения радиометрических характеристик приемных датчиков оптоэлектронных приборов обусловлена усложнением и расширением круга задач, решаемых методами дистанционного оптического зондирования, и необходимостью корректного сопоставления данных, получаемых различными приборами.

В НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ создан метрологический комплекс «Камелия-М» в соответствии с поверочной схемой средств измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). Он предназначен для высокоточной аттестации (калибровки) различной спектрометрической и видеоспектральной аппаратуры, а также для аттестации различных источников и приемников излучения в рабочем спектральном диапазоне от 0,35 до 2,5 мкм. Комплекс «Камелия-М» включает в себя: монохроматический осветитель; диффузные излучатели; белый осветитель; образцовый осветитель (опорный источник); спектрокомпаратор; систему регистрации излучения.

Основными операциями при калибровке аппаратуры на комплексе «Камелия-М» являются: определение рабочего спектрального диапазона; определение пороговых значений СПЭЯ и динамического диапазона; определение спектральной чувствительности по абсолютным значениям СПЭЯ.

После создания, наземной калибровки и запуска оптоэлектронных съемочных систем, предназначенных для долговременного функционирования в условиях космического полета, встает важнейшая задача абсолютных радиометрических

калибровок систем на борту космического носителя. Калибровка приборов на орбите и валидация данных космических съемок необходимы для эффективной эксплуатации космических аппаратов и полноценного использования космической информации для практических задач. Для осуществления полетных калибровок нами разработана методика многоуровневых измерений тестовых участков полигона БГУ «Западная Березина», включающая квазисинхронные измерения спектральных отражательных характеристик на трех уровнях: наземном, авиационном и космическом и методики совместной тематической обработки спектров и изображений, позволяющие увеличить точность классификации подстилающих поверхностей за счет значительного увеличения количества спектральных каналов [1].

Разработаны методики калибровки рабочих эталонов метрологического комплекса фотометрической калибровки съемочных систем с большой входной апертурой до 1000 мм с помощью переносного компаратора – высокоточного спектрометра ПВС-02. Разработана схема передачи единицы СПЭЯ от Государственного эталона ГЭТ 86-89 Российской Федерации к рабочему эталону «Камелии-М», затем – к съемочным системам космического базирования.

### **Исследование характеристик природных образований с авиационных носителей и из космоса**

В рамках государственной научно-технической программы «Леса Беларуси и их рациональное использование» в НИИПФП БГУ был разработан, создан и испытан авиационный видеоспектральный комплекс ВСК-2, который предназначен для оперативного контроля состояния лесных ресурсов с борта авиационных носителей. С помощью ВСК-2 регистрируются одновременно три спектрозональных (спектрополяризационных) изображения, обзорные телевизионные изображения и спектр высокого разрешения (1024 канала в области 350–1150 нм) в отдельных точках трассы (4–6 спектров на одно изображение сцены). Разработана методика получения, обработки и анализа данных. В течение ряда лет проводились дистанционные измерения с борта вертолета Ми-2 государственного предприятия «Беллесавиа» РБ.

Следующей системой авиационного мониторинга территорий является авиационная система контроля АСК-ЧС [2], которая предназначена для определения масштабов и оценки последствий от ЧС различного уровня. Основные научно-технические задачи, решаемые с помощью АСК-ЧС в интересах МЧС РБ: оперативное построение картосхем тепловых полей лесных, торфяных пожаров и других объектов в условиях сильной задымленности, с координатной привязкой очагов горения, определение масштабов пожаров и последствий от них; определение масштабов утечек из нефте- и продуктопроводов, оценка их последствий; построение картосхем повреждений от ураганов; построение картосхем затопленных территорий и оценка последствий от наводнений. Система АСК-ЧС была установлена на самолете Ан-2 МЧС РБ и до настоящего времени эффективно используется для решения задач предупреждения и ликвидации ЧС.

Еще одна авиационная спектрозональная система АВИС высокого пространственного и спектрального разрешения предназначена для регистрации спектрозональных, монохромных и тепловых изображений земной поверхности при авиационном мониторинге. АВИС предназначена для осуществления съемок объектов и территорий с авиационных носителей типа Ан-2, оборудованных специальным люком и гиролатформой с высот от 100 до 2000 м. АВИС обеспечивает: регистрацию ИК изображений в диапазоне длин волн 7,5-13 мкм с числом элементов изображения 640 × 480; регистрацию спектрозональных изображений в диапазоне длин волн 400-900 нм с числом элементов изображения 33 Мпкс; регистрацию спектров высокого

разрешения в диапазоне 400-900 нм. Система АВИС эксплуатируется в ГП «Беллесавиа» МЧС РБ.

Тематические карты, на которых на исходное спектрально-зональное изображение наложены отдельные классы, окрашенные в условные контрастные цвета, являются конечным продуктом оперативного дистанционного мониторинга лесных участков. В ходе проведения съемок системами ВСК-2, АСК-ЧС и АВИС получены тематические картосхемы с выделением основных классов лесных территорий для целого ряда лесничеств РБ. Результаты компьютерной классификации сравнивались с таксационными описаниями в базе данных «Лесные ресурсы». Корреляция результатов классификации и описаний ГИС «Лесные ресурсы» во всех случаях достаточно высокая и составляет 75–95 %.

Космические исследования подстилающих поверхностей проводились нашими приборами с борта ОНС «Салют-4» -6» -7». С 1988 г. на борту орбитальной станции «Мир» функционировала микропроцессорная система регистрации, накопления и обработки видеоспектральной информации «Гемма-2 видео» разработанная и созданная в НИИПФП БГУ. С системой «Гемма-2-видео» была проведена обширная серия космических экспериментов по геоэкологическим исследованиям спектральных отражательных характеристик различных типов подстилающих поверхностей и атмосферы Земли [1].

В НИИПФП БГУ совместно с Институтом географии РАН по заказу РКК «Энергия» разработана и изготовлена фотоспектральная система ФСС [3], предназначенная для регистрации спектров отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн 350–1050 нм, однозначно «привязанных» к цветным изображениям высокого пространственного разрешения с борта российского сегмента МКС в космическом эксперименте «Ураган». С августа 2010 г. по настоящее время всеми экспедициями на МКС проводятся регулярные съемки аппаратурой ФСС спектров и изображений различных участков земной поверхности при различных условиях освещения и наблюдения. Получен большой объем информации по многим регионам земного шара. Ведется обработка данных.

Логическим развитием системы ФСС явилась разработанная и созданная в НИИПФП БГУ видеоспектральная система ВСС, также предназначенная для проведения измерений характеристик отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн от 400 до 950 нм на служебном модуле Российского сегмента МКС при выполнении мониторинга земной поверхности в ходе проведения научно-прикладных исследований в космическом эксперименте «Ураган». В результате применения разработанной нами методики декомпозиции и последующей интерполяции спектров, применяемой к совокупности данных, получаемых ВСС, последняя по информативности будет близка к видеоспектрометрам и это дает возможность применять методы классификации, основанные на совместном использовании спектральной, пространственной (текстурной) и угловой информации. Система ВСС успешно прошла все испытания и готова к отправке на МКС.

### **Заключение**

Представленные в статье комплексные исследования оптико-спектральных характеристик природных образований и их связи с параметрами изучаемых объектов с помощью созданных приборов и систем дистанционного зондирования использовались для диагностики состояния различных сред и объектов. Все описанные приборы и комплексы прошли всесторонние испытания на различных носителях и используются в различных организациях и ведомствах РБ и РФ.

### Список литературы

1. Беляев Б.И., Катковский Л.В. Оптическое дистанционное зондирование: монография. Минск: БГУ, 2006. 455 с. (монография).
2. Катковский Л.В., Хвалец С.В., Шукайло В.Г., Сизиков А.С. Особенности распознавания зон ЧС по их спектральным характеристикам на примере АСК-ЧС // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2013. №2 (34). С. 66–80.
3. Беляев Б.И., Катковский Л.В., Сосенко В.А. Дистанционные методы и аппаратура для исследования Земли из космоса // Наука и инновации. 2013. № 5 (123). С. 15–18.

УДК 528.8:629.78, 535.361

## АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. ИТОГИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

В. В. Белов

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН

e-mail: [belov@iao.ru](mailto:belov@iao.ru)

В работе рассмотрены проблемы необходимости и путей учета влияния атмосферы на характеристики оптических изображений земной поверхности, наблюдаемой из космоса. Приведена информация о существующих зарубежных пакетах программ и разработок в том направлении в ИОА СО РАН.

*Ключевые слова:* атмосферная коррекция, спутниковые изображения, рассеяние.

Доступ к широкому спектру данных мониторинга окружающей среды (атмосферы, земной поверхности, включающей сушу, океаны, водостоки) из космоса дистанционными средствами в оптическом и радиодиапазоне длин волн организовать несложно, если использовать Интернет и соответствующие информационные ресурсы. Нет формальных препятствий для организации прямой связи со спутниковыми приборами-зондировщиками. Для этого достаточно иметь средства на приобретение отечественных или зарубежных наземных станций приема спутниковой информации, программного обеспечения и иметь коллективы квалифицированных специалистов в области информационных технологий, геоинформационных систем и соответствующих предметных областей. Такие центры на региональном, ведомственном и Федеральном уровне созданы, действуют [1–3]. Поставляется ими информация в ограниченной области приложений (наиболее известные из них – мониторинг лесных пожаров, контроль паводковой ситуации, создание карт и оценка биоресурсов и т. д.), но не всегда она используется в масштабах России или даже в отдельных ее областях. Одна из причин этого в том, что в ряде случаев к этой информации не высок уровень доверия.

Один из основных путей повышения достоверности зондирования в оптическом диапазоне длин волн состояния или характеристик земной поверхности (суши, водных акваторий) состоит в атмосферной коррекции ее аэрокосмических изображений. Это достигается, если известно оптическое состояние атмосферы в момент съемки или близкий к нему момент. Информацию о составе и состоянии атмосферы можно получать от наземных, авиационных или спутниковых источников. Последние представляют особый интерес, так как они могут быть получены практически для любых географических координат.

В работах J. Dozier, Y. Kaufman, T. Lee, P. Dowty, O. Arino, Giglio [4–8] изложены методические основы детектирования, в частности, тепловых аномалий из космоса на основе систем глобального и регионального мониторинга NOAA/AVHRR и

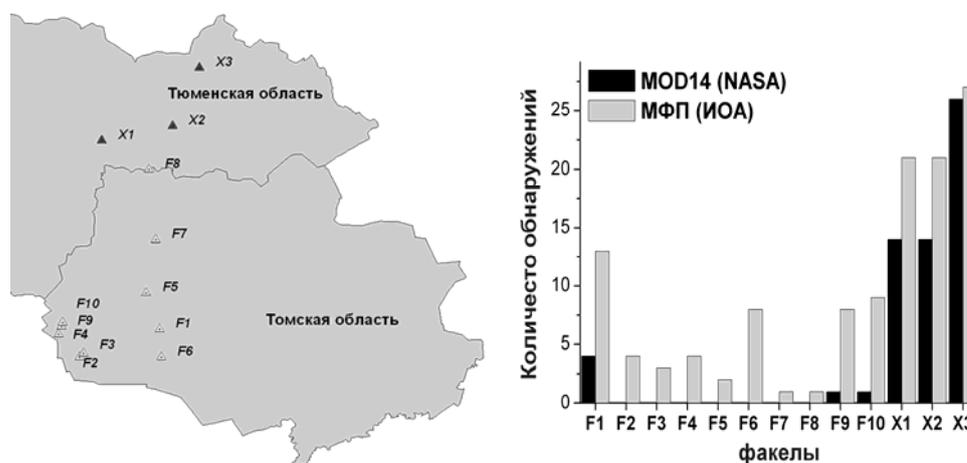
EOS/MODIS. Разработаны соответствующие алгоритмы для ESA (*European Space Agency*), IGBP (*International Geosphere and Biosphere Project*), CCRS (*Canada Centre for Remote Sensing*), системы EOS. Обзорные работы [7] и [8] дают полное представление о ключевых аспектах проблемы космического мониторинга земной поверхности и оперативных спутниковых методах решения этой проблемы.

Эффективность применения алгоритмов атмосферной коррекции при тематической обработке спутниковых изображений в ИК – диапазоне иллюстрируют приведенные ниже рисунок и табл. 1, 2.

Таблица 1

**Эффективность обнаружения из космоса лесных пожаров конкурирующими методами тематической обработки спутниковых изображений**

Алгоритмы	Обнаружено всего (раннее обнаружение)
ИОА СО РАН (Россия)	186 (77)
NASA, MOD14 (USA)	98 (37)
NASA, MOD14 / Terra (USA)	78 (28)
NASA, MOD14 / Aqua (USA)	74 (23)



**Рисунок. Эффективность обнаружения из космоса стационарных малоразмерных высокоинтенсивных тепловых источников (факелов сжигания попутного газа на месторождениях Тюменской и Томской областей) конкурирующими методами тематической обработки спутниковых изображений**

В табл. 2 приведен пример восстановления температуры двух близких по всем характеристикам малоразмерных тепловых объектов на земной поверхности. Один них (А) наблюдается в разрыве облачности, второй (Б) – через полупрозрачный фрагмент облака.

Таблица 2

**Результаты восстановления температуры объектов**

Ситуация	$T_F, K$	$T_F^0, K$
А	1252	1192
Б	1261	956

Как видим, стандартные средства обработки изображений (без атмосферной коррекции, последний столбец) дают температуры объектов, отличающиеся на 236 град. Применение многофакторного физического подхода, развиваемого в ИОА СО РАН, к атмосферной коррекции уменьшает разницу в восстановленных температурах объектов до 9 град, что соответствует реальным характеристикам этих излучателей.

Из приведенных примеров следует, что применение атмосферной коррекции на основе строгих физических предпосылок (алгоритмы ИОА СО РАН) приводят к существенно лучшим результатам, чем те, в которых атмосферная коррекция осуществлена на более низком уровне (алгоритмы NASA, USA).

Эти результаты дают основание утверждать, что интегрирование алгоритмов атмосферной коррекции в системы спутникового мониторинга регионального, ведомственного, федерального уровня существенно повысят их эффективность.

За рубежом технология атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности развивается интенсивно в США, Франции, Германии. Создание этих программно-информационных средств идет по двум направлениям с точки зрения их доступности и уровня. Созданы и эксплуатируются комплексы или пакеты программ открытого доступа и коммерческие продукты. Примеры программ приведены ниже.

#### **Некоммерческие программные продукты (продукты открытого доступа)**

Программа **MOD09** разработана в Direct Readout Laboratory (DRL) GSFC/NASA (Goddard Space Flight Center, NASA). Ее характеристика: учитываются только молекулярно-аэрозольного поглощения и рассеяния, но при этом процесс бокового подсвета игнорируется; может обрабатывать только данные MODIS; для учета атмосферы используют прогностические данные (т.е. модельные) об оптическом состоянии атмосферы; отсутствует учет рельефа земной поверхности.

Программа **SMAC**, созданная для атмосферной коррекции данных SPOT. Метод SMAC (Simplified Method for the Atmospheric Correction) производит только радиометрическую и геометрическую коррекцию, но без учета атмосферных искажающих факторов.

#### **Коммерческие продукты**

##### **ATCOR** (Atmospheric Correction for Flat and Rugged Terrain).

Пакет **ATCOR** разработан специалистами DLR (German Aerospace Center) и распространяется под коммерческой лицензией ReSe Applications Schldpfer. Целью атмосферной/топографической коррекции является устранение влияния атмосферы и эффектов освещения для восстановления физических параметров земной поверхности, например, отражательной способности (*reflectance*) подстилающей поверхности, излучательной способности (*emissivity*) и температуры.

**ATREM** (the ATmospheric REMoval). **ATREM** – программный пакет, разработанный в университете Колорадо, США, для восстановления отражательной способности поверхности на основе гиперспектральных данных с использованием модели переноса излучения. Несмотря на то, что пакет программ **ATREM** больше не поддерживается и не доступен новым пользователям, он до сих пор широко применяется для обработки гиперспектральных данных. В пакете заложены основные возможности атмосферной коррекции.

**FLAASH** (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). **FLAASH** – это основанный на MODTRAN4 пакет атмосферной коррекции, разработанный в Air Force Phillips Laboratory, Hanscom AFB и Spectral Sciences, Inc (SSI) (Adler-Golden et al., 1999). Эта программа обеспечивает точное, физически обоснованное определение отражательной способности поверхности путем определения параметров атмосферы: альbedo поверхности, высоты поверхности, общего содержания водяного пара, оптической толщи аэрозоля и облачности, температуры поверхности и атмосферы на основе гиперспектральных данных. **FLAASH** используется в спектральном диапазоне 0.4–2.5 мкм.

Таким образом, зарубежные программные продукты для атмосферной коррекции в целом можно характеризовать следующим образом. Программные продукты открытого доступа осуществляют коррекцию спутниковых изображений земной поверхности без учета большинства процессов взаимодействия оптического излучения с атмосферой и земной поверхностью. Коммерческие продукты учитывают

большинство физических процессов, участвующих в формировании спутниковых изображений земной поверхности, однако, распространяются без исходных кодов, не допускают возможности их модификаций, внесение дополнительных блоков и т. д. По мнению некоторых авторов не всегда объявленные в рекламных проспектах функции выполняются в полном объеме.

Существенно иная ситуация с развитием средств атмосферной коррекции имеет место в видимом и УФ диапазонах длин волн. Для решения этих проблем необходимо осуществить фундаментальные исследования по теории решения обратных задач атмосферной оптики с целью создания методов и средств восстановления из спутниковых измерений характеристик аэрозольной составляющей атмосферы для использования этой информации в схеме многофакторного физического подхода к атмосферной коррекции. Другая важная задача, требующая проведения поисковой НИР состоит в том, чтобы интегрировать в средства атмосферной коррекции отечественные программные модули решения уравнения переноса излучения, чтобы исключить из них зарубежные разработки (такие как MODTRAN4, LOWNHAN и т. п.). Не менее важным вопросом здесь является проблема верификации алгоритмов атмосферной коррекции, требующая проведения комплексных подспутниковых экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного контракта 14.515.11.0030, гранта РФФИ №14-01-00211\_А, интеграционного проекта СО РАН № 131а и Гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5.

#### Список литературы

1. Абушенко Н.А., Алтынцев Д.А., Антонов В.Н., Афонин С.В., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Гришин А.М., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Кошелев В.В., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Матвиенко Г.Г., Новик В.П., Пономарев Е.И., Соловьев В.С., Сухинин А.И., Татарников А.В., Тащилин С.А., Ткаченко В.А., Флитман Е.В. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы (Ред. В.В. Белов). Новосибирск: Изд-во ГПНТБ СО РАН, 2003. Аналитический обзор. Сер. "Экология". Вып. 70. 135 с.
2. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csiszar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G. and Loboda T. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. Vol. 11. № 1. P. 113–145.
3. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Королева Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А., Сухинин А.И., Афонин С.В., Белов В.В., Гришин А.М., Соловьев В.С. Спутниковый мониторинг лесов России // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 5. С. 443–447.
4. Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution // *Remote Sens. Environ.* 1981. V.11. P. 221–229.
5. Kaufman Y.J., Tucker C.J., Fung I. Remote sensing of biomass burning in the tropic // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 9927–9939.
6. Lee T. F., Tag P. M. Improved Detection of Hotspots using the AVHRR 3.7- $\mu\text{m}$  Channel // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1990. V. 71(12). P. 1722–1730.
7. Dowty P.R. A Theoretical Investigation of Fire Detection with AVHRR Data, M.S. Thesis, Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 1993.
8. Li Z., Kaufman, Y. J., Ichoku C., Fraser R., Trischenko A., Giglio L., Jin J., Yu X. A review of AVHRR-based active fire detection algorithms: principles, limitations, and recommendations. In F. Ahern, J. Goldammer, C. O. Justice (Eds.), *Global and regional wildfire monitoring from space: Planning a coordinated international effort* (pp. 199–225). The Hague, The Netherlands: SPB Academic Publishing. 2001.

## ПРОГРАММНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИКИ

В. В. Асмус<sup>(1)</sup>, В. А. Кровотынцев<sup>(1)</sup>, В. П. Пяткин<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»

<sup>(2)</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
e-mail: [asmus@planet.iitp.ru](mailto:asmus@planet.iitp.ru); [krv@planet.iitp.ru](mailto:krv@planet.iitp.ru), [pvp@ooi.sccc.ru](mailto:pvp@ooi.sccc.ru)

Данные измерений полярно-орбитальных российских и зарубежных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) были использованы для мониторинга ледяного покрова Арктики. В рамках решения этой задачи ФГБУ «НИЦ «Планета» и ИВМ и МГ СО РАН осуществляют долговременное сотрудничество в области создания и использования методов и технологий обработки спутниковых данных. В докладе приводятся данные о действующих и перспективных отечественных и зарубежных космических аппаратах, в том числе космической системы «Арктика», описание разработанных методов и оперативных технологий мониторинга ледяного покрова, примеры спутниковой информационной продукции по территории Арктики.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, спутниковые данные, мониторинг ледяного покрова, программные технологии.

**1. Введение.** Наблюдение за состоянием ледяного покрова Земли является одной из традиционных задач гидрометеорологии, климатологии и, в целом, мониторинга состояния окружающей среды. Оперативная информация о пространственном распределении, дрейфе, типе, возрасте, концентрации морского льда и айсбергов необходима для обеспечения безопасности навигации, рыболовства, добычи нефти и газа в полярных районах, а также для составления ледовых прогнозов различной заблаговременности. С точки зрения климатологии чрезвычайно важно накопление и анализ многолетних рядов, данных о различных характеристиках ледяного покрова, являющихся индикаторами изменений регионального и глобального климата. В течение длительного времени ФГБУ «НИЦ «Планета» и ИВМиМГ СО РАН совместными усилиями разрабатывают представительный набор программных технологий, позволяющих решать различные задачи обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1–3, 5].

**2. Космические системы мониторинга ледяного покрова Земли.** Космический мониторинг ледяного покрова Арктики проводится в ФГБУ «НИЦ «Планета» с момента запуска в 1983 г. первого отечественного океанографического спутника серии «Океан» с радиолокационной станцией бокового обзора X-диапазона (длина волны 3,2 см). Использование спутниковых радиолокационных данных является наиболее эффективными средствами наблюдения ледяного покрова, так как результаты космической съемки не зависят от освещенности и облачного покрова. Наряду с радиолокационными данными для осуществления ледовых наблюдений в разные годы использовались также данные видимого и инфракрасного диапазонов с отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА) серии Метеор, Ресурс, NOAA, MetOp, EOS (TERRA, AQUA) и других. В настоящее время для мониторинга ледяного покрова активно используются данные с российского метеорологического спутника «Метеор-М» №1 (запущен 17.09.2009 г.). Группировка спутников серии «Метеор-М» должна пополниться еще тремя космическими аппаратами (один из которых океанографический) и, начиная с этого времени, на орбитах постоянно должны функционировать три КА метеорологического и один КА океанографического назначения. Создаётся также группировка в составе 3-х метеорологических спутников

на геостационарных орбитах серии «Электро», первый из спутников этой группировки «Электро-Л» был запущен 20.01.2011 г. Кроме того, создаётся группировка из 2-х космических аппаратов для контроля чрезвычайных ситуаций серии «Канопус – В» (КА «Канопус – В» №1 был запущен 22.07.2012 г.), а также 2-х природно-ресурсных спутников серии «Ресурс – П» (КА «Ресурс – П» №1 был запущен 25.06.2013 г.). В дополнение осуществляется также разработка уникальной (не имеющей мировых аналогов) системы спутников на высокоэллиптических орбитах – МКС «Арктика», предназначенной для мониторинга северного полярного региона. Арктический регион физически недоступен для наблюдений спутниками международной базовой метеорологической группировки на геостационарных орбитах. Зона качественного мониторинга с геостационарных орбит ограничивается зенитным углом наблюдения 70 градусов, что соответствует широте 60 градусов. Каналы связи, размещенные на геостационарных спутниках, не могут обеспечить качественный прием данных с арктических дрейфующих буёв и автоматических гидрометеостанций. Контроль состояния ледяного покрова Арктики и Антарктики в ФГБУ «НИЦ «Планета» осуществляется на основе данных, принимаемых наземным комплексом приема и обработки спутниковой информации (НКПОР) Росгидромета, включающим в себя три центра: Европейский (Москва, Обнинск, Долгопрудный); Сибирский (Новосибирск) и Дальневосточный (Хабаровск), что обеспечивает полное покрытие космической съемкой всей территории Северного морского пути и всех замерзающих морей России.

**3. Предварительная обработка спутниковых данных.** На протяжении многих лет в ФГБУ «НИЦ «Планета» создавались, развивались и совершенствовались методы и технологии обработки спутниковых данных. В частности, были разработаны методы относительной и абсолютной калибровки данных РЛС БО ИСЗ серии «Океан», позволяющие осуществить переход от значений яркости радиолокационных изображений к физической характеристике ледяного покрова – удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР). С использованием данных методов была проведена оценка пространственно-временных изменений и угловых зависимостей значений УЭПР многолетнего и однолетнего льда в двух (отличающихся по своим климатическим особенностям) районах Арктики [4]. Результаты исследований характеристик радиолокационного обратного рассеяния морского льда использовались при создании технологии бесшовного соединения спутниковых радиолокационных изображений при построении обзорных монтажей (мозаик) Арктики или ее отдельных территорий. Обзорные радиолокационные мозаики могут использоваться на практике как самостоятельная информационная продукция, либо служить в качестве исходных данных для построения карт ледовой обстановки. Следующим важным направлением в обеспечении космического мониторинга является создание технологии построения карт ледовой обстановки по спутниковым данным, преимущественно инфракрасного и видимого диапазонов. В технологии воплощено сочетание автоматизированных и интерактивных процессов. В автоматизированном режиме осуществляется предварительная обработка спутниковых изображений, которая включает в себя набор общепринятых операций по яркостным и контрастным преобразованиям изображений. Программный комплекс включает ряд основанных на видоизменении гистограмм контрастных преобразований. В группу геометрических преобразований включено масштабирование изображений и отображение космических снимков на растровые карты (геокодирование).

**4. Технология распознавания.** Центральные вопросы тематической обработки (интерпретации) данных ДЗЗ – вопросы повышения качества дешифрирования – непосредственно связаны с проблемой выбора адекватных алгоритмов распознавания [3]. Современный опыт автоматизированного распознавания данных ДЗЗ показывает,

что заранее практически невозможно установить, какой алгоритм будет лучше с точки зрения точности классификации. Поэтому в распознающую систему целесообразно закладывать несколько алгоритмов и выбор оптимального алгоритма проводить эмпирически. В классификации данных ДЗЗ чаще других используются методы, которые можно разбить на две группы: контролируемая классификация (классификация с обучением) и кластеризация (классификация без обучения) [6, 7]. В классификации с обучением для распределения векторов признаков по представляющим интерес классам используется процесс обучения классификатора способности различать эти классы на основе репрезентативных выборок представителей классов. Эти выборки называются обучающими. Процесс обучения фактически является процессом построения функций правдоподобия (или решающих функций) для классов. Эти функции будут затем использоваться для классификации каждого вектора признаков как принадлежащему только одному классу (жесткая классификация) либо нескольким классам (нечеткая классификация). Обучение классификатора может быть проконтролировано путем определения вероятности правильной классификации (для этого часть из обучающих выборок переводится в разряд контрольных). Контролируемая классификация в программном комплексе PlanetMonitoring основана на использовании байесовской стратегии максимального правдоподобия для нормально распределенных векторов признаков. В состав программного комплекса входит реализация классического алгоритма жесткой кластеризации – алгоритма *K*-средних, широко используемого для разбиения на кластеры больших объемов многомерных данных [7]. Другой подход, позволяющий получать разбиение векторов измерений на кластеры произвольной формы, основан на предположении, что исходные данные являются выборкой из многомодового закона распределения, причем векторы, отвечающие отдельной моде, образуют кластер [3]. Таким образом, задача сводится к анализу мод многомерных гистограмм.

**5. Построение полей дрейфа морского льда.** Еще одним примером сотрудничества ФГБУ «НИЦ «Планета» с ИВМиМГ СО РАН является экспериментальная технология построения полей дрейфа морского льда. В технологии использовался метод восстановления полей дрейфа морского льда по опознанным изменениям положения некоторых ледовых объектов (трассеров) на разновременных и картографически совмещенных спутниковых изображениях. Определение координат перемещения ледовых полей с заданным шагом достигалось в результате использования аппроксимаций по методу триангуляции Делоне. При этом на спутниковых изображениях предварительно производилось закрепление контуров береговой черты с помощью опорных точек для того, чтобы на картах дрейфа льда произвести разделение неподвижной суши и перемещающегося плавучего льда. Одним из способов определения пространственных перемещений ледяных полей по разновременным спутниковым изображениям является метод, основанный на нахождении максимумов коэффициента взаимной корреляции. Реализован соответствующий алгоритм и получены результаты вычислительных экспериментов на изображениях, полученных с КА «METEOSAT-8» [8].

**6. Методы линеаментного анализа.** При обработке космических снимков с целью обнаружения на них объектов, представляющих интерес (в частности, линеаментов), в силу целого ряда причин предпочтение отдается статистическому подходу [1–3]. Основная причина состоит в том, что вследствие случайного характера природных процессов данные дистанционных измерений (спектросовмещенные изображения) содержат много случайных вариаций, маскирующих различия значений

яркости изображения в точках области объекта и в точках области фона. Совместными усилиями ФГБУ «НИЦ «Планета» и ИВМиМГ СО РАН произведена адаптация методов линеаментного анализа (ранее использовавшегося для изучения структур суши в интересах геологических исследований [9]) для изучения структуры морского льда в Арктике. Было установлено, что по распределению линеаментов, выделенных на разновременных спутниковых изображениях, можно оценивать упорядоченность и перемещение трещиноватых структур плавучего морского льда, а зоны повышенной плотности линеаментов, выделенные на космических снимках морского льда, в большей степени подвержены деформации. Именно в этих зонах происходит наибольшее количество сжатий и разряжений ледяного покрова.

**7. Изучение многолетних изменений ледяного покрова Арктики.** Созданные технологии обработки спутниковых данных используются в ФГБУ «НИЦ «Планета» не только в оперативной практике, но и для изучения долговременных изменений характеристик ледяного покрова по архивным данным. Так, например, в 2002–2013 гг. была проведена оценка сезонных изменений границ распространения и площадей покрытия многолетнего льда в Арктике по данным скаттерометра  $K_U$ -диапазона (длина волны 2,2 см) SeaWinds ИСЗ QuikSCAT, с ноября 2009 г. по данным скаттерометра  $S$ -диапазона (длина волны 5,66 см) ASCAT ИСЗ MetOp. Именно эти характеристики многолетнего льда наиболее чувствительны к изменениям климата и могут служить индикаторами региональных и глобальных климатических изменений. Оценка сезонных изменений площади многолетнего льда проводилась в российском секторе Арктики, ограниченном  $10^\circ$  в.д. и  $160^\circ$  з.д. В результате анализа сезонных изменений за восьмилетний период были выявлены некоторые закономерности. Наибольшая площадь многолетнего льда в российской Арктике приходится на сентябрь месяца. В последующие месяцы площадь многолетнего льда неравномерно уменьшается. В отдельные месяцы наблюдается небольшой прирост площади многолетнего льда (как, например, в декабре 2002 г.) за счет его поступления из канадского сектора Арктики. Обращает на себя внимание существенное сокращение протяженности многолетнего льда в российском секторе Арктики в зимний период 2007–2008 гг. и 2012–2013 гг. Продолжены работы по оценке межгодовых изменений площади многолетнего льда в западном секторе Арктики. Оценка межгодовых изменений площади многолетнего льда проводилась в западном секторе Арктики, ограниченном  $40^\circ$  в.д. и  $105^\circ$  в.д. Установлено, что в исследуемом районе имеют место значительные межгодовые вариации площадей от 180 тыс. км<sup>2</sup> до 540 тыс. км<sup>2</sup>. Наибольшая площадь многолетнего льда была отмечена за этот период в декабре 1988 и 2003 гг., наименьшая – в 1985, 1999, 2005, 2006, 2007 и 2013 гг. За период наблюдения с 1983 по 2013 гг. в западном секторе Арктики с учетом пропусков информации отмечается небольшой отрицательный тренд (уменьшение площади многолетнего льда ~ на 5 %).

**8. Заключение.** Долговременные изменения многолетнего льда в Арктике, полученные на основе спутниковых данных, выставлены на сайтах международного (под эгидой ВМО) Северо-Евразийского климатического центра: <http://seakc.meteoinfo.ru> и <http://neacc.meteoinfo.ru> и могут служить индикаторами изменения климата. К настоящему времени в архиве накоплены ряды спутниковых данных по различным районам Арктики за более чем 30-летний период. Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-07-00068.).

### Список литературы

1. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш. М. Дейвис, Д. А. Ландгребе, Т. Л. Филлипс и др.; под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвис. Пер. с англ. В. П. Пяткина, О. А. Юдиной; под ред. А. С. Алексеева. М.: Недра, 1983. 415 с.
2. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
3. Асмус В. В. Программно-аппаратный комплекс обработки спутниковых данных и его применение для задач гидрометеорологии и мониторинга природной среды: дис. в виде науч. доклада на соискание уч. степени д-ра физ.-мат. наук. На правах рукописи. М., 2002. 75 с.
4. Кровотынцев В.А., Милехин О.Е. Характеристики радиолокационного обратного рассеяния морских льдов Арктики по данным ИСЗ «Океан-О1» // Исследование Земли из космоса. № 2. 1998. С. 68–80.
5. Асмус В.В., Милехин О.Е., Кровотынцев В.А., Селиванов А.С. Использование радиолокационных данных ИСЗ серии Океан для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Исследование Земли из космоса. 2002. № 3.
6. Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П. Контролируемая классификация данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2008. Т. 44. № 4. С. 1–8.
7. Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П. Кластерный анализ данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2010. Т. 46. № 2. С. 58–66–8.
8. Бучнев А.А., Пяткин В.П. Мониторинг облачных образований по данным геостационарных спутников Земли // Автометрия. 2009. № 4. С. 40–47.
9. Пяткин В.П., Салов Г.И. Статистический подход к задаче обнаружения некоторых структур на аэрокосмических изображениях // Научно-технические технологии. 2002. № 3. Т. 3. С. 52–58.

УДК 551.501.7

## МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ВЗВЕШЕННЫХ В АТМОСФЕРЕ ЧАСТИЦ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ И ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В БЕЛАРУСИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНАХ

А. П. Иванов, А. П. Чайковский, Э. П. Зега, И. Л. Кацев, В. П. Кабашников,  
С. В. Денисов, М. М. Король, Ф. П. Осипенко, А. С. Прихач, А. С. Слесарь  
Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси  
e-mail: [ivanovap@dragon.bas-net](mailto:ivanovap@dragon.bas-net)

Для решения экологических задач использованы, совместно с региональными, материалы Международных дистанционных измерительных сетей. Проанализирован перенос, обусловленный аномальными природными явлениями и антропогенной деятельностью. Выявлена пространственная плотность мощности источников аэрозолей, влияющих на состояние атмосферы в Березинском заповеднике Беларуси.

*Ключевые слова:* атмосфера, мониторинг, аэрозоль, экология, модель, оптическая толщина, лидар, радиометр, космическое зондирование, пыль, пожар.

**Введение.** Взвешенные в атмосфере частицы (атмосферный аэрозоль) являются существенным фактором, влияющим на установление энергетического баланса планеты и изменения климата. Недостаточная изученность прямого и косвенного воздействий аэрозоля на формирование радиационных полей в атмосфере является одной из главных причин, препятствующих совершенствованию климатических моделей. Решение этой проблемы возможно только при комплексном подходе к получению исходных данных по большой территории планеты. В работе источником информации о загрязнении атмосферы являлись: радиометрическая сеть, лидарные

сети, данные космических наблюдений, характеристики процессов переноса примесей на основе использования различных моделей, модели обратных траекторий для оценки расположения источника загрязнения, карты распределения пожаров, данные измерений параметров атмосферных примесей в приземном слое в Беларуси и окружающих регионах. Использовался широкий комплекс разработанных методик и аппаратуры, включавший в себя лидары, радиометр Simel, данные космических наблюдений в рамках международного космического проекта “A-Train”, а также данные спектрометра SCIAMACHY на спутнике ENVISAT. Признаками, по которым производилась идентификация частиц аэрозоля указаны в таблице.

#### **Мониторинг загрязнения атмосферы и проявление аномальных явлений.**

Систематический мониторинг осуществляется с 2006 г. Комплексный анализ позволяет выявить возникающее в определенные периоды сильное загрязнение атмосферы, найти источник и причины такого загрязнения. Большинство событий крупномасштабного переноса загрязнений в регионе Беларуси может быть отнесено к четырем группам в зависимости от механизма формирования и переноса загрязнений. Это: 1. Антропогенное загрязнение атмосферы. Загрязнение приземного слоя в зимний период. 2. Перенос дымов в весенне-осенний период. 3. Перенос пыли. 4. В ряде случаев проявление воздействие вулканов. Остановимся на каждом из них.

**Таблица**

Тип аэрозоля	Размер, мкм	Форма	Параметр Ангстрема	Деполяризация, %
Дым и индустриальный аэрозоль	Меньше 1	Разная	A~ 1	1-5.
Пылевые частицы	1 - 20	несферические	A~ - 0.4 – 0	8-20.
Частицы капельных облаков	Много больше 1	сферические	A~ 0	0
Кристаллические облачные частицы	Много больше 1	Разные типы	A~ 0	20-40

**Антропогенное загрязнение атмосферы.** В Центральной Европе и восточно-европейском регионе в нижнем слое атмосферы наблюдается формирование загрязненной антропогенными выбросами обширной воздушной массы. Ее образование и трансформация определяется метеорологическими и синоптическими условиями. На рис. 1 рассмотрен типичный случай. Стрелками указаны воздушные потоки, имеющие, в основном, направление на восток. Видно, что над океаном, где воздух достаточно чистый, его оптическая толщина небольшая. По мере перемещения по Европе с большим количеством выбросов антропогенного происхождения замутненность атмосферы увеличивается и достигает максимума в Польше. Далее она немного уменьшается.

В зимнее время специфические метеорологические условия, характерные для этого сезона, в частности, низкие температурные инверсии способствуют накоплению антропогенного загрязнения в нижнем слое атмосферы. В этот период выбросы в атмосферу объектов энергетического профиля и коммунального хозяйства увеличивают степень загрязнения атмосферного воздуха. Данные лидарного зондирования показывают, что верхняя граница загрязненного слоя находится на уровне 50–150 м. Загрязненная воздушная масса может охватывать территории нескольких стран.

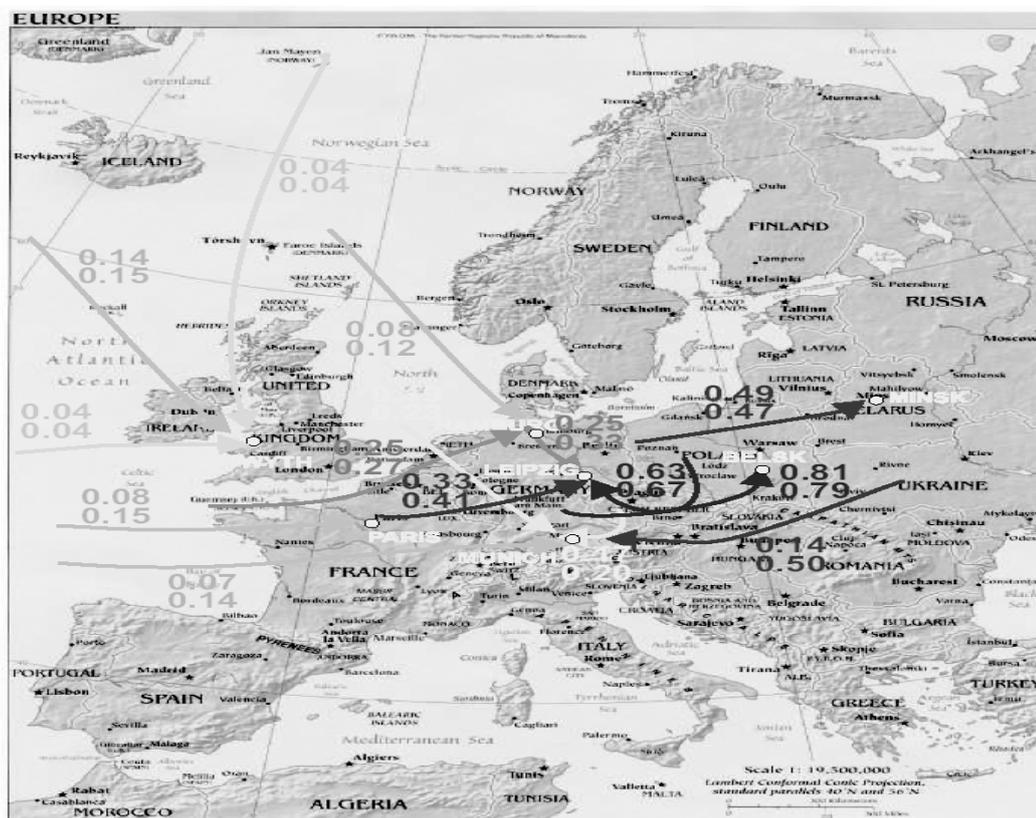


Рис. 1. Воздушные потоки через Европейский регион и устанавливаемые ими оптические аэрозольные толщину, длина волны 355 нм, верхняя цифра – зимний период, нижняя – летний период

**Перенос дымов в весенне-осенний период.** Главным для Беларуси фактором, вызывающим рост концентраций атмосферных примесей в приземном слое, является перенос дымов лесных и торфяных пожаров. Вероятность событий переноса дымов имеет выраженную сезонную зависимость. В регионе Беларуси перенос дымов обычно обнаруживается в марте. Источником выбросов являются очаги пожаров на Украине. В апреле – мае вероятность событий увеличивается за счет образования очагов пожаров в России и в Беларуси.

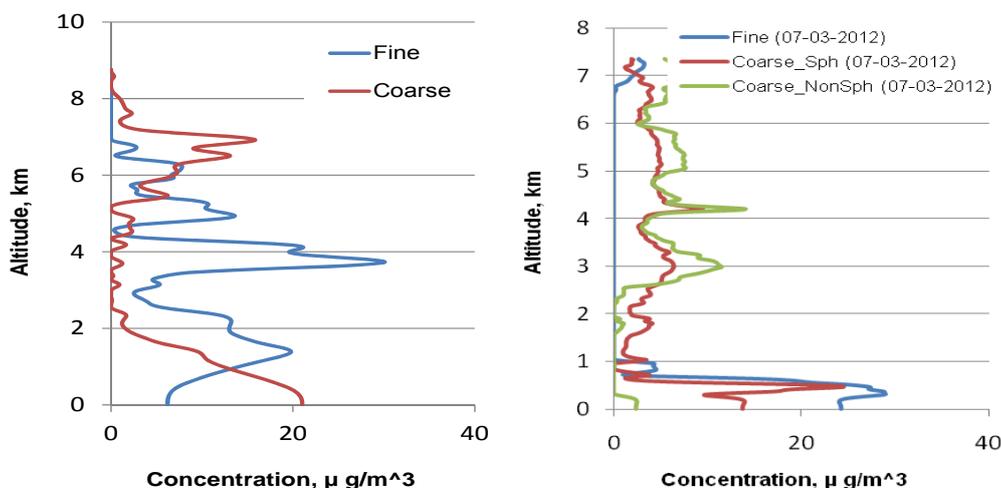


Рис. 2. Зависимость концентраций ( $\text{г/м}^3$ ) мелкой и крупной (сферической и несферической) фракций от высоты (км) при пожаре (слева) и пыли (справа)

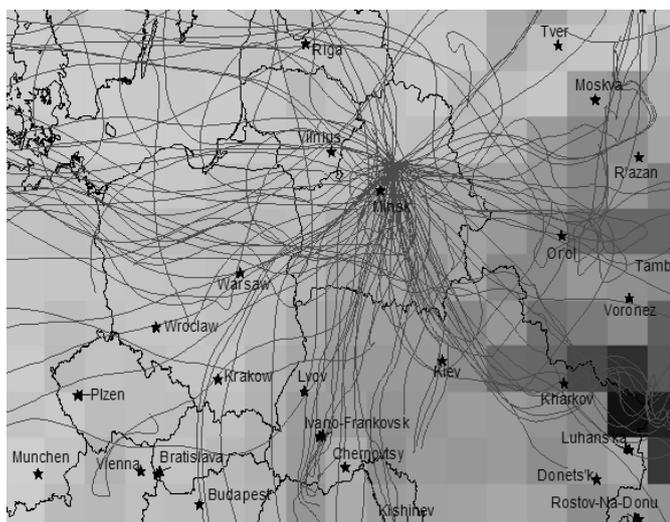
Наибольшая степень загрязнения атмосферного воздуха дымами пожаров зарегистрирована в сентябре 2002 г. Концентрация мелких частиц была выше 200 мкг/м<sup>3</sup>. Высокая степень загрязнения дымами пожаров регистрировалась в 2006 и 2010 г. В первых числах июля 2013 г. было зарегистрировано достаточно редкое событие – перенос большого количества вещества (дымов) от очагов пожаров в Северной Америке через Атлантический океан в северные и восточные районы Европы, в том числе в регион Беларуси. На рис. 2 (слева) по данным лазерного зондирования представлено высотное распределение концентрации мелкого и крупного аэрозоля над Минском.

**Перенос пыли в регион Беларуси.** Пыль – один из основных компонентов атмосферного аэрозоля и составляет до 75 % от массы всего аэрозольного вещества. Перенос пыли в воздушный бассейн Европы, находящейся в непосредственном соседстве с наиболее мощным источником пыли – пустыней Сахара, является весьма частым явлением. Время жизни в атмосфере для наиболее мелких частиц достаточно велико и они могут переноситься на тысячи километров. Таким примером является перенос пыли в район Беларуси из азиатского региона (пустыни Гоби) в начале марта 2012 г. (см. рис. 2, справа).

**Загрязнение атмосферы действующими вулканами.** При сильных извержениях вулканов продукты выбросов длительное время (иногда годы) сохраняются в верхних слоях атмосферы (стратосфере). Об этом свидетельствуют лидарные измерения, начатые в 70-е годы прошлого столетия. Особо мощное извержение было вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. Аэрозольный слой возник на высотах 15–25 км. В течение двух лет количество аэрозоля в стратосфере над Минском было в 50–100 раз больше, чем в период спокойного состояния. Путем сравнения нормированных лидарных сигналов на разных длинах волн и их степени деполяризации изучались не только трансформация концентрации частиц, но их размер и форма. Стратосфера очистилась к концу 1995 г. В период 20 марта – 20 мая 2010 года дистанционные наблюдения за облаком пепла исландского вулкана Eyjafjallajökull в регионы Европы проводились в г. Минске и в районе г. Лилля (Франция) в сотрудничестве с учеными Лилльского университета. Результаты измерений позволили оценить трансформацию характеристик взвешенных частиц в процессе их переноса.

**Источники повышенной загрязненности.** В те дни, когда в пункте наблюдений просматривается повышенная загрязненность, представляет интерес выявить траекторию, по которой она распространялась. Такую приблизительную картину могут дать обратные траектории, изображенные на рис. 3. Густота траекторий свидетельствует о том, насколько часто проявлялось влияние источников загрязнения.

Видно, что в теплые сезоны наиболее мощные источники находятся на восточной границе Украины с Россией, более слабые – на западе Украины и черноземном поясе России. В холодные сезоны (рисунка нет) наиболее мощные источники аэрозолей расположены на большей части Украины, юго-востоке Беларуси, в районе Москвы. Наибольший вклад в загрязненность атмосферы Минска взвешенным веществом дают южные и восточные территории. Менее всего загрязняют атмосферу северные территории.



**Рис. 3. Пространственная плотность мощности источников аэрозолей, влияющих на состояние атмосферы в Березинском заповеднике в теплые сезоны (разная степень фона карты) и траектории воздушных масс, на высоте 950 гПа (450 м) в дни с концентрациями аэрозолей, в два и более раз превышающие средние**

УДК 528.8.04, 528.88

## **ВОЗМОЖНОСТИ ОПЕРАТОРА РОССИЙСКИХ СРЕДСТВ ДЗЗ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МАТЕРИАЛАМИ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

В. А. Селин, А. А. Емельянов, Ю. В. Федоркова

ОАО «Российские космические системы»

e-mail: [referent@ntsomz.ru](mailto:referent@ntsomz.ru), [emelyanov\\_aa@ntsomz.ru](mailto:emelyanov_aa@ntsomz.ru), [fedorkova@ntsomz.ru](mailto:fedorkova@ntsomz.ru)

Сообщается о целевом применении российской орбитальной группировки Оператором российских космических средств ДЗЗ. Изложены возможности Оператора по предоставлению спутниковых данных и продуктов их обработки в интересах оперативного мониторинга состояния природных и антропогенных объектов. Освещены организационные проблемы в отрасли, сдерживающих эффективное целевое применение российских космических средств ДЗЗ. Представлены возможности геосервисов Оператора, примеры их интеграции с ведомственными информационными системами.

*Ключевые слова: Дистанционное зондирование Земли, космическая информация, Оператор российских космических средств, российская орбитальная группировка, геоинформационные сервисы.*

Федеральное космическое агентство в настоящее время проводит целенаправленную работу по наращиванию российской орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и дальнейшему ее развитию в соответствии с Федеральной космической программой (ФКП) России. Работа проводится с целью обеспечения максимального удовлетворения потребностей национальной экономики в космической информации и обеспечения конкурентоспособности отечественных данных и услуг в области ДЗЗ.

Несмотря на то, что состояние российской ОГ и наземной инфраструктуры ДЗЗ соответствует мировым тенденциям развития отрасли в последние 10–15 лет, необходимо признать недостаточность отечественных информационных ресурсов по

оперативности и объему для решения социально-экономических задач. Реализация ФКП России позволит до 2020 г. обеспечить до 80 % потребностей в информационном ресурсе российскими данными ДЗЗ общемирового уровня качества.

В России основными потребителями космических услуг являются государственные институты – федеральные и региональные органы власти, имеющие аналитические центры. Данные центры используют продукты ДЗЗ в составе собственных информационных систем дистанционного мониторинга в целях выполнения федеральных (Минсельхоз России, Рослесхоз, МЧС России и др.) и региональных социально-экономических программ. В настоящее время 99,7 % поставок данных ДЗЗ приходится на государственных потребителей.

Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы» (НЦ ОМЗ) выполняет функции Оператора российских космических средств (КС) ДЗЗ, создаваемых в рамках реализации ФКП России. НЦ ОМЗ обеспечивает целевое применение ОГ путем реализации полного технологического цикла по планированию использования информационных ресурсов КА и наземной инфраструктуры, приему, регистрации, первичной и стандартной обработке информации, ведению единого каталога и архива данных Роскосмоса в целях обеспечения конечных потребителей данными ДЗЗ и продуктами их обработки.

Анализ действующего российского законодательства в части положений, связанных с использованием данных ДЗЗ, показывает наличие организационных проблем в отрасли, сдерживающих эффективное целевое применение российских космических средств. Основными из них являются:

- отсутствие отраслевого стандарта качества применительно к продуктам обработки первичной информации;

- ограничения в сфере нормативно-правового регулирования обеспечения работ по использованию результатов космической деятельности в области ДЗЗ.

Национальные органы стандартизации многих стран активно переходят от полностью самостоятельных разработок к международным стандартам, утверждаемым на национальном уровне. Вероятно, этот путь актуален и для России. Ввиду отсутствия отечественных стандартов в части определения уровней обработки данных ДЗЗ, Оператор в настоящее время обеспечивает поставки данных в уровнях обработки, определенных разработчиками КА и Роскосмосом для каждого конкретного КА. Фактически, результаты съемки предоставляются в виде данных, прошедших радиометрическую и геометрическую коррекцию (уровень L1A, согласно принятой международной классификации) на безвозмездной основе федеральным и региональным органам власти. Поставка продуктов более высоких уровней обработки осуществляется на договорной основе в соответствии с требованиями конечного потребителя.

Основная проблематика распространения данных высокого пространственного разрешения проявляется в следующих основных направлениях.

Первое из них связано с наличием ограничений на распространение данных с пространственным разрешением лучше 2 м в целях их широкого использования и активного внедрения в хозяйственный оборот. В настоящее время Оператор имеет право передавать данные высокого разрешения (лучше 2 м) организациям, уполномоченным Роскосмосом по согласованию с Минобороны России. Необходимо на федеральном уровне нормативно установить порядок свободного доступа к информации высокого и сверхвысокого разрешения всем заинтересованным потребителям.

Второе проблемное направление – отсутствие государственной политики использования данных ДЗЗ, не позволяющее внедрять результаты космической деятельности в хозяйственный оборот с эффективностью, соответствующей потребностям развития страны. В результате потребители активно используют зарубежную информацию. Необходимо санкционировать распространение данных любого

пространственного разрешения, которые могут быть востребованы для решения задач в обеспечение государственных нужд, а также коммерческими пользователями.

Отдельно стоит сказать об отсутствии единого подхода к трактовке правового статуса данных ДЗЗ. Зарубежные операторы осуществляют свою деятельность в условиях признания данных ДЗЗ объектами интеллектуальной собственности и распространяют данные по лицензионным договорам, в том числе и на территории Российской Федерации. В соответствии с российским законодательством, данные ДЗЗ могут признаваться и информацией, и объектом интеллектуальной собственности. Однако до сих пор отмечается отсутствие официального правового статуса данных, что не позволяет реализовывать однозначную позицию в отношении распространения данных в рамках лицензионных договоров.

Изменяющаяся обстановка на мировом и российском рынках геоинформатики обуславливает необходимость постоянного мониторинга потребностей в нормативном обеспечении деятельности в области ДЗЗ и реализации усилий по преодолению существующих и вновь возникающих ограничений.

Оператор осуществляет целевое применение российских КС ДЗЗ с учетом заявок всех пользователей. Заявки на проведение космической съемки предоставляются федеральными органами власти в Роскосмос, остальными пользователями – Оператору. По требованию Заказчика предоставляются долгосрочный прогноз возможности космической съемки заявленной территории.

В настоящее время в состав российской ОГ входят следующие КА ДЗЗ:

- «Электро-Л» № 1 (глобальный уровень наблюдения);
- «Метеор-М» №№ 1, 2 (глобальный и региональный уровни наблюдения);
- «Ресурс-П» № 1 (региональный и локальный уровни наблюдения);
- «Канопус-В» № 1 (локальный уровень наблюдения);
- «Ресурс-ДК» (локальный уровень наблюдения).

Данные среднего и низкого разрешения с КА «Метеор-М» №№ 1-2 и «Электро-Л» № 1 (аппаратура МСУ-МР и МСУ-ГС, соответственно) являются информацией открытого доступа. Основные потребители этих данных (98% от общего объема) – организации Росгидромета.

КА «Метеор-М» №№ 1, 2 (КМСС) и «Ресурс-П» № 1 (ШМСА) позволяют получать данные среднего разрешения, используемые преимущественно для решения задач регионального мониторинга. Эти данные применяют для оперативной (1 раз в 3 суток) оценки ситуации на региональном уровне и имеют значение для решения задач природно-ресурсного характера. Полное покрытие территории Красноярского края (второго по величине субъекта Российской Федерации) данными среднего разрешения обеспечивается за 5–7 дней.

Использование данных высокого пространственного разрешения позволяет решать задачи мониторинга объектов социально-экономической инфраструктуры, осуществлять крупномасштабное картографирование территорий (до 1:10 000). В настоящее время их получение возможно с использованием КА «Ресурс-ДК» (Геотон), «Канопус-В» № 1 (ПСС, МСС) и «Ресурс-П» № 1 (Геотон). Данные высокого пространственного разрешения являются наиболее востребованными среди российских потребителей. Такие материалы съемки могут поставляться с частотой, определяемой условиями баллистического прогноза полета КА и метеоусловиями (облачность, осадки), обычно 1–2 раза в месяц. Создание сплошного покрытия территории Красноярского края данными высокого разрешения возможно в течение 6 месяцев, то есть в рамках одного съемочного сезона (май-октябрь). Однако, в настоящее время, согласно ограничению на использование КА «Ресурс-П», съемка не осуществляется на широтах выше 60°. Также существуют ограничения на приоритет территорий для задания очередности съемки.

Российский КА «Канопус-В» работает в единой ОГ с белорусским КА (БКА). Целевое использование объединенной группировки осуществляется на паритетной основе, при этом российские пользователи имеют возможность получать до 15 % информационного ресурса БКА, что обеспечивает повышение оперативности съемки территории Красноярского края на 10 %.

В 2015 г. ожидается запуск КА «Канопус-В-ИК» с дополнительной аппаратурой наблюдения в среднем и дальнем ИК-диапазоне (МСУ-ИК-СР), предназначенной для выявления техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, прежде всего детектирования очагов пожаров.

Находящиеся в эксплуатации КА имеют оптико-электронную аппаратуру, работа которой зависит от облачности и условий освещенности в районе съемки. С целью получения данных о состоянии и изменениях подстилающей поверхности вне зависимости от погодных условий и времени суток необходимо получение космической радиолокационной информации. В настоящее время осуществляется создание космического комплекса «Обзор-Р» в составе двух радиолокационных КА. Запуск первого запланирован на 2018 г., второго – на 2019 г.

Передача данных ДЗЗ российским потребителям Оператором может осуществляться любым из перечисленных способов:

- сброс информации непосредственно на станцию приема пользователя – селективный (строго определенные пункты приема) и неселективный (доступны материалы съемки в зоне приема);
- свободно распространяемые данные (в настоящее время это информация КА «Электро-Л» № 1, размещенная в открытом доступе на сайте НЦ ОМЗ);
- прием информации Оператором с последующей поставкой потребителям по каналам связи;
- обеспечение доступа к продуктам ДЗЗ посредством геосервисов.

Оператором эксплуатируется система обеспечения российских потребителей данными ДЗЗ в оперативном и в плановом режимах, в т. ч. с использованием Геопортала Роскосмоса (введен в действие в 2010 г.). Сервис обеспечивает оперативный доступ, поиск, просмотр характеристик, заказ данных ДЗЗ и продуктов их обработки, а также возможность контроля изменения территорий и объектов во времени. В ближайшей перспективе Оператор обеспечит потоковое создание, хранение и предоставление потребителям базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования на основе российских и зарубежных спутниковых данных посредством создания Банка базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования (ввод в действие запланирован на 2015 г.). Доступ к Банку будет организован через информационный портал в Интернете.

Базовый продукт занимает промежуточное положение между первичными данными ДЗЗ и тематическим продуктом обработки глубокого уровня, проводимой экспертами предметной области применения космической информации. К основным базовым продуктам относят индексы вегетации и композиты на основе разновременных данных.

Технологии создания, верификации и распространения базовых продуктов ДЗЗ разрабатываются Оператором совместно с организациями Роскосмоса, Рослесхоза, Минсельхоза России, РАН и др. Требования к получаемым продуктам и средствам доступа к ним регламентируются основными государственными потребителями – федеральными и региональными органами власти.

С середины 2013 г. в НЦ ОМЗ проводятся работы по информационной интеграции геосервисов Оператора с ведомственными и региональными информационными системами, осуществляющими мониторинг на основе космической информации и данных наземных служб мониторинга. В качестве примера можно привести интеграцию геосервисов Оператора с ведомственной информационной системой лесной отрасли –

Корпоративной геоинформационной системой (КГИС) ФГУП «Рослесинфорг», выполняющего функции оператора информационных ресурсов Рослесхоза. В рамках информационного сопряжения отработан технологический процесс передачи по Интернету обзорных изображений и метаданных стандартных продуктов ДЗЗ, а также базовых продуктов с метаданными с последующей их загрузкой в пользовательский интерфейс КГИС. Проведенная работа по информационному сопряжению позволила в значительной степени автоматизировать процессы информационного обмена.

В процессе выполнения работы согласованы регламентирующие документы, определяющие структуру метаданных и формат представления продуктов ДЗЗ в КГИС, как составной части геоинформационного обеспечения Рослесхоза. Дальнейшее направление работ связано с автоматизацией процессов формирования заявки на получение продуктов ДЗЗ на основе имеющихся обзорных изображений непосредственно в интерфейсе КГИС, передачи данной заявки Оператору, отслеживания ее состояния и оперативного получения продуктов ДЗЗ на основе данных с российских КА.

Разработка технологий обеспечения продуктами ДЗЗ геоинформационных систем потребителей, предназначенных для решения прикладных задач лесной отрасли, ведется, в том числе, с использованием наработок, полученных при реализации ряда научных международных проектов.

С целью повышения эффективности целевого использования российских средств ДЗЗ необходимо усилить информационную интеграцию геосервисов Оператора с ведомственными и региональными информационными системами, обеспечить равный доступ конечных пользователей к спутниковой информации и данным наземных наблюдений.

# СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

---

УДК 528.8.04, 528.88

## ПРОБЛЕМЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АВИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Е. В. Дмитриев<sup>(1)</sup>, В. В. Козодеров<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГБУН «Институт вычислительной математики РАН»

<sup>(2)</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

e-mail: [yegor@mail.ru](mailto:yegor@mail.ru), [vkozod@mail.ru](mailto:vkozod@mail.ru)

Рассматривается задача дистанционного зондирования почвенно-растительного покрова с использованием авиационных гиперспектрометров. Приводится анализ современного развития аэрокосмической измерительной аппаратуры высокого спектрального разрешения. Обсуждаются проблемы и методы тематической обработки гиперспектральных данных. Демонстрируются некоторые результаты для выбранных участков тестовой территории.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, гиперспектральные измерения, аэрокосмические изображения, распознавание образов, растительный покров.

Современные аэрокосмические системы дистанционного зондирования позволяют производить мониторинг природно-техногенных объектов на больших территориях. Используемая при этом измерительная аппаратура постоянно совершенствуется в направлении повышения пространственного и спектрального разрешения. Высокое пространственное разрешение способствует развитию методов обработки получаемых изображений с точки зрения распознавания соответствующих объектов при рассмотрении математической категории соседства элементов разрешения для выбранных классов объектов и оценки параметров, характеризующих их состояние. Высокое спектральное разрешение предназначено для распознавания тонких нюансов состава и строения наблюдаемых объектов.

Получаемые аэрокосмические изображения разделяются на многоспектральные и гиперспектральные. Многоспектральные изображения представляют собой набор монохромных изображений в отдельных спектральных каналах, отстоящих друг от друга на расстояниях, превышающих их полуширину. Каналы гиперспектральных приборов пересекаются и, таким образом, непрерывно покрывают рабочий спектральный диапазон.

В ходе развития систем аэрокосмического мониторинга, наряду с известными спектрорадиометрами MODIS и ETM+, имеющими 4 канала в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (ВБИК, 400-900 нм) при пространственном разрешении 500 и 30 м, соответственно, появляются новые приборы, позволяющие получать значительно более подробные данные. Так, например, сенсор Hyperion, установленный на спутнике EO-1 (Earth Observing-1) имеет около 80 каналов ВБИК-диапазона при пространственном разрешении 30 м, а аппаратура спутника GEOEYE-2 имеет пространственное разрешение 1.65 м для 4-х мультиспектральных каналов и 0.25 м для панхроматического канала.

Задача создания новых систем гиперспектрального космического мониторинга во ВБИК диапазоне имеет высокую актуальность во всех ведущих странах мира. Так, например, в Японии был разработан прибор HISUI (Hyperspectral Imager Suit), представляющий собой комбинацию многоспектрального и гиперспектрального сканеров. Мультиспектральный сканер имеет 4 спектральных канала в диапазоне 450–890 нм. Полоса захвата составляет 90 км, пространственное разрешение – 5 км. Характеристики гиперспектрометра HUSUI сопоставимы с Hyperion. Прибор имеет

185 каналов, покрывающих диапазон от 400 до 2500 нм (57 каналов ВБИК диапазона), полосу захвата 30 км и пространственное разрешение 30 м. Запуск HUSUI планируется осуществить в 2016 году. В том же году, в рамках программы EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) будет выведен на орбиту германский гиперспектрометр, разработанный компанией Кайзер-Треде (Kaiser-Threde GmbH), имеющий 89 каналов ВБИК диапазона и пространственное разрешение 30 м. Также следует отметить итальянский гиперспектрометр PRISMA имеющий 249 каналов (92 во ВБИК диапазоне), планируемый к запуску в 2017 году. В 2020 году будет запущен гиперспектрометр HyspIRI производства США, имеющий 213 каналов в диапазоне 380–2500 нм и пространственное разрешение 60 м совместно со спектрорадиометром теплового диапазона.

Для получения более детальной региональной информации, применяют видеоспектрометры, установленные на воздушные летательные аппараты. Относительно низкая высота полета обеспечивает возможность совмещения высокого пространственного и спектрального разрешения и позволяет существенно уменьшить искажающее влияние атмосферы. В качестве примера наиболее известных зарубежных сканеров можно привести AisaEAGLET (Spectral Imaging Ltd, Финляндия) и CASI-1500, (ITRES Research Ltd, Канада), которые имеют, соответственно, до 820 и 288 каналов во ВБИК диапазоне, при пространственном разрешении примерно 0.4 м при визировании в надир с высоты 1 км (см. таблицу).

Отечественные системы аэрокосмического мониторинга также активно развиваются в последние годы, хотя и с некоторым отставанием. Один из лучших образцов действующих отечественных сканеров, установленный на спутнике "Ресурс-ДК1", имеет пространственное разрешение 2–3 м (эллиптическая орбита) и 3 канала во ВБИК диапазоне. Сканер космического аппарата Канопус-В имеет 4 канала в данном диапазоне с разрешением 10.5 м. В 2012 году на базе МКА-ФКИ был выведен на орбиту пробный образец российского гиперспектрометра, производства НПО Лептон (г. Зеленоград, г. Москва).

**Таблица**  
**Основные характеристики зарубежных и российских гиперспектрометров**

Название прибора	AisaEAGLET	CASI1500	Сокол-ГЦП	Реагент	АВ-ВД
Производитель	Spectral Imaging Ltd., Finland	ITRES Research Ltd, Canada	ОАО КМЗ, Красногорск, Моск. обл.	ЗАО НТЦ Реагент, Москва	НПО Лептон, Зеленоград, Москва
Рабочий диапазон, нм	400-1000	380-1050	530-1000	450-800	400-1000
Число каналов	820	288	105	106-250	287
Спектральное разрешение, нм	3.3	2.4	4.6-7.1	1.6-16	0.5-15
Объединение каналов	да	Да	нет	нет	Нет
Калибровка	да	Да	да	–	Да
Простр. разр., м (высота 1 км)	0.053-0.4	0.4	0.75	1.4	0.56
Полоса захвата (пиксели)	1600	1500	–	250	500
Разрядность, бит	12	14	14	14	12
Вес, кг	3.5 (10.5 общ.)	25 (43 общ.)	(50 общ.)	–	2
Мощность, Вт	100	–	250	7-12	7

Известные отечественные авиационные гиперспектрометры (см. таблицу), такие как Сокол-ГЦП (ФНПЦ ОАО Красногорский завод им. С. А. Зверева, г. Красногорск, Московской обл.), Реагент (ЗАО НТЦ Реагент, Москва) АВ-ВД (НПО Лептон) имеют схожие характеристики и уступают по ряду параметров ведущим западным образцам. В качестве диспергирующего элемента используются многокомпонентные призмы.

Разрешение спектральных каналов существенно увеличивается при движении в фиолетовую область спектра. Этот факт существенно затрудняет съемку, а именно выбор времени накопления, поскольку измерения в узких спектральных каналах фиолетовой и синей области содержат в основном шум и, в то же самое время, более широкие каналы БИК области склонны к насыщению при измерениях растительного покрова. Таким образом, эффективное число каналов уступает западным приборам. Пространственное разрешение зарубежных приборов также несколько выше, чем у российских. Представленные отечественные гиперспектрометры не позволяют производить объединение каналов на аппаратном уровне. Доступ к информации, касающейся технических характеристик, имеющих дисторсий и используемых методик калибровки ограничен.

Наиболее популярные коммерческие пакеты прикладных программ для обработки данных аэрокосмического зондирования и построения на основе полученных данных геоинформационных систем (ENVI, ArcGIS, ERDAS и др.) разрабатываются и поставляются зарубежными фирмами. Среди отечественных производителей следует выделить программные продукты компании ScanEx.

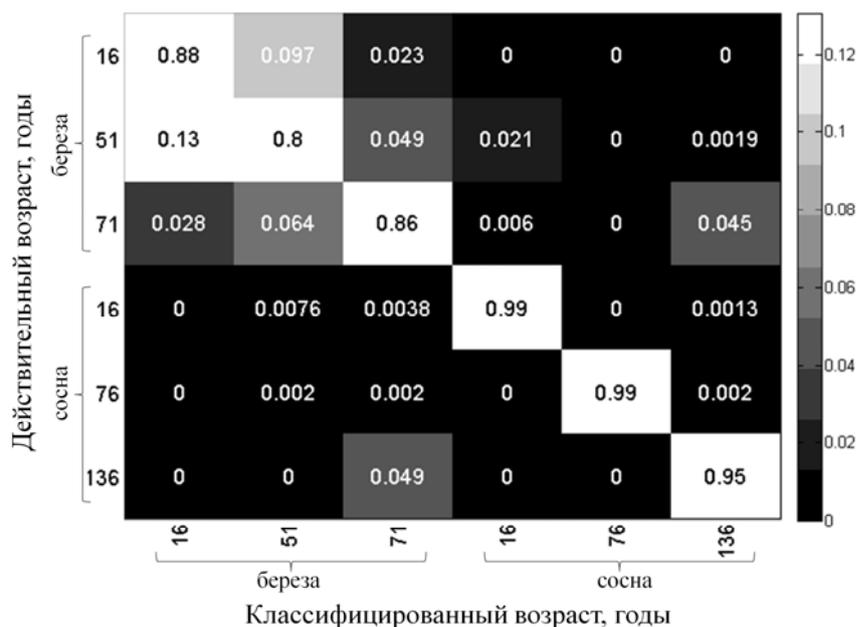
На протяжении последних лет совместными усилиями научных групп МГУ, ИВМ РАН, МФТИ, ТвГУ и НПО Лептон ведутся работы по созданию российского аппаратно-программного комплекса гиперспектрального аэрозондирования объектов природно-техногенной сферы. В августе 2011 года была проведена кампания авиационных измерений, в ходе которой были получены перекрывающиеся гиперспектральные изображения, покрывающие тестовый участок размером 4x10 км расположенный на территории Савватьевского лесничества Тверского лесхоза. Породный состав леса на тестовой территории представлен в основном древостоями сосны и березы различных возрастных классов. В небольшом количестве присутствуют также осинники и ельники. Наземная информация по распределению породного и возрастного состава представлена стандартными табличными и картографическими данными лесотаксации.

Для проведения съемок использовался самолет АН-2. Полет проводился полностью в ручном режиме, для выполнения полетных заданий пилот использовал GPS навигатор, при этом обеспечивалась точность 30-80 м, в зависимости от локальных метеорологических условий. Для проведения измерений использовался гиперспектрометр АВ-ВД разработки НПО Лептон и зеркальная фотокамера установленные на гиросtabilизированную платформу JSM-3000.

Построение алгоритма распознавания основано на известном принципе байесовской классификации. В качестве признаков объектов рассматриваются соответствующие им значения спектральных плотностей энергетической яркости (СПЭЯ) нормализованные на интегральное значение по длине волны. Априорные вероятности классов определяются на основе текстурного анализа изображения в выбранном наиболее контрастном спектральном канале. Данная процедура позволяет повысить точность распознавания основных классов – водная поверхность, открытые почвы, луговая растительность, лесная растительность. Внутриклассовые распределения признаков строятся на основе модели Гауссовских смесей.

Для эффективного сокращения размерности признакового пространства мы предложили модификацию стандартного пошагового метода, которая позволяет получить устойчивое решение. На первом этапе выделяется главный спектральный канал, который обеспечивает точное распознавание наибольшего числа рассматриваемых классов. Далее производится серия запусков пошагового метода выбора каналов. При каждом запуске обучающий ансамбль случайным образом разделяется на две приблизительно равных части, одна часть используется для оценки параметров, вторая для оценки ошибок классификации. В результате данного процесса

получаем набор последовательностей выбранных каналов. На конечном этапе из данного набора выбирается наиболее вероятная последовательность.



**Рисунок. Матрица ошибок (вероятности) для полностью освещенных Солнцем участков крон чистых березовых (возраст 16, 51 и 71 год) и сосновых выделов (возраст 16, 76 и 136 лет) на выбранных участках наземных обследований тестовой территории**

Оценки параметров производятся на основе априорной информации в виде множества спектров и соответствующих им наименований распознаваемых классов, составляющих обучающее множество. Для составления базы данных эталонных спектров были выделены участки с однородным породным составом. Полученные данные для сосновых и березовых древостоев позволили рассмотреть задачу классификации возрастного состава.

На основе полученных данных были проведены численные эксперименты по распознаванию породного и возрастного состава древостоев на тестовом участке. На рисунке приведена матрица ошибок для выбранных возрастов березовых и сосновых насаждений, которые соответствуют основным возрастным классам. Оценка точности решения задачи распознавания полученная методом кросс-валидации находится в пределах 80–88 % для березняков и 95–99 % для сосняков. Распознавание всей совокупности возрастов (на примере сосняков от 13 лет до 136 лет с шагом 10 лет) по данным самолетного гиперспектрального зондирования приводит к более существенным ошибкам.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты N 14-05-00598, 13-01-00185 и 14-07-00141).

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В УГЛЕДОБЫВАЮЩЕМ РЕГИОНЕ В ЗИМНИЕ ПЕРИОДЫ ВРЕМЕНИ**

В. П. Потапов, О. Л. Гиниятуллина, А. А. Быков, Н. В. Андреева  
ФГБУН «Институт вычислительных технологий СО РАН»  
e-mail: [kembict@gmail.com](mailto:kembict@gmail.com)

В работе рассматривается опыт применения данных дистанционного зондирования в задачах геоэкологического мониторинга природных объектов, в частности вопросы оценки состояния снегового покрова и загрязнения атмосферы в районах с интенсивной угледобычей. Предлагается использовать интегрированный подход для оценки антропогенного воздействия на окружающую среду с использованием космоснимков за зимний период времени.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, дешифрирование, космоснимки, спектральная отражательная способность объектов, мониторинг, загрязнение окружающей среды, снеговой покров.

Во многих районах Кузбасса сконцентрированы угледобывающие предприятия, оказывающие техногенное интегральное изменение состояния окружающей среды. При оценке допустимости воздействия отдельного предприятия на природные комплексы проводится государственный мониторинг окружающей среды, в том числе – загрязнения атмосферы [1]. Для таких предприятий размеры санитарно-защитных зон обязаны обеспечивать уменьшение воздействия их выбросов на загрязнение атмосферного воздуха как до гигиенических нормативов (ПДК), так и до величин приемлемого риска для здоровья населения [2].

Выбросы зачастую содержат высокотоксичные вещества (тяжелые металлы, оксиды серы, диоксины, полициклические углеводороды и т. д.). Выявление подобных загрязнений способствует принятию своевременных мер по обеспечению экологической безопасности. С помощью космических методов атмосферные выбросы детектируются далеко не всегда. Но анализ состояния снежного покрова в зимний период позволяет определять ареалы загрязнений и проводить оценку экологической ситуации [3]. Для оценки соответствия работы компании экологическим стандартам и нормативам, а в случае аварии – для оценки площади загрязнения и выработки мер по его ликвидации, необходима система оперативной оценки состояния территории, позволяющая своевременно и точно выявлять места загрязнения и координировать работу соответствующих служб, ответственных за ликвидацию последствий [4]. Именно применение космоснимков позволяет оперативно получать данные о формировании аномальных зон, на которые следует уделить внимание лицам, принимающим решения.

Практическое использование результатов дистанционного зондирования для мониторинга окружающей среды определяется возможностью установления связей параметров, характеризующих состояние контролируемого объекта, с полем уходящего излучения. Важным свойством снежного покрова, обеспечивающим его дешифрирование на спутниковых изображениях, являются его высокие альbedo и спектральные коэффициенты яркости (СКЯ) [5].

Применение дистанционных методов измерения параметров загрязнения местности особенно примечательно, поскольку ранее в отношении снежного покрова эти методы применялись лишь для определения пространственно-временных характеристик ареала загрязнения. В связи с этим актуализируется проблема сбора и анализа оперативной информации о состоянии снежного покрова на большой территории. Возникла

необходимость в разработке дистанционных методов оценки уровней загрязнения снега по цифровым спутниковым изображениям и в построении карт загрязнений [6].

Исследования проводились на территории Бунгурского геолого-промышленного района Кузбасса (Кемеровская область). В ходе работы использовался массив космоснимков за летний и зимний периоды в диапазоне девяти лет (2005–2013 гг.) со спутников среднего и высокого разрешения.

Загрязнение снега влияет на яркость изображения на космических снимках, что дает возможность совместно с результатами обработки проб снега картографировать площади и интенсивность загрязнения. Наиболее ощутимы различия в характеристиках снежного покрова загрязненных территорий и на фоновых территориях весной, хотя закладываются они еще зимой. При снеготаянии эти контрасты становятся более выраженными за счет накопления загрязняющих веществ, вытравливаемых из снега [7].

Для выделения территорий, покрытых снегом, рассчитан нормализованный дифференциальный индекс снега NDSI (1). NDSI – это относительная величина, характеризующая различие отражательной способности снега в красном ( $P_{RED}$ ) и коротковолновом инфракрасном ( $P_{SWIR}$ ) диапазонах. Для снега  $NDSI > 0,4$ :

$$NDSI = \frac{\rho_{RED} - \rho_{SWIR}}{\rho_{RED} + \rho_{SWIR}}. \quad (1)$$

Для количественного определения интенсивности осаждения частиц на поверхность снега по данным дистанционного зондирования Земли, необходимы сведения о связи уровня запыленности со спектральной отражательной способностью заснеженной поверхности.

В 2012 г. взяты пробы снега в 13 точках (код: Т0-Т6, К1-К6), после чего они были проанализированы в лаборатории на состав загрязнения. Поэтому в качестве зон интереса для анализа спектральной отражательной способности снегового покрова выбраны данные точки. Далее построены спектральные кривые, как по каждому каналу, так и синтезированные (рис. 1). За эталонную кривую взята кривая снега с гор, находящихся вдали от цивилизации.

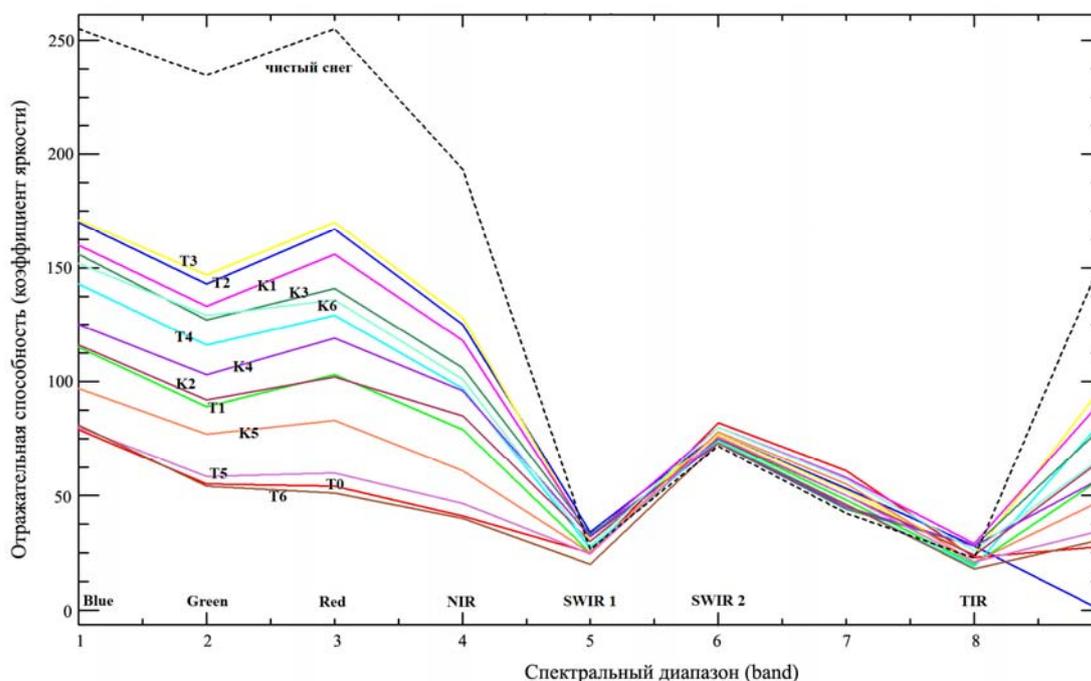
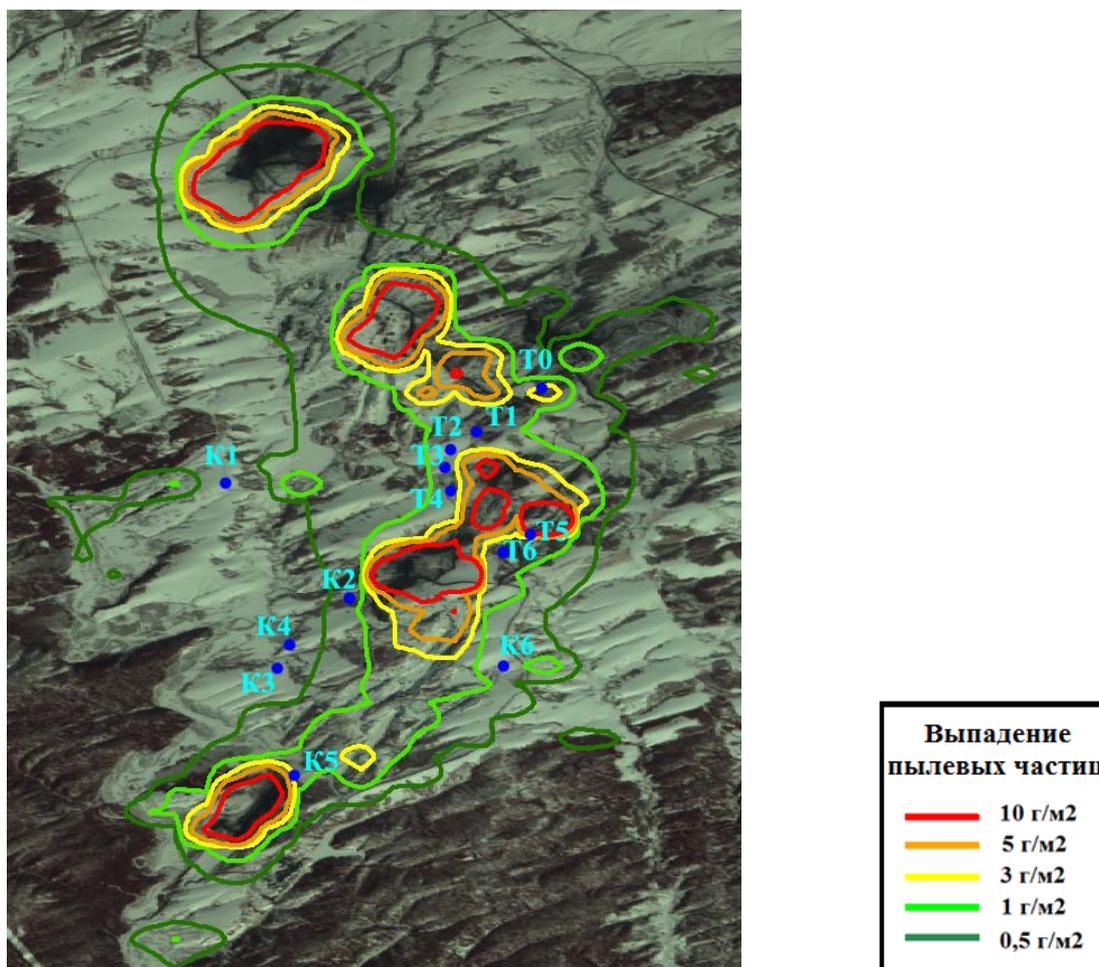


Рис. 1. Спектральные кривые (февраль 2012 г.)



**Рис. 2. Изолинии расчетного выпадения суммы пылевых частиц за зимний период 2012 года**

Основные факторы, влияющие на СКЯ снега это: влажность, загрязненность, размер зерен и плотность снега.

Увеличение влажности снега сопровождается увеличением размера зерен и плотности снега. При этом СКЯ снега уменьшается вследствие увеличения поглощения водой и уменьшения роли многократного рассеяния. Загрязненность снега также приводит к уменьшению СКЯ. Существует зависимость между уменьшением зональных яркостей загрязненного снежного покрова и концентрациями в нем некоторых загрязняющих веществ.

По результатам исследования, наиболее загрязненными участками являются снеговые пробы T0, T5 и T6. Это так же подтверждается численно, а именно расчетами выпадения на подстилающую поверхность сумм пылевых частиц (рис. 2). Данные точки находятся наиболее близко к эпицентру загрязнения.

В результате экспериментальных и экспедиционных работ накоплен большой массив эмпирических данных, анализ которых позволяет выявить зависимость уровня загрязнения снежного покрова от конкретных факторов. Таким образом, получен новый метод диагностики состояния снежного покрова по данным дистанционного зондирования, который позволяет получать зоны влияния загрязнителей от угледобывающих и перерабатывающих предприятий, что является важным фактором для проведения экологических мероприятий по устойчивому развитию горнопромышленных регионов. Достоверность подхода к определению степени загрязненности снега по мультиспектральным снимкам подтверждена лабораторными

исследованиями проб снега. Полученные закономерности позволяют рекомендовать предложенный подход к анализу экологического воздействия предприятий угледобывающего комплекса в зимний период времени в качестве метода предварительного мониторинга, целью которого является определение аномальных зон с повышенным содержанием загрязняющих веществ.

#### **Список литературы**

1. Ковалев В.А., Потапов В.П., Счастливец Е.Л. Мониторинг состояния природной среды угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 312 с.
2. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 с изменением № 1 СанПиН 2.2.1./2.2.1-2362-08 от 10 апреля 2008 г., N 25. "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов". М., 2008.
3. Кравцова В.И., Маслов А.А., Тутубалина О.В. Изображения Земли из космоса: примеры применения. М.: Научно-популярное издание: ООО Инженерно-технологический центр «Сканэкс», 2005. 97 с.
4. Михайлов С.И. Методика детектирования случаев загрязнения природной среды на суше по данным спутниковых наблюдений // Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6. № 1. С. 32–37.
5. Толмачева Н.И., Шкляева Л.С. Космические методы экологического мониторинга. Пермь, 2012. 296 с.
6. Прокачёва В.Г., Усачёв В.Ф. От космических снимков к эколого-гидрографической статистике // ГИС для устойчивого развития территорий. Ч. 3. ГИС и картография в экологии и охране природы. Якутск: Изд. ЯГУ, 1999. С. 104–116.
7. Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. и др. Геоинформатика / под ред. В.С. Тикунова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 480 с.

**УДК 504.5.06:622:528.8.044.2**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ КУЗБАССА ПО ДАННЫМ COSMO-SKYMED И ALOS PALSAR**

В. П. Потапов, О. Л. Гиниятуллина, Л. С. Миков

Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал)

e-mail: [mikov@ict.sbras.ru](mailto:mikov@ict.sbras.ru)

Рассмотрены вопросы оценки состояния и изменения земной поверхности в сейсмоопасных районах Кузбасса. Продемонстрировано применение спутниковых радарных данных высокого разрешения за период с 2007 по 2013 год с использованием методов радиолокационной интерферометрии для оценки и выявления динамики смещений земной поверхности в горнодобывающих районах с помощью построенных дифференциальных интерферограмм и карт вертикальных смещений.

*Ключевые слова:* радарные данные, дифференциальная интерферограмма, карта вертикальных смещений, радарная интерферометрия, деформация земной поверхности.

На сегодняшний день Кузбасс – это крупнейший горнопромышленный регион в России. Его отличительной особенностью является высокая техногенная нагрузка, связанная с постоянным увеличением объемов угледобычи. Кроме того, на территории

Кемеровской области ежегодно происходит несколько тысяч геодинамических событий как природного, так и техногенного характера (промышленные взрывы). Одно из сильнейших землетрясений в Кузбассе произошло 19 июня 2013 года в 21 километре от города Белово. В результате землетрясения пострадало около 5 тысяч домов. Общий ущерб составил 1,7 млрд. рублей [1]. Вдобавок ко всему этому, горные работы проводятся в непосредственной близости к населенным пунктам, из-за этого Кузбасс, как никакой другой регион, подвержен большому числу инспекций со стороны различных федеральных служб и министерств. Именно поэтому ставиться задача постоянного мониторинга состояния земной поверхности в таких районах.

В настоящее время определение деформаций земной поверхности на больших территориях осуществляется, как правило, традиционными маркшейдерско-геодезическими методами. Следует отметить, что эти методы, являясь своего рода эталонными, требуют больших финансовых и временных затрат. Кроме того, оперативность получения информации на основе данных методов является достаточно низкой, т.к. для получения динамики развития деформационных процессов требуется выполнение постоянных серий наблюдений и постоянная постобработка их результатов [2]. Альтернативным способом измерений является использование относительно дешевых спутниковых радарных данных, которые позволяют выявить любые изменения (вертикальные и горизонтальные смещения) земной поверхности с миллиметровой точностью, произошедшие за период между съемками, а также произвести площадную оценку на территориях от нескольких десятков до тысяч квадратных километров. В Кузбассе спутниковые радиолокационные данные для определения деформаций поверхности применяются впервые.

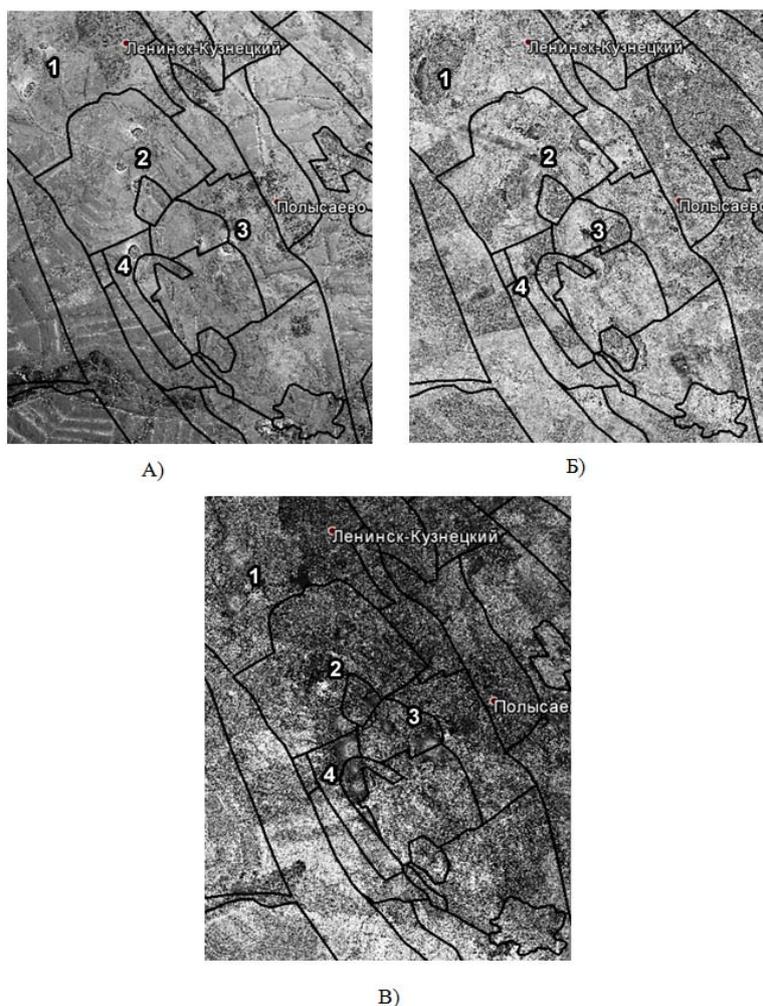
Деформации поверхности могут быть вызваны различными видами антропогенных или природных процессов, например, с одной стороны, горными работами или удалением грунтовых вод и, с другой стороны, землетрясениями, вулканической активностью, или оползнями. Величина такого деформационного процесса может составить несколько сантиметров в год. В зависимости от типа процесса деформации, изменения могут происходить медленно с постоянной скоростью или внезапно (например, землетрясения). В любом случае, крайне трудно, а иногда даже невозможно контролировать такие тонкие изменения с помощью оптических датчиков. Потенциал радиолокационного дистанционного зондирования для обнаружения незначительных значений смещений земной поверхности с помощью интерферометрии был исследован относительно давно [3]. В результате были разработаны два основных метода обработки радарных данных - дифференциальная интерферометрия (DinSAR) и интерферометрия постоянных отражателей (PSI). Оба этих метода основаны на интерферометрической обработке пар снимков (InSAR) [4]. Для определения смещений поверхностей в сейсмоопасных регионах Кузбасса применялся первый метод.

В качестве объекта исследования был выбран район в центральной части Кемеровской области, включающий территории городов Полысаево, Белово, Ленинск-Кузнецкий, характеризующиеся высокой техногенной нагрузкой. На исследуемой территории находятся несколько крупных горнопромышленных предприятий. Следует заметить, что для данного района характерна либо небольшая удаленность объекта угледобычи от городской черты (например, шахта имени С. М. Кирова – центральная часть месторождения находится в двух километрах от г. Ленинска-Кузнецкого), либо большая часть месторождения находится непосредственно в черте города (шахта имени 7 ноября, г. Ленинск-Кузнецкий) [5].

Многократная съемка исследуемого региона спутниками ALOS PALSAR (L-диапазон) и COSMO-SkyMed (X-диапазон) позволила сформировать набор интерферометрических пар радиолокационных изображений высокого разрешения

(ALOS PALSAR–7-20 м/пиксель, COSMO-SkyMed – 3 м/пиксель) для разных временных интервалов в 2007–2013 годах.

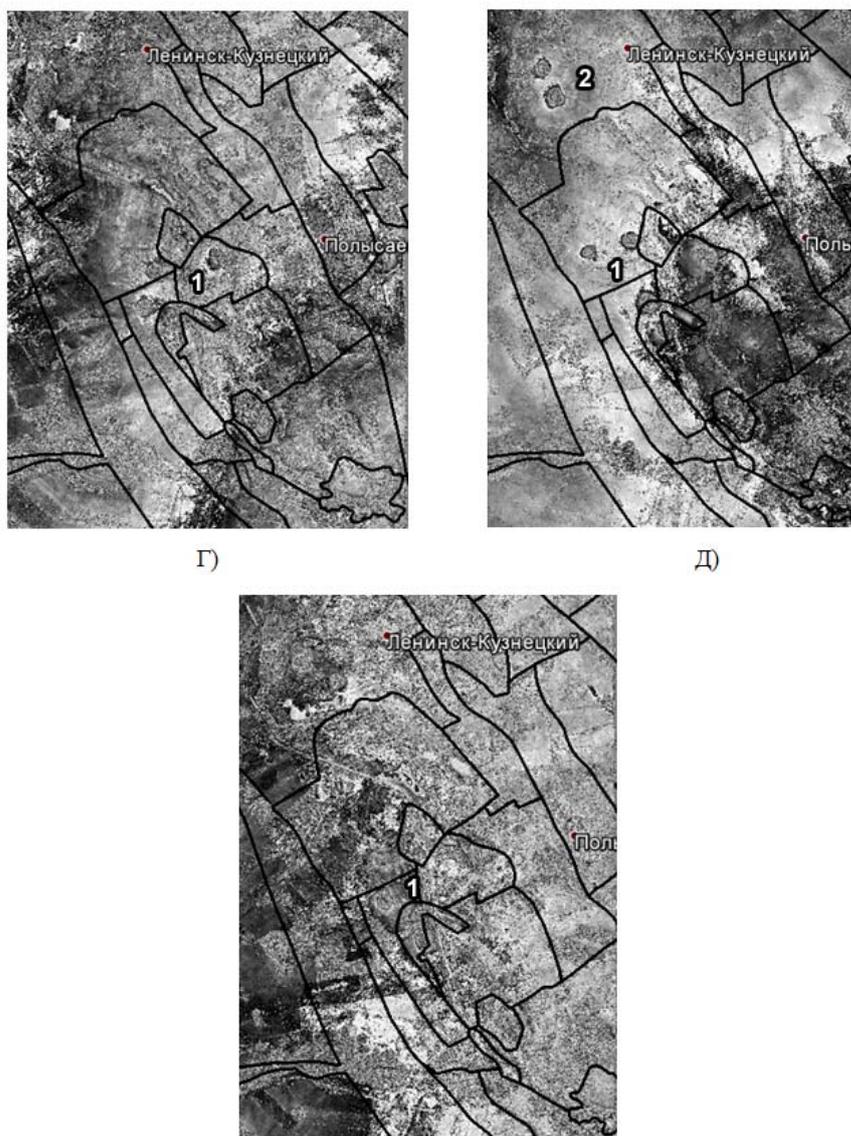
Для исследования динамики роста зон смещений земной поверхности в сейсмоопасных регионах Кузбасса использовались по шесть пар радарных снимков с указанных выше спутников. При построении интерферограммы исследуемого района в полосе размером 15x45 км выполнялся стандартный граф обработки: совмещение изображений; формирование интерферограммы; построение карты когерентности; вычитание фазового набега, характерного для гладкой Земли (выглаживание интерферограммы); фильтрация шумов интерферограммы; развертка фазы, необходимая для получения рельефа местности (использовался порог когерентности равный 0,15). Для получения дифференциальной интерферограммы использовалась модель SRTM, довольно точно характеризующая рельеф исследуемого района. Вся обработка производилась в программном комплексе SARscape 5.0.



**Рис. 1. Дифференциальные интерферограммы, полученные по данным ALOS PALSAR:А) 10.12.2007 – 25.01.2008; Б) 10.12.2007 – 12.12.2008; В) 17.06.2010 – 02.08.2010. Черными линиями выделены участки шахтных полей и разрезов**

Метод дифференциальной интерферометрии позволил выявить несколько локальных участков смещений земной поверхности, произошедшие за 1 месяц (с 10 декабря 2007 года по 21 января 2008 года) (рис 1-А). Изменения на интерферограммах представлены в виде колец, с переходами от белого цвета к черному цвету (изменения фазы от  $-\pi$  до  $\pi$ ). Каждый такой переход соответствует смещениям земной

поверхности, равным половине длины волны радиолокатора. Все зарегистрированные смещения находятся на территории шахтных полей, либо разрезов, таких как шахта «имени 7 ноября», шахта «Октябрьская» и разрез «Моховский» (рис. 1 А-В, участки 1-3). В течение нескольких лет (2007–2011 гг.) на этих же участках продолжают регистрироваться деформации, связанные с интенсивной угледобычей в этих районах (рис. 1-А, Б, В; рис. 2-А). В июле 2012 года были зарегистрированы два новых участка смещений на территории шахты имени Кирова (рис. 2-Д). Июнь 2013 года характеризуется меньшим количеством локальных участков смещений. Это связано с приостановкой угледобычи из-за землетрясения, произошедшего между съемками – 19 июня 2013 года.



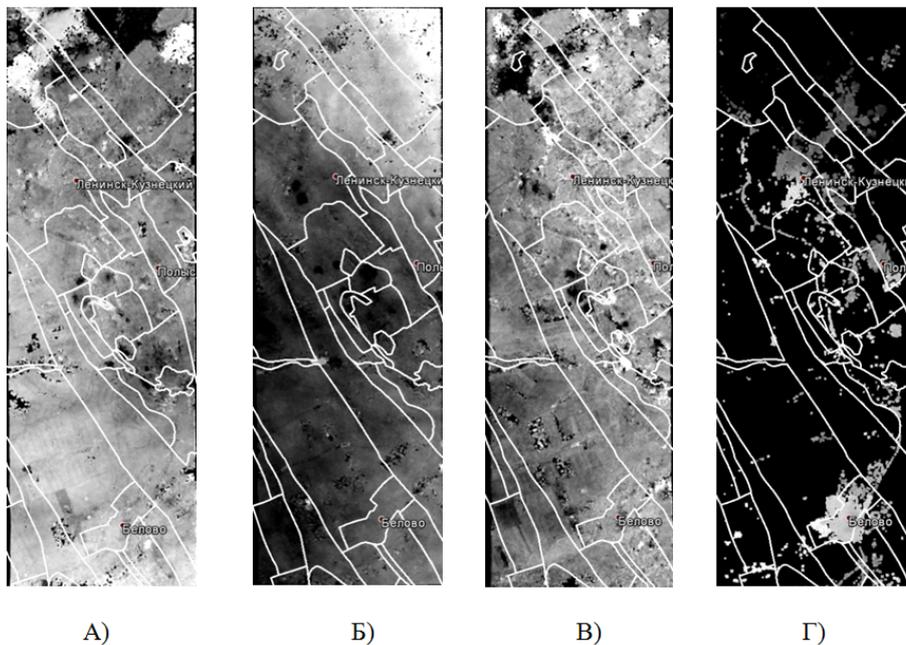
**Рис. 2. Дифференциальные интерферограммы, полученные по данным COSMO-SkyMed. Г) 14.08.2011 – 22.08.2011; Д) 15.07.2012 – 23.07.2012; Е) 16.06.2013 – 24.06.2013. Черными линиями выделены участки шахтных полей и разрезов**

Для определения численного значения смещений в исследуемых районах построены карты вертикальных смещений земной поверхности по данным дифференциальной интерферометрической обработки пар радиолокационных снимков COSMO-SkyMed (рис. 3-А-Г). Темные участки на картах смещениях соответствуют

отрицательным вертикальным смещениям поверхности (опускания), светлые – положительным (поднятия). Результаты показали, что за период между съемками (8 дней) произошли следующие изменения земной поверхности:

- в 2011 году: от -3,9 см (опускание) до +3,1 см (поднятие) (рис. 3-А);
- в 2012 году: от -4,2 см (опускание) до +3,2 см (поднятие) (рис. 3-Б).

Отдельно стоит отметить изменения в 2013 году, произошедшие во время землетрясения в районе города Белово 19 июня 2013 г. Здесь произошли смещения от -3,1 см (опускание) до +2,8 см (поднятие) за 8 дней (рис. 3-В), и от -7,8 см (опускание) до +4,9 см (поднятие) за 32 дня (рис. 3-Г). Следует обратить внимание на то, что вертикальные смещения, зарегистрированные за 32 дня, удалось рассчитать на меньшей площади, чем за 8 дней, что объясняется потерей когерентности из-за большого промежутка времени между съемками.



**Рис. 3. Карты вертикальных смещений, полученные по данным COSMO-SkyMed. А) 14.08.2011 – 22.08.2011; Б) 15.07.2012 – 23.07.2012; В) 16.06.2013 – 24.06.2013; Г) 16.06.2013 – 18.07.2013. Белыми линиями выделены участки шахтных полей и разрезов**

Оценка вертикальных смещений по данным космической радиолокационной съемки даже за такой короткий срок – 8 дней – показывает возможность оперативного решения проблемы определения деформаций земной поверхности для региона (в 2013 г. локальные просадки земной поверхности достигают 8 см) и целесообразность осуществления постоянного мониторинга с применением технологий радарной интерферометрии в сейсмоопасных районах Кузбасса. Представляется перспективным создание геоинформационной системы мониторинга деформационных процессов земной поверхности на участках угледобычи с применением интерферометрических технологий радиолокационной съемки. Кроме того, полученные результаты позволяют оценить влияние горного производства на окружающую среду. Спутниковый мониторинг вертикальных смещений может служить основой для последующей разработки природоохранных мероприятий.

#### **Список литературы**

1. Chorowicz J., Lopez E., Garcia F., Parrot J., Rudant J., Vinluanr. Keys to analyse active lahars from Pinatubo on SAR ERS imagery Статья // Remote Sensing of Environment. 1997. 62. С. 20–29.

2. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2012. 146 с.
3. Soergel U. Radar Remote Sensing of Urban Areas. Hannover: Springer. 2012. 277 с.
4. Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen SN, Rodriguez E, Goldstein RM Synthetic aperture radar interferometry. Proc IEEE 88(3). 2000. С. 333–382.
5. Портал. Сибирская Угольная Энергетическая Компания [Электрон. ресурс]. 2013. URL: <http://www.suek.ru/page.php?id=35> (дата обращения: 11.03.2014).

УДК 528.8.04, 528.88

## ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ TERRASAR-X ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОСАДОК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ САМОТЛОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. В. Филатов, А. В. Евтюшкин<sup>(1,2)</sup>, Ю. В. Васильев<sup>(3)</sup>, П. В. Погодин<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»

<sup>(2)</sup>Научно-исследовательский институт прикладной информатики и математической геофизики

<sup>(3)</sup>Западно-Сибирский филиал ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН

<sup>(4)</sup>ОАО «Самотлорнефтегаз»

e-mail: [anfilatov@kantiana.ru](mailto:anfilatov@kantiana.ru)

В работе представлены результаты обработки 13 радиолокационных кадров TerraSAR-X/Tandem-X на территорию Самотлорского нефтяного месторождения за период август-декабрь 2013 года. Проведено сравнение результатов обработки с материалами наземных геодезических измерений на пунктах Самотлорского геодинамического полигона.

*Ключевые слова:* радиолокационная интерферометрия, интерферометрия постоянных отражателей, геодинамический полигон, просадки, TerraSAR-X.

### **Используемые радиолокационные данные и методы обработки**

Преимущества метода постоянных отражателей перед применением площадной радарной интерферометрии основаны на особенных свойствах точечных объектов, которые сохраняют высокий уровень обратного отражения радиолокационного сигнала в течение множества последовательных съемок [1–2]. Зачастую размер такого отражающего объекта меньше элемента разрешения, поэтому когерентность достаточно высока ( $> 0.5$ ) даже для пар кадров с базовой линией больше критической. При условии оценки и удаления атмосферного фазового сдвига высоты таких точек над опорной поверхностью могут быть рассчитаны с точностью лучше 1 м, а смещения лучше 1 см.

Для мониторинга объектов нефтедобычи расположенных на месторождениях реализован метод интерферометрической обработки постоянных. Данный метод предусматривает алгоритмы выбора постоянных отражателей и расчета атмосферного фазового сдвига, скорости смещений и высот. Постоянным отражателем считается объект, который дает высокий и стабильный уровень обратного отражения (амплитуда пиксела), тогда фаза сигнала, принятого от такого объекта, имеет низкую дисперсию.

Для исследования смещений земной поверхности и техногенных объектов на территории Самотлорского лицензионного участка использованы спутниковые радиолокационные данные, полученные с двух спутников TerraSAR-X, Tandem-X,

работающих в паре. Оператором спутников является Немецкий аэрокосмический центр (DLR).

Съемка территории Сомотлорского месторождения радиолокатором TerraSAR-X проведена в период с августа по декабрь 2013. В обработке использованы 13 радиолокационных сцен размером 30км в направлении наклонной дальности и 50 км в направлении азимута. Под покрытие попадают наиболее значимые районы, расположенные в площади горного отвоя: центральная часть мульды оседания, город Нижневартовск, Усть-Вахская площадь (Нижневартовская ГРЭС и поселок Излучинск).

### **Обработка радиолокационных данных**

Выбор основной сцены, относительно которой рассчитываются интерферограммы, основан на минимизации влияния факторов снижающих когерентность интерферограммы: перпендикулярной базовой линии, временной базы и разницы доплеровских центроидов [3]. Основной сценой выбрана съемка, произведенная 30.10.2013 г.

В результате обработки 13 радиолокационных кадров TerraSAR-X по методу интерферометрии постоянных отражателей определены скорости смещений (мм/год) и временные ряды смещений между последовательными съемками (мм). Расчет смещений проведен для 89290 точек, соответствующих техногенным объектам и элементам ландшафта земной поверхности. В районах городской и промышленной застройки смещения определены на основе плотной сети дочек (от 200 точек/км<sup>2</sup>), для природных ландшафтов плотность устойчивых отражателей меньше. На рис. 1-а приведена карта скоростей смещений постоянных отражателей, полученная после применения дополнительной интерполяции точечных значений (метод локальных полиномов).

Интерполяция проведена таким образом, что в первую очередь учтены скорости смещений, рассчитанных для плотных скоплений интерферометрических отражателей, что позволило значительно снизить ошибку вносимую обособленными точками. Кроме того, интерполяция позволяет получить сглаженную картину и построить контуры зон проседания и поднятия. При этом необходимо отметить, что скорость смещений каждого стабильного интерферометрического отражателя, относительно которых проводятся расчеты, – это линейная составляющая смещений точки в течение интервала наблюдений. На рис. 1-а цветовая шкала скоростей смещений представлена в мм/год, так как такое отображение позволяет проводить анализ и сравнение результатов космического мониторинга и наземных геодезических измерений за разные годы.

На карте скоростей смещений на рис. 1-а выделяются центральная часть мульды оседания Сомотлорского месторождения и просадка на территории города Нижневартовск. Зона поднятия южнее пункта 58 соответствует нескольким кустовым площадкам в центре озера Сомотлор. Смещение пункта 58 по нивелировке –14 мм в период с 2012 по 2013 годы, самый ближайший к пункту отражающий объект за время спутникового мониторинга (4 месяца) сместился на –7 мм. Но несмотря на это южнее существует зона поднятия.

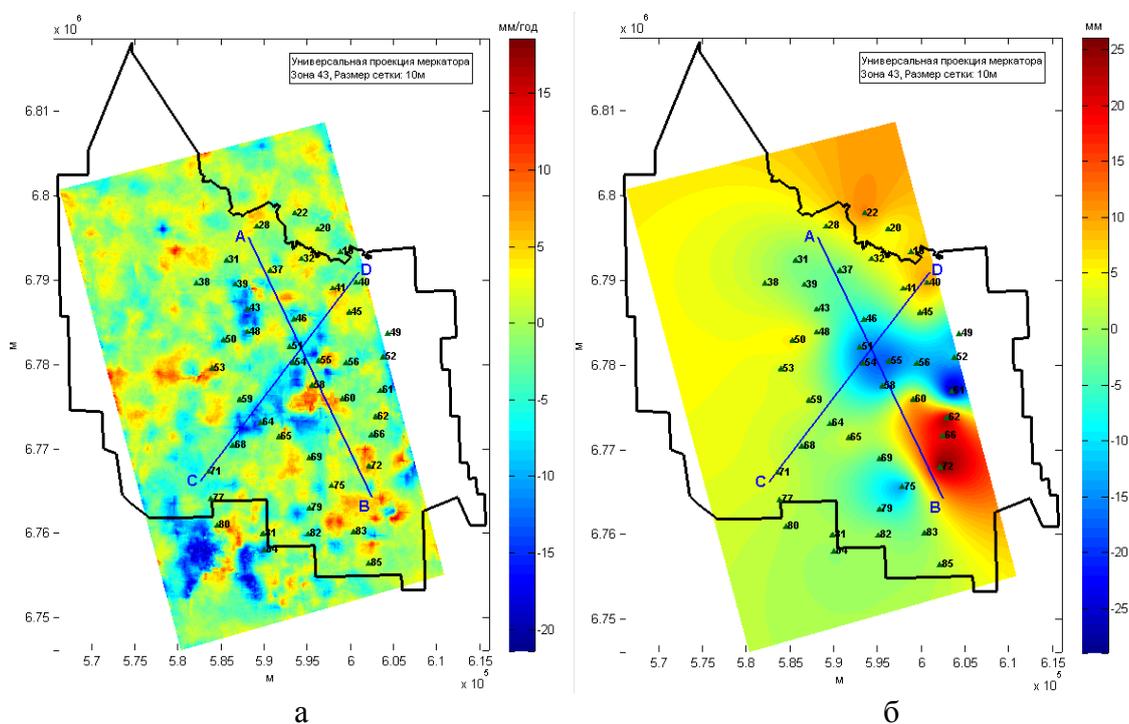
В ходе анализа детально рассмотрены 2 зоны. Первая соответствует Усть-Вахской площади, включая Нижневартовскую ГРЭС и поселок Излучинск. На территории Нижневартовской ГРЭС обнаружены 2 зоны разнонаправленных смещений, восточная часть имеет положительное смещение, западная – отрицательное. Такие же результаты были получены в ходе предыдущего цикла обработки в 2012 году на основе 18 радиолокационных кадров ALOS/PALSAR за период 2007–2011 годы с использованием метода обнаружения зон геодинамического риска [3, 4].

### **Оценка точности результатов спутникового мониторинга**

Метод интерферометрической обработки многовременных радиолокационных измерений для точечных отражающих объектов использует статистическую обработку

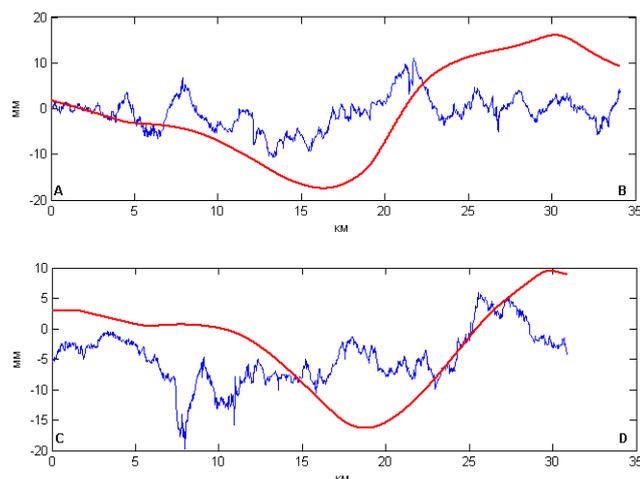
амплитудно-фазовых компонент сигнала, отраженного от одних и тех же объектов. За счет такой обработки теоретическая точности метода может достигать 1 мм при достаточном объеме съемок. В ходе расчетов дополнительно определяется точность восстановления смещений отражающих объектов. Значение точности зависит от соотношения сигнал шум, для каждого отражающего объекта, а также от точности оценки и устранения таких компонент интерферометрической фазы как, атмосферный сдвиг, рельеф, ошибка определения орбиты. В ходе обработки 13 сцен TerraSAR-X достигнута точность определения скоростей смещений 2,5 мм/год.

Дополнительно проведено сравнение скоростей смещений, приведенных на рис. 1-а с результатами наземных геодезических измерений на пунктах Самотлорского геодинимического полигона (смещения по нивелировке 2012–2013 годы). Для определения точности выбран вариант, при котором в качестве смещений по нивелировке используется разница высот пунктов между 2012 и 2013 годами, а смещения по спутниковому мониторингу экстраполируются до годовых значений на основе результатов наблюдений за 4 месяца. Точность определения скоростей смещений составила 11 мм/год.



**Рис. 1. Скорости смещений по результатам спутникового мониторинга (а) и смещения по данным наземных измерений (б) с нанесенными пространственными профилями**

На рис. 1-б для сравнения с картой смещений по интерферометрии (рис. 1-а) приведен результат интерполяции смещений пунктов Самотлорского геодинимического полигона (по нивелировке 2012–2013 годы). Треугольниками с номерами отмечено положение 43 пунктов полигона, для которых проводилось сравнение со смещениями по интерферометрии. Линии АВ и CD отмечают расположение пространственных профилей через мульду оседания. Смещения вдоль линий АВ и CD приведено на рис. 2.



**Рис. 2. Смещения по данным наземных измерений по нивелировке 2012-2013 годы (красная линия) и по результатам спутникового мониторинга (синяя линия) вдоль пространственных профилей через мульду оседания**

### **Заключение**

По результатам интерферометрической обработки 13 радиолокационных сцен спутника TerraSAR-X, снятых в период с августа по декабрь 2013 года с интервалом в 11 суток, на территорию Самотлорского месторождения сделаны следующие выводы:

1. Метод позволяет рассчитывать смещения стабильных отражающих объектов в проекции на направление обзора радиолокатора на основе данных многопроходной съемки одной и той же территории.

2. Смещения рассчитаны для более плотной сети точек по сравнению плотностью расположения пунктов геодезического полигона. Большая плотность ( $\sim 200$  точек/км<sup>2</sup>) достигнута в районах гражданской и промышленной застройки, а также в местах расположения крупных объектов нефтедобычи.

3. Результаты спутникового мониторинга позволяют уточнить границы мульды оседания на территории неохваченной наземными геодезическими измерениями.

4. Точность расчета скоростей смещений стабильных отражающих объектов, определенная на основе соотношения сигнал/шум для многовременных радиолокационных измерений, составила 2,5 мм/год.

5. Точность расчета скоростей смещений, определенная путем сравнения с данными по нивелировке за 2012–2013 годы в местах расположения пунктов геодезического полигона составила 11 мм/год.

6. Обнаружена корреляция между материалами наземных геодезических измерений на пунктах Самотлорского геодезического полигона и результатами интерферометрической обработки спутниковых данных.

7. Обнаружена корреляция между смещениями, определенными по результатам обработки 18 кадров ALOS/PALSAR за 2007–2011 годы (предыдущих цикл горно-экологического мониторинга) и по текущим результатам по всей области и в частности для территории Нижневартовской ГРЭС. Восточная часть имеет среднее смещение +5 мм, западная –5 мм за 4 месяца съемки TerraSAR-X.

8. Вследствие того, что определяет смещения отражающих объектов, на значения смещений оказывает влияние специфика самих объектов (температурное расширение/сжатие, диэлектрический свойства самой отражающей поверхности). Смещение совокупности близкорасположенных объектов является отражением подвижек земной поверхности.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 13-07-00419 и гранта DLR GEO1978.

### **Список литературы**

1. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. Is. 1. P. 8–20.
2. Bryksin V.M., Filatov A.V., Yevtyushkin A.V., Using of SAR data and DInSAR-PSInSAR technique for monitoring Western Siberia and Arctic // Journal of Radio Electronics. 2012. V. 6. P. 1–53.
3. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Брыксин В.М., Васильев Ю.В., Юрьев М.Л., Белоносов А.Ю. Использование метода интерферометрии устойчивых отражателей при геодинимическом мониторинге Самотлорского месторождения // Маркшейдерский вестник. 2012. № 4. С. 57–62.
4. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Брыксин В.М. Способ обнаружения зон геодинимического риска на основе данных радиолокационного зондирования земной поверхности // Патент России № 2506606.2014. Бюл. № 4.

**УДК 551.524.001.572, 528.873.041.3**

## **ИЗУЧЕНИЕ ОСТРОВА ТЕПЛА ГОРОДА АПАТИТЫ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО ПОЛЕВЫМ И КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

П. И. Константинов, М. Ю. Грищенко, М. И. Варенцов  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
e-mail: [m.gri@geogr.msu.ru](mailto:m.gri@geogr.msu.ru)

В работе представлены результаты сопоставления значений температуры приземного слоя атмосферного воздуха, полученных в ходе полевых работ с 28 января по 3 февраля 2014 г. на территории г. Апатиты (Мурманская обл.) и значений температуры земной поверхности, полученных по тепловым космическим снимкам системы MODIS на эту территорию. Выявлено наличие как поверхностного, так и классического островов тепла. Кроме того, выявленная интенсивность поверхностного теплового острова оказалась отличной от характерной для зимнего периода некоторых европейских городов, что позволяет расширить представления о рассматриваемом явлении.

*Ключевые слова.* Городской остров тепла, города Заполярья, поверхностный городской остров тепла, тепловые космические снимки.

### **Введение**

В последние десятилетия отмечается устойчивый рост общественного и научного интереса к климатическим особенностям городов – в частности к городскому острову тепла (urban heat island – UHI) в странах Западной Европы и Северной Америки. Городской остров тепла представляет собой явление, выражающееся в увеличении температуры воздуха (собственно остров тепла, или классический остров тепла) или поверхности (поверхностный остров тепла, выявляемый по космическим снимкам в тепловом инфракрасном диапазоне) в городе по сравнению с окружающей местностью. Правильное представление об этом климатическом феномене способно серьезно сэкономить средства городских бюджетов за счет уменьшения затрат на отопление городов умеренных и высоких широт в зимний период – в настоящее время отопление жилых и общественных зданий не всегда эффективно. В низких широтах

экономический эффект проявляется в снижении энергозатрат на кондиционирование помещений в летний период.

Основное внимание специалистов в области городской метеорологии приковано в настоящее время к городам тропической зоны – это связано с заметным недостатком фундаментальных знаний о климатических особенностях как подобных территорий в принципе, так и урбанизированных территорий в частности.

Микроклиматические особенности городов, расположенные по другую сторону от умеренного пояса – за полярным кругом – исследуются значительно менее интенсивно. Имеются лишь единичные исследования, проведённые на Аляске и показавшие существование в зимнее время мощных островов тепла в относительно небольших городах Барроу и Фэрбанксе [4].

Российский город Апатиты (Мурманская область) заметно превосходит Барроу и Фэрбанкс по площади и населению. В то же время его равнинное положение, относительно высокая плотность застройки, а также низкие зимние температуры, определяющие большие энергозатраты на отопление, делают его одним из лучших мест для изучения эффекта острова тепла северных городов вообще.

Целью работы является исследование городского острова тепла в полярных широтах на примере города Апатиты по космическим и полевым данным, в частности, сопоставление полевых данных о температуре воздуха и космических данных о температуре земной поверхности и выявление связи между явлениями классического и поверхностного островов тепла. Сопоставление данных измерения температуры приповерхностного слоя воздуха и с данными о температуре поверхности, полученными по космическим снимкам в тепловом инфракрасном диапазоне (тепловым космическим снимкам) является актуальной задачей, т.к. позволяет разносторонне изучить явление острова тепла.

### **Материалы и методика**

Для получения прямых данных о термической структуре приземного слоя воздуха на высоте 2 метра в пределах Апатит использовалось два типа приборов:

1) Автоматические метеостанции (АМС) Davis Vantage Pro2, измеряющие температуру, влажность и скорость ветра, хорошо себя зарекомендовавшие в отечественных исследованиях за счёт относительно низкой стоимости, надёжности и хорошей точности измерений температуры (0,5°C).

2) Термодатчики iButton американской фирмы Maxim Integrated, измеряющие и записывающие температуру воздуха (с точностью 0,5°C).

Термодатчики iButton размещались относительно равномерно по территории города и его окрестностям и устанавливались на стандартной высоте измерений (2 м) на ветвях кустов и деревьев (рис. 1).

Информация о температуре земной поверхности получена из космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне съёмочной системы MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer). Нас интересовала съёмка в каналах 31 и 32 (10,78–11,28 мкм и 11,77–12,27 мкм соответственно), в которых фиксируется интенсивность теплового излучения земной поверхности и которые приходятся на диапазон, соответствующий максимуму собственного излучения Земли (10–12 мкм). Пространственное разрешение снимков, получаемых в этих каналах – 1000 м. В работе использован продукт, содержащий данные о температуре земной поверхности, рассчитанные по значениям интенсивности теплового излучения и параметрам атмосферы – MOD10A1 (по данным спутника Terra) и MYD10A1 (по данным спутника Aqua), коллекция данных – 5. Такие материалы достаточно широко применяются для изучения поверхностных тепловых островов городов [1–3].



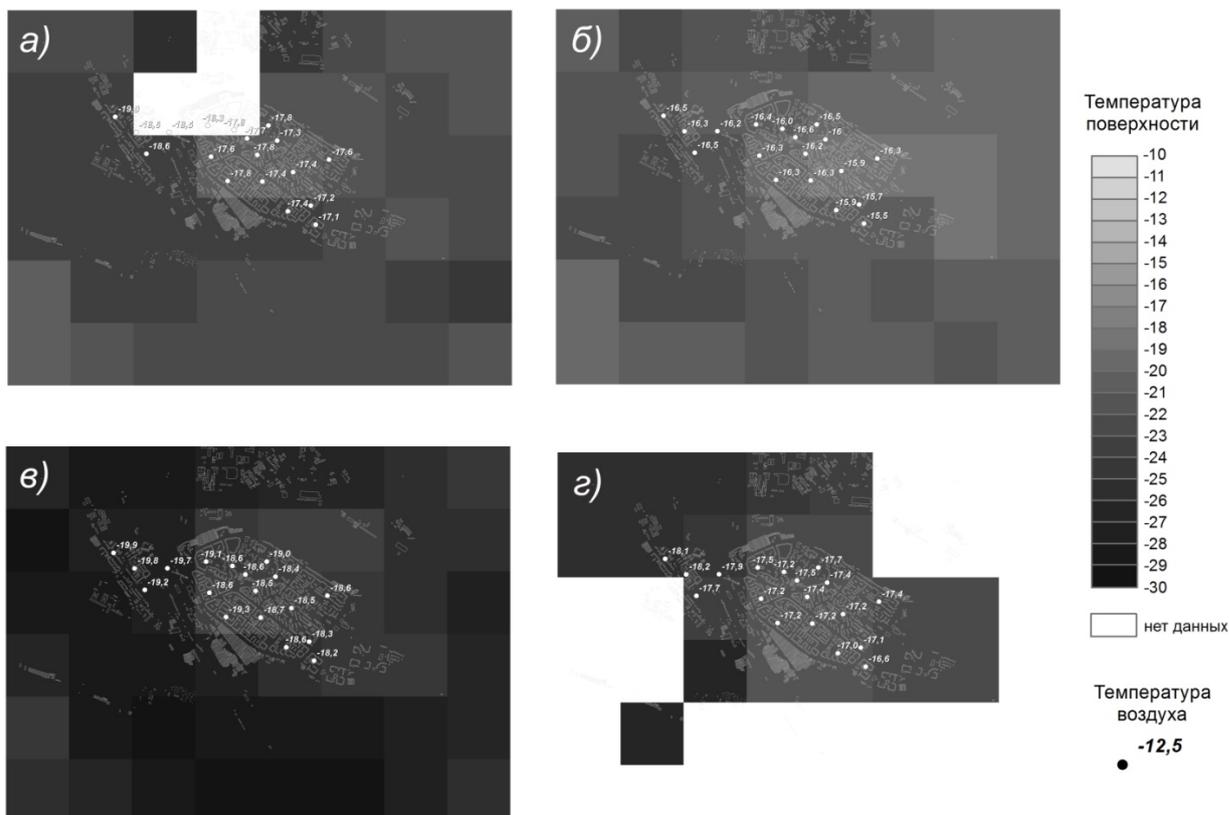
**Рис. 1. Расположение температурных датчиков и АМС в пределах г. Апатиты: 1 – АМС; 2 – датчики и их номера**

Из всех снимков была выделена территория  $6 \times 8$  км, охватывающая центральную часть города. После выделения интересующей территории были отобраны снимки, количество и расположение непустых пикселей которых было достаточно для исследования поверхностного острова тепла и его связи с островом тепла, выявленным по измерениям температуры приземного слоя воздуха: снимки за 29 января, 23:40; 30 января, 03:40; 31 января, 14:00; 31 января, 02:40 (по Московскому времени).

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведено взаимное соотношение температуры поверхности по снимкам системы MODIS и температуры воздуха по данным установленной сети датчиков iButton. Известно, что такие параметры, как температура приземного слоя воздуха и температура земной поверхности, не являются идентичными, они могут различаться в условиях сильных инверсий на несколько градусов.

Амплитуда значений поверхностного острова тепла (Surface urban heat island – SUHI), который фиксируется с помощью снимков, в среднем составляет 4,4 градуса, в то время как амплитуда температуры воздуха в пределах города (Urban heat island – UHI) – всего 1,6 градуса. Данные осредненных UHI и SUHI неплохо соотносятся друг с другом, однако их амплитуда почти в 3–4 раза больше среднего для европейских городов ( $1,7 \pm 0,4$  градусов в дневное время и  $0,4 \pm 0,4$  в ночное [5]). Это можно объяснить спецификой городов, расположенных за полярным кругом, до сих пор не подвергавшихся подобному анализу. Среднесуточная разница в несколько градусов между температурой воздуха, осредненной по всем точкам, и температурой подстилающей поверхности, осредненной по всем пикселям снимков системы MODIS, учитывая, что подстилающая поверхность устойчиво холоднее воздуха (что связано с инверсией, наблюдавшейся во время экспедиционных наблюдений) представляется вполне разумным результатом с точки зрения классической микроклиматологии.



**Рис. 2.** Сопоставление данных полевых измерений температуры воздуха с данными тепловых снимков MODIS за: а) 29 января, 23:40; б) 30 января, 03:40; в) 31 января, 14:00; г) 31 января, 02:40

### Выводы

1. На всех использованных тепловых космических снимках проявляется поверхностный остров тепла в районе плотной застройки Апатит, ограниченном улицами Ферсмана, Строителей, Победы, Северной. Различия температуры земной поверхности между указанным районом и окружающей местностью достигают 5 °С.

2. Независимо от времени суток, разница между температурой поверхности и температурой приземного слоя атмосферного воздуха достигает 4,5 °С (поверхность холоднее воздуха), причём в пределах наиболее интенсивного поверхностного острова тепла – в центральной части города – она уменьшается до 2,4 °С (средненное значение за все время наблюдений).

3. Впервые для города, расположенного за Полярным кругом, с помощью описанной методики были синхронно оценены поверхностный остров тепла (SUNI) и классический городской остров тепла (UNI). Обнаружено, что полученные данные очень хорошо сочетаются с заключениями предыдущих авторов об интенсивности поверхностного острова для зимнего периода для европейских городов, что, по-видимому, связано с исключительным положением города Апатиты в Заполярье. Таким образом, по результатам статьи удалось расширить представления о наблюдающихся различиях в поверхностной температуре для городов Европы в зимний период.

Вопрос о связи значений температуры поверхности и температуры воздуха в условиях наблюдающегося острова тепла для Апатит остается открытым – однако для условий сильных вертикальных инверсий температуры, поверхность в среднем является стабильно более холодной (на 2,5–4,5 °С в пределах всего города), что соответствует теоретическим представлениям.

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ 14-05-31384, грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1497.2013.5 и грантом РГО N.27/2013-НЗ.

#### **Список литературы**

1. Cheval S., Dumitrescu A. The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. Vol. 96. P. 145–153.
2. Hung T., Uchihama D., Ochi S., Yasuoka Y. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2006. Vol. 8. P. 34–48.
3. Imhoff M.L., Zhang P., Wolfe R.E., Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114. P. 504–513.
4. Magee N., Curtis J., Wendler G. The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska // *Theoretical and Applied Climatology*. 1999. Vol. 64. P. 39–47.
5. Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Otle C., Bréon F.-M., Nan H., Zhou L., Myneni R.B. Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities // *Environmental Science and Technology*. 2012. Vol. 46. P. 696–703.

**УДК 550.383**

## **АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ Z-КОМПОНЕНТЫ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ IGRF В ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ В ПЕРИОД 1980–2005 гг.**

В. А. Кочнев

ФГБУН «Институт вычислительного моделирования  
Сибирского отделения Российской академии наук»  
e-mail: [kochnev@icm.krasn.ru](mailto:kochnev@icm.krasn.ru)

Z-компонента магнитного поля Земли (МПЗ) в геоцентрической системе координат наиболее наглядно и полно отображает глобальные свойства МПЗ. По разности Z-компонент анализируется динамика изменения напряженности поля и решена обратная задача для оценки изменения интенсивности источников МП в ядре.

*Ключевые слова:* магнитное поле Земли, вековые вариации.

В настоящее время вековые вариации рассчитываются по данным глобальных магнитных съемок за каждые 5 лет. На поверхности Земли можно выделить несколько различающихся по характеру областей вековых вариаций. Средняя скорость вековых вариаций составляет около 45 нТл/год [1], однако в отдельных областях отмечена скорость до 170 нТл/год. Основными характерными особенностями вековых вариаций в настоящее время являются ослабление главной дипольной компоненты (примерно на 6.3 % за сто лет) геомагнитного поля и смещение на запад линии нулевого магнитного склонения (в среднем примерно на 0.2° в год). Выявлено также [2] несколько резких изменений тренда вековых вариаций (джерков), последний из которых относится к 1992 году.

Обширная литература посвящена проблеме прогноза вековых вариаций геомагнитного поля. Экстраполяция наблюдаемых изменений, включенная, например, в модели поля IGRF [3] и WMM [4], позволяет прогнозировать изменения на несколько лет вперед, однако задача прогноза долгосрочных изменений пока не решена.

Предложен [5] метод прогноза вариаций на основе модели установившегося потока жидкости в ядре (в предположении «вмороженности» магнитного поля в жидкость). Делаются также попытки объяснить различные особенности вариаций процессами, происходящими в ядре [6] [7] и др.

Особенность данной работы в том, что изменение поля рассматривается по Z-компоненте и иллюстрируется в плане со стороны северного полюса и по результатам решения обратной задачи демонстрируется изменение источников в ядре.

На рис. 1 слева показана Z-компонента магнитного поля IGRF-80 северного полушария на высоте 1 км, а справа – Z-компонента магнитного поля IGRF-2005. Вид со стороны северного полюса. Для ориентации на поверхности помещены сокращенные символы POL-полюса и городов: TOK – Токио, KRS – Красноярск, EKT – Екатеринбург, LON – Лондон, OTV – Оттава. Светлыми кружками отмечены два пункта в южном полушарии: CNB – Канберра (Австралия), PAR – Пунта-Аренас (южная оконечность Южной Америки).

Как видно, особых отличий в полях нет. На обоих полях видим вытянутый в направлении 270-90 эллипс в области максимума. В средней части рис. 1 слева видим разность полей Z2005-Z1980. Судя по шкале, разностное поле меняется от -3070 (темная часть в области OTV, где располагается канадский глобальный максимум) до 1370 нТл. Максимум приращения располагается в восточной и южной части северного полушария. На рисунке показано криволинейное сечение, идущее против часовой стрелки и пересекающее минимум разности, а затем идущее по гребню максимума. Справа расположены 5 графиков, соответствующих разностям  $\Delta Z1 = Z1985 - Z1980$ ,  $\Delta Z2 = Z1990 - Z1985$ , и так далее. Как видно, графики разности ведут себя практически одинаково. Сильно уменьшаются в области общего минимума до 500–600 нТл и увеличиваются до 100–200 нТл не столь синхронно в области максимума. В нижнем ряду рис. 1 видим соответствующие разности в южном полушарии. Минимум разности располагается в южной части Атлантического океана. Аномалия уменьшения поля протягивается в субширотном направлении, захватывая Южную Америку и Южную Африку, примыкая к южному полюсу. Аномальное разностное поле в начальной – западной части меняется от -2360 до 2800 нТл. Положительная часть аномалии оконтуривает отрицательную.

Графики по сечению (в нижнем ряду справа в рис. 1), захватывающему на краях две положительные и в центре отрицательную аномалию, также синхронны в левой части, где максимальная скорость роста МП составляет 100–120 нТл/год.

В правой части отмечается сильное изменение скорости увеличения роста магнитного поля. Если максимальная скорость роста в интервале 1980–1985 г. была близка к 0, то в интервале 1985–1995 г. она составляла 50 нТл/год, а в 1995–2005 г. 90-100 нТл/год. В итоге общий максимум роста МП составил около 1500 нТл за 20 лет. Такое ускорение роста равно 100 нТл/год характерно для джерков. Область аномального роста поля находится в Тихом океане в интервале долгот от 30° до 60° и от 30° до 60° южной широты. В среднем скорость изменения магнитного поля в южном полушарии составляла от -95 до 115 нТл в год. В северном полушарии от -120 до 55 нТл в год. В узкой экваториальной зоне картина обратная: увеличение поля в западной и уменьшение в восточной.

Попытаемся оценить возможное положение источников, увеличивающих или уменьшающих МП. Если источники находятся на поверхности планеты, то их местоположение совпадает с положением аномалий разности.

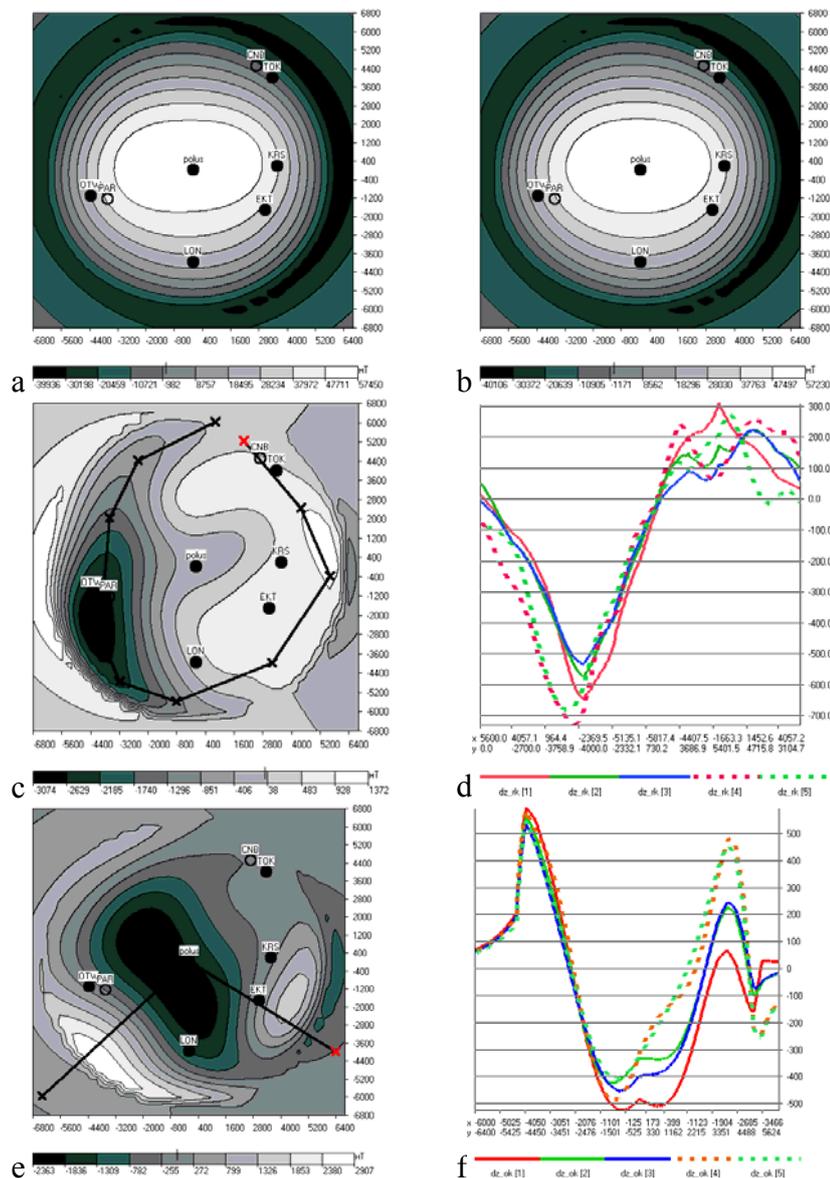


Рис. 1. а) Z-компоненты IGRF в геоцентрической системе, северное полушарие, 1980; б) то же, 2005; в) Z(2005-1980) северного полушария, д) графики Z(1985-1980), Z(1990-1985) ... по сечению с, е) Z(2005-1980) южного полушария, ф) графики Z(1985-1980), Z(1990-1985) ... по сечению е.

Наиболее вероятным является вариант изменения интенсивности источников ядра. Решая обратную задачу с помощью пакета ADM-3D-earth [8] [9], получим вариант интенсивности источников, приведенные на рис. 2. В восточной части видим дугообразную аномалию изменения эффективной намагниченности (ЭН) с максимумом 231 А/м. Уменьшение ЭН проявляется в меньшей степени и составляет -86 А/м. В южном полушарии ядра превалируют уменьшение источников ядра, находящихся в средних широтах ядра с центром на 0° долготы, с минимумом -197 А/м, а максимум увеличения источников, находящихся в восточной части, равен 126 А/м. В целом для всей модели ядра Земли максимальный рост интенсивности источников составляет в восточной части ядра -231 и 126 А/м и уменьшается в западной с минимумами -86, -197 А/м.

На рис. 3 приведена модель эффективной намагниченности ядра северного и южного полушария. Сравнивая эти модели с моделями изменения ЭН, расположенными выше, замечаем, что они подобны. Максимуму ЭН соответствует максимум роста.

Исключение составляет западная часть северного полушария, где максимуму интенсивности источников соответствует уменьшение ЭН модели ядра со скоростью около 3.5 А/м в год. При таком темпе убывания западный источник, создающий Канадскую глобальную аномалию, может исчезнуть примерно через 500 лет. За это же время восточные источники будут увеличивать свою интенсивность, что приведет в северном полушарии примерно к такой же асимметрии, что есть сейчас в южном полушарии.

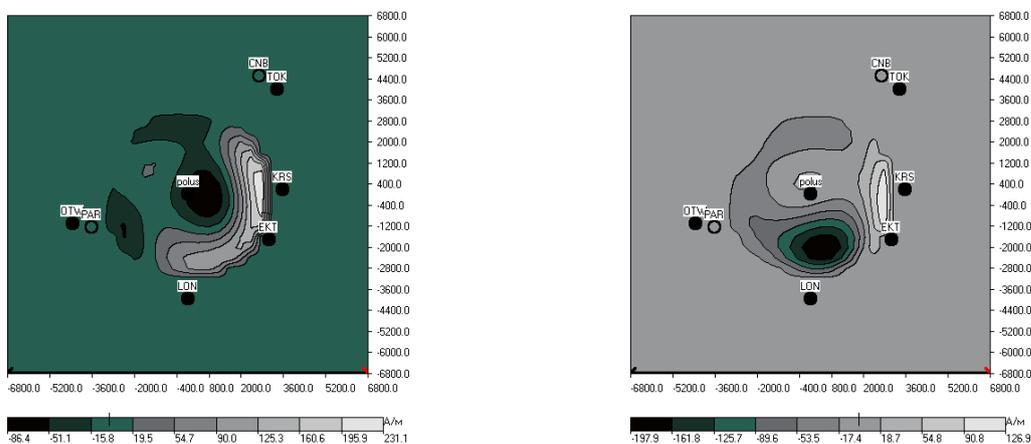


Рис. 2. Изменение напряженности источников в северном и южном полушариях ядра

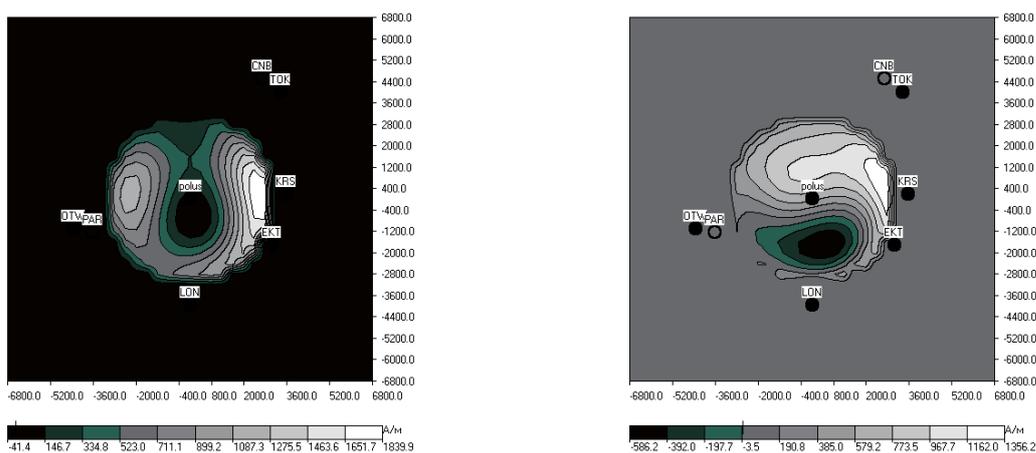


Рис. 3. Эффективная намагниченность северного и южного полушария ядра (вид со стороны северного полюса)

Такое неравномерное изменение источников может быть вызвано двумя основными причинами: изменением скорости и направления движения жидкой субстанции и температуры в разных частях ядра.

### Выводы

1. По Z-геоцентрической компоненте вектора магнитного поля при наблюдении со стороны северного полюса наглядно выделяются аномалии МП Земли.
2. В северном полушарии наблюдается плавное увеличение МП Сибирско-Азиатской аномалии и интенсивное уменьшение Канадской глобальной аномалии.
3. В южном полушарии отмечено интенсивное уменьшение Южно-Атлантической аномалии (около 100 нТл/год) и увеличение МП западнее и восточнее этой аномалии. Причем наблюдается увеличение скорости роста восточной аномалии.

По разности Z-компонент в период 1980-2005 г. решена обратная задача для определения изменения эффективной намагниченности ядра. Выделены аномалии изменения ЭН от –200 до 230 А/м.

### Список литературы

1. Government of Canada N.R.C. Secular variation [Электронный ресурс]. 2010. URL: [http://geomag.nrcan.gc.ca/mag\\_fld/sec-eng.php](http://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-eng.php) (дата обращения: 06.12.2013).
2. Courtillot V., Le Mouél J.-L. Geomagnetic secular variation impulses. // Nature. 1984. Т. 311. С. 709–716.
3. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. и др. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation // Geophysical Journal International. 2010. Т. 183. № 3. С. 1216–1230.
4. Maus S., Macmillan S., McLean S., Thomson A.W.P., Nair M., Rollins C. The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015, NOAA Technical Report NESDIS/NGDC. 2011.
5. Beggan C.D., Whaler K.A. Forecasting secular variation using core flows // Earth, Planets and Space. 2010. Т. 62. № 10. С. 821–828.
6. Aubert J., Finlay C.C., Fournier A. Bottom-up control of geomagnetic secular variation by the Earth's inner core // Nature. 2013. Т. 502. № 7470. С. 219–223.
7. Finlay C.C., Dumberry M., Chulliat A., Pais M.A. Short Timescale Core Dynamics: Theory and Observations // Space Sci Rev. 2010. Т. 155. № 1–4. С. 177–218.
8. Кочнев В.А., Гоз И.В. Нераскрытые возможности магнитометрии // Геофизика. 2006. № 6. С. 51–55.
9. Кочнев В.А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо // Геофизический журнал. 2013. Т. 35. № 4. С. 3–15.

УДК 528.8

## ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ ИНДЕКСА РАСТИТЕЛЬНОСТИ NDVI В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Е. В. Варламова, В. С. Соловьев

ФГБУН «Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера  
СО РАН»

e-mail: [varlamova1@ikfia.sbras.ru](mailto:varlamova1@ikfia.sbras.ru)

По данным спутника Spot Vegetation за период 1998-2012 гг. проведено исследование сезонных изменений индекса NDVI растительности Восточной Сибири на примере тестовых участков, расположенных в/вне зоны вечной мерзлоты. Для каждого участка построены графики сезонных и годовых вариаций NDVI трех типов растительности - хвойные вечнозеленые, лиственные и хвойные листопадные. Проведен сравнительный анализ вариаций NDVI с поведением температуры воздуха.

*Ключевые слова:* Spot Vegetation, вегетационный индекс NDVI, вечная мерзлота.

### Введение

Как важнейший компонент биосферы и источник ресурсов, растительный покров является чувствительным «индикатором» изменений в биосфере и климате.

В условиях труднодоступности и обширности значительной части исследуемой территории методы дистанционного зондирования являются неопределимыми

источниками информации о состоянии окружающей среды, обеспечивая высокий уровень достоверности и регулярности измерений ключевых параметров.

Работы по исследованию растительного покрова с использованием данных дистанционного зондирования ведутся давно как в России, так и за рубежом. По данным спутниковых и наземных наблюдений показано, что в последние десятилетия в ряде регионов произошли заметные сдвиги сроков фенологических событий у растений, которые связывают с повышением температуры воздуха [1–4]. В работах [5, 6] отмечается, что, в целом, за последние 30 лет на северных широтах наблюдается тенденция роста вегетационного индекса NDVI.

Целью работы является исследование сезонных изменений индекса NDVI растительности Восточной Сибири на примере территорий, расположенных в/вне зоны вечной мерзлоты по спутниковым данным.

### Исходные данные и методика

В работе использован набор 10-дневных значений NDVI (продукт VGT-s10), построенный по данным спутника Spot Vegetation за период 1998–2012 [7]. Также использована цифровая карта наземных экосистем Северной Евразии [8]. Вариации среднесуточной температуры воздуха и осадков получены из открытых источников данных 22-х метеостанций Росгидромета.

На территории Приленского плато, Среднесибирского плоскогорья и Западносибирской равнины были выбраны пять участков: участки №№ 1–3, 5 находятся в зоне вечной мерзлоты, участок № 4 – вне этой зоны. Расположение и размер участков выбирались с условием наличия/отсутствия залегания вечной мерзлоты, однородностью видового состава по типам доминирующей растительности, ровного (низменного) рельефа и отсутствия крупных водных объектов. На рис. 1. показано географическое расположение всех участков.

Участки №№ 1–2 расположены на Приленском плато, которое является наиболее засушливым районом Якутии. Годовое количество осадков составляет не более 200–220 мм, что согласно климатической классификации относит эту территорию к зоне полупустынь. Высокие летние температуры воздуха (июль, 35–40 °С) вызывают иссушающий эффект подстилающей поверхности, а наличие большого количества термокарстовых котловин оказывают значительное влияние на формирование водного баланса этой территории. На территории участка № 3 климат также резко континентальный, но значительно мягче, чем в Центральной Якутии: зимой значительно теплее, летом прохладнее, количество осадков вдвое больше (400–500 мм). Климатические условия территории участков № 4 и № 5 по со среднегодовой температуре воздуха (1,3 и –0,9 °С) и уровню осадков (550 и 400 мм в год) достаточно близки. Однако участок № 4 расположен вне зоны вечной мерзлоты.

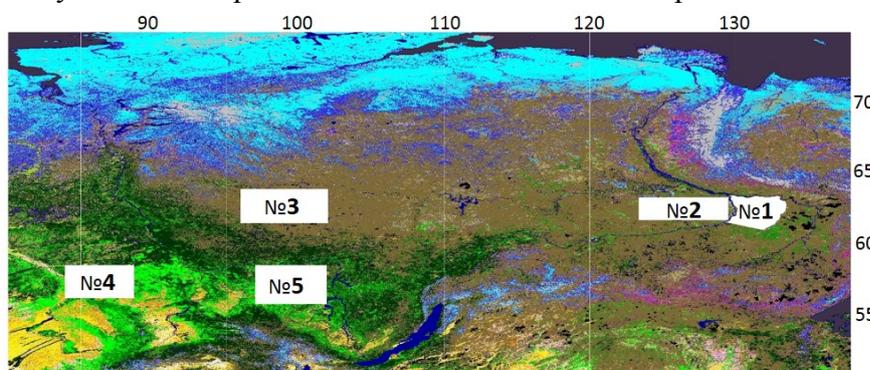
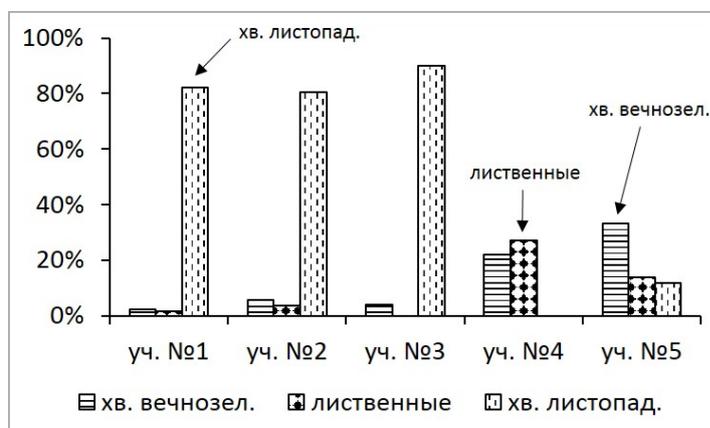


Рис. 1. Расположение тестовых участков №№ 1–5

На рис. 2. в процентном соотношении показана занимаемая площадь территории всех участков тремя типами растительности. На участках №№ 1–3 доминирует «хвойный листопадный» тип растительности (преимущественно лиственница) и занимает 81–90 % территории. На участках №№ 4–5 – тип «хвойные вечнозеленые» (22, 33 %) и «лиственные» (27, 14 %).



**Рис. 2. Занимаемая площадь территории участков №№ 1–5 типами растительности: хвойные вечнозеленые, лиственные, хвойные листопадные**

### Результаты и обсуждение

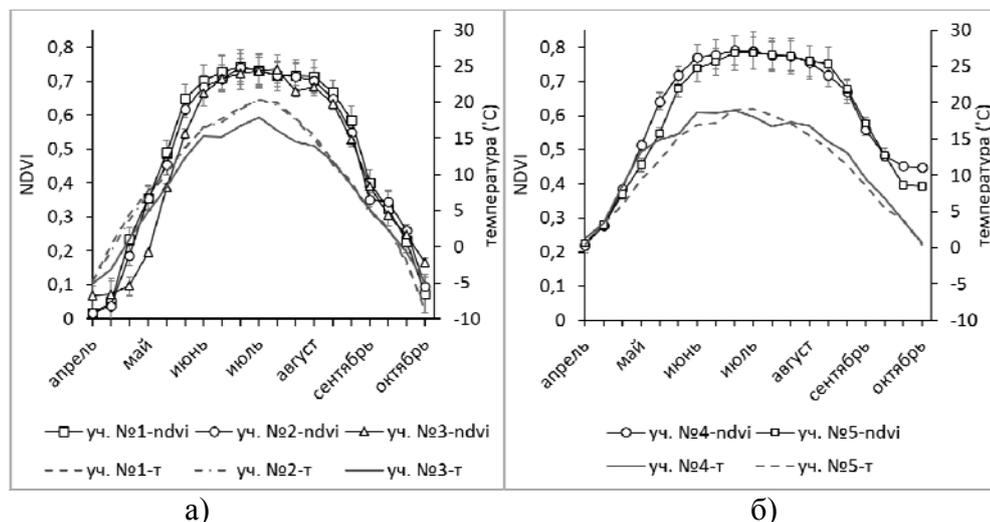
По исходным наборам данных для каждого участка были построены графики сезонных и годовых вариаций индекса NDVI трех типов растительности и сопутствующие метеорологические показатели (температура воздуха и осадки). В максимуме сезона вегетации абсолютные значения NDVI типа «лиственные» чуть выше чем «хвойные вечнозеленые» и «хвойные листопадные». Показано, что в пределах территории отдельно взятого участка, NDVI всех трех типов растительности в целом имеют схожие сезонные и годовые вариации. Таким образом, показатели NDVI трех типов растительности каждого участка были усреднены.

Проведен сравнительный анализ показателей NDVI с температурой воздуха. На участках №№ 1–3, находящихся в зоне залегания вечной мерзлоты, но с различным уровнем осадков, наблюдается высокая корреляция (0,7–0,9) NDVI с температурой в начале сезона вегетации (май) на всех трех участках на протяжении 15 лет. В течение сезона вегетации (май–сентябрь 1998–2012) NDVI участка №3 хорошо коррелирует (0,7) с температурой воздуха, а для участков №№ 1–2 этот коэффициент составил всего 0,3–0,4. Можно отметить, что максимальный пик сезона вегетации (июль) характерен антикорреляцией (–0,5–(–0,1)) NDVI с температурой для участков №№1–2 с наиболее засушливыми условиями и высокой температурой этого месяца. На уч. №№ 4–5 в начале сезона вегетации также (как и для участков №№ 1–3) наблюдается хорошая корреляция (0,6–0,7) NDVI с температурой в апреле (месяцем ранее в виду положительных температур). Однако в течение всего сезона вегетации корреляции NDVI с температурой не отмечено. Тем не менее общим для всех участков является тенденция роста NDVI на фоне повышения температуры воздуха. Прирост вегетационного индекса за рассматриваемый период (1998–2012) для участков №№ 1–2 составил ~ 5 %, а для участков №№ 3, 4, 5 ~ 9, 3, 4 %, соответственно.

В зоне «вечной мерзлоты» водообеспеченность растительности в корнеобитаемом слое зависит от темпа сезонного протаивания грунтов. Наибольшее оттаивание почвы достигается во второй половине августа – начале сентября. Таким образом, на

территориях с засушливым климатом (высокие летние температуры и низкий уровень осадков) недостаток влаги почвы компенсируется оттаиванием деятельного слоя мерзлоты.

На рис. 3 (а, б) показаны сезонные вариации NDVI растительности участков и температуры воздуха, усредненные за 1998–2012 гг. По вертикальной оси слева отложены значения NDVI, справа – значения температуры воздуха. Декадные риски (вторая декада апреля – вторая декада октября) отложены по горизонтальной оси.



**Рис. 3. Сезонные вариации NDVI растительности участков и температуры воздуха за 1998–2012 гг.: а) участки №№ 1–3; б) участки №№ 4–5**

Сезонный ход индекса NDVI участков №№ 1–3, 5, расположенных в зоне вечной мерзлоты (по сравнению с NDVI участка № 4) имеет ярко выраженную "трапецевидную" форму с длительной фазой максимума, характер температурных кривых иной – достигнув максимума ко второй декаде июля, температура воздуха начинает снижаться. Индекс NDVI после прохождения температурного максимума воздуха не снижается, сохраняя ранее достигнутые значения, более того в отдельные годы наблюдается небольшой его рост к середине августа. Такую особенность в сезонном поведении NDVI можно объяснить оттаиванием многолетнемерзлых пород во второй половине лета, что обеспечивает достаточный уровень влагосодержания почв для роста/поддержания растительности.

### Выводы

Сезонное поведение NDVI в зоне распространения многолетнемерзлых пород, где средний показатель осадков за летние месяцы варьирует ~ от 100 мм (уч. №№ 1–2) до 300 мм (уч. №№ 3, 5), но летние температуры достаточно высоки (в июле столбик термометра нередко достигает отметки +40 °C на уч. №№ 1–2), обусловлено температурным режимом воздуха в весенний период и оттайкой многолетнемерзлых пород во второй половине лета, что ведет к увлажнению верхних слоев почвы и, соответственно, расширению фазы максимума растительного покрова.

Общим для всех рассматриваемых участков является тенденция роста среднесезонных значений NDVI в течение 1998–2012 гг. на фоне повышения температуры воздуха. Прирост вегетационного индекса составил: ~ 5 % для участков №№ 1–2 и ~ 9 %, 3 %, 4 % для участков №№ 3, 4, 5, соответственно. Коэффициент корреляции межгодовых вариаций NDVI с температурой воздуха на участках №№ 1, 2, 3 составил ~ 0,3, 0,4, 0,7 соответственно, а на участках №№ 4–5 корреляция отсутствует.

### Список литературы

1. White, M.A., De Beurs, K.M., Didan, K., Inouye, D.W., Richardson, A.D., Jensen, O.P., O'Keefe, J., Zhang, G., Nemani, R.R., van Leeuwen, W.J.D., et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 // *Glob. Chang. Biol.* 2009. 15. P. 2335–2359.
2. N. Delbart, G. Picard, T. Le Toans, L. Kergoat, S. Quegan, I. Woodward, D. Dye, V. Fedotova. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale // *Global Change Biol.*, 14 (2008). P. 603–614.
3. E. Pudas, M. Leppala, A. Tolvanen, J. Poikolainen, A. Venalainen, E. Kubin. Trends in phenology of *Betula pubescens* across the boreal zone in Finland // *Int. J. Biometeor.*, 52 (2008). P. 251–259.
4. Menzel, A., Fabian, P. Growing season extended in Europe // *Nature* 1999. 397. P. 659–659.
5. Compton J. Tucker, Daniel A. Slayback, Jorge E. Pinzon, Sietse O. Los, Ranga B. Myneni, Malinda G. Taylor. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 // *International Journal Biometeorology*. 2001. 45. P. 184-190.
6. J. Ronald Eastman, Florencia Sangermano, Elia A. Machado, John Rogan, Assaf Anyamba. Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 // *Remote Sensing*. 2013. 5. P. 4799-4818.
7. VEGETATION portal. URL: <http://www.spot-vegetation.com> (дата обращения: 29.05.2014).
8. Барталев С.А., Белвард А.С, Ершов Д.В., Исаев А.С. Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation. Проект Global Land Cover 2000. Информационная система TerraNorte. Институт космических исследований РАН, 2004. URL: <http://terranorte.iki.rssi.ru> (дата обращения: 29.05.2014).

УДК 528.83, 528.88

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ МЕТАНА НА АРКТИЧЕСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ (ст. Тикси) ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В. С. Стародубцев, В. С. Соловьев

ФГБУН «Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера»  
СО РАН

e-mail: [starodubjr@ikfia.sbras.ru](mailto:starodubjr@ikfia.sbras.ru), [solovyev@ikfia.sbras.ru](mailto:solovyev@ikfia.sbras.ru)

На обсерватории ПГО Тикси (побережье м. Лаптевых) проводились (октябрь 2011 – февраль 2013) измерения метана с помощью газоанализатора Fast Methane Analyzer DLT-100. Исследования суточных вариаций показали, что в летние месяцы наблюдается повышение концентрации метана в дневные часы и его понижение в остальное время суток. В зимние месяцы суточный ход не имеет каких-либо заметных вариаций. Летний суточный ход метана может быть обусловлен ветровым режимом в пункте наблюдения: днем доминируют ветры со стороны тундры, где находятся источники метана, в остальное время – со стороны моря, где содержание метана в атмосфере низкое. Проведено сопоставление с данными ДЗЗ (AIRS/Aqua), корреляция среднемесячных вариаций метана составила 0,69.

*Ключевые слова:* метан, дистанционное зондирование, глобальное потепление, вечная мерзлота.

## **Введение**

Метан занимает важное место среди малых газовых компонент атмосферы. Он примечателен тем, что по эффекту вклада в глобальное потепление атмосферный метан находится на втором месте после углекислого газа, если степень воздействия углекислого газа на климат условно принять за единицу, то парниковая активность метана составит 21 единицу [1].

По приблизительным оценкам в зоне вечномёрзлых пород содержится не менее  $2,7 \cdot 10^6$  Мт [2]. Таким образом, разрушение вечной мерзлоты в результате глобального потепления может привести к резкой эмиссии метана в атмосферу и соответствующей стимуляции парникового эффекта. Таким образом, исследование и мониторинг метана в атмосфере являются одними из наиболее актуальных задач современной науки.

## **Исходные данные**

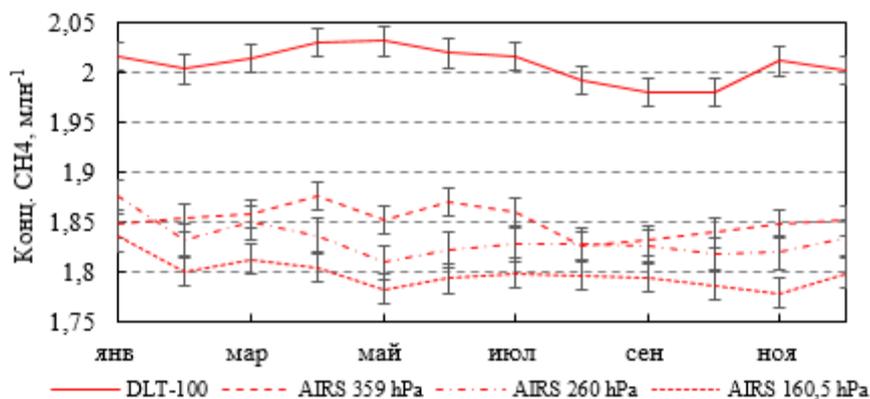
В работе использованы данные газоанализатора Fast Methane Analyzer DLT-100, который был установлен в полярной геокосмофизической обсерватории (ПГО) "Тикси" в 2011 г. в рамках сотрудничества ИКФИА СО РАН и ТОИ ДВО РАН. Диапазон измеряемых значений концентрации метана составляет от 10 млрд<sup>-1</sup> до 25 млн<sup>-1</sup>. Регистрация ведется автоматически, с периодом 5 сек. Погрешность определения концентрации метана составляет не более 1 %. Измерения проводились с 01.10.2011 по 28.02.2013 г.

Помимо наземных измерений, в работе использованы данные дистанционного зондирования (ИСЗ Aqua, прибор AIRS), представляющие карты среднесуточного распределения метана с разрешением 1x1 град. на трех барических высотах – 359 гПа (~7 км), 260 гПа (~9,7 км) и 160,5 гПа (свыше 10 км). Концентрация метана по данным прибора AIRS рассчитывалась, как среднее по прямоугольному участку в широтно-долготном диапазоне: 69–75 с.ш. и 122–133 в.д.

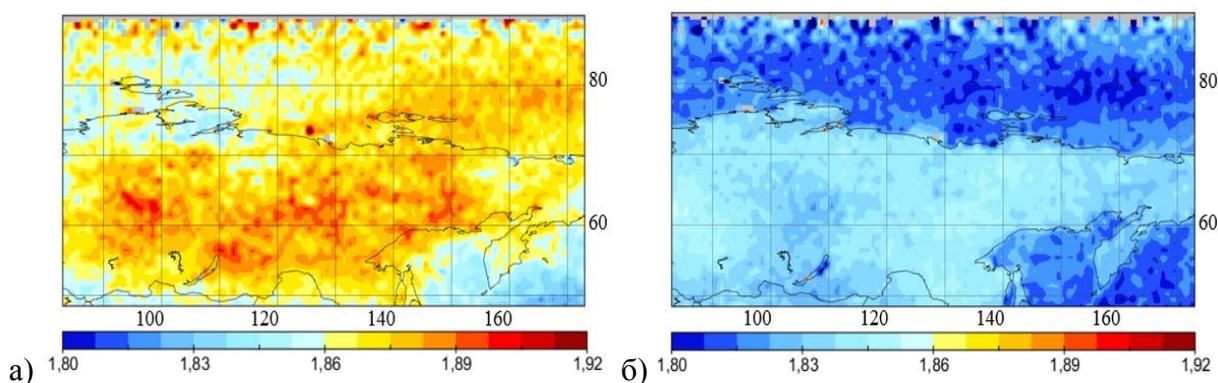
Для анализа вариаций ветра использовались 3х-часовые данные, полученные на метеостанции Тикси (71 с.ш., 128 в.д.).

## **Обсуждение**

На рис. 1 представлены среднемесячные вариации концентрации метана и стандартное отклонение, полученные по данным прибора DLT-100 (сплошная линия) и AIRS (пунктирные линии) в период 01.01.2012-31.12.2012. Из сравнения графиков видно, что сезонный ход метана на высоте ~7 км (AIRS), подобен сезонному ходу, полученному из наземных наблюдений (DLT-100): наблюдаются аналогичные периоды повышения концентрации в январе-феврале и спад в летний период. Коэффициент корреляции составил 0,69. Максимальные среднесуточные значения концентрации метана наблюдались в январе-феврале, в отдельных случаях по прибору AIRS – 1,94 млн<sup>-1</sup>, по DLT-100 – 2,16 млн<sup>-1</sup>, минимальные значения в июне составили – 1,81 млн<sup>-1</sup> и – 1,97 млн<sup>-1</sup>, соответственно.



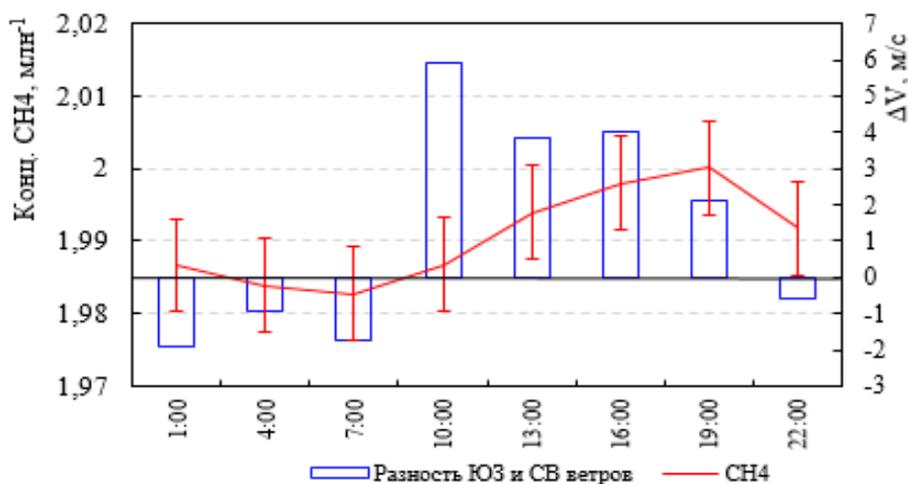
**Рис. 1. Среднемесячные вариации концентрации метана по данным прибора DLT-100 (сплошная линия) и AIRS (пунктирные линии) в период 01.01.12-31.12.12**



**Рис. 2. Распределение метана по данным прибора AIRS за: а) январь 2012, б) июнь 2012**

Среднемесячные карты распределения метана, построенные по данным AIRS/Aqua, представлены на рис. 2. В зимние месяцы (январь 2012, рис. 2, а) концентрация метана выше по сравнению с летними значениями (июнь 2012, рис. 2, б). Хорошо просматривается различие в распределении метана над океаном и сушей в летний период. Летом источником метана являются содержащиеся в почве анаэробные микроорганизмы. Наблюдаемое понижение концентрации в летний период может быть обусловлено двумя основными механизмами [3]: в результате химической реакции метана с гидроксидом (ОН) и стоком в почву. Причем до 85 % метана уничтожается в ходе реакции с гидроксидом [4], отсюда пониженное содержание метана над водной поверхностью. Зимой сток метана и его эмиссия с почвы минимизируются. Сезонное поведение метана с максимумом в январе-феврале и минимумом в июне соответствуют результатам исследований, приведенным в работах [4–8].

На рис. 3 приведен график среднего суточного хода концентрации метана (красная линия) в летние месяцы (июнь, июль, август 2012 г.); усредненные за этот же период времени значения разности юго-западного и северо-восточного ветра ( $\Delta V$ ) отображены гистограммой. В дневное время (с ~ 10 и до ~ 19 час местного времени) наблюдается повышение содержания метана в воздухе и понижение в остальное время суток. В зимние месяцы суточный ход не имеет каких-либо заметных вариаций.



**Рис. 3. Усредненные (июнь, июль, август 2012 г.) суточные вариации концентрации метана (красная линия) и разность скоростей юго-западного и северо-восточного ветров в ПГО Тикси**

В условиях отсутствия крупных техногенных источников метана в исследуемом регионе, распределение метана определяется балансом между природными механизмами стока (уничтожение метана в реакциях с гидроксидом) и эмиссии (результат жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов в почве), что наглядно демонстрируется на рис. 2. Поэтому рационально предположить, что характерный вид суточного хода метана в летнее время формируется переносом воздушных масс с низким содержанием метана с моря и/или переносом воздуха с повышенным содержанием метана с тундры.

Ветровой режим в пункте наблюдения (ПГО Тикси), расположенной недалеко от побережья м. Лаптевых, достаточно изменчив. Однако в летний период в суточных вариациях ветра можно выделить особенность: после ~ 7 и до ~ 22 час местного времени ветры с юго-западного сектора (с суши) доминируют над ветрами, дующими с моря:  $\Delta V > 0$ . В остальное время доминируют ветры со стороны моря ( $\Delta V < 0$ ). Очевидно, такой суточный ветровой режим формирует суточный ход концентрации метана в пункте наблюдения: днем ветер, дующий со стороны тундры, приносит воздух с повышенным содержанием метана, а в остальное время ветры со стороны моря переносят воздух с низким содержанием метана.

### **Заключение**

Представлены результаты измерения концентрации метана в приземном слое атмосферы, полученные с помощью газоанализатора DLT-100 на ПГО “Тикси”. Проведено сопоставление с данными AIRS/Aqua, значение коэффициента корреляции среднемесячных вариаций метана составило 0,69. Показана особенность в суточном ходе значений метана в летнее время. В дневные часы (после ~ 7 и до ~ 22 час местного времени) содержание метана в воздухе повышается, по сравнению с остальным временем суток. Такое поведение концентрации метана может быть объяснено режимом ветра в пункте наблюдения. Днем юго-западный ветер со стороны тундры приносит воздух с повышенным содержанием метана, тогда как в остальное время суток доминирует северо-восточный ветер, несущий воздушные массы со стороны моря, где содержание атмосферного метана ниже. Высокие концентрации метана зимой с максимумом в январе-феврале и низкие летом (минимум в июне) соответствуют современным описаниям картины поведения атмосферного метана для Северного полушария.

### Список литературы

1. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press. 1995. P. 21–23.
2. Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and hydrate accumulation within permafrost in Russia // Cold regions Science and Technology. 2000. V. 31. P. 189–197.
3. Белан Б.Д., Креков Г.М. Влияние антропогенного фактора на содержание парниковых газов в тропосфере. 1. Метан // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 361–373.
4. Адушкин В.В., Кудрявцев В.П. Глобальный поток метана в атмосферу и его сезонные вариации // Физика Земли. 2010. № 4. С. 78–85.
5. Макарова М.В., Поберовский А.В., Яговкина С.В., Кароль И.Л., Лагун В.Е., Парамонова Н.Н., Решетников А.И., Привалов В.И. Исследование процессов формирования поля метана в атмосфере северо-западного региона Российской Федерации // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 1–13.
6. Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Шмаков И.А. Содержание метана в тропосфере Западной Сибири по данным AIRS/AQUA // Известия Алтайского государственного университета. 2012. Т. 1-1. № 73. С. 191–196.
7. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // Tellus. 2010. V. 62B. № 5. P. 403–416.
8. Xiong X., Christopher D. Barnett, Zhuang Q., Machida T., Sweeney C., Prabir K. Patra. Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations // Journal of geophysical research. 2010. V. 115. P. 1–15.

УДК 551.324 + 551.326 (268.45)

## МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА АЙСБЕРГОПРОДУЦИРУЮЩИМИ ЛЕДНИКАМИ НОВОЙ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

И. А. Бычкова, Е. В. Платонова

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

e-mail: [bychkova@aari.ru](mailto:bychkova@aari.ru)

По материалам оптических и радиолокационных космических снимков за 1986–2013 гг. и топографическим картам 1971 г. выявлены многолетние изменения в положении 8 выводных ледников восточного побережья северного острова Новой Земли. Проведено сравнение ледников восточного побережья Новой Земли по их способности генерировать айсберги.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, спутник, оптический диапазон, радиолокация, айсберг, динамика выводных ледников.

### Введение

В последние годы отмечается резкое увеличение деловой активности в Арктике, вызванное, в частности, началом работ по освоению углеводородных месторождений на шельфе арктических морей. Сложная ледовая обстановка, характерная для этих морей, является фактором повышенного риска как для производства сейсморазведки и буровых работ, так и для эксплуатации нефтедобывающих платформ. Используемые

для добычи углеводородов в замерзающих морях стационарные и плавучие платформы рассчитаны на характерные для данного района ледовые условия. Однако такие ледяные образования, как ледяной остров или крупный айсберг, могут представлять реальную угрозу для подобных сооружений [1]. Для сейсморазведки и буровых работ опасность представляют уже не только айсберги, но и их куски и обломки, а также малые ледяные поля. Поэтому для обеспечения безопасности работ в шельфовой зоне арктических морей необходимо иметь представление об основных источниках айсбергов в конкретном районе, о межгодовой и сезонной изменчивости айсбергового стока с выводных ледников. Для решения этих задач требуется организация постоянного наблюдения в шельфовых зонах с целью раннего обнаружения айсбергов. Обеспечить такие регулярные наблюдения в труднодоступных полярных районах можно только с помощью дистанционных средств, прежде всего – спутников. Спутниковый мониторинг района выводных ледников позволяет выявить наиболее айсбергоопасные участки морской акватории. Безусловный интерес представляет также использование спутников для изучения многолетней изменчивости отступления ледников, связи отступления ледников с климатическими изменениями в Арктике.

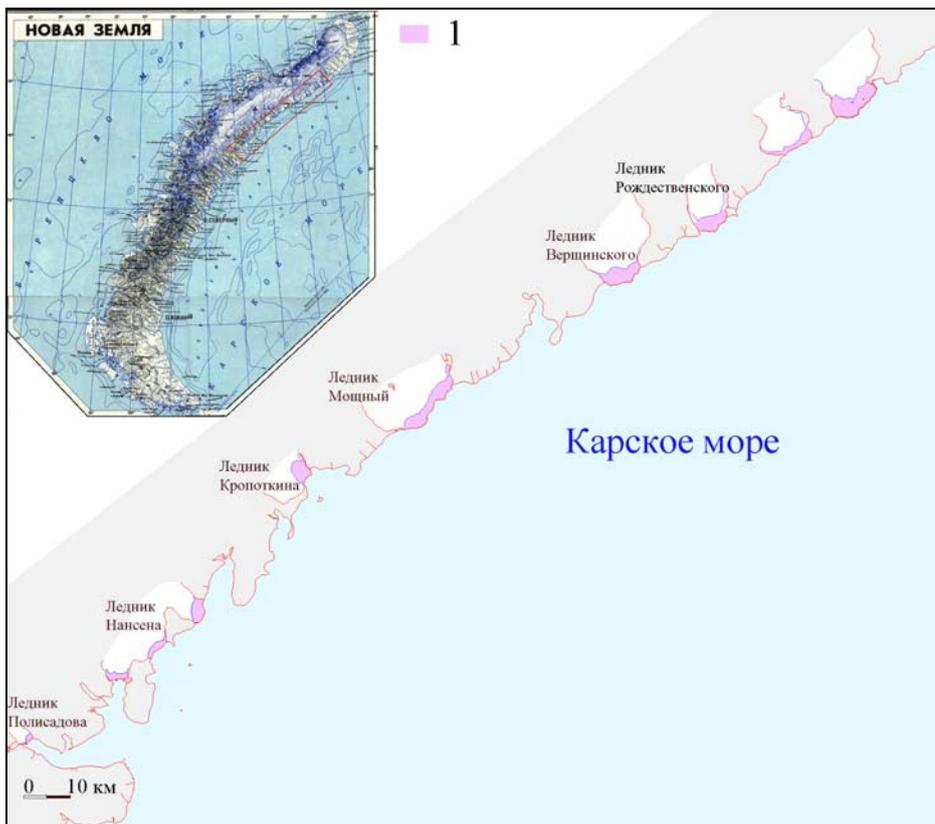
### **Район исследований. Материалы и методы**

В работе исследованы 8 самых северных ледников восточного побережья Новой Земли: ледник Полисадова, Нансена, Кропоткина, Мощный, Вершинского, Рождественского, Средний и Розе (рис. 1). Наблюдение за этими ледниками Новой Земли ведется, в той или иной степени, более 100 лет. С начала XX в. здесь отмечается сокращение оледенения, выражающееся в отступании кромок ледников и понижении поверхности ледников, уменьшении скорости движения и толщины выводных ледников; скорость отступления ледников 100 лет назад составляла около 100 м в год [2].

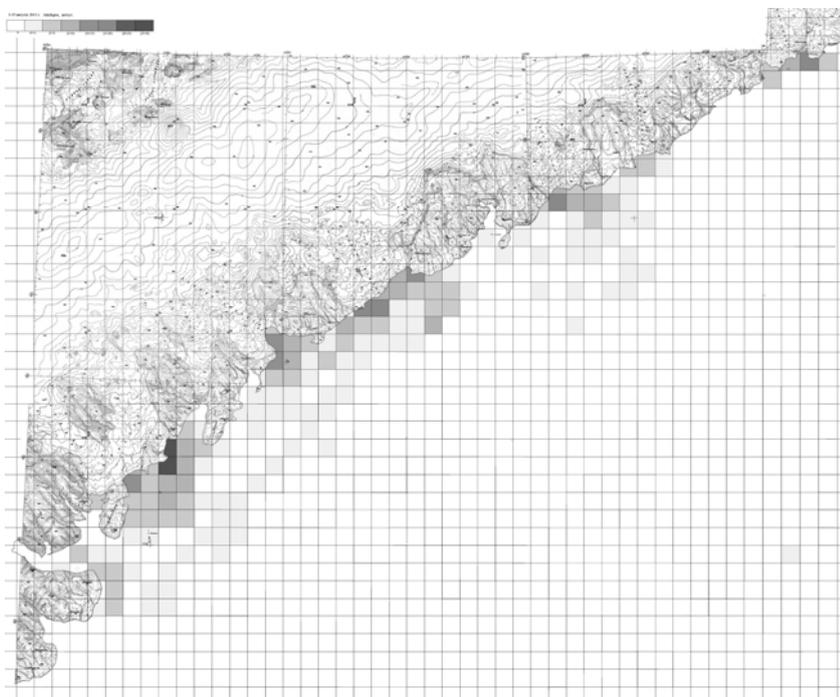
В научных публикациях последних лет приводятся сведения об отступании отдельных новоземельских ледников за конкретные годы. Так, в работе Кураева с соавторами [3], по материалам спутниковых наблюдений 1990–2000 гг. сделан вывод об отступании ледника Мощный за эти годы на 7,76 км<sup>2</sup>, а ледника Розе – на 6,55 км<sup>2</sup>. По оценкам сотрудников Института географии средняя скорость отступления ледников Карского берега Новой Земли за последние 50 лет составила 19 м/год при этом суммарная площадь отступления ледников была равной 75 км<sup>2</sup> [4].

Для изучения новоземельских ледников были использованы спутниковые данные видимого диапазона за 1985–2013 гг. и радиолокационные данные последних лет. В частности, применялись снимки с ИСЗ Landsat-7,-8 с разрешением 15 и 30 м из архива USGS, снимки радиолокатора ASAR/ENVISAT с разрешением 30–150 м (режим IM) из базы данных MIRAVIS Европейского космического агентства, размещенной в свободном доступе. Также анализировались квик-луки кадров высокого разрешения со спутников видимого диапазона EROS-B, WorldView и др., размещенные в базе данных компании СКАНЭКС. Из архивов выбирались снимки за июль-август – период, когда акватория, в основном, очищается ото льда и припай не мешает дешифрированию кромок ледников.

Картирование границ выводных ледников по снимкам разных лет проводилось в программных пакетах ScanMagic и ENVI 5.1. По разнице в положении этих границ за разные годы определялась площадь отступления ледника  $dS$  за конкретный временной период  $dt$ . Для каждого ледника была определена протяженность фронта вдоль морской границы  $l$  и скорость отступления ледника  $dS/l dt$ . По данным наблюдений были составлены таблицы скорости отступления выводных ледников и таблицы изменения площадей основных ледников. В качестве эталонного года были использованы топографические карты Новой Земли издания 1971 г.



**Рис. 1. Основные айсбергопроизводящие ледники Карского побережья Новой Земли. Район ледников обозначен красным прямоугольником на карте-врезке Новой Земли. 1 – площадь отступления ледников в период с 1970 по 2013 гг.**



**Рис. 2. Плотность распределения айсбергов у восточного побережья Новой Земли в августе 2012 г. по спутниковым данным**

### Полученные результаты

Максимальная площадь отступления отмечена у ледника Мощный имеющего наибольшую протяженность вдольберегового фронта. За 1970–2013 гг. этот ледник отступил на 24,7 км<sup>2</sup>, при средней скорости отступления 34 м/год. На 20 км<sup>2</sup> отступил ледник Нансена, спускающийся к морю тремя лопастями; на 17,8 км<sup>2</sup> – ледник Вершинского. Наименьшая площадь отступления (1,16 км<sup>2</sup>) зафиксирована у ледника Полисадова, расположенного в узком фьорде. Наибольшая средняя скорость отступления ледников за 43 года была отмечена у ледников Розе и Кропоткина (около 80 м/год), наименьшая – у ледника Средний (12 м/год).

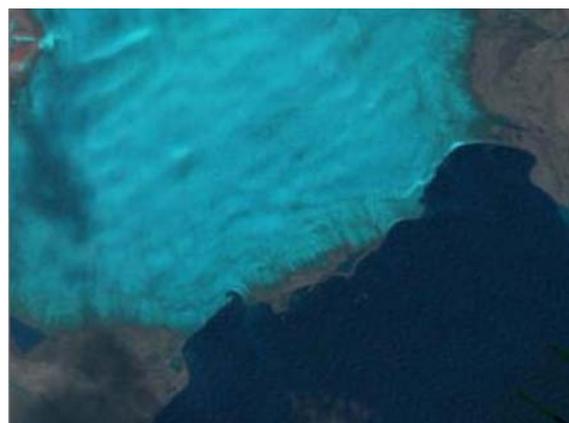
Ледник Мощный является и самым продуктивным из исследованных ледников по количеству генерируемых айсбергов. Вблизи ледников Мощный и Кропоткина в последние годы отмечается наибольшая концентрация айсбергов. Так, например, в августе 2012 г. плотность айсбергов возле этих ледников достигала 20 шт. на элемент регулярной сетки 4x4 км ежедневно (рис. 2). Вблизи ледника Средний, напротив, концентрация айсбергов минимальна, в течение месяца здесь может не наблюдаться ни одного айсберга. Такое поведение этого ледника связано с тем, что при его отступании из-под льда на дневную поверхность вышла часть суши. В результате сформировался новый участок берега, свободный ото льда. Линия фронта собственно ледника резко уменьшилась, как это отчетливо видно на спутниковых снимках (рис.3), соответственно ледник практически перестал генерировать айсберги. Вблизи ледника Розе при его отступании образовались новые острова, ледник остается айсбергопродуцирующим.

Дополнительным фактором, влияющим на интенсивность образования айсбергов выводными ледниками Новой Земли, является Новоземельская бора. Так, в районе ледника Мощный в августе 2012 года был зафиксирован подобный случай проявления сильного ветра (50 м/с), что послужило толчком к образованию новых айсбергов.

Изменение площадей ледников в период с 1985 по 2013 годы происходило неравномерно. В начале периода отмечалось состояние ледников, близкое к стабильному, в 1990-х гг. для некоторых ледников был отмечен даже небольшой прирост площади (наступление ледника). С 2000-х гг. процессы абляции устойчиво превалируют над процессами аккумуляции, происходит интенсивное отступление ледников Новой Земли.



А



Б

Рис. 3. Ледник Средний на снимках спутника Landsat 7: а) август 1985 г.; б) август 2011 г.

## **Выводы**

В настоящее время продолжается процесс отступления ледников Карского берега Новой Земли. Средняя скорость отступления ледников колеблется от 12 до 80 м в год. Большинство северных ледников Карского берега являются айсбергопродуцирующими. Наибольшее количество айсбергов поступает в Карское море с ледников Мощный и Кропоткина.

## **Список литературы**

1. Мацкевич Д.Г., Смирнов В.Г. Роль дистанционного зондирования в обнаружении и отслеживании потенциально опасных ледяных образований (ПОЛО) // Тр. 10-й Междунар. конф. по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2011), 13–16 сентября 2011 г., Санкт-Петербург. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. С. 20–26.
2. Говоруха Л.С. Современное наземное оледенение Советской Арктики. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 256 с.
3. Kouraev A.V., Legrésy B.F., Rémy Northern Novaya Zemlya outlet glaciers 1990–2000, C.I.S. // Fluctuations of glaciers 2000–2005. With addenda from earlier years. .Vol. IX. ICSU (FAGS) – IUGG (IACS) – UNEP – UNESCO – WMO, 2008. P. 61.
4. Медведков А.А. Ледниковые районы России: эволюция и современное состояние оледенения // География. 2010. № 2.

УДК 528.8.04, 528.852

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ УВЛАЖНЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ И ГЕОБОТАНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

В. В. Дмитриев<sup>(1)</sup>, Б. Ф. Свириденко<sup>(2)</sup>, Е. Н. Финиченко<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет»

<sup>(2)</sup>ГБОУ ВПО «Сургутский государственный университет»

Научно-исследовательский институт экологии Севера

e-mail: [vdmित्रiev@omgpu.ru](mailto:vdmित्रiev@omgpu.ru), [bosvir@mail.ru](mailto:bosvir@mail.ru)

Выполнены наземные и спутниковые исследования уровня увлажненности для южной части Западно-Сибирской равнины. Выявлены межгодовые тренды вегетативной активности и изменений высотно-ярусного распределения растительных сообществ. Отмечена взаимосвязь с индексами солнечной и геомагнитной активности.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, наземные исследования, дешифрирование снимков, увлажненность территории, растительный покров.

## **Введение**

Для южной части Западно-Сибирской равнины характерны циклические колебания увлажненности, вызванные различными причинами, среди которых наиболее существенными являются долгопериодические изменения климатических и геомагнитных параметров. Такие изменения оказывают значительное и разностороннее влияние на природную среду и хозяйственную деятельность [1]. Особенно зависимо от них сельскохозяйственное производство, от величины увлажненности зависит площадь пахотно-пригодных угодий, урожайность зерновых и кормовых культур и многое другое. В дорожном деле рост увлажненности приводит к затоплению низинных участков дорог, что нарушает целостность дорожной сети.

В современных условиях применение данных дистанционного зондирования в сочетании с наземными исследованиями, позволяет оперативно оценивать изменения площади и некоторые важные экологические параметры гидроморфных экосистем Западной Сибири [2]. В работе представлены результаты исследования временной динамики уровня увлажненности территории с использованием в качестве маркера новообразованных проценозов. Исследования проведены на временном интервале 10 лет. Были поставлены и решены следующие задачи.

1. Отбор образцовых наземных полигонов и исследование на них характеристик водно-болотной растительности наземными и спутниковыми методами.

2. Выявление взаимосвязей между спектрально-яркостными и фитоценотическими характеристиками растительности, а также их высотно-ярусным расположением.

3. Исследование на длительных временных интервалах изменений режима увлажненности. Выявление имеющихся циклических закономерностей.

### **1. Результаты наземных геоботанических исследования тестовых участков**

В 2005–2007 годах в отдельных районах Западной Сибири отмечен значительный рост увлажненности. Вокруг заболоченных днищ депрессий, занятых в регрессивную фазу длительно формирующейся болотной растительностью, возникли периферические акватории, на которых начала формироваться водная растительность из несбалансированных группировок – проценозов. Они имеют значительную пространственную протяженность, четко отграничены как от других видов растительности, поэтому проценозы хорошо выявляются на спутниковых снимках и могут служить индикаторами трансгрессивной фазы циклов увлажненности исследуемых территорий.

В качестве наземных полигонов были выбраны два тестовых участка. Эти участки включали заболоченные озера: «Глубокое» – с координатами центра 55° 31' 16" с.ш. и 71° 33' 48" в.д., и «Малое Фомихино» – с координатами центра 55° 29' 03" с.ш. и 71° 30' 33" в.д., а также прилегающие части их водосборов.

Наземными геоботаническими методами было установлено, что в этих озерах растительные группировки сложены преимущественно гелофитами – гидрофильными видами, ассимиляционная поверхность которых возвышается над водой на высоту от 0,5 до 1,5 (2,5) м. Гелофитные ценозы образуют сомкнутый надводный ярус и существенно влияют на спектрально-яркостные характеристики изучаемой поверхности. Эти группировки принадлежат к двум типам растительности: континентально-водной макрофитной растительности и болотной растительности. Вопрос исследования методами ДЗЗ растительных обществ, относящихся к двум данным типам, привлекает внимание исследователей в связи со спецификой гидрофильной растительности и ее слабой изученностью. Значительный интерес представляют также группировки, которые формируются на разных стадиях заболачивания водоемов. В целом ценотический состав растительности изученных озер Называевского района Омской области охарактеризован в работах [2, 3].

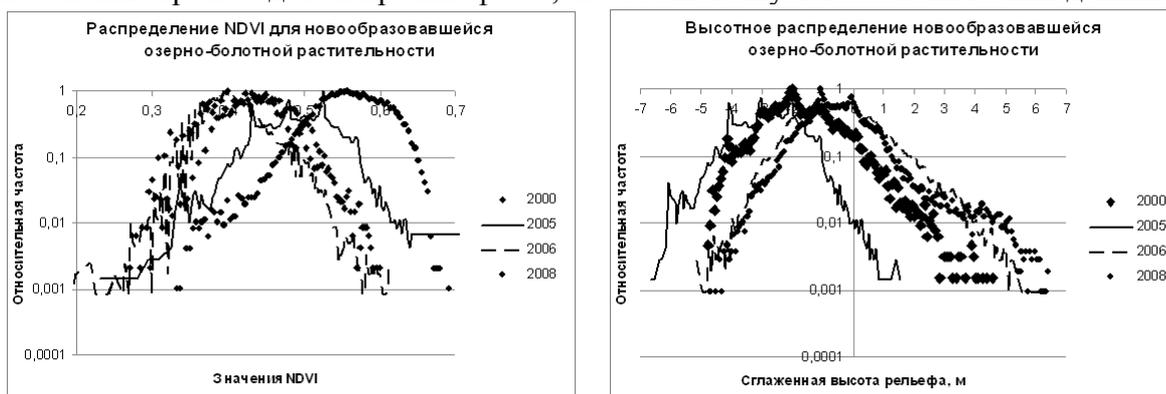
### **2. Результаты исследования с использованием спутниковых изображений**

Для дистанционного изучения тестовых участков в работе были использовано изображения земной поверхности, полученные радиометрами LISS-3 (спутник IRS-1D), [6], ASTER (спутник TERRA) и ETM+ (спутники Landsat – 5 и 7). Дата и время съемки были выбраны исходя из задачи исследования растительного покрова. Пространственное разрешение всех изображений на земной поверхности после проведения геометрической коррекции было приведено к 23 м в пикселе. Географическая привязка была выполнена в проекции UTM, зона N43, геоид WGS84 [4]. Ко всем кадрам был добавлен слой ЦМР, построенный по данным миссии SRTM, приведенный к указанному разрешению и

картографической проекции. В слое ЦМР был удален крупномасштабный тренд, для чего был использован фильтр низких частот, основанный на преобразовании Фурье. Частота среза фильтра позволяла исключить объекты, размеры которых превышают 15 км. Выбор данной частоты фильтрации был обусловлен тем, что размеры озер в исследуемом районе не превышают 15 км.

На основе информации, полученной при наземных исследованиях, на спутниковых изображениях были выделены семь классов покрытий: Классификация происходила в интерактивном режиме методом обучаемой классификации с использованием критерия максимального правдоподобия [5]. Классы соответствовали следующим типам покрытий: № 1 – открытая водная поверхность; № 2 – болотные (травяные и кустарниковые) формации – на низких уровнях поверхности; № 3 – водные осоковые (осока береговая), рогозовые, новообразованные проценозы на обводненной периферии депрессий; № 4 – пашни без растительного покрова; № 5 – луговые формации; № 6 – лесные (лиственные) формации; № 7 – лесные сосновые искусственные насаждения.

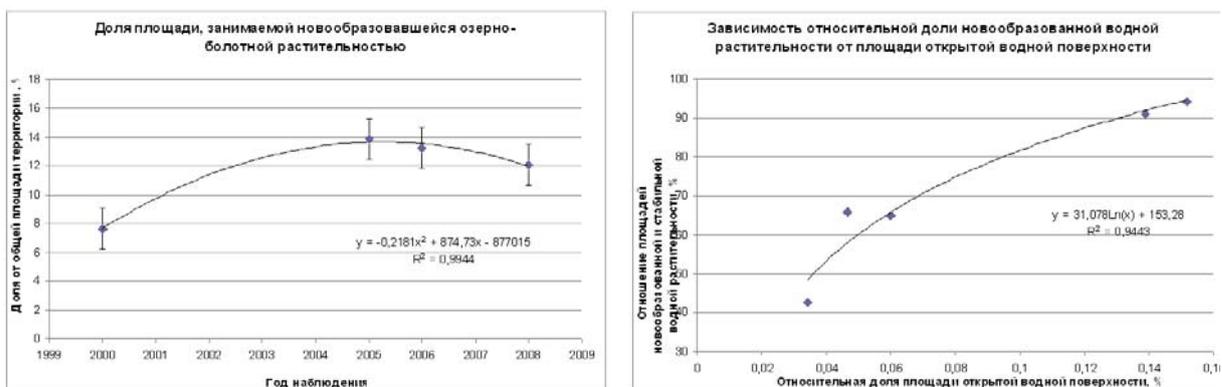
По исходным и классифицированным спутниковым изображениям были определены площади указанных покрытий и параметры вегетации. Далее были исследованы зависимости площадей и вегетативных индексов от следующих факторов: от времени, от высоты рельефа, а также статические (частотные) зависимости. На рис. 1 приведены результаты исследования для покрытия № 3 за период с 2000 по 2010 годы. Можно сделать вывод о значительном изменении вегетативной активности новообразованных формаций и смещении их по высоте (по склону озерной депрессии). Отмеченные изменения происходят «в противофазе», что соответствует геоботаническим данным.



**Рис. 1. Частотное и высотное-ярусное распределение NDVI для новообразованной растительности**

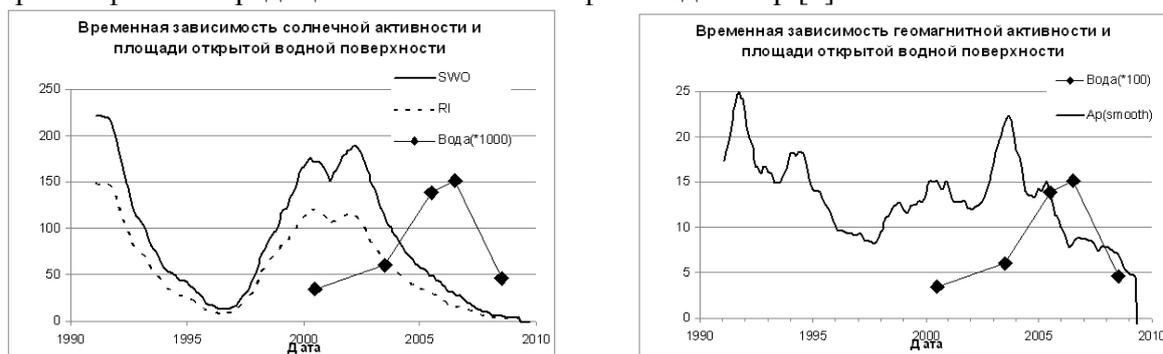
На рис. 2 приведена зависимость относительной доли площади, занимаемой новообразованными растительными формациями, на рисунке указаны границы погрешностей по уровню  $2\sigma$ . Из рисунка видно, что межгодовые изменения превышают величину погрешности, поэтому являются статистически значимыми. Еще один результат, полученный в ходе исследований, также соответствует геоботаническим представлениям: управляющим параметром, который определяет поведение временных зависимостей для всех остальных видов гидрофильной флоры, является величина площади открытой водной поверхности (класс № 1). Однако, сама площадь открытой воды не удобна для измерений по спутниковым изображениям в силу своей малости. В тоже время, площадь новообразованной водной растительности (класс № 3) коррелирует с площадью открытой воды с очень высоким коэффициентом (0,944). Именно это и позволяет использовать в качестве индикатора увлажненности площадь новообразованной озерно-болотной растительности. Этот факт отмечался при проведении наземных

геоботанических исследований. А теперь он получил дополнительное обоснование и по спутниковым измерениям. Полученная зависимость имеет явно нелинейный характер, с тенденцией к «насыщению», это объясняется особенностями рельефа.



**Рис. 2. Межгодовые изменения площади новообразованной растительности и ее взаимосвязь с площадью открытой водной поверхности**

В более ранних работах [1, 6], обосновывалась взаимосвязь уровня увлажненности с солнечной активностью. На наш взгляд, более правдоподобным является влияние геомагнитных характеристик. Из множества доступных индексов солнечной и геомагнитной активности были выбраны два наиболее очевидных и удобных с точки зрения физики: традиционное число Вольфа и индекс Ap [6].



**Рис. 3. Взаимосвязь солнечной и геомагнитной активности с площадью открытой водной поверхности**

Как видно из рис. 3, связь с солнечной активностью наличествует, можно даже сказать, что площадь открытой водной поверхности меняется в противофазе с числами Вольфа. Имеется и взаимосвязь с геомагнитным индексом Ap, с учетом сдвига примерно на 2,3 года. Этот результат вполне закономерен.

### Выводы

1. В начале трансгрессивной фазы увлажненности территории в периферических частях заболоченных озер формируются проценозы гелофитов, которые за 1–2 вегетационных сезона достигают высокой сомкнутости. Они хорошо выявляются на спутниковых снимках и могут служить качественными и количественными индикаторами границ и величины трансгрессии водоемов.

2. Площадь открытой водной поверхности является управляющим параметром, который определяет поведение всех остальных видов гидрофильной флоры. Площадь

новообразованной растительности сильно коррелирует с площадью открытой воды, что позволяет использовать в качестве индикатора увлажненности величину площади новообразованной озерно-болотной растительности

3. Поведение гидрофильной флоры и изменение площади открытой водной поверхности показывает хорошую корреляцию с индексами солнечной и геомагнитной активности.

Работа выполнена в рамках госзадания № 2014/336, код проекта 1744.

#### **Список литературы**

1. Максимов А.А., Понько В.А., Сытин А.Г. Смена фаз увлажненности Барабы (характеристика и прогноз). Новосибирск, 1979. 65 с.

2. Дмитриев В.В., Финиченко Е.Н., Свириденко Б.Ф. Изучение трансгрессии заболоченных водоемов западносибирской равнины по спутниковым данным на основе геоботанических индикационных методов // Исследование Земли из космоса. 2011. № 1. С. 39-47.

3. Свириденко Б.Ф., Дмитриев В.В. Изучение трансгрессии заболоченных водоемов Называевского района Омской области (Западная Сибирь) по материалам фитоиндикации и спутниковой съемки // Омская биологическая школа. Межвуз. сб. науч. тр., Ежегодник. Вып. 5. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2007. С. 14-23.

4. Берлянт А.М. Картография: учебник для ВУЗов. М.: Аспект Пресс, 2001. 336 с.

5. Сухих В.В. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 412 с.: ил.

6. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности: Справочное пособие. Изд-е 2-е, перераб. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 88 с.

**УДК 528.718, 528.852**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ О МИКРОРЕЛЬЕФЕ**

А. В. Дмитриев, В. В. Дмитриев, А. С. Ященко

ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет»

e-mail: [ftsoft@yandex.ru](mailto:ftsoft@yandex.ru), e-mail: [vdmitriev@omgpu.ru](mailto:vdmitriev@omgpu.ru)

Выполнены наземные исследования микрорельефа почвенного покрова. Выявлены статистические характеристики: вид распределения, среднее и дисперсия шероховатости почвы в горизонтальном и вертикальном масштабах. Выполнено моделирование излучательных характеристик шероховатой почвы с учетом микрорельефа.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, наземные исследования, почвенный покров, микрорельеф почвы, рассеяние шероховатой поверхностью.

#### **Введение**

Исследование характеристик почвогрунтов является одним из важнейших направлений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Значимость этого направления определяется тем, что почвы и грунты в каждой конкретной отрасли хозяйственной деятельности имеют определяющее значение, хотя и различного вида. В условиях Российской Федерации оперативный мониторинг текущего состояния и динамики свойств почвенного покрова реально, т.е. при разумных затратах, может быть

реализован только с использованием данных ДЗЗ. Указанные соображения показывают актуальность и практическую значимость данной работы.

Физической основой ДЗЗ является взаимодействие волнового поля с изучаемым природным объектом. При теоретическом моделировании такого взаимодействия существенную роль играют характеристики поверхности, отделяющей изучаемый природный покров от воздушной среды. Среди них можно выделить параметры, описывающие степень неровности (шероховатости) подстилающей поверхности.

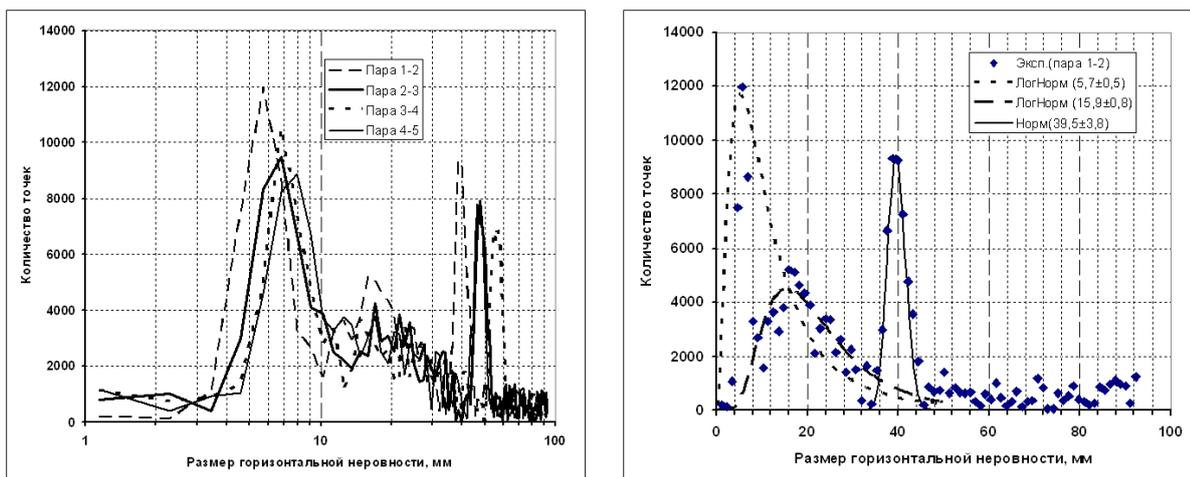
Данная работа посвящена теоретическому исследованию влияния характеристик микрорельефа на излучательные характеристики почвы. Для реализации поставленной цели были решены две задачи. Первая – непосредственное экспериментальное определение характеристик шероховатости верхней поверхности почвы в горизонтальном и вертикальном направлениях. Вторая – теоретическое моделирование излучательных параметров почвы с учетом реальных характеристик ее шероховатости. По результатам модельных расчетов, были оценены границы применимости используемых приближений и влияние параметров шероховатости.

### **1. Результаты экспериментального исследования шероховатости тестовых участков**

В предшествующих работах [1] нами был описан аппаратно-программный комплекс и три алгоритма, позволяющие определить пространственное распределение и статистические характеристики параметров микрорельефа подстилающей поверхности. Под микрорельефом понимаются неровности размером от единиц миллиметров до единиц дециметров. Величина исследуемого участка поверхности определяется размерами лабораторного стенда, в нашем случае его площадь ограничена первым десятком квадратных метров. Определению поддаются горизонтальные и вертикальные размеры неоднородностей микрорельефа: среднее значение, дисперсия, распределение по размерам – его вид и количество мод.

Используемый в данной работе метод является модификацией метода стереофотограмметрии [2]. Основная идея его состоит в определении параллактического смещения изображения одного и того же участка поверхности на двух соседних кадрах стереопары. По известному параллактическому смещению, с учетом геометрии съемки можно оценить высоту поверхности в каждой конкретной точке. По совокупности полученных оценок можно построить цифровую модель рельефа (ЦМР). Процедура определения величины смещения и последующего вычисления ЦМР автоматизирована. Программа написана на языке IDL, предоставленном компанией «СовЗонд».

На рис. 1 приведен пример результатов, полученных непосредственно в эксперименте и вариант теоретического описания экспериментальных данных. На левом изображении показано распределение по размерам неровностей в горизонтальной плоскости для 4-х последовательных стереопар из одной серии составлявшей 5 кадров. Зависимости, полученные по результатам обработки разных стереопар, отличаются друг от друга. Для количественной оценки сходства к ним были применены стандартные критерии проверки принадлежности нескольких выборок к единой генеральной совокупности [3]. Все приведенные зависимости могут считаться совпадающими на уровне значимости 0,67. Уровень значимости невысок, это означает, что данные по разным участкам даже одного поля надо усреднять с осторожностью.



**Рис. 1. Результаты экспериментального определения распределения по размерам неровностей почвы в горизонтальной плоскости и вариант их аппроксимации полимодальным распределением**

Полученные данные о ЦМР далее используются при расчете излучательных характеристик почвы. Для этого целесообразно аппроксимировать реальные распределения стандартными аналитическими функциями, свойства которых хорошо изучены в математической статистике. Исследования, проведенные нами, показали, что для ЦМР почвы наилучшее совпадение и статистическую значимость имеют функции двух видов распределений: нормального и логарифмически нормального. На правом изображении рис. 1 приведен пример аппроксимации, точками изображено реальное распределение горизонтальных неровностей для стереопары 1-2 (левое изображение). Наилучшее совпадение с экспериментом обеспечивается при выделении трех мод с максимумами в районе 6, 16 и 40 мм соответственно. Выделение является статистически значимым по уровню 0,9. Непрерывными кривыми показаны аппроксимирующие эти моды стандартные распределения, два логарифмически нормальных и одно стандартное нормальное распределение. Параметры распределений указаны в легенде.

К полученным результатам следует все же относиться с осторожностью, поскольку статистическая однородность в серии изображений соответствует уровню значимости всего 0,67. К тому же процедура выделения мод допускает варианты и сильно зависит от экспериментальной информации, строгих правил, для этой процедуры сформулировать нельзя. Поэтому представленный нами результат должно считать лишь одним из возможных.

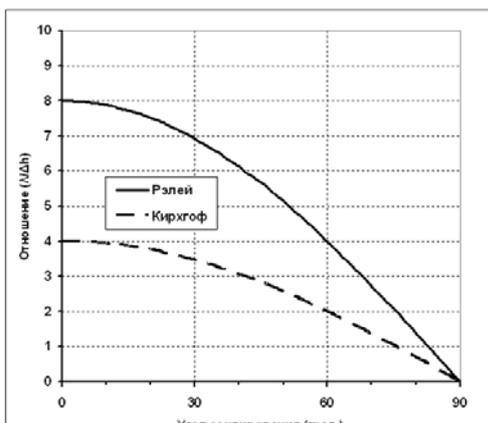
## **2. Результаты моделирования излучательной способности почвы с использованием характеристик микрорельефа**

Строгое решение задачи о взаимодействии электромагнитной волны с неровной поверхностью в самом общем случае отсутствует, да и вряд ли оно вообще возможно, поэтому в практике ДЗЗ используются различные приближения [4]. Чаще всего используются два приближения: Рэлея и Кирхгофа. Выбор конкретного приближения определяется двумя факторами: первое – соотношением между длиной волны ( $\lambda$ ) и размером неровности ( $\Delta h$ ), второе – величиной угла зондирования ( $\theta$ ) или гармонических функций этого угла. Для почвы  $\Delta h$  в первом приближении может считаться величиной постоянной (на уровне 0,6-0,7), поэтому за варьируемые параметры следует принять  $\lambda$  и угол  $\theta$ . Тогда критерии применимости упомянутых выше приближений можно записать в следующем виде [4, 5]:

приближение Рэля  
приближение Кирхгофа

$$\lambda \geq \Delta h * 8 \cos(\theta);$$
$$\lambda \leq \Delta h * 4 \cos(\theta).$$

На рис. 2 показаны области применимости этих двух приближений в координатах  $\theta$  и  $\lambda$ , размер шероховатости является параметром, поэтому по оси ординат отложена величина  $(\lambda/\Delta h)$ . Графики, приведенные на рис. 2 рассчитаны для случая  $\Delta h = 1$ . Область применимости приближения Рэля (Кирхгофа) лежит выше (ниже) соответствующей кривой.



**Рис. 2. Области применимости приближений Рэля и Кирхгофа в координатах  $\theta$  и  $\lambda/\Delta h$**

Реальная почва характеризуется полимодальным распределением неровностей, поэтому строгий подход требует выполнения условий для всех мод. В нашем случае (рис. 1) среднее значение  $\Delta h$  составляет 6, 16 и 40 мм, поэтому приближение Рэля применимо для  $\lambda \geq 320$  мм, приближение Кирхгофа для  $\lambda \leq 24$  мм. Оценки приведены для зондирования в надир, для других углов их легко получить по рис. 2 или приведенным выше выражениям.

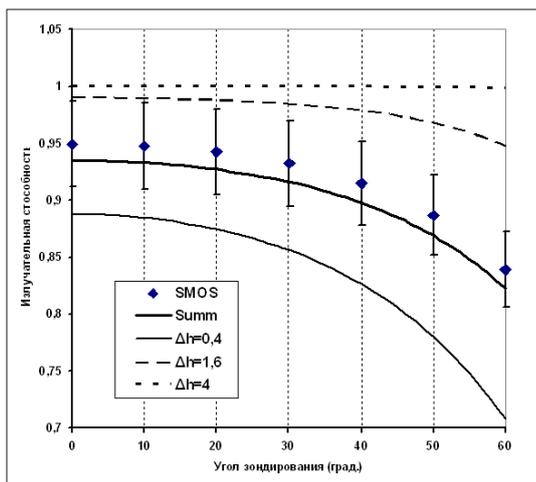
При менее строгом подходе можно оценивать относительную долю каждой из мод в общем распределении неровностей. В нашем случае доля (статистический вес) распределений составляли 55,1 %, 32,0 % и 12,9 % соответственно. Поэтому, соглашаясь с возможным увеличением погрешностей до 13 %

можно ослабить ограничение для приближения Рэля  $\lambda \geq 128$  мм.

Как показано в предшествующих работах [6] неровность почвы оказывает сильное влияние на угловую зависимость коэффициента отражения, излучательной способности и радиояркостной температуры. Автору указанной работы предлагают использовать следующее выражение для коэффициента отражения шероховатой поверхности:

$$R(\theta) = R_f(\theta) * \exp(-\Delta h * (\cos(\theta))^n).$$

Здесь  $R_f(\theta)$  – коэффициент Френеля для заданной поляризации и угла зондирования,  $n$  - эмпирический параметр, зависящий от типа и степени шероховатости поверхности, а также от вида поляризации. После определения  $R_f(\theta)$ , излучательная способность и радиояркостная температура вычисляются стандартными методами. При отсутствии данных о реальных характеристиках микрорельефа параметры  $\Delta h$  и  $n$  определяются эмпирически путем согласования с данными ДЗЗ, т.е. фактически являются подгоночными.



**Рис. 3 Сравнение экспериментальной угловой зависимости шероховатой почвы с результатами модельных расчетов**

реального микрорельефа почвы. Второе, мелкомасштабные неоднородности приводят к занижению излучательной способности, крупномасштабные – наоборот. Третье, мелкомасштабные неоднородности начинают влиять на угловую зависимость «раньше», т.е. при меньших углах зондирования. Четвертое, при исследовании излучательных характеристик почвы необходим учет, а, значит и измерение реальных характеристик микрорельефа.

Недостатком данной модели является ее эвристический характер и наличие эмпирических (подгоночных) коэффициентов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-05-98082.

### Список литературы

1. Дмитриев А.В., Дмитриев В.В., Коньшев И.С., Тудос В.Н. Аппаратно-программный комплекс для определения параметров микрорельефа природных покровов. // Десятая всерос. откр. ежег. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012 г. Тезисы докладов, с.32, электронное издание: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=27&thesis=3569](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=27&thesis=3569)
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
3. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
4. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
6. Kerr, Y.H.; Waldteufel, P.; Richaume, P.; Wigneron, J.-P. *et al.* The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. Vol. 50. №. 5. P. 1384–1403.

Нами была предпринята попытка применить модель [6] для  $R(\theta)$  к реальным данным по микрорельефу. На рис. 3 приведен пример модельных расчетов и сравнение их с данными эксперимента. Точками изображены экспериментальные данные, измеренные радиометром SMOS с учетом погрешностей, линиями показаны результаты расчетов для трех мод отмеченных в распределении по размерам, а также суммарная зависимость, рассчитанная в рамках линейно-аддитивного приближения с учетом статистического веса каждой моды.

Зависимости, приведенные на рис. 3, иллюстрируют следующие результаты. Первое, в рамках модели [6] можно добиться согласования данных эксперимента и результатов моделирования, если учитывать данные

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И МОНИТОРИНГ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС/GPS ПО ДАННЫМ ДЗЗ ЗА 2013 г.

А. О. Клыков<sup>(1)</sup>, В. Б. Кашкин<sup>(2)</sup>

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

<sup>(1)</sup> Институт космических и информационных технологий

<sup>(2)</sup> Институт инженерной физики и радиоэлектроники

e-mail: [89233576861@mail.ru](mailto:89233576861@mail.ru), [rtcvbk@rambler.ru](mailto:rtcvbk@rambler.ru)

Описывается алгоритм вычисления зенитной тропосферной задержки сигналов ГЛОНАСС/GPS на основе спутниковых данных о профилях атмосферы. Приводятся методы расчета на основе моделей Саастамойнена и Хопфилд. Публикуются результаты мониторинга тропосферной задержки в районе г. Красноярск за 2013 г. Построение карты распространения тропосферной задержки в районе Красноярского края.

*Ключевые слова:* зенитная тропосферная задержка, вертикальные профили тропосферы, модель Саастамойнена, модель Хопфилд, ATOVS.

Принцип работы систем глобального спутникового позиционирования основан на определении расстояния от космического аппарата до наземного приемника. Фактически, замеряют время, за которое радиоволна проходит путь. В результате получаем не реальное расстояние, а псевдодалность [1]:

$$PR = R + d_{\text{ион}} + d_{\text{троп}} + \tilde{N}_0(dt - dT) + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $R$  – реальное расстояние от спутника до приемника;  $d_{\text{ион}}$  – задержка в ионосфере;  $d_{\text{троп}}$  – задержка в тропосфере;  $C_0(dt - dT)$  – ошибка хода часов на спутнике и приемнике;  $\varepsilon$  – прочие погрешности;

Тропосферной задержкой принято называть задержку в нижней части атмосферы (тропосфера, тропопауза и стратосфера). Величина задержки зависит от физических свойств атмосферы и от угла возвышения спутника относительно приемника. В случаях, когда угол возвышения равен  $0^\circ$ , говорят о зенитной тропосферной задержке.

Скорость распространения радиоволн  $c$  и показатель преломления  $n$  в нейтральной атмосфере связаны с температурой  $T$ , давлением  $p$  и парциальным давлением водяного пара  $e$  в этой среде соотношениями [2]:

$$n = 1 + \frac{77,6}{T} * \left( p + \frac{4810 * e}{T} \right) * 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $c_0$  – скорость света в вакууме в м/с;  $T$  – температура в К;  $p$  и  $e$  выражены в гПа.

Пусть электромагнитная волна проходит одинаковый путь от точки  $z_1$  до точки  $z_2$  в среде и в вакууме. Так как скорость в среде меньше, чем в вакууме, то волна в среде отстанет на время  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \int_{z_1}^{z_2} \frac{n}{c_0} dz - \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{c_0} dz = \frac{1}{c_0} \int_{z_1}^{z_2} (n - 1) dz. \quad (3)$$

Тропосферная задержка, выраженная в единицах расстояния, равна:

$$\Delta z = \int_{z_1}^{z_2} (n - 1) dz. \quad (4)$$

Разобьем тропосферу на изобарические слои, определим показатель преломления среды  $n_i$  для каждого слоя и оценим зенитную задержку  $\Delta l_i$  в  $i$ -м слое толщиной  $l_i$  как

$$\Delta l_i = l_i(n_i - 1), \quad (5)$$

величина  $n_i$  определяется по формуле (2), входящее в неё парциальное давление водяного пара  $e_i$  вычисляется как

$$e_i = 6,1070 * 10^{\frac{7,665*t}{243,33+t}} * U_i / 100, \quad (6)$$

где  $t$  – средняя температура в °С в слое и  $U_i$  – средняя относительная влажность в %.

Просуммировав задержки во всех слоях, мы получим полное значение зенитной тропосферной задержки.

Очевидно, что для использования этого метода расчета, необходимо знать метеопараметры тропосферы на различных высотах. Источником данных о вертикальных профилях тропосферы (ВПТ) служат искусственные спутники Земли, например, космические аппараты серии NOAA (США).

Космические аппараты серии NOAA в составе бортовой аппаратуры содержат комплекс приборов ATOVS (Advanced Television and Infrared Observational Satellite) для вертикального зондирования тропосферы и стратосферы [3]. Аппаратура ATOVS позволяет восстановить поля параметров атмосферы на различных уровнях давления  $p$ .

Оперативная информация ATOVS доступна для всех станций, принимающих сигналы спутников NOAA в режиме HRPT. Архивные данные по ВПТ можно найти на сайте Air Recourse Laboratory NOAA. Эти данные хранятся в архивах формата GDAS и покрывают всю планету сеткой с шагом  $1^\circ \times 1^\circ$  по широте и долготе, шаг по времени 3 часа. Доступ возможен как через специальный интерфейс сайта, так и через открытый ФТП сервер [4].

В настоящее время для учета тропосферной задержки используют математические модели, которые прогнозируют значение  $\Delta z$  по наземным метеорологическим параметрам: температуре, влажности и давлению в точке приема сигналов ГНСС. В тропосферной задержке выделяют сухую (гидростатическую) и влажную компоненты. Наибольшее распространение получили модели Саастамойнена и Хопфилд.

Сухая составляющая ЗТЗ по модели Саастамойнена равна [5]:

$$\Delta z_d = \frac{0,002277(p_1 - e_1)}{1 - 0,00266 \cos(2\varphi) - 0,00028h_1}. \quad (7)$$

Здесь  $p_1$  – атмосферное давление в гПа,  $e_1$  – парциальным давление водяного пара в гПа месте расположения приемника ГНСС,  $h_1$  выражено в км.

Влажная составляющая ЗТЗ имеет вид:

$$\Delta z_w = \frac{0,002277(0,05 + \frac{1255}{T_1})e_1}{1 - 0,00266 \cos(2\varphi) - 0,00028h_1}. \quad (8)$$

В (8)  $T_1$  – температура в К.

В модели Хопфилд обе составляющие ЗТЗ представлены в форме [6]:

$$\Delta z_d = 77,64 * 10^{-6} \frac{(p_1 - e_1)h_d}{5T_1}, \Delta z_w = 0,373 * 10^{-6} \frac{e_1 h_w}{5T_1^2}. \quad (9)$$

В нашей работе найдена зенитная тропосферная задержка по вертикальным профилям тропосферы из архива Air Recourse Laboratory NOAA. На приземном уровне использованы метеоданные. В качестве нижней границы стратосферы выбран изобарический уровень 200 гПа, соответствующий высоте в 11000 м. Как и в модели Саастамойнена, для стратосферы использована барометрическая формула изотермической атмосферы. Стратосферная часть задержки  $\Delta z_s$  вычисляется по формуле:

$$\Delta z_s = \frac{77,6 \cdot 10^{-6}}{T_s} p_s \int_{z_1}^{\infty} \exp \left[ -\frac{g(z-z_s)}{R_c T_s} \right] dz = 77,6 \cdot 10^{-6} * \frac{p_s R_c}{g}. \quad (10)$$

Выбран бесконечный верхний предел интегрирования, это не вносит погрешности, так как на границе стратосферы  $(z - z_s) = 40$  км, экспонента под интегралом практически равна нулю. При  $p_s = 200$  гПа имеем:  $\Delta z_s = 0,455$  м, при  $p_s = 150$  гПа  $\Delta z_s = 0,341$  м. Итоговое значение ЗТЗ определится как сумма  $\Delta z_s$  и задержки в слоях тропосферы.

С использованием формул (2)–(6) был разработан алгоритм определения зенитной тропосферной задержки по данным дистанционного зондирования и по метеопараметрам. Алгоритм реализован в среде языка программирования Python.

В этой статье рассчитывается тропосферная задержка (ЗТЗ) в районе г. Красноярск (56 с.ш. 93 в.д.) за каждый день 2013 года. ЗТЗ оценивалось с шагом в 3 часа с 0:00 до 21:00 UTC. Для приземного слоя использованы данные местной метеостанции [7]. Найдено около 3000 значений ЗТЗ для каждого из трех вариантов: по ВПТ и по моделям Хопфилд и Саастамойнена.

На рис. 1 показаны среднемесячные значения ЗТЗ в районе г. Красноярск за 2013 г.

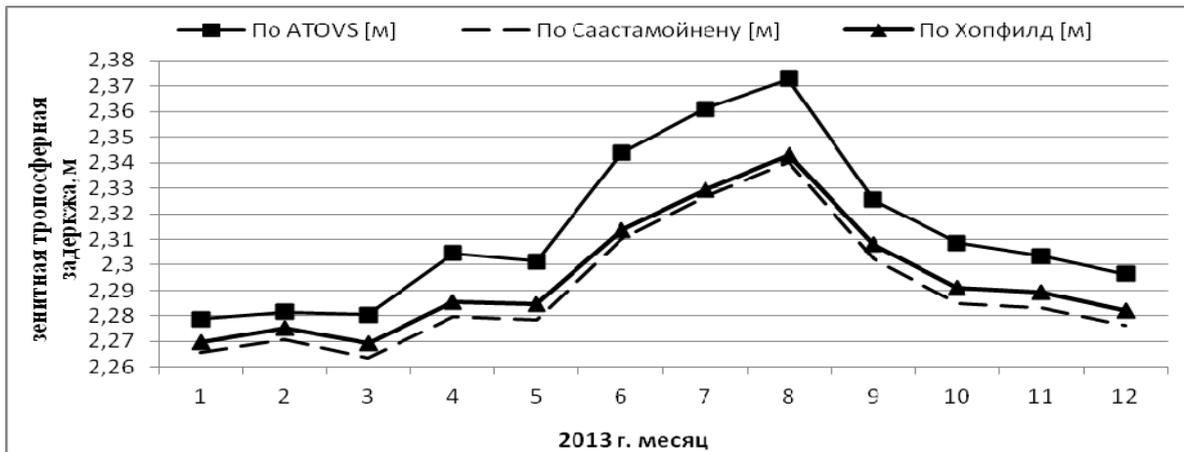
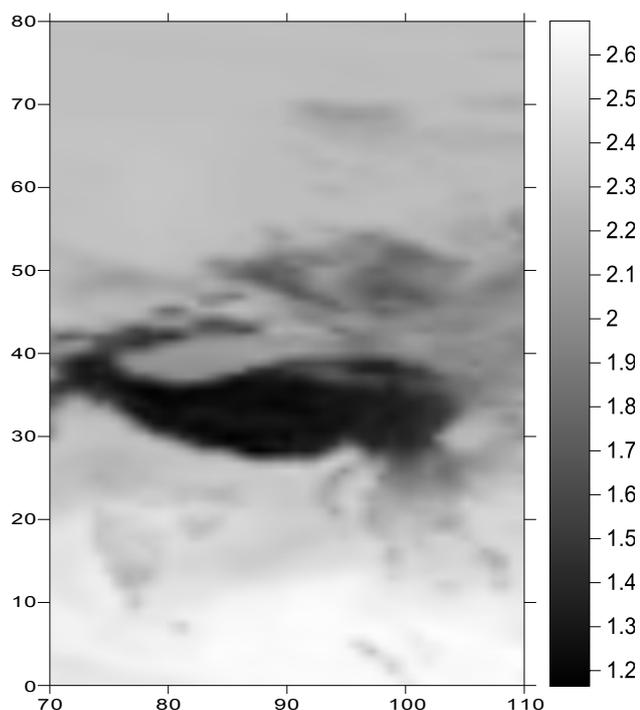


Рис. 1. График ЗТЗ в районе г. Красноярск за 2013 г.

Значение ЗТЗ, полученное по данным АТОВС, превышает значения ЗТЗ, полученные по моделям на 0,1–0,2 м зимой и 0,3–0,4 м летом. Разность объясняется, тем, что модели не позволяют корректно учитывать влажную составляющую задержки. Влажность по слоям тропосферы распределена неравномерно, и судить о ней только по наземным данным представляется невозможным.

Архивные данные GDAS, охватывают всю планету и позволяют строить карты распределения тропосферной задержки по географическим регионам с шагом в 1°. На рис. 2 приведена карта, охватывающая регион с 80° до 0° с.ш. и с 70° до 110° в.д.

На широтах с 30–40° выделяется горный массив. Высота там достигаем 3000–4000 м над уровнем моря, соответственно значение ЗТЗ там очень мало. За исключением гор, значение ЗТЗ увеличивается от северных широт к экватору. Это объясняется большей влажностью в широтах 0–10° и соответственно большим значением влажной составляющей ЗТЗ.



**Рис. 2. Карта распространения ЗТЗ за 01.01.14 00:00 UTC**

### Список литературы

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Седунов Ю.С. Атмосфера. Справочное издание. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 509 с.
3. Goodrum G. et al. NOAA KLM user's guide. National Ocean and Atmosphere Administration. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/>
4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>
5. Saastamoinen J. Int. Symp. on the Use of Artificial Satellite // Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellite. Washington, 1971. P. 247–251.
6. Hopfield H. S. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data // Journal of Geophysical Research. 1969. 18: Vol. 74. P. 4487–4499.
7. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rp5.ru>

УДК 528.8.04, 528.88

## АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ПОРОДНОЙ, ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ ХАКАСИИ ПО ДАННЫМ ДЗ

Е. В. Федотова<sup>(1,2)</sup>, А. В. Командирова<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

<sup>(2)</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

e-mail: [elfed@ksc.krasn.ru](mailto:elfed@ksc.krasn.ru)

Предложен алгоритм анализа космических снимков среднего пространственного разрешения для выделения на территории Хакасии лесов, отличающихся по породному составу, возрасту. В его реализации дополнительно к снимкам используются цифровая модель рельефа и почвенные карты.

*Ключевые слова: дифференциация возрастной и породной структуры леса, классификация данных Landsat, Хакасия.*

Сохранение и восстановление биологического разнообразия в условиях возрастающей антропогенной нагрузки является одной из приоритетных задач, решаемых на уровне государственных программ Российской Федерации. Основой для решения рассмотренных задач является знания о структуре исследуемого природно-территориального комплекса (ПТК), выраженные в иерархической модели геосистемы. Эти знания, согласно структурно-геоморфологическому методу, могут быть извлечены в процессе ступенчатого дешифрирования космических снимков различного разрешения по геоморфологическому устройству территории. Структурные элементы ПТК характеризуются такими признаками, как высота над уровнем моря, экспозиция поверхности, морфологические характеристики рельефа.

При разделении лесного покрова с помощью данных ДЗ основной характеристикой является спектральная характеристика верхнего полога леса.

Поэтому первым шагом при дифференциации лесного покрова является выделение формаций – темнохвойной и светлохвойной, которые определяются по составу верхнего полога лесных насаждений.

К темнохвойной формации относятся леса с преобладанием деревьев темнохвойных пород – пихты, кедра, ели. К светлохвойной формации относятся леса с преобладанием сосны или лиственницы. Лиственные леса на территории Хакасии являются в основном производными, то есть возникшими на тех местах, где коренные хвойные леса были повреждены рубками или пожарами. Они представлены березовыми и осиновыми насаждениями.

При апробации методики применительно к анализируемой территории, с учётом особенностей ландшафтного строения Хакасии, в качестве основания для выделения ландшафтных зон была принят признак высотной поясности ландшафтов. Задача картографирования и классификации территориальных единиц ранга высотных поясов для территории гор юга Сибири решается успешно с применением данных ДЗЗ низкого пространственного разрешения порядка 1 км [1–3].

В лесной части Хакасии выделяются:

- подтаежные леса с участием сосны, лиственницы, березы и осины в предгорьях и на высоте до 400 м над у.м.;
- черневые преимущественно пихтовые с участием осины (300-700 м н.у.м.);
- темнохвойные горные леса (высота 700-1200 м н.у.м.);
- горно-таежные преимущественно кедровые леса (примерно от 1000 м н.у.м.).

Дальнейшая детализация лесного покрова осуществлена по данным ДЗЗ среднего пространственного разрешения Landsat. Эти данные используются в классификации лесного покрова гор Южной Сибири для более детального выделения ландшафтных единиц и деления лесов по таким характеристикам, как преобладающая порода, состав насаждений, возраст, тип леса [4]. В указанной работе на территории северного макросклона Западного Саяна по результатам классификации снимка Landsat 7 ETM+ выделены классы вырубок, горно-таежные темнохвойные леса, черневые и мелколиственные леса, каменистые россыпи и травяные сообщества субальпийского пояса. При анализе обучающих выборок было выявлено, что дифференциация темнохвойных коренных насаждений слабая, производных лиственных насаждений – хорошая, в зависимости от состава насаждения и присутствия в нем темнохвойных пород.

Данный подход может быть полностью применен для той части лесов Хакасии, которые относятся к Алтае-Саянскому горнотаежному лесному району. Для лесов

среднесибирского подтаежного лесного района со светлохвойно-лиственными лесами на севере Хакасии требуется разработка новых компонентов алгоритма.

Ниже рассмотрены основные шаги алгоритма.

1. Выделяются две лесные формации, которые характеризуют высотно-зональную структуру территории – темнохвойная горная и светлохвойная низкогорная, а также участки производных мелколиственных лесов на участках бывших вырубок или гарей. Для проведения анализа и классификации с обучением используются таксационные описания нескольких кварталов Туимского и Коммунарковского лесничеств. Обобщенная формула состава насаждений 5Лц(80)2К(140)1П(80)2Б(40). При более детальном анализе таксационных описаний в Туимском лесничестве можно выделить:

- на границе со степью молодые смешанные лиственнично-лиственные леса, возраст до 60 лет лиственницы, 20–30 лет береза; в составе примерно пополам лиственницы и березы;

- смешанные насаждения с преимуществом лиственницы (ее возраст более 100 лет до 120–140 лет), береза в составе около 50 лет;

- смешанные насаждения с лиственницей, пихтой и осиной, что характерно для подтайги; возраст лиственницы 120 лет; кедр старше 120 лет; пихта около 100 лет;

- горные темнохвойные насаждения с кедром 140–240 лет, пихтой около 120 лет, с лиственницей (около 120 лет) и березой (около 80 лет) и осиной; характерны для средне- и высокогорья.

По таксационным описаниям отдельных кварталов этих лесничеств были созданы обучающие выборки для темнохвойных (пихта и кедр), лиственничных (смешанные лиственнично-лиственные леса с преобладанием лиственницы) и мелколиственных лесов (преимущество березы в составе). Была получена картосхема с четырьмя классами покрова – три класса лесов и класс небольших безлесных участков (рис. 1).

Классификация проводилась методом минимальных расстояний. Наибольшая вероятность ошибки составила 0,25 для обучающих выборок лесов, принадлежащих одной формации. Разделение темнохвойных и светлохвойных лесов осуществляется с ошибкой, меньшей 0,01.

2. Далее для наиболее распространенных лиственнично-лиственных лесов была проведена кластеризация на 10 кластеров методом ISODATA, поскольку в отсутствие карты выделов уверенно разделить для создания обучающих выборок леса разного состава и возраста в пределах лиственнично-лиственных лесов невозможно. Кластеризацией выделилось еще четыре кластера внутри класса лиственничных лесов (рис. 2).

3. Дифференциация лесов по преобладающим породам.

Темнохвойные леса: выделяются по ранневесенним снимкам (март) и по летним снимкам – более низкое значение NDVI по сравнению с NDVI лиственных лесов и травянистой растительности.

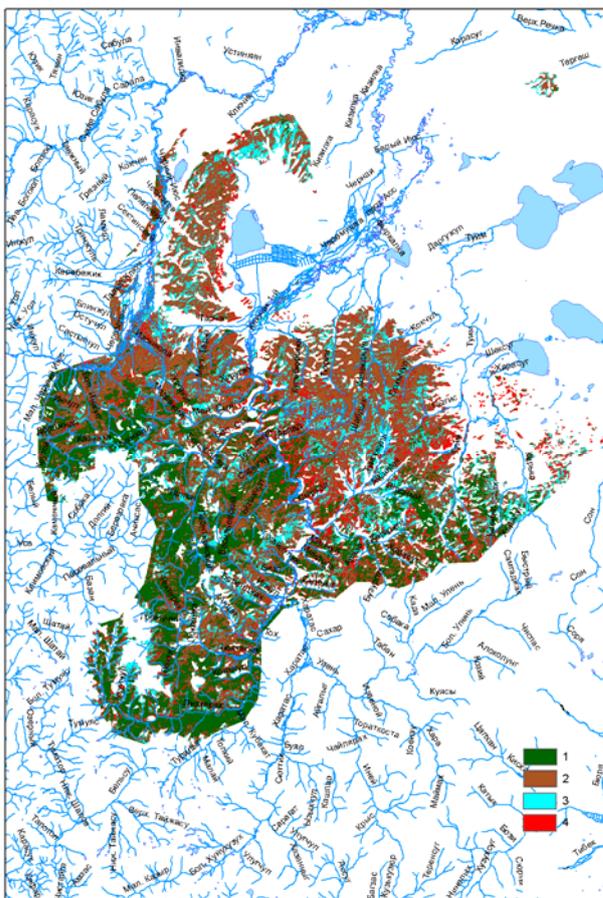
Сосновые леса: по ранневесенним снимкам (март), по летним снимкам как и темнохвойные леса, но с более высоким отражением в красном канале.

Лиственные леса: более высокое значение NDVI на летних снимках. Возможно разделение березовых и осиновых насаждений.

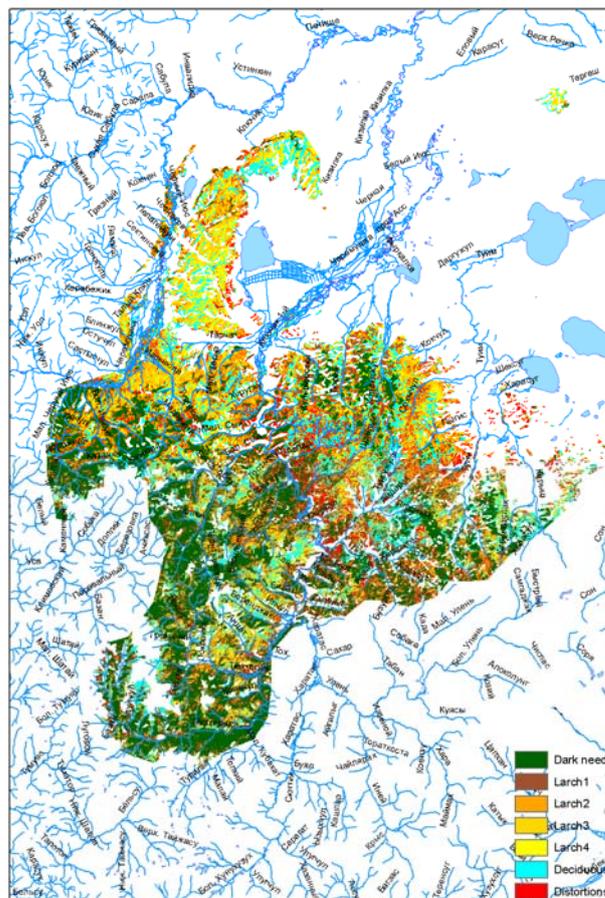
Лиственничные леса вызывают определенные трудности по отделении от лиственных лесов, тем более что чаще всего они представлены смешанными лиственнично-березовыми насаждениями.

4. Дальнейшая дифференциация растительных сообществ осуществляется по возрасту лиственных насаждений. Так, березовые насаждения можно разделить по спектральным признакам на молодые (до 60 лет) и спелые (80 лет и более). Далее, на снимке Landsat при визуальном анализе фрагментов изображения с лиственными и лиственничными насаждениями можно выделить шесть классов, которые по

статистическим характеристикам разделяются значимо по расстоянию Джеффриса-Матусита.



**Рис. 1. Выделение лесного покрова по формациям. 1 – темнохвойные, 2 – лиственничные, 3 – мелколиственные леса, 4 – нелесные участки**



**Рис. 2. Картограмма лесов Туимского лесничества, полученная при классификации снимков Landsat 8**

С такими значениями разделимости верхняя граница вероятности ошибки классификации оценивается в 3–5 %.

Процедура разделения осуществляется с использованием дерева решений на основе реализации решающих правил вида

$$\text{If } R_i < \text{Threshold}_a \text{ and } R_i > \text{Threshold}_b \text{ and then } R_i = \text{«class ab»} \quad (1)$$

Реализация подобных решающих правил возможна внутри всех пакетов обработки данных ДЗЗ, а также реализуется в виде самостоятельных программных средств в составе специализированных программных комплексов обработки данных ДЗЗ.

5. Использование весенних снимков позволяет более надежно выделить темнохвойные и сосновые леса, которые хорошо разделяются с лиственными и лиственничными лесами, которые в весеннее время на данной территории еще не имеют листьев и хвои. Так, по снимкам за 2 мая 2014 года проводилось выделение темнохвойные и сосновых лесов леса на участках Таштыпского и Туимского лесничеств. По снимку Туимского лесничества были выделены лиственничные леса, по снимку Таштыпского лесничества были выделены темнохвойные леса. Поскольку

задача стояла только в выделении вечнозеленых насаждений, для классификации использовался метод параллелепипеда.

6. Использование цифровой модели рельефа даст возможность исправлять ошибки классификации, связанные в первую очередь с разделением сосновых и темнохвойных лесов, которые трудно различаются по спектральным характеристикам, особенно в смешанных насаждениях. В этом случае можно использовать закономерность, что сосновые леса произрастают в низкогорном светлохвойном поясе, тогда как темнохвойные (пихтовые, еловые, кедровые) – в горном и высокогорном таежном поясах.

Дополнительную информацию для выделения разных типов леса можно извлечь из почвенных и ландшафтных карт. Реализация алгоритма в полном объеме позволит дифференцировать леса республики Хакасия по породному составу, возрасту, типу.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-07-98005.

### **Список литературы**

1. Назимова Д.И., Поликарпов Н.П., Сухинин А.И., Федотова Е.В., Харук В.И. Использование спутниковой информации при анализе высотной поясности лесного покрова гор Южной Сибири // География и природные ресурсы. 2000. № 4. С. 117–123.

2. Kharuk V.I., Ranson K.J., Burenina T.A., Fedotova E.V. Mapping of Siberian forest landscapes along the Yenisey transect with AVHRR // Int. J. Remote Sensing. 2003. Vol. 24. № 1. P. 23–37.

3. Назимова Д.И., Пономарев Е.И., Степанов Н.В., Федотова Е.В. Черневые темнохвойные леса на юге Красноярского края и проблемы их обзорного картографирования // Лесоведение. 2005. № 1. С. 12–18.

4. Буренина Т.А., Овчинникова Н.Ф., Федотова Е.В. Изменение структуры водного баланса на вырубках черневой тайги Западного Саяна // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 92–100.

**УДК 528.8.04, 528.88**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗ В АНАЛИЗЕ ДИНАМИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ В РАЙОНЕ ИНТЕНСИВНОЙ ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСИНЫ**

Е. В. Федотова<sup>(1,2)</sup>, Е. А. Стаброва<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

<sup>(2)</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

e-mail: [elfed@ksc.krasn.ru](mailto:elfed@ksc.krasn.ru)

Сопоставление данных лесоустройства 1950-х годов и космических снимков, оценены изменения площадей лесов разных преобладающих пород на общей площади 72 тыс. га на территории Маганского лесхоза с 1970-х по 2010 год. Истощение промышленных запасов древесины в конце XX века привело к прекращению заготовок, сокращению площади вырубок, увеличению площади хвойных и лиственных лесов, которые в результате пожара 1991 года сильно пострадали.

*Ключевые слова:* динамика лесных площадей, классификация снимков Landsat.

**Исходные данные.** Промышленная заготовка леса на территории Маганского лесничества в Красноярском крае началась в пятидесятых годах прошлого века. В настоящее время запасы древесины сильно истощены. Изменение лесного покрова территории связано с антропогенными (рубки) и естественными факторами (например, пожары), а также восстановлением лесного покрова на ранее вырубленных участках. Поэтому большой интерес представляет оценка изменения лесной растительности, которое произошло за 60 лет. Определение времени проведения рубки лесов, площадей рубок позволит оценить время восстановления лесов на данной территории. Единственным доступным источником данных о лесной растительности 1950-х годов в этом регионе являются данные инвентаризации лесного фонда Советского леспромхоза Маганского лесничества Красноярского лесхоза, проведенные в 1950 и 1952 годах. Эти данные представлены в виде бумажных карт и таблиц запасов древесины с разнесением по породам, возрасту и др. Карты были оцифрованы, в результате получен набор векторных карт грузопотоков, входящих в состав Советского леспромхоза. В атрибутивные таблицы цифровых карт были внесены сведения о запасах, площадях, возрасте лесных насаждений.

Использование данных дистанционного зондирования, которые доступны на данную территорию с середины 1970-х годов, позволяет определить время рубок и площади вырубленных лесов.

Территория по характеру растительного покрова является поясом темнохвойной тайги (пихта, ель, кедр) и лиственнично-светлохвойных лесов (сосна, лиственница, береза и осина). Основными лесозаготовительными породами являются пихта, ель и сосна.

Анализ динамики площадей, занятых лесами с разными преобладающими породами, проводился по снимкам среднего пространственного разрешения Landsat (<http://glovis.usgs.gov/>, табл. 1).

Взаимная привязка снимков осуществлялась в автоматическом режиме по средствам модуля Erdas Imagine 9.2 AutoSync Georeferencing Wizard. Затем наиболее проблемные участки корректировались вручную с помощью AutoSync Workstation. Средняя ошибка привязки не превысила 0,4. Топографическая нормализация снимков производилась с целью частичного устранения теней, вызванных сложными элементами рельефа и позицией Солнца на момент съемки [1]. Модель, реализующая данный алгоритм топографической коррекции, была построена в модуле MODELER ERDAS Imagine. Алгоритм был применен ко всем снимкам Landsat.

**Таблица 1**

**Используемые снимки Landsat**

Дата съемки	Датчик	Количество каналов	Разрешение, м
1977-06-20	Landsat 2 MSS	4	60
1989-07-10	Landsat 4 MSS	4	60
2007-06-02	Landsat 5 TM	7	30
2010-08-29	Landsat 5 TM	7	30

**Классификация снимков для выделения различных типов леса, вырубок и гарей.** В результате классификации на снимках для решения поставленной задачи необходимо выделить следующие классы: хвойные, лиственные и смешанные леса, рубки, вода, поля. На снимках 2007 и 2010 годов также необходимо выделить гари, появившиеся в 1991 году.

Оценив возможности и особенности нескольких методов классификации с обучением, для работы был выбран метод минимальных расстояний, основанный на

евклидовой метрике, который может рассматриваться безотносительно нормального закона распределения значений яркости в обучающих выборках [2].

Летние снимки позволяют разделять леса по преобладающим древесным породам. Хвойные и лиственные леса отчетливо различаются по значениям спектральной яркости. Разделение светлохвойных (преимущественно сосновых) и темнохвойных лесов проводилось путем совместного анализа снимков и имеющихся карт лесного покрова. Лиственные леса из березы и осины практически не получилось разделить по снимкам.

После выполнения классификации была проведена постклассификационная обработка, исправлялись контекстные ошибки: например, единичные пиксели класса вырубок или же сельскохозяйственных угодий на территории лиственных лесов переводился в класс лиственных лесов.

Для оценки точности классификации в качестве эталона использовалась карта-схема лесонасаждений ФГУ Маганский лесхоз Красноярского края лесоустройства 2003 года, масштабом 1:100000. Точность оценивалась по классификации снимка 2007 года и только для классов лиственных и хвойных лесов, а также вырубок (табл. 2).

**Таблица 2**

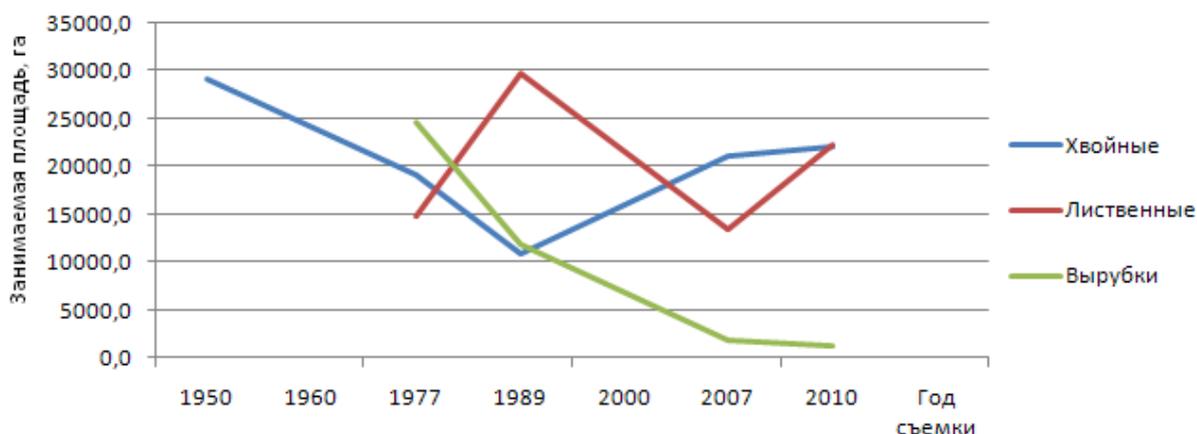
**Точность классификации**

Название класса	Всего по карте	Всего на классификации	Правильно распознаны	Ошибка процедуры	Ошибка пользователя
Хвойные леса	40	41	36	90.00 %	87.80 %
Лиственные леса	43	34	30	69.77 %	88.24 %
Вырубки	27	35	27	100.00 %	77.14 %
Сумма по столбцу	110	110	93		

Средняя точность классификации составила 84.55 %.

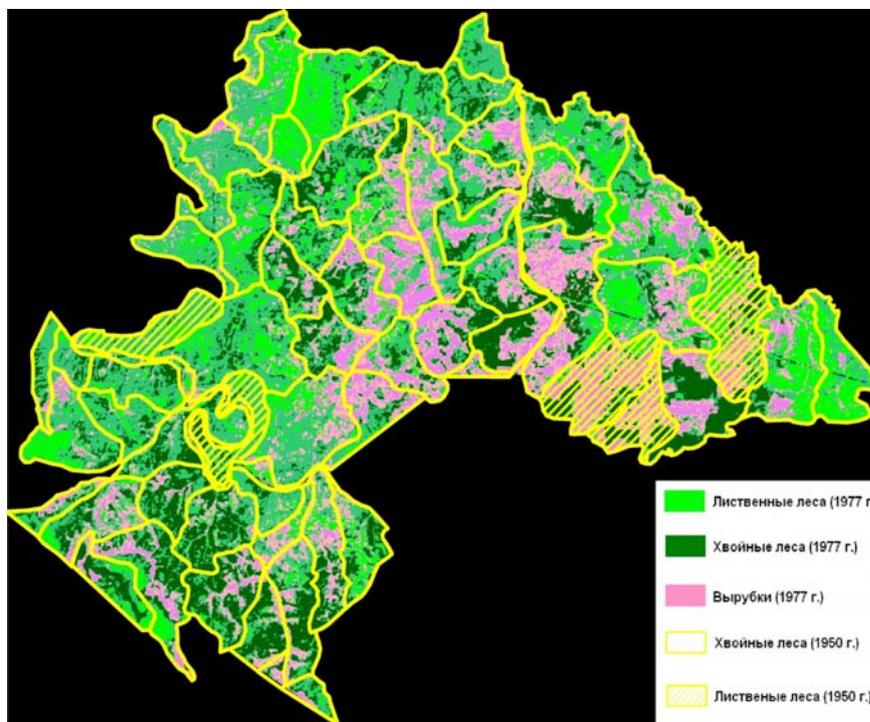
**Расчет изменения площадей вырубок, хвойных и лиственных лесов на исследуемой территории.** Атрибутивные данные векторных слоев инвентаризации части Советского леспромхоза 1950-х годов содержат лесотаксационные данные на исследуемую территорию. Чтобы определить последствия промышленных вырубок с 1950 по 1977 год, были посчитаны площади хвойных лесов в каждом урочище Советского леспромхоза. Общая площадь сосновых, пихтовых, еловых и кедровых лесов в 1950-х годах составила 29179 га.

Для того, чтобы оценить динамику изменения площадей, табличные данные были представлены в виде графика (рис. 1).



**Рис. 1. Изменения площади хвойных, лиственных лесов и вырубок на территории Маганского лесничества**

Используя сведения 1950-х годов в виде векторных слоев карты и полученные в ходе работы данные можно сделать вывод: территория хвойных лесов значительно убывала в 1950–1989 годах, а именно уменьшилась с 29 тыс. га до 11 тыс. га. После этого идет увеличение их площади, связанное с постепенным переходом к 1990 году лиственных лесов, образованных на месте первых вырубок, в класс хвойных лесов. К 2010 году площадь территории хвойных лесов составила 22 тыс. га.



**Рис. 2. Результат наложения векторных слоев карты 1950-х годов на классификацию снимка 1977 года**

Площадь вырубок уменьшалась с каждым годом и с 1977 по 2010 гг. сократилась с 24,5 тыс. га до 1300 гектаров.

Лиственные леса с 1950 по 1989 гг. заняли значительную часть территории (почти 30 тыс. га), ранее занимаемую хвойным лесом. Это объясняется тем, что основная часть хвойных лесов была вырублена к 1970-м годам, менее интенсивно заготовка леса продолжалась до 1989 года. На месте вырубок образовался лиственный лес, который в результате пожара 1991 года сильно пострадал: площадь лиственных лесов к 2007 году уменьшилась до 13 тыс. га. С постепенным зарастанием гари к 2010 году лиственные леса стали занимать 22 тыс. га.

Таким образом, анализ космических снимков позволяет уточнить время проведения рубок леса в районах интенсивной заготовки, а также оценить процесс его восстановления. Использование дополнительной информации о типичных восстановительных сукцессиях на данной территории позволит построить модель оценки сроков полного восстановления лесов.

Автор работы благодарит д-ра биол. наук, профессора Валерия Васильевича Кузьмичева за любезно предоставленные для анализа данные.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-07-98005

## Список литературы

1. Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types // IEEE Transaction on geosciences and remote sensing. 2003. Vol. 41. No 5. P. 1056–1061.
2. Richards J.A. Remote sensing Digital Image Analysis: second, revised and enlarged edition. Springer-Verlag, 1993. 340 p.

УДК 574.42

## КЛИМАТОГЕННАЯ СОЛИФЛЮКЦИЯ В ЛИСТВЕННИЧНИКАХ ЭВЕНКИИ

А. С. Шушпанов, В. И. Харук

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

e-mail: [alexandr01061987@gmail.com](mailto:alexandr01061987@gmail.com), [kharuk@ksc.krasn.ru](mailto:kharuk@ksc.krasn.ru)

В работе рассмотрены динамика оползней за последние 10 лет в лиственничниках центральной Эвенкии. Исследования проводились с использованием съемки сверхвысокого (QuickBird 2, WorldView-1 и WorldView-2) и среднего (Landsat) разрешения. Это позволило провести оконтуривание оползней и оценить основные характеристики рельефа для них. Так же в статье отражена роль глобального изменения климата в образовании и развитии оползней за счет увеличения количества осадков и повышения температуры.

*Ключевые слова:* цифровая модель рельефа, солифлюкция, SPEI, съемка сверхвысокого и среднего разрешения.

### Введение

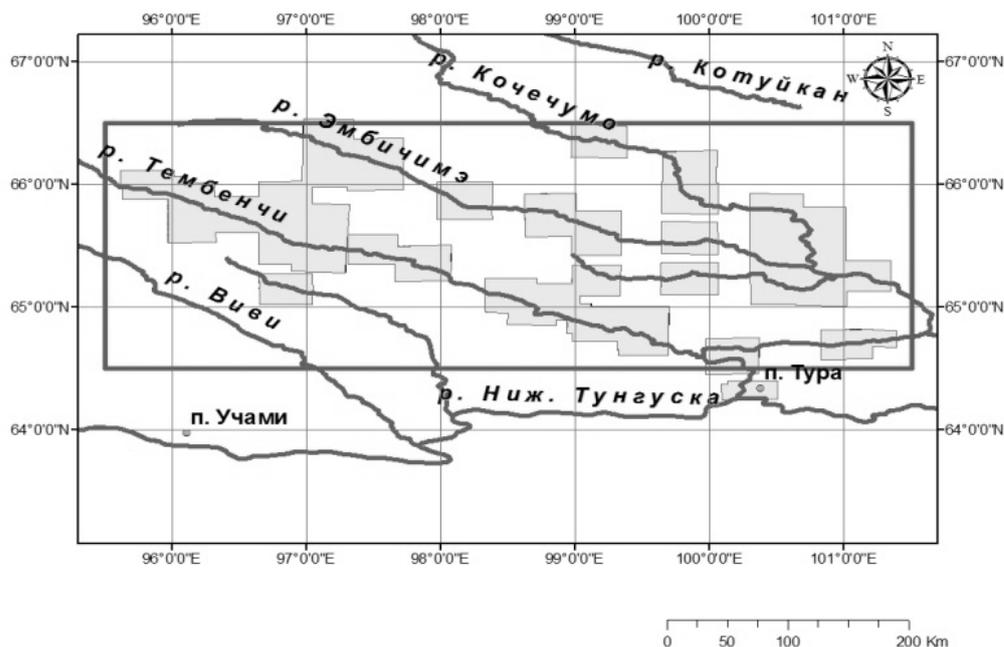
Солифлюкция является обычным процессом на склонах в зоне многолетней и островной вечной мерзлоты, а также на участках с длительным сезонным промерзанием почв. Данный процесс широко распространен и наблюдается во многих северных регионах мира: архипелаг Шпицберген, Полярный Урал, криолитозона Енисейской Сибири, Чукотский полуостров, Аляска, Канада, тундра и лесотундра Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого округов [1–7]. Частота возникновения оползней увеличивается, одной из основных причин можно считать климатические изменения в северных регионах отмечаемые многими авторами [8–13]. Исходя из результатов представленным в мировой литературе по изучению оползней, они могут быть разделены на три группы: 1. картирование (инвентаризация), 2. определение основных характеристик, 3. пространственный и временной мониторинг [14].

Цель данной работы заключается в оценке влияния климатически индуцированных изменений на частоту оползней и выявлении основных морфологических особенностей рельефа в районах интенсивной солифлюкции.

### Материалы и методы

Район данного исследования находится в Центральной Эвенкии в зоне с лиственничным доминированием. Область ограничена следующими координатами углов: л.н. 64° 30' с.ш., 95° 30' в.д. и п.в 66° 30' с.ш., 101° 30' в.д. на рис. 1.

Использование данных дистанционного зондирования за период с 2000 по 2012 гг. (снимки Landsat, QuickBird 2, WorldView-1 и WorldView-2) и ГИС анализа позволило выделить свежие оползни на выделенной территории, создать векторную маску и установить год их образования. После чего используя цифровую модель рельефа (ЦМР) ASTERGLOBALDEM [15] и полученную маску оползней стандартными методами геоанализа были полученные основные характеристики рельефа для интересующих участков.



**Рис. 1. Область исследования и территория, покрываемая снимками сверхвысокого разрешения**

Для анализа климатических изменений и трендов использовались данные о температуре, осадках и индекс сухости (SPEI) [17, 18]. Для оценки тесноты связей климатических изменений и ежегодным числом оползней использовались корреляционный и регрессионный анализы.

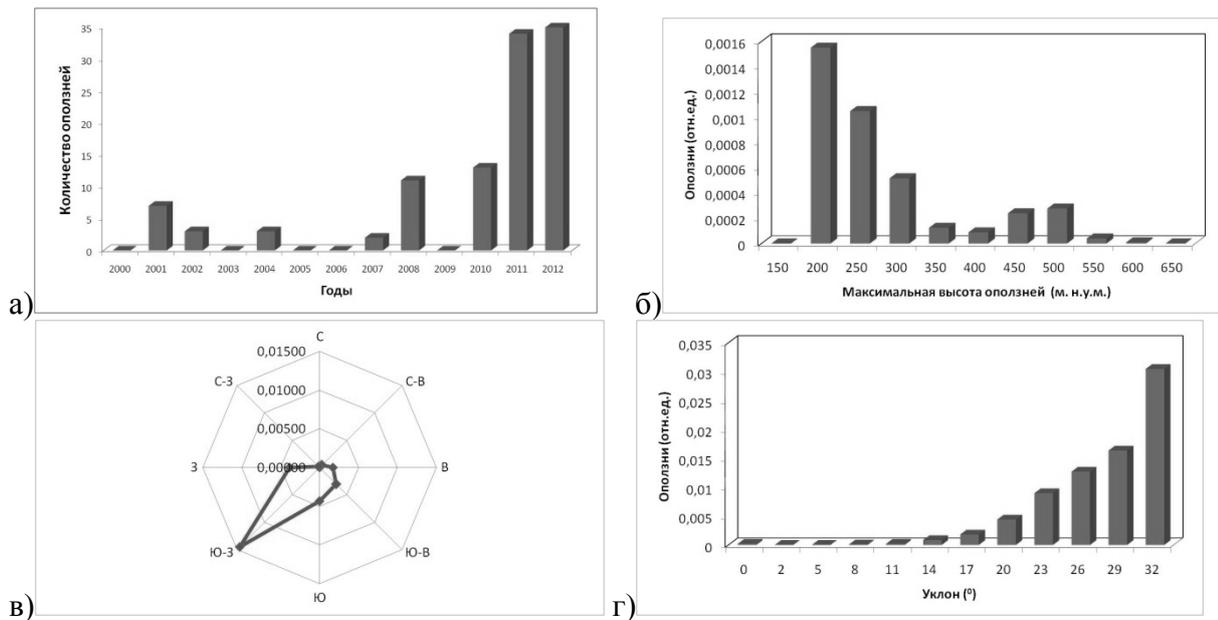
### **Результаты**

Поскольку снимки высокого разрешения (QuickBird 2, WorldView-1 и WorldView-2) позволяют достаточно точно идентифицировать поврежденные участки, было проведено их экспертное оконтуривание. Применение разновременной съемки (Landsat 2000–2012 гг.), совместно с маской оползней, позволило провести датировку оползней методом экспертного сравнения снимков разных лет. Результаты проведенной датировки представлены на рис. 2, а.

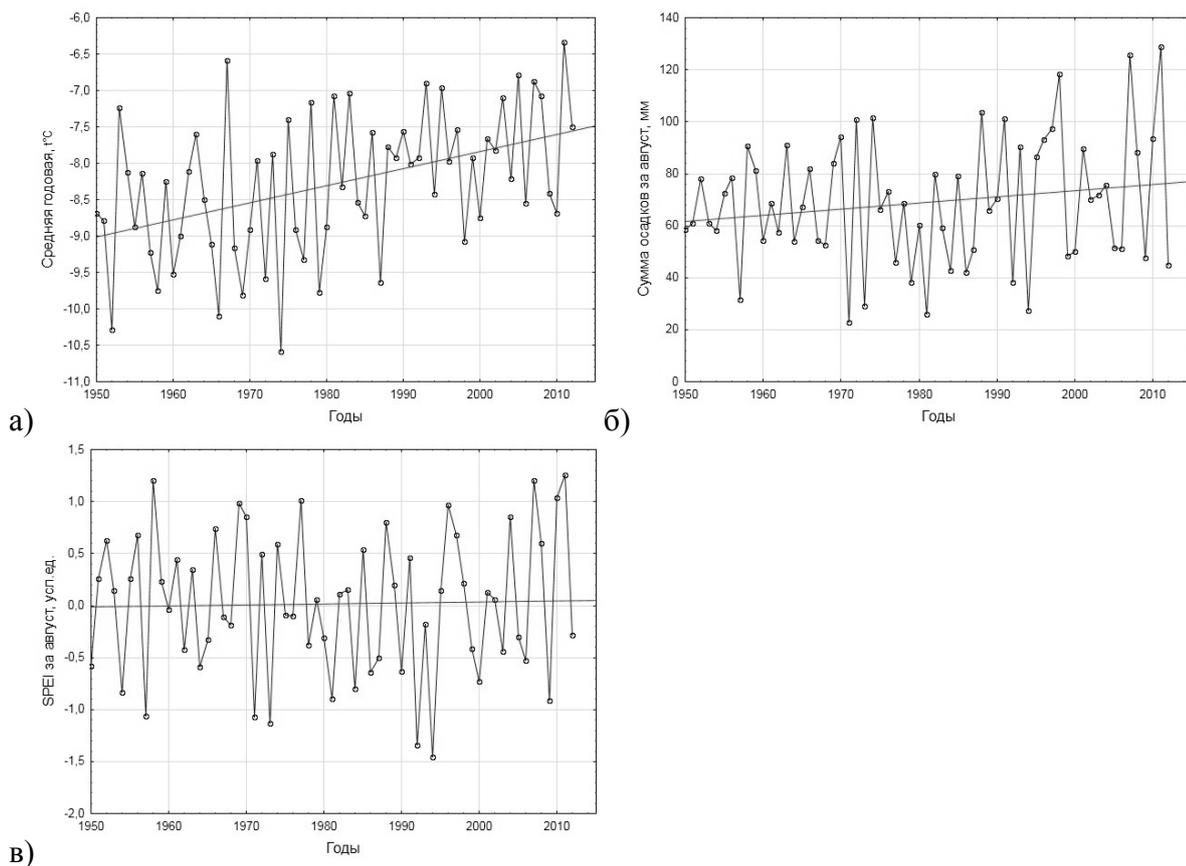
Используя ЦМР с помощью стандартных процедур был создан растровый слой включающий в себя: высоту над уровнем моря, экспозицию и крутизну склонов. Использование имеющегося набора данных позволило провести анализ распределения оползней с учетом характеристик рельефа. Эта процедура позволила выделить потенциально опасные территории для всей исследуемой области (рис. 2, б-г).

Для выбранной территории была проведен анализ климатического (погодного) набора данных, показавший наблюдаемый рост годового количества осадков и температуры (рис. 3). Частота образования оползней увеличивается с ростом температур и количества осадков, и их дальнейший рост приведет к значительному увеличению количества оползней.

Корреляционный анализ набора климатических показателей и количества оползней позволил выделить наиболее значимые и достоверные связи между ними для значений SPEI за август ( $R = 0,65$ ;  $p < 0,05$ ) и количества осадков за август ( $R = 0,71$ ;  $p < 0,5$ ). На более низком уровне достоверности также можно говорить о взаимосвязи со среднегодовыми температурами ( $R = 0,43$ ;  $p < 0,15$ ).



**Рис. 2. Количество оползней: а) по годам; б) по высоте над уровнем моря; в) по экспозиции склона; г) по крутизне склона**



**Рис. 3. а) Средняя годовая температура, б) сумма осадков за август, в) SPEI за август**

## Заклучение

На территории Эвенкии наблюдается увеличение частоты оползней. Использование ГИС технологий позволило выявить участки с высокой вероятностью образования оползней, которые происходят в большинстве случаев по берегам рек на прогреваемых склонах юго-западной экспозиции и их количество увеличивается с крутизной склона (по экспоненте).

Установлена достоверная и значимая взаимосвязь годового количества оползней со значением SPEI за август ( $R = 0,65$ ;  $p < 0,05$ ) и со значениями осадков за август ( $R = 0,71$ ;  $p < 0,5$ ). На более низком уровне достоверности также можно говорить о взаимосвязи со среднегодовыми температурами ( $R = 0,43$ ;  $p < 0,15$ ).

## Список литературы

1. Abaimov A.P. Long-Term Investigation of Larch Forests in Cryolithic Zone of Siberia: Brief History, Recent Results and Possible Changes under Global Warming / A.P. Abaimov, O.A. Zyryanova, S. G. Prokushkin // *Eurasian J. For. Res.* 5 (2). 2002. Pp. 95–106.
2. Anderson J.G. Solifluction, a Component of Subaërial Denudation / J.G. Anderson // *The Journal of Geology.* 1906. Vol. 14. № 2. Pp. 91–112.
3. Горшков С. П. Климат, мерзлота и ландшафт Среднеевропейского региона / С.П. Горшков, Дж. Ванденберг, Б. А. Алексеев, О. И. Мочалова, М. А. Тишкова // 8-я Междунар. конф. по вечной мерзлоте. МГУ им. М. В. Ломоносова. М., 2003. С. 75–79.
4. Jones A. Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. / A. Jones, V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren, L. Montanarella (eds.) // European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2010. 142 pp. Режим доступа: <http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/Circumpolar/Download.cfm?myID=1>
5. Каплина Т.Н. Криогенные склоновые процессы. М.: Наука, 1965. 294 с.
6. Wang. B. Movement Behaviour Of Thawflows In Permafrost Soils / B. Wang, H. Li, V. Paudel // *Geohazard.* 2008. Режим доступа: <http://www.landslides.ggl.ulaval.ca/geohazard/Processus/wang.pdf>
7. Жигарев Л.А. Причины и механизм развития солифлюкции / Л.А. Жигарев, Дж. Броун // М.: Наука, 1967. 151 с.
8. Kasischke E.S. Fire, climate change, and carbon cycling in the boreal forest / E.S. Kasischke, B. J. Stocks // *Ecological Studies.* 2000. № 138. P. 19–30.
9. Kharuk V.I. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities / V.I. Kharuk, M.L. Dvinskaya, K.J. Ranson, S.T. Im // *Environmental Research Letters.* 2011. 6. 045208.
10. Kharuk V.I. Expansion of Evergreen Conifers to the Larch-Dominated Zone and Climatic Trends / V.I. Kharuk, M.L. Dvinskaya, K.J. Ranson, S.T. Im // *Russian Journal of Ecology.* 2005. № 36 (3). Pp. 164–170.
11. Kharuk V.I. Wildfires dynamic in the larch dominance zone / V.I. Kharuk, M.L. Dvinskaya, K.J. Ranson // *Geophysical Research Letters.* 2008. 35. L01402.
12. Kharuk V.I. Fire return intervals within the northern boundary of the larch forest in Central Siberia / V.I. Kharuk, M.L. Dvinskaya, K.J. Ranson // *International Journal of Wildland Fire.* 2013. № 22 (2). Pp. 207–211.
13. Stocker T.F. Climate Change 2013: 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, IPCC. 2013. 1535 pp.

14. Metternicht G. Remote sensing of landslides : An analysis of the potential contribution to geospatial systems for hazard assessment in mountainous environments / G. Metternicht, L. Hurni, R. Gogu //Remote Sensing of Environment. № 98. 2005. Pp. 284–303.
15. ASTER GLOBAL DEM. (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).
16. CRU TS 3.21 dataset.  
[http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_\\_ATOM\\_\\_ACTIVITY\\_0c08abfc-f2d5-11e2-a948-00163e251233](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__ACTIVITY_0c08abfc-f2d5-11e2-a948-00163e251233).
17. Higher Council for Scientific Research. (<http://sac.csic.es/spei>.)

УДК 528.88, 556

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОЙ МАССЫ В СРЕДНЕЙ СИБИРИ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ GRACE

С. Т. Им

ФГБУН «Институт леса СО РАН», ИЭУиП ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет, Институт экономики, управления и природопользования, НОЦ ИКИВТ, ФГАОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет»  
e-mail: [stim@ksc.krasn.ru](mailto:stim@ksc.krasn.ru)

Проведено исследование изменений водной массы в зоне вечной мерзлоты центральной Сибири по данным дистанционного зондирования GRACE за период 2003–2013 гг. Выделено одиннадцать зон с однородными временными сериями водного эквивалента массы. В период 2003–2009 гг. для восьми выделенных зон выделены значимые положительные тренды водной массы (4–21 мм в год,  $\alpha < 0,05$ ). На участках, расположенных в тундре в зоне сплошной мерзлоты наблюдается достоверный рост дисперсии водной массы в период 2010–2013 гг. по сравнению с 2003–2009 гг. Указанные аномалии водной массы связаны с климатическими изменениями.

*Ключевые слова:* вечная мерзлота, центральная Сибирь, GRACE.

### Введение

Зона вечной мерзлоты покрывает примерно 25 % северного полушария (23 млн. кв. км), и покрывает 63 % территории России (10 млн. кв. км) [1, 2].

Состояние Арктики и субарктики значительно зависит от температур [3]. За последние 30 лет в северной части России температура возросла на 1–2 °С [3, 4]. Климатические модели предсказывают дальнейший рост температуры в арктической зоне на 7–8 °С к концу 21 века [5]. Рост температур в арктической зоне приведет к изменению активного слоя и водного баланса [1, 6, 7]. Анисимов и др. [8] определили, что к 2050 году глубина оттаивания мерзлоты в северной части Сибири может увеличиться на более чем 50 %, а в южной части до 30 %.

Рост глобальной температуры на 0,5–1,0 °С приведет к деградации только зоны островной вечной мерзлоты, а потепление на 1,5 °С может вызвать значительное оттаивание зоны сплошной мерзлоты севернее 60° с.ш. [9].

В течение трех десятилетий 20 века изменение климата сопровождается сокращением площадей и количества водных поверхностей в некоторых регионах Сибири [10, 11].

Таким образом, изменения климата в последние десятилетия оказывает значительное влияние на состояние зоны вечной мерзлоты. Климатические изменения приведут к значительным изменениям в водном балансе в зоне вечной мерзлоты.

Одним из подходов к анализу динамики водной массы является гравитационный метод. Гравитационная спутниковая съемка GRACE позволяет вести мониторинг за изменениями водной массы при решении различных задач. Эти данные

дистанционного зондирования позволили исследовать интенсивное таяние ледников в Антарктике и Гренландии [12, 13], в Канадском Арктическом Архипелаге [14] и других регионах [15] и решать другие гидрологические задачи [16–21]. В настоящее время длительность наблюдений по спутниковой съемке GRACE составляет 10 лет, что позволяет наблюдать за менее выраженными явлениями такими как, деградация вечной мерзлоты [18, 22], засухи [17] и сокращение запасов воды [20].

Целью данной работы являлся анализ изменений водной массы по гравитационным данным дистанционного зондирования GRACE на территорию криолитозоны Средней Сибири в связи с климатическими изменениями.

### **Материалы и методы**

В исследовании использованы материалы дистанционного зондирования GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, <http://www.csr.utexas.edu/grace/>, <http://grace.jpl.nasa.gov/>) за период 2003–2013 гг. Система GRACE позволяет получать оценки аномалий водного эквивалента массы на основе гравиметрических измерений. В работе использованы материалы, полученные с сайта GRACE Tellus (<http://grace.jpl.nasa.gov>). Снимки представляют собой сеточные растровые данные с пространственным разрешением в один градус по широте и долготе. Данные представляют собой помесечные ряды водного эквивалента массы [23].

Объект исследования покрывает территорию в 5,5 млн. кв. км. (80°–130° в.д., 55°–82° с.ш.). Большая часть исследуемой территории расположена на плато центральной Сибири. Плато охватывает территории с большим разнообразием ландшафтов между реками Енисей и Лена и распространяется на территорию в 3.5 млн. км<sup>2</sup> [24]. Большая часть территории расположена в зоне вечной мерзлоты [1, 9].

В пределах анализируемой территории выделены однородные зоны, объединяющие пикселя с похожими временными сериями изменений водного эквивалента массы. Для выделения однородных зон использован метод кластеризации ISODATA [25], реализованный в программном пакете Erdas Imagine (<http://geospatial.intergraph.com>).

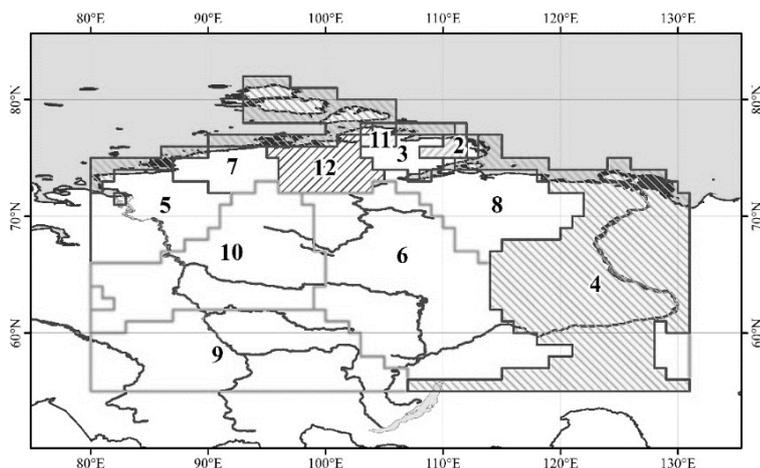
Для анализа динамики температур и осадков использованы данные CRU TS 3.21 [26]. Данные представляют собой сеточный месячные данные с 1901 по 2012 гг. с пространственным разрешением 0,5 градуса по широте и долготе. Для статистического анализа временных рядов данных использована программа StatSoft Statistica (<https://www.statsoft.ru>).

### **Результаты и обсуждение**

Выделено одиннадцать однородных зон с различным временным ходом изменений водного эквивалента массы (рисунок). Семь из них расположены преимущественно в зоне тундры, с преобладанием сплошной мерзлоты. Зона 9 в большей части расположена вне зоны мерзлоты. Остальные зоны расположены на лесопокрытых территориях сплошной и фрагментарной мерзлоты.

Для семи из выделенных зон найдены статистически значимые тренды ( $\alpha < 0,05$ ) аномалий водной массы (таблица). Эти зоны расположены в пограничных районах между сплошной и фрагментарной мерзлотой, и в гористой местности. Наблюдаются положительные тренды аномалий водной массы в период 2003–2008 гг. (таблица). Наибольший рост водной массы в этот период наблюдается в тундровых зонах и связан с ростом температур и осадков. Предположительно, рост водной массы связан с увеличением деятельного слоя и, следовательно, увеличением накопления влаги почвами.

Для 5 и 7 зоны найдены значимые положительные корреляции между среднегодовыми температурами и среднегодовыми аномалиями водной массы ( $r^2 > 0,6$ ;  $\alpha < 0,1$ ), и годовыми осадками и среднегодовыми аномалиями водной массы ( $r^2 > 0,6$ ,  $\alpha < 0,05$ ).



**Рисунок. Зоны однородных временных рядов аномалий водной массы за период 2003–2013 гг.**

Начиная с 2008 года в зонах тундры наблюдается рост варируемости аномалий водной массы по сравнению с предыдущим периодом, что, вероятно, связано увеличением активного слоя.

**Таблица**

**Тренды водного эквивалента массы в пределах выделенных однородных зон**

N	Линейный тренд 2003–2008			Линейный тренд 2003–2013			Полиномиальный тренд 2003–2013	
	R <sup>2</sup>	Скорость, мм в год	Уровень значимости	R <sup>2</sup>	Скорость, мм в год	Уровень значимости	R <sup>2</sup>	Уровень значимости
2	0.06	+20	0.04	0.00	+1	0.88	0.05	0.05
3	0.12	+16	0.00	0.00	+1	0.63	0.08	0.01
4	0.39	+10	0.00	0.20	+4	0.00	0.33	0.00
5	0.05	+10	0.07	0.04	+6	0.03	0.04	0.07
6	0.11	+11	0.00	0.04	+4	0.02	0.10	0.00
7	0.03	+8	0.18	0.03	+6	0.05	0.03	0.15
8	0.04	+5	0.09	0.00	+0	0.78	0.07	0.02
9	0.18	+4	0.00	0.28	+11	0.00	0.31	0.00
10	0.06	+10	0.04	0.05	+5	0.01	0.06	0.04
11	0.06	+21	0.04	0.00	-3	0.61	0.05	0.07
12	0.07	+9	0.02	0.00	+1	0.49	0.03	0.13

**Заключение**

Таким образом, показано, что в зоне вечной мерзлоты центральной Сибири в начале 21 века наблюдался значимый рост водной массы (2003–2009 гг.), связанный с климатическими изменениями. Тундровые и лесопокрываемые зоны имеют различные изменения в зависимости от расположения в зонах сплошной и фрагментарной мерзлоты. В последние годы наблюдается значимый рост вариации водной массы в зоне тундры, вероятно, связанный с увеличением деятельного слоя.

Работа поддержана грантом Правительства РФ № 14.B25.31.0031.

**Список литературы**

1. Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A., Shiklomanov N.I., Zhang T., Nelson F.E. Uncertainties in gridded air temperature fields and effects on predictive active layer modeling // Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003–2012). 2007. Vol. 112(F2). URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JF000593/pdf> (дата обращения 28.04.2014).
2. Callaghan T.V., Jonasson S. Arctic ecosystems and environmental change // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 1995. Vol. 352. P. 259–276.

3. IPCC AR4. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R. K. Pachauri, A. Reisinger (Eds.). Geneva: IPCC, 2007. 104 p. URL: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html) (дата обращения 28.04.2014).
4. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia // *Permafr. Periglac. Process.* 2010. Vol. 21. P. 136–155.
5. ACIA, Arctic Climate Impacts Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 1042 p.
6. IPCC Technical Paper VI - June 2008 / Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof (Eds.). Geneva: IPCC Secretariat, 2008. 210 p. URL: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/\\_climate\\_change\\_and\\_water.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/_climate_change_and_water.htm) (дата обращения 28.04.2014).
7. Romanovsky V.E., Shender I., Sazonova T.S., Balobaev V.T., Tipenko G.S., Rusakov V.G. Permafrost Temperatures in Alaska and East Siberia: Past, Present and Future // In: *Proceedings of the Second Russian Conference on Geocryology (Permafrost Science)*, Moscow, June 6–8, 2001. P. 301–314.
8. Анисимов О.А. Современные и будущие изменения вечной мерзлоты: синтез наблюдений и моделирования // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2008. № 1(78). С. 7–16.
9. Vaks A., Gutareva O.S., Breitenbach S.F.M., Avirmed E., Mason A.J., Thomas A.L., Osinzev A.V., Kononov A.M., Henderson G.M. Speleothems Reveal 500,000-Year History of Siberian Permafrost // *Science.* 2013. Vol. 340(6129). P. 183–186.
10. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // *Science.* 2005. Vol. 308(5727). P. 1429.
11. Кравцова В. И., Тарасенко Т.В. Динамика термокарстовых озер центральной Якутии при изменениях климата с 1950 года // *Криосфера Земли.* 2011. Т. XV. № 3. С. 31–42.
12. Barletta V.R., Sørensen L.S., Forsberg R. Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica // *The Cryosphere.* 2013. Vol. 7. P. 1411–1432.
13. Chen J.L. Wilson C.R., Tapley B.D. Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet // *Science.* Vol. 313(5795). 2006. P. 1958–1960.
14. Gardner A.S. Moholdt G., Wouters B., Wolken G.J., Burgess D.O., Sharp M.J., Cogley J.G., Braun C., Labine C. Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago // *Nature.* 2011. Vol. 473. P. 357–360.
15. Jacob T., Wahr J., Pfeffer W. T., Swenson S. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise // *Nature.* 2012. Vol. 482. P. 514–518.
16. Landerer F.W., Dickey J.O., Güntner A. Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012). 2010. Vol. 115(D23).
17. Long D., Scanlon B.R., Longuevergne L., Sun A.Y., Fernando D.N., Save H. GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas // *Geophysical research letters.* 2013. Vol. 40(13).
18. Muskett R.R., Romanovsky V.E. Energy and mass changes of the Eurasian permafrost regions by multi-satellite and in-situ measurements // *Natural Science.* 2011. Vol. 3(10). P. 827–836.
19. Reager, J.T., Famiglietti J.S. Characteristic mega-basin water storage behavior using GRACE // *Water Resources Research.* 2013. Vol. 49(6).

20. Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J. S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India // *Nature*. 2009. Vol. 460. P. 999–1002.
21. Velicogna I., Tong J., Zhang T., Kimball J.S. Increasing subsurface water storage in discontinuous permafrost areas of the Lena River basin, Eurasia, detected from GRACE // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39(9).
22. Vey S., Steffen H., Müller J., Boike J. Inter-annual water mass variations from GRACE in central Siberia // *Journal of Geodesy*. 2013. Vol. 87(3). P. 287–299.
23. Landerer F.W., Swenson S.C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // *Water Resources Research*. 2012. Vol. 48(4).
24. Раковская Э.М., Давыдова М.И. Физическая география России [Текст]; учебник для студентов педагогических высших учебных заведений: в 2 ч. М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2001. Ч. 2. 304 с.
25. Schowengerdt, R. A. Remote Sensing. 3rd Edition. Models and Methods for Image Processing. Waltham: Elsevier, Academic Press, 2006. 560 p.
26. University of East Anglia Climatic Research Unit (CRU). CRU TS3.21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.21 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901 - Dec. 2012). Phil J., Ian H. NCAS British Atmospheric Data Centre, 2013. URL: [http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_\\_ATOM\\_ACTIVITY\\_0c08abfc-f2d5-11e2-a948-00163e251233](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM_ACTIVITY_0c08abfc-f2d5-11e2-a948-00163e251233) (дата обращения 28.04.2014).

УДК 528.8.04, 528.88, 551.46

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

А. В. Картушинский

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

e-mail: [kartushka@mail.ru](mailto:kartushka@mail.ru)

Рассматриваются возможности для определения состояния верхнего слоя водных экосистем и определения неоднородного распределения физических и биологических компонент по спутниковым данным. Представлены результаты расчетов и статистического анализа изменчивости градиентных полей температуры, солености, концентрации хлорофилла и мутности в поверхностном слое водных экосистем на локальном (региональном) и глобальном уровне масштабирования по данным дистанционного зондирования Земли.

*Ключевые слова:* спутниковые данные, температура поверхности, водная экосистема, гидрофизические процессы, фитопланктон, хлорофилл, изменчивость, пространственные неоднородности.

Частью необходимых знаний о функционировании водных систем является анализ условий возникновения гидробиологических и гидрофизических процессов в водных системах, характера их изменчивости и взаимосвязи между этими процессами. Насущной необходимостью при оценке состояния природных объектов является получение качественных данных для изучения механизмов взаимодействия явлений физической и биологической природы в экосистемах, а также условий такого проявления. Динамическое состояние водной среды оказывает значительное влияние на биологические процессы. Увеличение или уменьшение жизненной активности в водных экосистемах нередко связано с различными гидрофизическими явлениями,

происходящими на поверхности и в толще вод. Изучение зависимости между гидрофизическими и биологическими процессами, позволяет раскрывать важные закономерности в распределении, поведении и воспроизводстве живых организмов.

С учетом пространственных и временных масштабов проявления гидрофизических процессов, необходимо получать качественную информацию об объекте исследования. Измерения, проводимые в отдельных точках или на станциях контроля, не обеспечивают необходимым объемом данных о происходящих явлениях в системе. Спутниковая информация, после соответствующей обработки, позволяет фиксировать динамические изменения параметров в поверхностном слое водных объектов по спектральной яркости, как в океане и морях, так и в озерах.

Основная задача работы – анализ изменчивости пространственного положения гидрофизических и гидробиологических полей с высокими значениями градиентов температуры, солености и концентрации хлорофилла в отдельных зонах океана, а также неоднородностей температуры и мутности в малых водных системах для оценки взаимосвязи двух структур водных систем: физической и биологической с применением спутниковой информации.

В работе используются спутниковые средненедельные данные по температуре поверхности океана и концентрации хлорофилла SeaWiFS, CZCS, AVHRR с пространственным разрешением снимков 9x9 км, которые скомпонованы для периода исследования с 1982 по 2013 год. Для исследования изменчивости градиентов солености океана используются данные климатического спутника Aquarius/SAC-D с пространственным разрешением 100x100км, начиная с 2011 года. Для изучения процессов во внутренних водоемах используются данные спутниковых аппаратов LANDSAT, SPOT и MODIS с различным пространственным разрешением.

При обработке спутниковых данных и получения расчетных характеристик в поверхностном слое океана применялось разработанное программное обеспечение для анализа структуры градиентных полей температуры, солености и концентрации хлорофилла на различных пространственных и временных масштабах. Обработка спутниковых изображений внутренних водных объектов для анализа изменчивости температуры воды и мутности проводилась при помощи пакета ENVI на примере озера Шира (Хакасия).

Формирующиеся на поверхности температурные поля и поля концентрации хлорофилла, являются показателями поверхностной структуры водных систем. Для определения изменчивости структурной организации поверхностного слоя океана необходима количественная оценка изменений параметров в пространстве. В качестве объекта для таких оценок можно использовать фронтальные зоны, то есть зоны, в которых градиенты основных гидрофизических полей значительно отличаются от средних значений градиентов вне пределов данной зоны. Градиент, это характеристика, отражающая направление наискорейшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой. Для оценки количественного показателя градиентов поверхностного слоя в программном обеспечении предусмотрена реализация алгоритма расчета широтного, меридионального и абсолютного (по модулю) градиентов заданных характеристик. Также проводится усреднение по времени для выявления среднемесячной, среднесезонной и среднегодовой изменчивости структуры градиентных полей. Кроме того в информационной системе (ИС) реализованы алгоритмы позволяющие проводить корреляционный и кластерный анализ для выявления статистической связи температуры и концентрации хлорофилла в поверхностном слое океана для различных пространственных и временных масштабов.

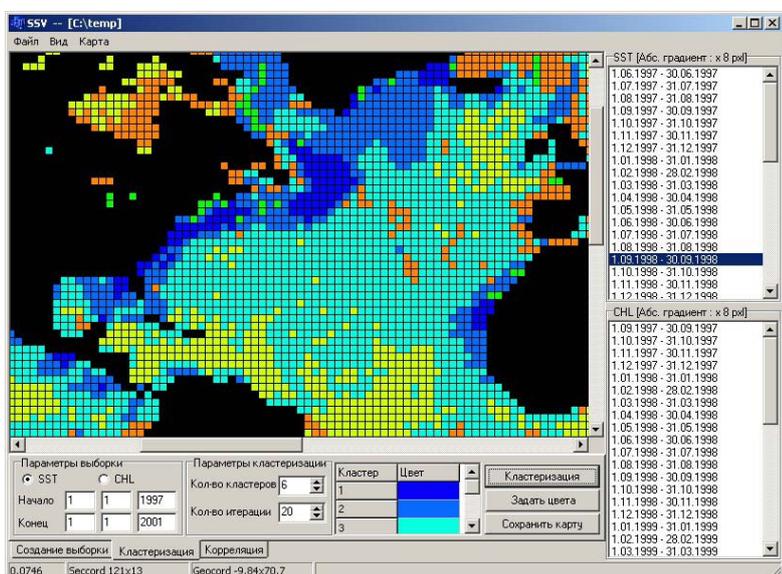
Функциональные возможности ИС заключаются в следующем:

- обеспечение усреднения входных данных по времени (месячное, сезонное, годовое) и масштабу расчетной сетки с соответствующим пиксельным увеличением (8, 16, 32, 64, 128), которое позволяет выделять крупномасштабные и долговременные гидрофизические процессы;

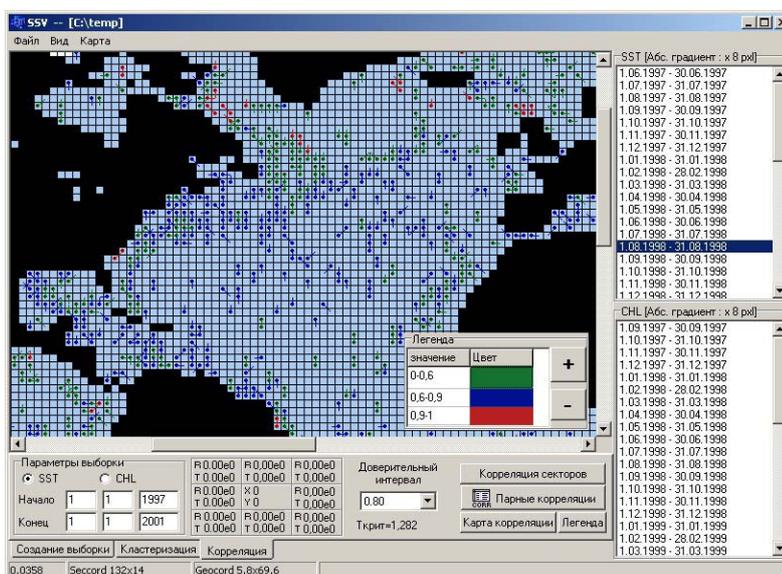
- визуализация кластеров по значениям градиентов, что подразумевает процесс разбиения выборки на однородные группы с указанием количества выделяемых кластеров и максимального числа итераций расчета, реализованного по алгоритму k-средних (позволяет визуально выделить зоны в океане со схожими изменениями значений градиентов, что дает наглядное отображение фронтальных зон). Сектора, в которых изменения значений существенно отличаются, окрашиваются в разные цвета, что приводит к формированию карты кластеров (рис. 1);

- расчет коэффициентов корреляции (позволяет выявлять наличие или отсутствие связи между процессами, происходящими в отдельных районах океана в сравнении с показателями в соседних квадратах на карте);

- вывод изображения в виде таблицы корреляции и корреляционной карты, полученной на основе вычислений парных корреляций, отображающих связи между соседними секторами (рис. 2);



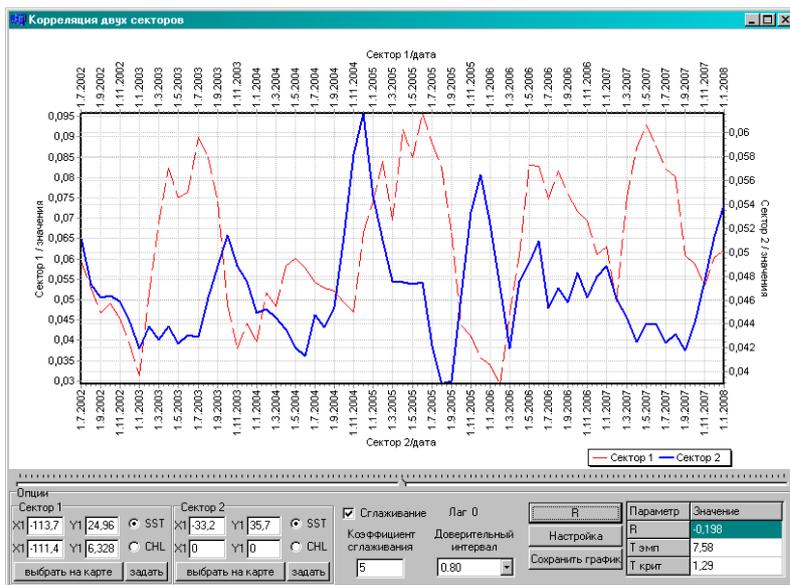
**Рис. 1. Карта кластеров для Северной Атлантики. Черным цветом обозначена суша (материки), светлые поля – зоны с наименее схожими изменениями значений градиентов**



**Рис. 2. Карта коэффициентов корреляции для Северной Атлантики. Светлые квадраты – квадраты с наименьшими значениями коэффициентов корреляции**

- вывод графика кросс-корреляции по выделенным секторам с учетом временного лага (позволяет проводить оценку интервала инерции по времени), который необходим для анализа интенсивности статистической связи между двумя секторами с учетом временной задержки динамики процессов между секторами (рис. 3).

Если для океанов и морей размеры и время существования неоднородностей, связанных с внешней средой могут ограничиваться масштабами процессов и явлений, то для внутренних водоемов пространственной границей системы, часто является береговая черта или размер водоема. Однако, так как диапазон изменчивости неоднородностей в водной среде достаточно велик, необходимо разделять и водоемы суши, в зависимости от проявления неоднородностей, связанных с гидрофизическими процессами.



**Рис. 3. График значений кросс-корреляции между двумя определенными секторами (фронтальными зонами). Оси абсцисс – дата, оси ординат – величина градиентов температуры**

Возможности изучения неоднородностей полей температуры и мутности водных объектов малого размера целиком зависят от пространственного разрешения спутниковых снимков. В нашем случае, при помощи программного пакета ENVI 7.0 и реализации соответствующих функциональных возможностей получены поля температуры и мутности поверхности оз. Шира (Хакасия) по которым оценивалась степень пространственной и временной изменчивости структуры водной экосистемы малого размера. Масштабы пространственных неоднородностей поля температуры и мутности в поверхностном слое озера определенным образом связаны с ветровым воздействием, волновыми процессами и соответствующим турбулентным перемешиванием, а также изменениями стока небольшой речки Сон. Анализ распределения поля мутности и температуры поверхности озера позволяет выявлять гетерогенные и гомогенные зоны, зоны прогрева или выхолаживания вод, что достаточно важно при оценке влияния гидрофизических процессов на пространственное распределение биологических объектов экосистемы.

Таким образом, в работе показаны возможности использования спутниковых данных для изучения процессов структурной самоорганизации в водных системах по физическим параметрам (температура и соленость воды, градиент температуры) и биологическим показателям (концентрация хлорофилла, концентрация взвешенных веществ). На основе расчетных данных получены оценки взаимодействия структурных компонент физической и биологической природы и размеры соответствующих неоднородностей. Выявлены региональные и глобальные особенности пространственно-

временной изменчивости градиентных характеристик в поверхностном слое водных экосистем по данным спутниковых измерений.

УДК 528.8

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В РАБОТЕ ОРГАНОВ ЧС КАЗАХСТАНА

О. П. Архипкин, Г. Н. Сагатдинова, Ж. А. Бралинова  
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»  
e-mail: [oarkhipkin@rambler.ru](mailto:oarkhipkin@rambler.ru)

Описаны задачи и выходные результаты космического мониторинга пожаров, которые используются в практической деятельности органов ЧС Казахстана различного уровня как для оценки пожароопасной ситуации, так и для ликвидации очагов пожаров. Также дается описание методики оценки потенциального развития паводков на основе временных рядов ДДЗ.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, космический мониторинг, чрезвычайные ситуации, ГИС-технологии, пожары, очаги пожаров, пострадавшие от пожаров площади, паводки, зоны затопления, многолетние ряды.

### Введение

Использованию данных космического мониторинга в работе казахстанских органов ЧС различного уровня (республиканских, областных, районных) уделялось первостепенное внимание с самого начала разработки соответствующих космических технологий. Так в Западно-Казахстанской области органами ЧС с 2001 года использовались в практической деятельности результаты оперативного космического мониторинга пожаров, а с 2002 года – космического мониторинга паводков. В текущем же году космическим мониторингом ЧС (паводки и пожары) охвачена уже вся территория республики. Результаты мониторинга оперативно передавались в Кризисный центр и департамент предупреждения МЧС РК, а также в областные департаменты ЧС и по адресам, указанных ими.

Главными задачами космического мониторинга пожаров являются оперативное определение очагов пожаров и оценка площадей, пострадавших от пожаров, а космического мониторинга паводков – оперативное определение зон затопления и динамики заполнения важнейших водных объектов, прежде всего водохранилищ. Для решения этих задач были разработаны соответствующие ГИС-технологии [1–5]. Базовыми ДДЗ в них являются данные Aqua и Terra MODIS, а для уточнения используются данные Landsat-8. При необходимости и наличии финансовых средств дополнительно привлекаются ДДЗ других космических систем среднего и высокого разрешения, включая радарные.

Большое значение для практического использования результатов космического мониторинга ЧС имеет разработка технологии формирования таких выходных данных, которые обеспечивают оперативность их получения, максимальный учёт пожеланий пользователей, понятны им и позволяют использовать эти данные для оценки степени опасности ЧС и возможности их локализации или ликвидации. Вид и форма выходных данных постоянно совершенствуются с учетом новых технологических возможностей и пожеланий пользователей. Если раньше основными заказчиками были областные управления ЧС при областных акиматах (исполнительный орган), то с этого года главным заказчиком является МЧС РК. Это позволило с одной стороны, распространить применение результатов оперативного космического мониторингом ЧС на все области Казахстана, а с другой – унифицировать выходные формы.

### Выходная информация космического мониторинга пожаров

Органам ЧС передаются выходные данные космического мониторинга пожаров, содержащие информацию об обнаруженных очагах пожаров и оценке площадей, пострадавших от пожаров. Информация пользователям передается тремя способами: по электронной почте в формате гео-pdf; по электронной почте в виде картографических форматов типа jpg и экселевских табличных файлов; посредством геопортала. При этом вторым способом (jpg и Excel) данные передаются организациям, непосредственно занимающимся борьбой с ЧС (например, пожарным частям).

### Выходная информация по очагам пожаров

Информация формируется утром по всем ночным космоснимкам MODIS и высылается пользователям между 8 и 9 часами местного времени, а днем – несколько раз после приема дневных данных Aqua и Terra MODIS через 20 минут – 1 час после приема этих данных. Данные на республиканском уровне формируются в формате гео-pdf, который формируется в ГИС (ArcGIS, MapINFO) и содержит атрибутивную и пространственную информацию, привязанную к географическим координатам. Формат Geo-Pdf дает возможность использовать разнообразные возможности ГИС: определять координаты и расстояния на карте, включать/отключать картографические слои, просматривать атрибутивную информацию каждого слоя, формировать и распечатывать свои варианты картографической информации. Это значительно повышает информативность и наглядность результатов космического мониторинга ЧС, не требуя при этом особых специальных знаний от пользователей.

Выходная информация на областном уровне содержит карту области с разбивкой на районы с указанием расположения очагов пожаров. Она дает представление о ситуации с пожарами в целом по области. Выходная информация на районном уровне содержит карту и таблицу, которые играют важнейшую роль в организации тушения пожаров. Согласованный с МЧС РК вариант выходной карты на районном уровне представлен на рис. 1.

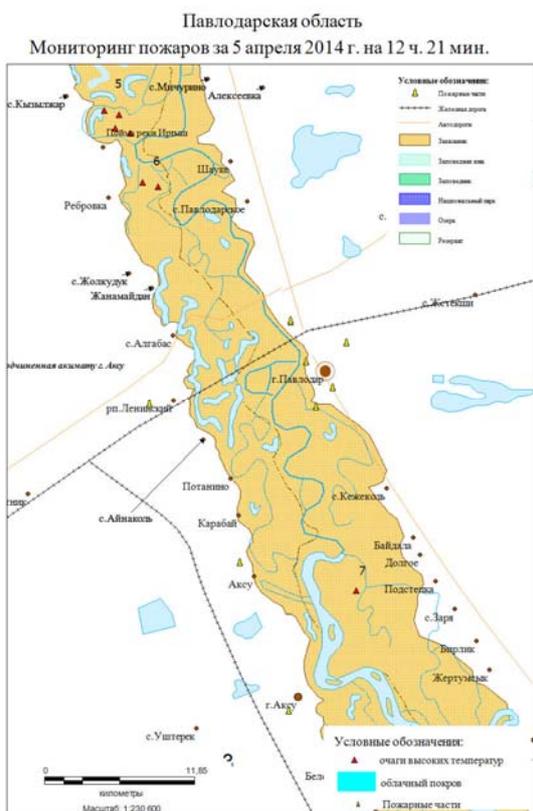
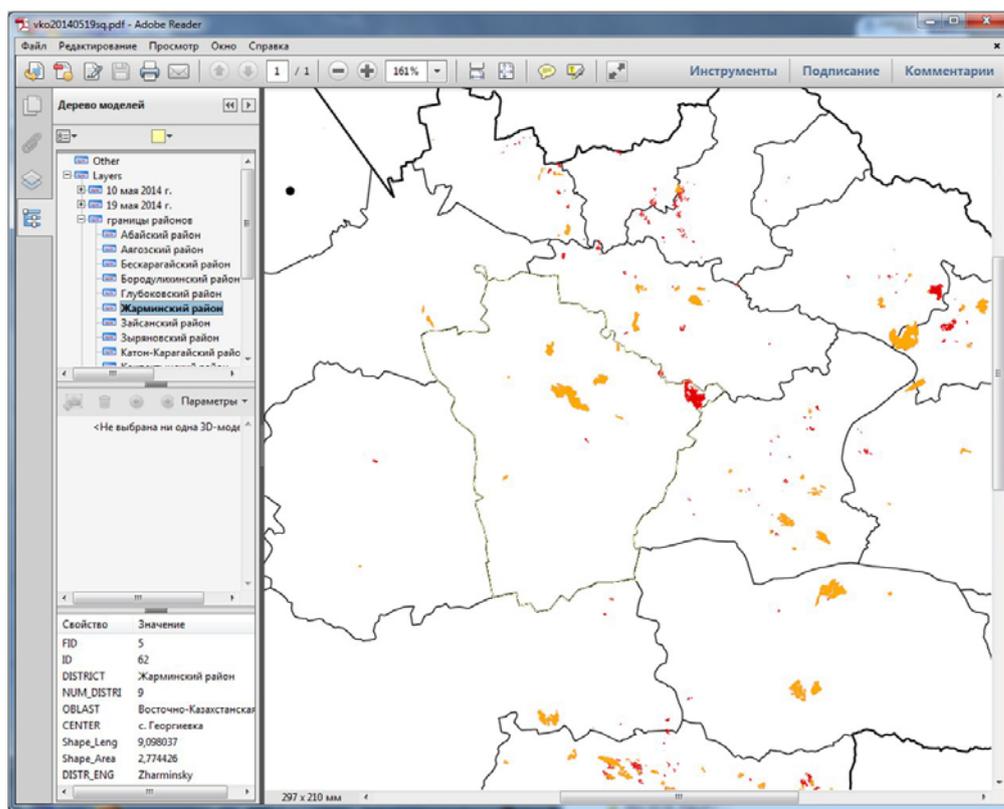


Рис. 1. Выходная информация по очагам пожаров на районном уровне



**Рис. 2. Выходная информация по площадям, пострадавшим от пожаров, в формате geo-pdf**

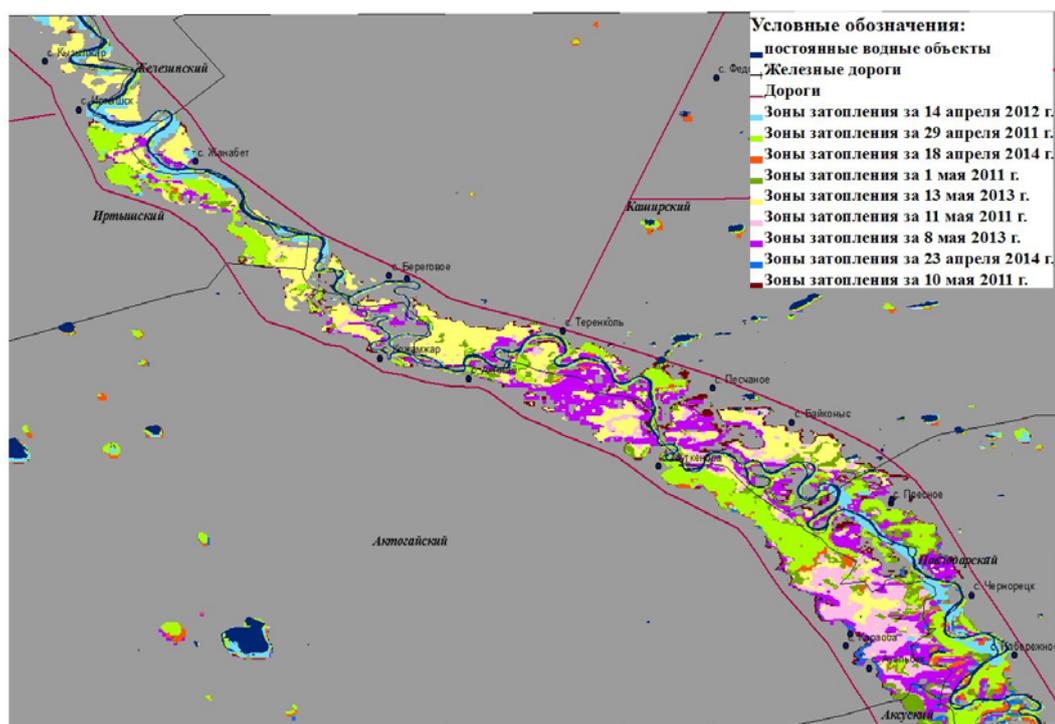
### **Выходная информация по площадям, пострадавшим от пожаров**

Информация формируется раз в декаду на основе анализа дневных данных Aqua и Terra MODIS с указанием цветом площадей обнаруженных ранее и в текущую декаду. Затем выходная информация по площадям, пострадавшим от пожаров, корректируется по мере поступления данных Landsat. Выходная информация на республиканском и областном уровнях формируются в формате geo-pdf, в котором имеется возможность выдавать данные о площадях по каждому отдельному пожару (рис. 2). На областном уровне дополнительно формируются данные в картографическом виде с приложением таблицы с указанием порайонной величины площадей, пострадавших от пожаров, нарастающим итогом с начала пожароопасного сезона.

### **Оценка потенциального развития паводков на основе временных рядов ДЗ**

Прогнозные оценки потенциального развития паводков можно проводить несколькими способами. Такую оценку может дать математическое моделирование, которое для правильного отражения процесса требует достаточно большого количества наземных данных с геодезическими и гидрологическими характеристиками исследуемой территории. Возможен и другой подход, базирующийся на анализе многолетних рядов данных космического мониторинга пожаров. Главная его задача состоит в получении пространственно-временной характеристики потенциальной динамики зон затопления на рассматриваемой территории. Для ее решения анализируется весь многолетний временной ряд данных, полученный по результатам космического мониторинга схода снежного покрова и прохождения паводковых вод. Из него выбираются данные, содержащие зоны затопления исследуемой территории.

Располагая эти данные в порядке возрастания площади зон затопления, и получаем пространственно-временную динамику прохождения паводков и наводнений (рис. 3).



**Рис. 3. Потенциальная динамика развития паводка на р. Иртыш в районе с. Актогай в Павлодарской области по данным космического мониторинга за весенний период 2011-2014 годов**

### Основные результаты

1. Выходные результаты ГИС-технологии космического мониторинга пожаров (очагов и пострадавших площадей) активно использовались в 2014 году органами ЧС различного уровня в Казахстане для оценки ситуации и организации тушения очагов пожаров.

2. Полученная оценка потенциального развития паводков на основе временных рядов ДДЗ показывает реальную последовательность затопления территории при развитии паводков и наводнений от сценария слабого паводка к наихудшему, что позволяет разработать порядок предупредительных мер для уменьшения ущерба от них.

### Список литературы

1. Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н. Развитие технологий оперативного космического мониторинга ЧС в Казахстане / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. науч. ст. Вып. 5. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Т. 2. С. 411–418.

2. Arkhipkin O.P., Sagatdinova G.N. Functioning of Fires and Flood Space Monitoring System in Kazakhstan // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008. pp. 435-439.

3. Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N. Development of Flood Space Monitoring in Kazakhstan / Geoscience and Remote Sensing New Achievements. Edited by Pasquale Imperatore & Daniele Riccio. ISBN 978-953-7619-97-8. Vukovar, Croatia: In Teach. 2010. pp. 419–436.

4. Lev Spivak, Oleg Arkhipkin, Gulshat Sagatdinova. Development and prospects of the fire space monitoring system in Kazakhstan // *Frontiers of Earth Science*. 2012, 6(3). pp. 276–282.

5. Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н. Основные результаты и направления развития космического мониторинга ЧС в Казахстане / *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Сб. науч. ст. Т. 10. № 1. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 292–302.

УДК 528.88, 004.67

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ АНОМАЛИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ MODIS. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

П. В. Воронина, Е. А. Мамаш

Институт вычислительных технологий СО РАН  
e-mail: [voronina@ict.nsc.ru](mailto:voronina@ict.nsc.ru), [elenamamash@gmail.com](mailto:elenamamash@gmail.com)

В работе предложен подход для выявления тепловых аномалий поверхности Земли, связанных, в том числе, с сейсмическими событиями по данным спектрорадиометра Terra/MODIS. Предварительные результаты получены для территории Чуйского землетрясения (Алтай), произошедшего 27 сентября 2003 г. с магнитудой 7,3 балла. Результаты показывают применимость предлагаемого подхода для рассматриваемой задачи.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, MODIS, тепловые аномалии.

Вопрос существования тепловых аномалий широко изучается в процессе мониторинга природной среды и рационального природопользования: при поиске месторождений рудных полезных ископаемых, месторождений углеводородов, для уточнения рельефа земной поверхности, в том числе, океанического дна, при мониторинге различных природных катастрофических явлений (землетрясений, извержений вулканов).

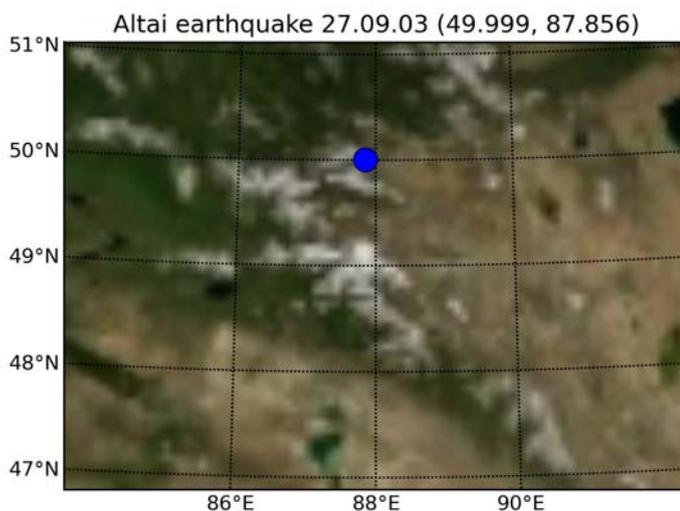
Нередко при проведении таких работ используются данные, полученные в результате космической тепловой съемки, ценность которых заключается в регулярности измерений и охвате труднодоступных регионов больших площадей [1–3]. Статистический материал по анализу температурных режимов и выявлению тепловых аномалий сейсмоопасных территорий Средней Азии, Ирана, Камчатки, Китая, Индии, Турции, Италии, Испании, Японии можно найти в [4–12]. Эти аномалии имеют размеры сотни километров в длину, десятки – в ширину, появляются за одну-три недели до толчка, их амплитуда достигает от 3 до 13 градусов.

Цель настоящей работы состоит в изучении возможности применения данных спектрорадиометра Terra/MODIS для выявления тепловых аномалий, связанных с сейсмическим событием. Рассмотрена территория, охватывающая эпицентр Чуйского землетрясения (Алтай), произошедшего 27 сентября 2003 г. с магнитудой 7,3 балла (рис. 1). Результаты детального геофизического исследования этого землетрясения изложены, например, в работах в [13–15].

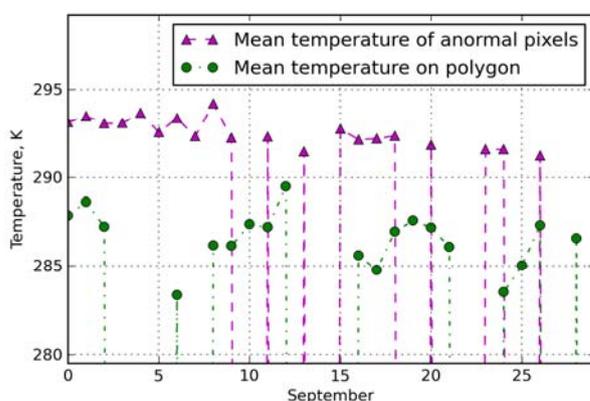
Предлагаемый подход заключается в представлении данных дистанционного зондирования не в виде изображения и последующей его обработки средствами известных пакетных инструментов (например, ENVI, ERDAS), а в попиксельной обработке спутниковых данных на базе оригинальных алгоритмов работы с архивными данными, и программированием в средах Fortran и Python.

Тематическая обработка данных заключается в выделении тепловых аномалий, расчете их площади и средней температуры, как предложено в [16]. Для этого по каждому пикселю изображения рассчитывается фоновое среднее значение и стандартное отклонение. Затем отмечаются все точки, значения температуры в которых больше фонового среднего значения и отличаются от него более чем на два стандартных отклонения.

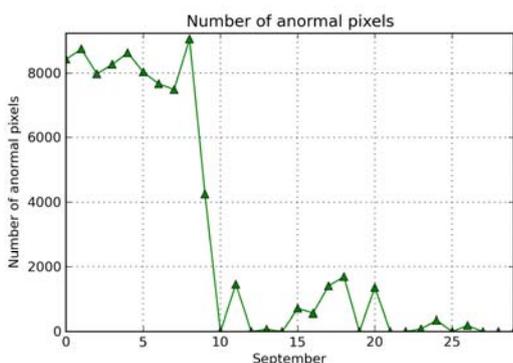
Основываясь на результатах многочисленных исследований о том, что тепловая аномалия, предшествующая сильному подземному толчку, возникает за несколько недель или даже дней до события, в качестве анализируемого периода рассмотрен сентябрь 2003 г., а в роли эталонного – сентябрь 2002 г. В качестве источника ДДЗ выступают данные MODIS с разрешением 1 км, а именно каналы 31 и 32 съемки в ночное время суток (продукт MOD11). По эталонному периоду вычисляются фоновые значения температур, средние квадратические отклонения в точках. Определяется и среднее значение температуры поверхности рассматриваемой территории (полигона исследований). Результат сравнивается с интересующим нас временным периодом. Для аномальных пикселей вычисляется их количество для каждого дня и среднее значение их температур. Следует отметить, что для оптимизации вычислений (время и используемая оперативная память) вся исследуемая область разбивается на несколько более мелких подобластей, с шагом в один градус по широте и долготе. Количество точек в такой подобласти около 9500, что позволяет достаточно быстро получать и обрабатывать температурные данные. По окончании всех вычислений результаты по всем подобластям объединяются и анализируются.



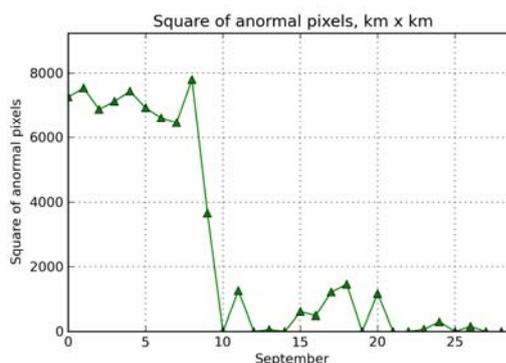
**Рис. 1. Исследуемая территория (синим кружком отмечен эпицентр землетрясения)**



**Рис. 2. Средняя температура исследуемой территории и средняя температура аномальных пикселей (сентябрь 2003 г.)**



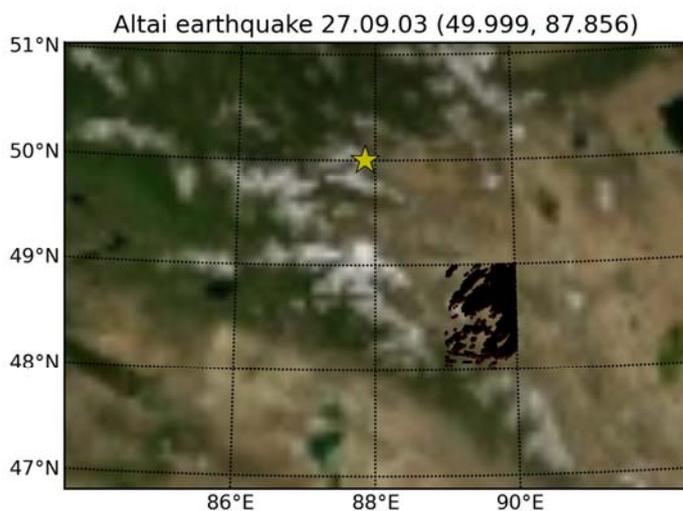
**Рис. 3. Количество аномальных пикселей (сентябрь 2003 г.)**



**Рис. 4. Площадь аномальных пикселей (сентябрь 2003 г.)**

В качестве примера приведены результаты, полученные для полигона с координатами в узлах  $(48^\circ, 89^\circ)$ ,  $(49^\circ, 89^\circ)$ ,  $(49^\circ, 90^\circ)$ ,  $(48^\circ, 90^\circ)$ . На рис. 2 представлены графики средней температуры по территории и аномальных пикселей за сентябрь 2003 г. Рисунки 3 и 4 показывают количество аномальных пикселей в течение месяца по полигону и площадь этих пикселей.

На рис. 5 изображена определенная тепловая аномалия 10 сентября 2003 г.



**Рис. 5. Выделенная тепловая аномалия (10 сентября 2003 г.). Звездочкой желтого цвета отмечен эпицентр землетрясения**

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности предлагаемого алгоритма определения временных тепловых аномалий на основе серий данных MODIS и перспективности его дальнейшего развития и использования.

### Список литературы

1. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67-69.
2. Сальман А.Г., Тронин А.А. Космическая тепловая съемка – новый метод дистанционного изучения сейсмоактивных регионов // Советская геология. 1989. № 10. С. 90-93.
3. Сальман А.Г., Тронин А.А. Вариации потока уходящего инфракрасного излучения Земли в сейсмоактивных районах Средней Азии // Известия АН СССР. Физика Земли. 1990. № 7. С. 67-69.

4. Тронин А.А. Возможность применения космической тепловой съемки для исследования землетрясений // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 86–96.
5. Тронин А.А. Спутниковые методы изучения землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 335–343.
6. Ouzounov D., Bryant N., Logan T., Pulinets S., Taylor P. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999–2003 // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. 31. Pp. 154–163.
7. Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to along earthquakes analysed by remote sensing data // Advances in Space Research. 2004. V. 33. P. 268–273.
8. Pulinets S.A., Ouzounov D., Ciralo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajecka, Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Kotsarenko A. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 // Ann. Geophys.. 2006. 24. Pp. 835–849.
9. Saradjian M.R., Akhoondzadeh M. Thermal anomalies detection before strong earthquakes ( $M > 6.0$ ) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods // Nat. Hazards Earth Syst. Sci.. 2011. 11. Pp. 1099–1108
10. Saraf A.K., Rawat V., Banerjee P., Choudhury S., Panda S.K. Satellite detection of earthquake thermal infrared precursors in Iran // Nat. Hazards. 2008. V. 47. P. 119–135.
11. Tronin A.A., Biagi P.F., Molchanov O.A., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V. 29. P. 501–506
12. Tronin A.A., Hayakawa M., Molchanov O.A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China // Journal of Geodynamics. 2002. V. 33. P. 519–534
13. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Доклады академии наук. 2005. Т. 405. № 6. С. 804–809.
14. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Трехмерная геомеханическая модель литосферы района подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 25–28.
15. Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В. Элементы структуры и фазы расвития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 29–36.
16. Тронин А.А. Возможность применения космической тепловой съемки для исследования землетрясений // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 86–96.

УДК 551.324 + 551.326 (268.45)

## **ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЙСБЕРГОВ ВБЛИЗИ ВЫВОДНЫХ ЛЕДНИКОВ НОВОЙ ЗЕМЛИ**

С. В. Михальцева

ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт»

e-mail: [mih\\_svetic@mail.ru](mailto:mih_svetic@mail.ru)

В данной статье рассматривается процесс движения айсбергов вблизи продуцирующих их ледников восточного побережья Новой Земли. На основании использования спутниковых снимков Aqua и Terra/MODIS и Landsat/ETM и TM+, совместно с натурными данными, полученными с автономных буев, установленных на дрейфующих айсбергах, сделан вывод о влиянии стока ледников на первичное распространение айсбергов.

*Ключевые слова: ледник, айсберг, Новая Земля, ледниковый сток, скорость движения айсберга, спутник, оптический диапазон, поле температуры поверхности.*

## **Введение**

Наша планета обладает огромным запасом нефти и газа, значительная часть которых находится на шельфах арктических морей Российской Федерации. По некоторым оценкам его суммарное количество достигает 318 млрд. барр. нефтяного эквивалента. Однако, в связи с суровыми климатическими условиями за пределами северного полярного круга, разведка месторождений и добыча углеводородов представляет сложную задачу. Основными неблагоприятными факторами являются низкие температуры воздуха, скорость течения и ветра, добыча на глубине также создает несколько проблем: глубина места, донный грунт, удаленность от берега. Существуют также ряд факторов, которые можно отнести к опасным – это в первую очередь намерзание льда на платформу, а также столкновение с опасными ледовыми образованиями, такими как стамухи, ледяные острова и, конечно, айсберги.

Айсберги несут опасность не только нефтедобывающей установке, но и самим судам, которые обслуживают платформу, поэтому в местах добычи углеводородов необходим постоянный мониторинг за ледовой обстановкой на акватории. Наиболее результативными методами мониторинга являются авиационная разведка и спутниковые наблюдения. Перемещение айсбергов по акватории до сих пор оставляет вопросы. В данной статье мы рассмотрим влияние одного из факторов – влияние стока ледников.

## **Основная часть**

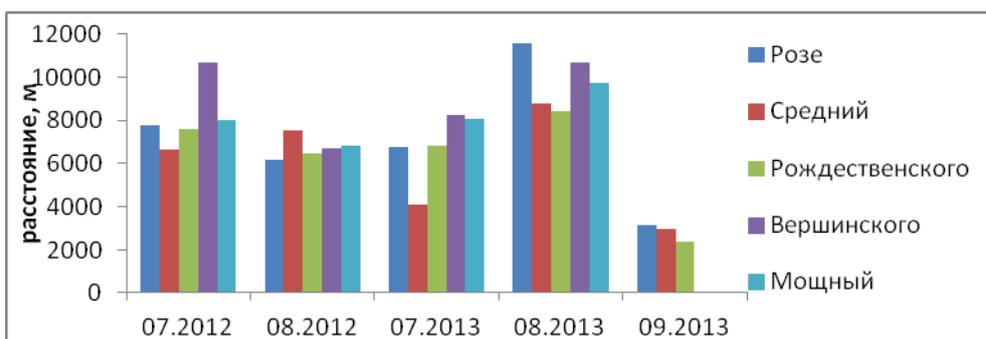
Определены основные процессы, вызывающие или оказывающие влияние на дрейф айсбергов – это поверхностные течения, топография морского дна, ветер [1] или поле атмосферного давления [2], а также волновой эффект [3]. Отколовшиеся от ледника айсберги начинают свое движение по водной акватории моря, подчиняясь в той или иной степени перечисленным факторам.

Как известно, на территории Арктического бассейна располагаются мощные ледники, продуцирующие айсберги, например, на островах Шпицберген, Новая Земля и Северная Земля, и именно ледники являются источником начального движения. Все ледники, благодаря текучести льда, способны двигаться от центральной части ледникового щита в сторону моря, иногда со скоростью (в Арктике) до 20–25 м/сутки и более. Чем больше скорости движения ледника, тем больше айсберговый сток. Наибольший сток в Арктике наблюдается в июле и августе [4] во время повышений температуры воздуха, которое в свою очередь ведет к таянию снега и льда. Вместе с талой водой в море попадают малые частицы грунта, которые отделились под действием движения ледника по земной поверхности.

Распространение талых вод идет от ледника в сторону открытого моря. Оптический диапазон позволяет увидеть сток воды, обогащенный примесью осадочных пород. Проанализировав все доступные изображения восточного побережья Новой Земли за летний период 2012 по 2013, можно сделать вывод о том, что максимальный вынос приходится на месяцы: июль и август, когда температура воздуха положительная и начинается таяние снежного покрова, а также льда. Распространение вод напрямую зависит от метеорологической обстановки в районе, так при сильных отжимных ветрах расстояние, на которое простираются талые воды, достигает 11 км от берега. В случае северных и восточных ветров талые воды направлены вдоль береговой черты.

Наиболее мощные выносы зафиксированы с ледников Розе, Мощный и Вершинского. На рис. 1 представлена гистограмма осредненных значений по

расстоянию распределения талых вод с основных ледников северо-восточного побережья Новой Земли, полученных по спутниковым снимкам Aqua и Terra/MODIS.



**Рис. 1. Осредненные данные по распространению талых вод**

С помощью программного комплекса ENVI удалось получить карты распределения температуры поверхности моря (ТПМ), восстановленной из данных сенсоров ТМ и ЕТМ+ спутника Landsat. Перевод данных производился по следующим формулам (1) и (2) [5]:

- для датчика ЕТМ+

$$1282.71 / \text{alog}(((666.09 * 0.95) / B61) + 1) - 273.15 ; \quad (1)$$

- для датчика ТМ

$$1260.56 / \text{alog}(((607.76 * 0.95) / B6) + 1) - 273.15 ; \quad (2)$$

B61 – данные инфракрасного канала Landat/ЕТМ+;

B6 – данные инфракрасного канала Landat/ТМ.

Талые воды, за счет более низкой температуры, хорошо идентифицируются на обработанных изображениях прибора Landsat/ТМ и ЕТМ+. Пример такого изображения представлен на рис. 2. Максимальный вынос на данном снимке принадлежит леднику Вершинского, а контуры линзы пресных вод, выделяемые на поле поверхностной температуры, соответствуют контурам, обозначенным на снимках Aqua и Terra/Modis за ту же дату.

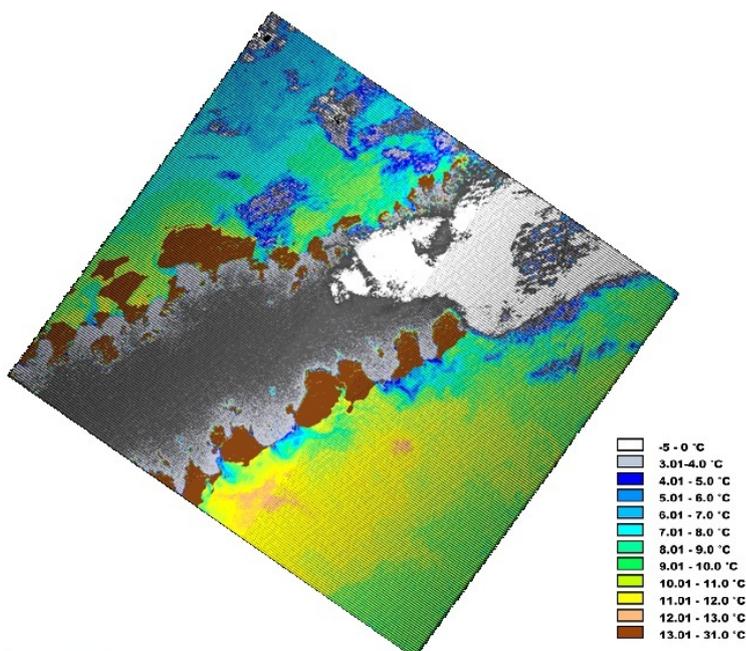
Направление распределения линзы пресных вод имеет большое значение в формировании траектории движения отколовшегося айсберга. Так как основное Новоземельское течение направлено вдоль берега, то мощные течения, сформированные выносом талых вод, позволяют айсбергам отклоняться от вдольбереговой траектории и следовать в центральную часть Карского моря. К тому же, более низкая температура создает условия для замедления разрушения айсбергов, продлевая время существования последнего.

Натурные данные, полученные в экспедиции ААНИИ 2013 путем установки буев на дрейфующие айсберги, помогли проследить направление и скорость движения айсбергов. В связи с достаточно быстрым процессом разрушения айсбергов, максимальная длительность получения сигнала достигала 4 суток.

Характер движения айсбергов при нахождении в прибрежной зоне условно можно разделить на 2 типа поведения:

а) хаотичное движение, точки местоположений сосредоточены в некоторой области, которая может иметь круглую форму либо более продолговатую;

б) направленное движение, диапазон разброса точек небольшой, среднеквадратическое отклонение не превышает 400 м.



**Рис. 2. Снимок Landsat/ETM+ за 2 августа 2013 г., восстановленные поля температуры поверхности Карского моря**

На основании совместного анализа данных, поступивших с автономных буев, и снимков Aqua и Terra/MODIS в видимом диапазоне за те же даты, можно констатировать следующее: при попадании айсберга в зону периодического течения, образованного выносом талых вод с ледника, его скорость увеличивается, а направление движения приобретает уверенную тенденцию. Действие таких течений может распространяться на достаточной удаленности от берега, например, зафиксировано движение айсберга, движущегося в северо-восточном направлении на расстоянии в 14 км. Снимок MODIS подтверждает, что в тот день вынос талых вод от ледника был направлен в соответствующую сторону.

Скорости айсбергов, попавших под влияние таких стоковых течений, зависят от силы и интенсивности последних. Таким образом, максимальные скорости айсбергов, отмеченные за период наблюдения, достигают 0,3–0,4 м/с, средняя скорость колеблется в пределах от 0,15 м/с до 0,22 м/с. При выходе айсбергов из области талых вод их скорость падает, а направление движения принимает более хаотичный характер. На рис. 3 можно проследить описанные выше тенденции движения айсберга.



**Рис. 3. Траектория движения айсберга за 3–6 августа, около ледника Вершинского**

Таким образом, в данной работе была обоснована зависимость скорости движения и направления айсберга от стоковых течений с ледников, которые продуцируют эти айсберги. При условиях сильного выноса с ледников, айсберги, попавшие под воздействие данной силы, могут выноситься на расстояние около 14 км в центральную

часть Карского моря, а также перемещаться как в северном, так и в южном направлении в зависимости от направления стока. Максимальный вынос стоковой струи наблюдался у ледников Розе, Мощный и Вершинского, средняя длина достигала 8 км. Учет зависимости параметров движения айсбергов от течения ледниковых талых вод может значительно увеличить точность прогнозирования их дрейфа в прибрежной зоне.

#### **Список литературы**

1. Аксенов Е.О., Позднышев С.П. Моделирование ветрового дрейфа айсбергов / Айсберги Мирового океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1996.
2. Зубакин Г.К., Иванов Н.Е., А Нестеров.В. Оценки изменчивости скорости дрейфа айсбергов и градиента атмосферного давления в северо-западной части Баренцева моря / Проблемы Арктики и Антарктики. 2013.
3. A stochastic model of iceberg drift including wave effect / Marc Pavac, Edmond Coche. 2014.
4. Воеводин В.А. О механизме откола льда от ледников и образования айсбергов // Айсберги Мирового океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1996.
5. Программный комплекс ENVI: учеб. пособие.

**УДК 004.4:528.9**

## **ПРОГРАММНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

А. А. Кадочников

Институт вычислительного моделирования СО РАН

E-mail: [scorant@icm.krasn.ru](mailto:scorant@icm.krasn.ru)

В работе рассматривается задача формирования геоинформационного Интернет-приложения мониторинга состояния окружающей среды и ресурсов для системы поддержки принятия решений на уровне Красноярского края. В работе востребованы методики и программные средства, которые позволят формировать оценки состояния территорий на базе основных показателей в наглядном виде.

*Ключевые слова: ГИС, система мониторинга, образование, геоинформационный Интернет-сервер, веб-картография, пространственные данные.*

Протяжённая территория Красноярского края, климатическое, ландшафтное природно-ресурсное разнообразие диктуют необходимость использования пространственных методов и средств анализа в задачах мониторинга качества природной среды и использования ее ресурсов. Мониторинг состояния окружающей природной среды в зоне действия различных промышленных предприятий позволяет сократить расходы на ликвидацию последствий техногенных аварий, что в свою очередь снижает вероятность загрязнения почвы, поверхностных вод, гибели растительности и представителей животного мира. Уровень развития современных геоинформационных технологий позволяет использовать их и как место для хранения, обработки и презентации тематических данных мониторинга, и как инструмент анализа качества природной среды.

Рассматривается задача создания информационно-аналитических систем для экологического мониторинга состояния природной среды и ресурсов, построенной на основе технологий ГИС, Интернет, обработки данных дистанционного зондирования и

данных со станций наблюдения. Значительное внимание уделяется веб-сервисам и программным интерфейсам. В работе важную роль играет использование современных средств визуализации данных с использованием ГИС-технологий. В таких задачах использование Интернет-технологий имеет ряд преимуществ по сравнению с настольными ГИС – доступность предлагаемых решений большому числу пользователей, упрощение процесса установки и распространения программного обеспечения, снижение его стоимости, возможность интеграции со сторонними приложениями и проч.

В рамках исследования уделено внимание проблеме, возникающей при разработке совместных проектов различных научных институтов, университетов и подразделений органов власти, связанной с обменом данными и метаданными о пространственной информации, а также данными наблюдений за окружающей средой. Возникла задача разработки распределенного хранилища пространственной информации для более эффективного взаимодействия различных организаций. Разработаны программные средства для анализа пространственных данных в среде геопортала Института вычислительного моделирования СО РАН с использованием технологий, предлагаемых международным консорциумом Open Geospatial Consortium и программного обеспечения MapServer, MapGuide Open Source и GeoWebCache. Программные инструменты содержат средства для хранения цифровых картографических материалов, растровых снимков территории, сервисы для навигации по распределенному каталогу пространственных данных, сервисы для пространственного анализа и математического моделирования на цифровых картах. Основным элементом геопортала является каталог метаданных о пространственных данных, который содержит информацию по доступным слоям, картам и другим ресурсам. Основной особенностью каталога пространственных данных является возможность использования различных форматов пространственных данных и организация доступа для пользователя к этим данным с помощью современных стандартов и технологий. Для оформления карт и картографических слоев применяется Styled Layer Descriptor – язык описания стилей, используемый для отображения объектов на карте в WMS, WFS и WCS серверах, а также собственный формат описания стилей, разработанный для геопортала ИВМ СО РАН [1].

В работе важную роль играет система сбора оперативных данных наблюдения от различных веб-сервисов, станций наблюдения и датчиков. В рамках геопортала ИВМ СО РАН был разработан блок для сбора, обработки и представления данных различных наблюдений. Организация доступа к данным наблюдений осуществляется стандартными средствами геопортала, включающего просмотр табличных данных, экспорт, просмотр данных на картах с возможностью выбора временных интервалов и доступ с помощью общепринятых стандартов. Организован доступ к собранным данным оперативного мониторинга с помощью стандарта SOS (Sensor Observation Service), разрабатываемого консорциумом OGC.

При разработке картографического компонента веб-интерфейса были проанализированы два способа представления картографической информации для пользователя. Первый способ – карта отображается с использованием фрагментов. Эту технологию используют такие ресурсы как Google Maps (<http://maps.google.com>), Яндекс Карты (<http://maps.yandex.ru>), Карты Bing (<http://www.bing.com/maps/>) и др. Основным преимуществом такого способа является скорость получения визуальной информации пользователем и малая нагрузка на сервер при отображении статической информации. Однако при отображении меняющихся тематических данных, необходимых для информационно-аналитических систем, такой способ снижает скорость доступа пользователя к пространственным данным и увеличивает нагрузку на

сервер. Для решения этой проблемы используется второй способ отображения информации – по запросу пользователя генерируется одно растровое изображение, либо формируется слой с векторными объектами. В зависимости от типа представляемой информации пользователю в программном интерфейсе системы используется комбинация этих двух способов.

Разработка клиентской части веб-приложения выполнялась с использованием JavaScript библиотеки OpenLayers и авторских модулей. При разработке серверной части используется программное обеспечение MapServer. Для создания карты из фрагментов использовалось программное обеспечение GeoWebCache. GeoWebCache использует спецификацию WMS Tile Caching (WMS-C), которая явилась результатом конференции FOSS4G в 2006 г [2]. Сервисы WMS (Web Map Service) разрабатывались с учетом большой гибкости и богатого функционала [3]. Но это оборачивается высокими требованиями к вычислительной мощности сервера. Серверы WMS-C по протоколам совместимы с OGC WMS (OpenGIS consortium), поэтому их можно встроить между клиентом и сервером WMS, что позволяет существенно увеличить скорость реакции и разгрузить сервер. Рассмотрены альтернативные решения для создания каталога фрагментов (тайлов).

Источником пространственных данных для сервера с программным обеспечением GeoWebCache послужил WMS сервер с картой Красноярского края на основе программного обеспечения MapServer. Реализована система сервисов, которые поддерживают кэш растровых изображений на сервере с GeoWebCache в актуальном состоянии при обновлении исходных данных на WMS сервере.

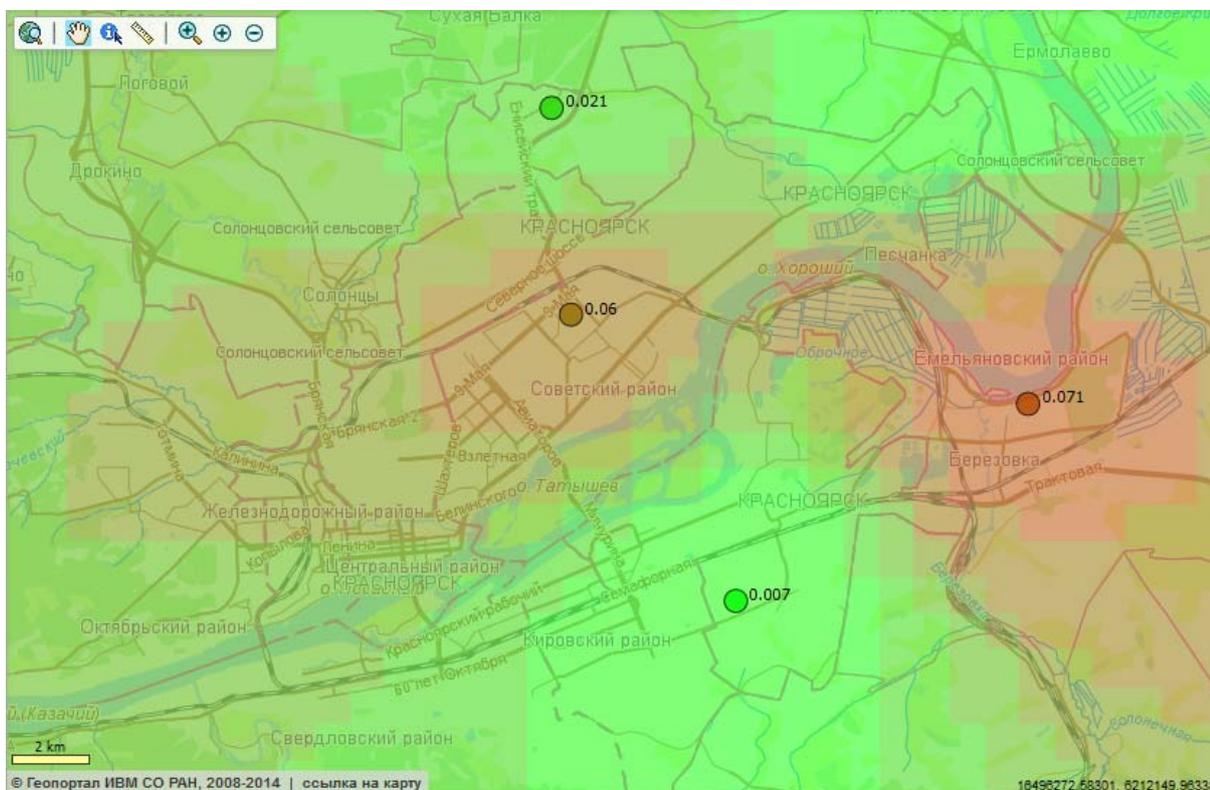
В результате объединения различных технологий представления карты пользователю на стороне клиента реализован вариант, в котором карта состоит из двух слоев: подложка и тематический слой.

При отображении тематического слоя могут использоваться данные различных наблюдений, полученные от сервиса «Sensor collector API», разработанного сотрудниками ИВМ СО РАН. Для наполнения базы данных наблюдений этого сервиса был подготовлен модуль сбора данных, который включает в себя набор различных «адаптеров» или «драйверов» для различных источников информации. Эти данные периодически загружаются с внешнего источника, который может быть представлен в виде потока информации в форматах txt, csv, json, xml, html и др. Разработанное программное обеспечение извлекает из полученных данных необходимую информацию и загружает с помощью API сервиса на сервер. В дальнейшем эти данные могут быть использованы различными способами. Доступ к данным может быть организован в виде SOS сервисов. Результаты наблюдений могут быть представлены в виде веб-приложений для дальнейшей визуализации и анализа. Данные могут быть переданы для дальнейшей обработки, результат которой в свою очередь также может быть представлен пользователю с помощью картографических веб-сервисов. Такие данные могут обрабатываться моментально и на протяжении некоторого продолжительного временного промежутка. В первом случае результат пользователь видит сразу после запроса, во втором пользователь ожидает результат обработки данных и в дальнейшем может эти данные получить в виде потока новых данных. Необходимо отметить, что большие объемы данных при таком подходе могут обрабатываться с помощью вычислительных кластеров. Источником для модуля сбора данных могут служить: данные других SOS сервисов; данные различных систем мониторинга; данные станций мониторинга с различными сенсорами; различные архивы наблюдения.

Данные наблюдений могут быть представлены в растровом и векторном формате в зависимости от их объема и структуры. Наиболее универсальным способом является представление в виде тайловых хранилищ. В качестве расширения созданной

технологии для работы каталога тайловых хранилищ была создана библиотека, позволяющая управлять не только процессами обновления тайлового кэша, но и набором тайловых карт и их настройкой. Такая библиотека позволила создать инструмент на базе геопортала ИВМ СО РАН, расширяющий возможности отображения картографической информации. А именно, для карт, содержащих большое число слоев и объектов скорость создания растрового изображения «на лету» низкая и пользователю приходилось ждать, пока сформируется изображение выделенного фрагмента и затем будет загружено в виде картинки в его веб-приложение. Просмотр карты в тайловом формате позволяет значительно ускорить процесс отображения карты на стороне клиента и одновременно с этим понизить нагрузку на сервер геопортала.

Данные наблюдения накладываются поверх слоя подложки в виде полупрозрачного растрового изображения или в виде векторных объектов. Пример карты представлен на рисунке. Эта часть карты отображает всю тематическую информацию, либо ее срез в зависимости от настроек пользователя [4]. Пользователь также может определить типы объектов, которые будут отображаться на карте и т.д.



**Рисунок. Пример тематического слоя с данными наблюдения**

Сегодня в результате развития технологий и программного обеспечения получены новые результаты, которые позволили значительно усовершенствовать существующую программно-технологическую платформу геопортала ИВМ СО РАН для разработки систем мониторинга окружающей природной среды. Программно-технологическая платформа для организации распределенного доступа к электронной карте Красноярского края позволит усовершенствовать процессы разработки систем мониторинга для Красноярского края, повысит качество предоставляемых услуг для населения края и качество принимаемых управленческих решений. Рассмотренное решение может быть использовано не только для территории Красноярского края, а ресурсы и инструменты разработанной программно-технологической платформы могут

быть использованы при разработке других систем. Предложенная технологическая основа и карта Красноярского края уже активно используется в различных проектах, работающих в крае.

### Список литературы

1. Кадочников А.А. Организация доступа к электронной карте Красноярского края для информационно-аналитических систем с помощью веб-сервисов // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС-18». Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт» / Редкол.: С.П. Евдокимов (отв. ред.) [и др.]. Смоленск, 26–28 июня, 2012 г. Смоленск, 2012. 532 с. С. 136–140.
2. OpenGIS Web Map Service (WMS) Implementation Specification. / Open GIS consortium. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/wms> (дата обращения: 21.04.2014).
3. Tile Map Service Specification. / The Open Source Geospatial Foundation. URL: [http://wiki.osgeo.org/wiki/Tile\\_Map\\_Service\\_Specification](http://wiki.osgeo.org/wiki/Tile_Map_Service_Specification) (дата обращения: 21.04.2014).
4. Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Попов В.Г., Токарев А.В.. Модель геоинформационной аналитической Интернет-системы для анализа состояния и презентации региона // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 61–66.

УДК 630.43

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ БАЛГАЗЫНСКОГО БОРА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT

Х. Б. Куулар

ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН»  
e-mail: [kuular\\_kb@mail.ru](mailto:kuular_kb@mail.ru)

В статье рассматриваются современное состояние Балгазынского соснового бора, находящегося на юге Республики Тыва. Пожары стали основной причиной уничтожения почти половины реликтового соснового бора. Анализируются динамика пожаров на основе данных Landsat MSS/TM/ETM+/OLI с 1974 по 2013 гг. На основе анализа результатов дешифровки снимков выявлена пространственная и временная динамика гарей соснового бора.

*Ключевые слова:* изменение климата, гарь, трансформация растительности, вегетационные индексы.

Балгазынский сосновый бор – реликтовый островной сосновый лес расположен в южной части Республики Тыва. Возраст бора составляет 2500 лет [1].

В последние годы всестороннее изучение бора ведётся учёными г. Красноярска. Исследования ведутся по следующим направлениям: естественное восстановление бора [2], палеоботаническое исследование [1], цитогенетические особенности сосны [3], почвы [4], пожаров [5] и др. Сложившийся к настоящему времени генотипический состав насаждений сосны обыкновенной в Центральной Туве является отражением длительной истории развития вида на фоне орографических, климатических и других изменений в этом регионе [6–9]. Балгазынский бор испытывает влияние возрастающей аридизации и континентальности климата, а также рост антропогенных факторов, что находит отражение в изменении фитоценотического и генотипического состава его насаждений [10]. В последние десятилетия характерной особенностью, свойственной Балгазынскому сосновому бору является высокая горимость. Статистический анализ показал, что за последние 11 лет при высоких показателях частоты пожаров ( $9,5 \pm 1,8$ ) шт./100 тыс. га за пожароопасный сезон) до 30 % территории бора пройдено

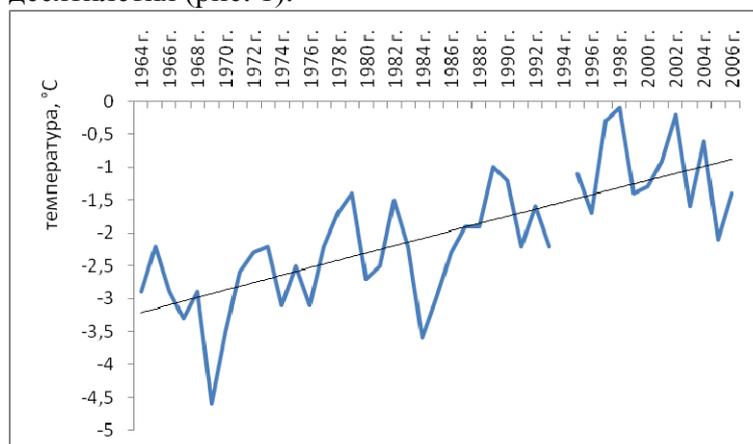
пожарами [5]. Для оценки и картографирования состояния соснового бора наиболее перспективно применение космических снимков Landsat разрешения 30 м.

Целью работы является оценка динамики соснового бора и с использованием космических снимков Landsat.

### Объект исследования

Балгазынский сосновый бор (*Pinus sylvestris* L.) расположен между 51°12'02" с.ш. 94°56'28" в.д., 51°03'39" с.ш. 95°11'26" в.д. Территория бора относится к Северо-Таннуольскому округу перистепных лиственничных и горно-таёжных лиственничных и кедровых лесов, Алтае-Тувинско-Хангайской котловинно-горной лесорастительной провинции горных степей и лиственничных лесов, Центрально-Азиатской котловинно-горной лесорастительной области [11]. Остепненный сосновый бор, закрепляющий слабо-задернованные пески и Центрально-Тувинской котловине, несет почвозащитную службу и по режиму хозяйства отнесен к лесам 1-й группы [12]. Преобладающими типами леса в сосновых насаждениях являются редкотравно-злаковый – 75 %, зеленомошно-разнотравный – 14,3 %, злаково-карагановый – 8,2 %. Относительно выровненные межувалистые пространства занимают сосновые ассоциации ирисово-караганово-злаковый и зеленомошно-злаковый групп типов леса. Сомкнутый (0,7) сосновый древостой имеет небольшую примесь лиственницы (9С1Л). Производительность его оценивается III–IV классом бонитета и деревья сосны в возрасте от 50–170 лет (наибольший возраст 250–280 лет) характеризуются диаметром 28–48 см и средней высотой 20 м. Под пологом древостоя подрост возрастом, взрослый и крупный подрост до 4 м. Подлесок представлен спиреей и шиповником средней густоты. Расположен бор на древних эоловых песках холмисто-увалистой возвышенности Сыргалыг-Тайга [13], абсолютная отметка высот достигает до 1480 м. н.у.м. По описанию Л.А. Марцинковского (1960) бор представляет собой компактный массив, от которого на юго-восток отходят три почти параллельные линии протяженностью 15 км и шириной до 4 км [2]. В Балгазынском боре сосредоточены наиболее приспособленные к недостатку влаги и высокому уровню инсоляции формы сосны обыкновенной (кустарниковидные, карликовые и полукарликовые) [9].

По данным метеостанции Сосновка среднегодовая температура составляет -2,5 °С (1961–1990 гг.), среднегодовое количество осадков 340 мм. Зима продолжительная и холодная: средняя температура января – 25,8 °С, годовая амплитуда температур составляет 48, сумма температур выше 10 °С – 1959 °С, сумма температур выше 5° – 2246 °С (по данным за 2011–2013 гг.). Лето умеренно тёплое: средняя температура июля +20,2 °С, большая часть осадков выпадает в июле-августе. Продолжительность вегетационного периода составляет 168 дней (по данным 2011–2013 гг.). Рост температуры приземного слоя воздуха, наиболее существенный в последние десятилетия (рис. 1).



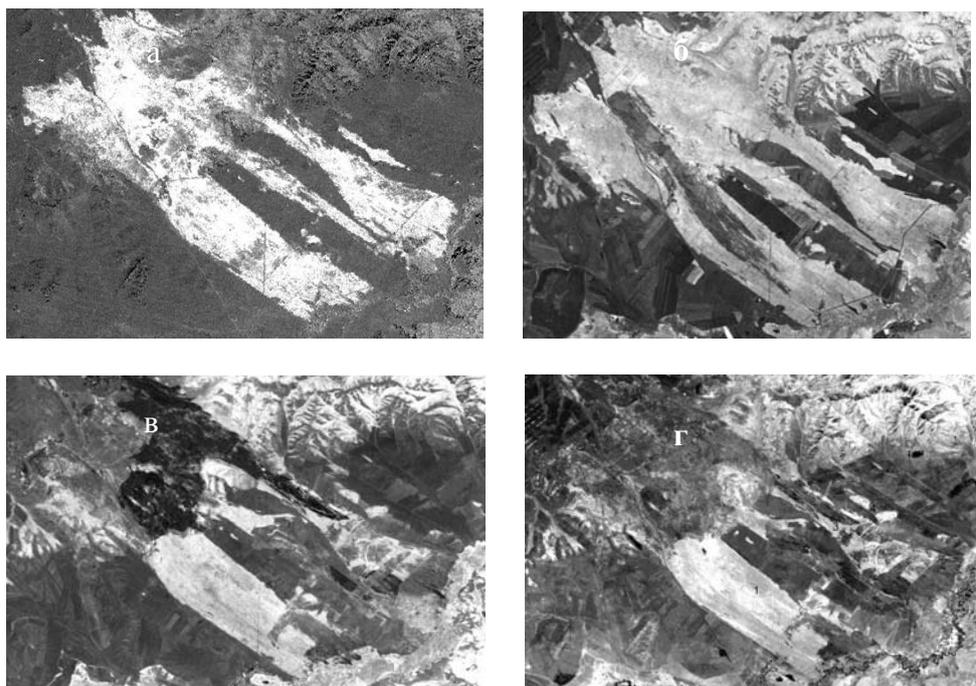
**Рис. 1. Тренд годовой температуры в период 1964–2006 гг. (по данным метеостанции Сосновка)**

## Материал и методы

Преимущества дистанционных методов исследования – это высокое интегрирование информации во времени и пространстве, доступность для анализа пространственной информации, возможность отслеживания множества параметрами природной среды.

Для оценки динамики соснового бора были использованы снимки Landsat, имеющие наименьшее количество шумов ((Landsat-4 MMS 27.02.1974, Landsat-5 TM, 19.08.1988, Landsat-7 ETM+ 08.09.2007, Landsat-8 OLI, 17.04.2013)). Съёмка Landsat-4 велась в 4 спектральных диапазонах с пространственным разрешением 30 м. Съёмка Landsat-5 – в 7 спектральных диапазонах с пространственным разрешением 30 м. Landsat-7 – в 7 спектральных диапазонах с пространственным разрешением 30 м, и с разрешением 15 м в панхроматическом канале. Landsat-8 – в 9 спектральных диапазонах с пространственным разрешением 30 м, в панхроматическом канале с разрешением 15 м, еще в 2 тепловых каналах – 100 м.

Для выделения исследуемого объекта в определённых информативных каналах создаются вегетационные индексы на основе комбинации значений яркости. На основании расчёта по этим значениям спектральных индексов строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что позволяет выделить исследуемый объект и оценить его состояние. При оценке повреждения растительного покрова и площади гарей были использован спектральный вегетационный индекс NDVI.



**Рис. 2. NDVI Балгазынского соснового бора за даты 18.02.1974 (а), 19.08.1988 (б), 08.09.2007 (в); 17.04.2013 (г)**

Выявления изменений на двух и более разновременных изображениях является определением и мониторингом за изменениями спектральных характеристик исследуемого участка за период съёмки первого и последнего изображения. Для мониторинга соснового бора были отобраны космические снимки разрешения 30 м Landsat ETM+/ OLI за даты 18.02.1974, 19.08.1988, 08.09.2007, 17.04.2013 гг. Обработка снимков проведена в специализированном программном пакете ERDAS 9.2.

Нормализованный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), который вычисляется по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* – отражение в красной области спектра [14].

Данный индекс предоставляет количественные оценки растительного покрова, полученных на основе комбинирования видимого красного и ближнего инфракрасного спектральных каналов Landsat.

Главная особенность индекса NDVI заключается в том, что позволяет выявить проблемные зоны угнетённой растительности. Для этого нами проведён расчёт нормализованного вегетационного индекса NDVI четырёх изображений за даты съёмки 18.02.1974, 19.08.1988, 08.09.2007 и 17.04.2013.

### **Результаты и обсуждение**

Применение дистанционных методов позволяет создать полную картину состояния соснового бора с 1974 по 2013. Совместное использование спектральных вегетационных индексов NDVI, NBR дают возможность получения многолетней динамики исследуемого соснового бора.

Процесс динамики бора успешно прослеживается на космических снимках, сделанных с интервалом в несколько лет. На снимке за 18.02.1974 видно, что на боре имеются гари (чёрным пятнам соответствуют участки после пожара). Средняя длина 1 ленты бора была 22 км 267 м, 2 ленты – 22698 км 69 м, 3 ленты – 25597 км 44 м, 4 ленты – 5030 км 43 м. Площадь бора составляла 21388,53 га (без учета полей между лентами). На снимке за 19.08.1988 площадь гарей составляет 3129,215 га; на снимке за 17.04.2007 – 14181,26 га. На снимке за 17.04.2013 площадь живых сосен составляет 13835 га. Площадь соснового бора сократилась в 1,5 раза.

Получена динамика Балгазынского соснового бора, которая свидетельствует о крайне угнетённом состоянии реликтового бора с началом потепления климата и учащении частоты засух. В период наибольшего потепления 1975–2006 гг. средняя температура в пожароопасный период (весной и осенью) повысилась в регионе, и климат стал еще тёплым и сухим (климатические изменения). Особо ущербными оказались последствия пожаров в засушливые годы 1989 и 1996 гг., когда пожарами уничтожен сосновый бор. По снимкам выявлено зарастание площади гарей на площади 74 га.

### **Заключение**

Анализ динамики динамику пожаров реликтового Балгазынского бора за исследуемый период (1974–2013 гг.) позволяет сделать следующий вывод. В связи с изменениями климата произошло увеличение активных температур и увеличилась продолжительность пожароопасного периода. В исследуемые годы были крайне сложные пожарные обстановки, когда совместное воздействие: из-за засухи, уменьшения возможностей органов пожарной охраны, неправильного лесопользования, изменения социально-экономических условий привело к большим возгораниям на территории реликтового Балгазынского соснового бора. Динамика Балгазынского бора представляет собой результат двух составляющих: аридизации и антропогенного воздействия.

### **Список литературы**

1. Кошкаров А.Д., Фабер С.К., Кошарова В.Л., Буренина Т.А. Мурзакматов Р.Т., Мурзакматова А.Р. История развития Балгазынского бора (Республики Тыва) как

пример мониторинга эколого-фитоценотической биоиндикации состояния лесов // Биоразнообразие Алтае-Саянского экорегиона: изучение и сохранение в системе ООПТ: материалы межрег. науч.-пр. конф., Кызыл, 27–1 июля 2013 г. Кызыл: ООО “ТываПолиграф”, 2013. С. 61–67.

2. Мурзакматов Р.Т., Буренина Т.А. Анализ естественного возобновления сосновых реликтовых лесов (Балгазына и Шагонара) в Туве // Биоразнообразие Алтае-Саянского экорегиона: изучение и сохранение в системе ООПТ: материалы межрег. науч.-пр. конф., Кызыл, 27–1 июля 2013 г. Кызыл: ООО “ТываПолиграф”, 2013. С. 75–87.

3. Тихонова И.В. Изменчивость годичных колец у разных половых типов деревьев сосны обыкновенной на юге Средней Сибири // Лесоведение. 2007. N 3. С. 40–45.

4. Сизина А.Ф. О пирогенном воздействии на почвы Балгазынского бора Республики Тыва // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. по материалам всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 20–21 окт. 2011. Красноярск: СибГТУ, 2011. Т.1. С. 20–23.

5. Буряк Л.В., Сухинин А.И., Каленская О.П., Пономарев Е.И. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // Сибирский экологический журнал. 2011. Т.3. С. 331–339.

6. Тихонова И.В., Корец М.А., Мухортова Л.В. Карты почвенных ареалов лесобразующих видов хвойных как один из примеров использования ГИС-технологий в лесном хозяйстве Сибири // Лесное хозяйство. 2012. N 4. С. 27–28.

7. Тихонова И.В., Семериков В.Л., Шишикин А.С., Тараканов В.В. О необходимости особого режима хозяйствования и охраны в рефугиумных (реликтовых) популяциях видов хвойных в Сибири // Лесное хозяйство. 2011. N 3. С. 41–42.

8. Машкина О.С., Тихонова И.В., Муратова Е.Н., Мурая Л.С. Цитогенетические особенности семенного потомства карликовых сосен на юге Восточной Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. XXX, N 1–2. С. 127–135.

9. Сунцов А.В. Цитогенетика и эмбриология сосны обыкновенной в изолированных популяциях Центральной Тувы: автореф. дис... канд. биолог. наук. Красноярск, 1984.

10. Милютин Л.И., Новикова Т.Н., Тараканов В.В., Тихонова И.В. Сосна степных и лесостепных боров Сибири. Новосибирск: Изд-во Гео, 2013. 144 с.

11. Типы лесов гор Южной Сибири / под ред. В.Н. Смагин и др. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.

12. Смагин В.Н., Софронов Н.А., Ильинская С.А. К характеристике лесов и лесного хозяйства Тувы // В кн.: “Природные условия Тувинской автономной области”. М.: АН СССР, 1957. С. 191–239.

13. Куминова А.В., Седельников В.П., Маскаев Ю.М. и др. Растительный покров и естественные кормовые угодья Тувинской АССР. Новосибирск, 1985. 256 с.

14. Rouse J.W., Haas R.H., Shell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // In Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Vol. 1. Washington, 10–14 December 1973, Washington, DC. P. 309–317.

## АНАЛИЗ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА СЕРЫ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТА OMI (СПУТНИК AURA) ДЛЯ НОРИЛЬСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЫ ЗА 2004–2013 гг.

Д. В. Зуев, В. Б. Кашкин  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
e-mail: [dmvzuew@yandex.ru](mailto:dmvzuew@yandex.ru), [rtcvbk@rambler.ru](mailto:rtcvbk@rambler.ru)

Производится оценка выбросов диоксида серы в атмосферу на основе спутниковых методов контроля в районе Норильской промышленной зоны за 2004–2013 гг. Используется база данных NASA по измерениям прибора Ozone Monitoring Instrument (спутник AURA). Наибольшая доля выбросов приходится январь–май и ноябрь (90 %), а оставшаяся часть – на июнь–октябрь. Максимальный объем выбросов составил 95 кг/месяц в ноябре 2004 г. Произведена оценка долей вкладов в общую концентрацию SO<sub>2</sub> за 2004–2013 гг. по месяцам.

*Ключевые слова:* спутник AURA, диоксид серы, мониторинг, концентрация.

На долю работающего ГМК «Норильский никель» приходится 25 % российских промышленных выбросов SO<sub>2</sub> [1]. В 2009 году «Норильский никель» выбросил в атмосферу около 979 тыс. т серы. Наличие в атмосфере высоких концентраций SO<sub>2</sub> уже через несколько часов может вызвать серьезное повреждение листьев (локализованные разрушения ткани (некрозы), а у чувствительных растений хронические повреждения могут возникнуть уже при минимальной концентрации.

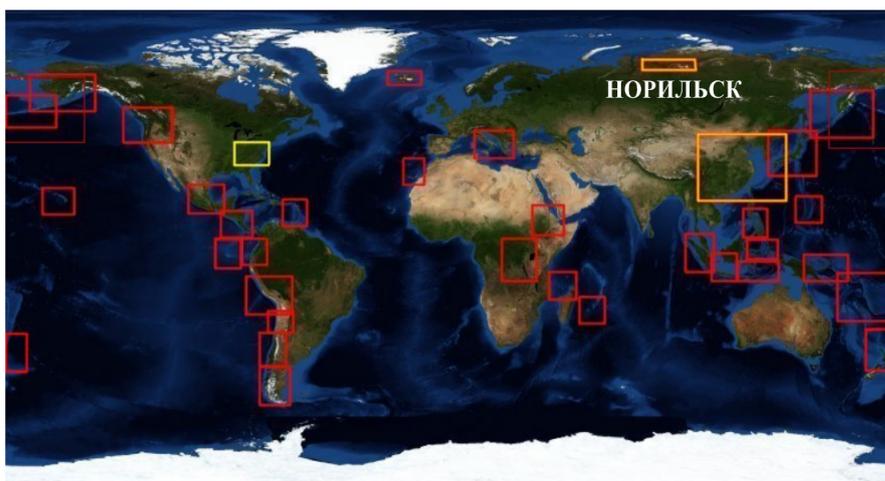
Превышение допустимых концентраций диоксида серы в воздухе, деградация почвы, вызванная ее закислением и присутствием в ней тяжелых металлов, приводят к повреждению лесных площадей вокруг предприятий ГМК «Норильский никель». Предприятия медно-никелевого производства в целом и ГМК «Норильский никель» в частности представляют собой источник техногенного загрязнения, что приводит к загрязнению атмосферы, поверхностных и подземных вод, к деградации почвы и, как следствие, к уничтожению растительного покрова.

В настоящее время, для решения задач мониторинга содержания и концентраций диоксида серы в атмосферном воздухе используются инструменты SCIAMACHY (на борту спутника ENVISAT) и OMI (на борту спутника AURA). Наиболее предпочтительными являются данные, получаемые инструментом OMI (Ozone Monitoring Instrument). Этот прибор в 2004 году сменил на околоземной орбите своего предшественника – TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer).

Современные космические технологии мониторинга позволяют обеспечить ежедневный глобальный охват всей атмосферы Земли. Космический аппарат AURA со спектрофотометром OMI (Ozone Monitoring Instrument) дает возможность оценивать выбросы диоксида серы от вулканов и эмиссии антропогенного происхождения, информация накапливается в базе данных OMI [3]. В данном случае инструмент OMI дает информацию об одном поллютанте и лишь один раз в сутки, наблюдается зависимость от погодных условий. Отсутствуют данные для декабря и первой половины января, во время полярной ночи, когда атмосфера над интересующим районом не освещается Солнцем.

На рис. 1 показаны районы постоянного контроля выбросов диоксида серы. Красными прямоугольниками отмечены районы наибольшей вулканической активности. Желтым прямоугольником отмечен район Восточного побережья США, где значителен объем выбросов SO<sub>2</sub>. Большим оранжевым прямоугольником отмечены

промышленные районы КНР. Малый оранжевый прямоугольник показывает на конкретный город – Норильск, точнее, на Норильскую промышленную зону.



**Рис. 1. Районы постоянного контроля выбросов диоксида серы инструментом ОМІ**

ОМІ регистрирует концентрацию диоксида серы на четырёх высотах над уровнем моря: 0,9 км, 2,5 км, 7,5 км и 17 км в единицах Добсона (е.Д. или DU). Фрагмент базы данных приведен в таблице, где SO<sub>2</sub>\_0,9 км – концентрация SO<sub>2</sub> на высоте 0,9 км в е.Д., SO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>\_2,5 км – концентрация SO<sub>2</sub> на высоте 2,5 км, SO<sub>2</sub>\_7,5 км – концентрация SO<sub>2</sub> на высоте 7,5 км, SO<sub>2</sub>\_17 км – концентрация диоксида серы на высоте 17 км. Одна е.Д. равна 0,01 мм толщины осажденного слоя диоксида серы при 0° С и атмосферном давлении 1013 ГПа, что составляет 2,69×10<sup>20</sup> молекул диоксида серы на квадратный метр. Типичное фоновое значение концентрации SO<sub>2</sub> в атмосфере составляет менее 1 е.Д. Погрешность оценки содержания диоксида серы прибором ОМІ равна ~ 1 е.Д.

ОМІ представляет собой направленный в надир спектрометр [2], предназначенный для регистрации солнечного излучения, отраженного и рассеянного атмосферой и поверхностью Земли в диапазоне от 270 до 500 нм со спектральным разрешением порядка 0,5 нм. Ширина съемки полосы поверхности при угле обзора камеры в 114° составляет около 2600 км. В нормальном режиме работы ОМІ (предназначенном для съемки в глобальных масштабах), размер пикселя (при съемке в направлении надир) составляет 13 км × 24 км вдоль и поперек полосы съемки соответственно. Пространственное разрешение можно улучшить, уменьшив размер пикселя до 13 км × 12 км.

**Таблица**

**Фрагмент базы данных ОМІ по выбросам диоксида серы**

Дата	Время начала года UTC, с	Широта, градусы	Долгота градусы	SO <sub>2</sub> _0,9 км, е.Д.	SO <sub>2</sub> _2,5км , е.Д.	SO <sub>2</sub> _7,5 км, е.Д.	SO <sub>2</sub> _17км, е.Д.
01.10.2004	10468	68,98	88,93	4,281	0,813	0,18	0,073
01.10.2004	10470	69,01	88,61	5,12	7,724	1,804	0,767
01.10.2004	10472	69,05	88,28	2,674	6,496	1,377	0,57
01.10.2004	10474	69,08	87,96	1,801	6,355	1,253	0,516
01.10.2004	10476	69,11	87,63	1,007	5,276	1,133	0,462

Прибор ОМІ измеряет поток рассеянного «назад» ультрафиолетового солнечного излучения. Для оценки содержания диоксида серы используется два спектральных канала, в одном из них наблюдается сильное поглощение, а во втором – слабое. Однако

в УФ диапазоне, кроме диоксида серы, поглотителем электромагнитного излучения является озон. Поэтому одновременно оценивается общее содержание озона. При оценке содержания  $SO_2$  в атмосфере решается обратная задача. Алгоритм основан на использовании вертикальных модельных профилей озона и диоксида серы. Путем варьирования модели минимизируется средний квадрат разности между измеренными и модельными параметрами [3].

#### Анализ выбросов диоксида серы за период с 2004 по 2013 гг.

В ходе исследований произведен анализ выбросов диоксида серы предприятиями ОАО «ГМК «Норильский Никель». Получены данные по массе выбросов  $SO_2$  за 2004–2013 года [4] по данным ОМІ с января по ноябрь для каждого года. Отсутствуют данные для декабря и первой половины января, во время полярной ночи. В периоды, когда погодные условия (густая облачность) не позволяли произвести оценку массы  $SO_2$ , были приняты значения, равные среднеарифметической массе выбросов в течение дня для текущего месяца (рис. 2).

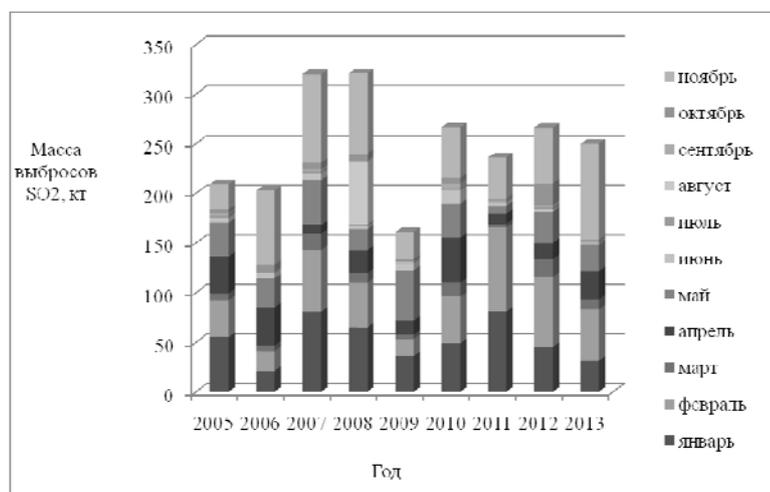


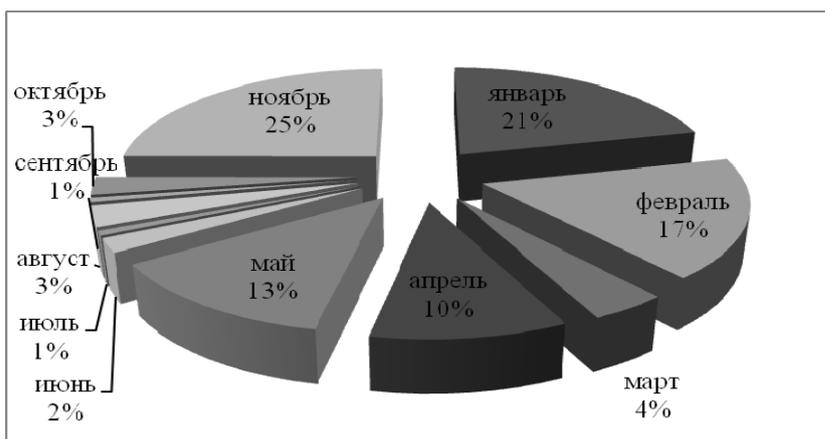
Рис. 2. Масса выбросов диоксида серы за 2005–2013 гг. по данным ОМІ

За весь период действия программы ОМІ наибольший объем выбросов был зафиксирован в 2008 году и составил 320,723 кт/год. Максимум выбросов  $SO_2$  традиционно характерен для периода январь – май, с пиком выбросов в ноябре 80,695 кт/месяц. Однако в 2008 году высокий уровень выбросов зафиксирован и в августе, он составил 60,015 кт/месяц. Минимальное значение массы  $SO_2$  выявлено в июле 1,271 кт/месяц. «Чистые» месяцы – июнь, июль, сентябрь, октябрь (масса выбросов не более 8 кт/месяц).

2009 год характеризуется наименьшим объемом выбросов – 160,908 кт/год. Пик эмиссии  $SO_2$  приходится на май и составляет 50,929 кт/месяц. Минимальные выбросы приходятся на июнь-октябрь (не более 7 кт/месяц). В 2010 году происходит резкое увеличение объемов производства меди и никеля до 484 кт, что приводит к такому же скачкообразному увеличению выбросов диоксида серы 266,32 кт/год. Наибольшая доля выбросов приходится январь-февраль, апрель-май, ноябрь. За этот период выбросы в атмосферу составили ~85 % от совокупного годового объема выбросов. Максимум наблюдается в ноябре – 51,087 кт/месяц. Минимум выбросов зафиксирован в августе – 0,458 кт/месяц.

Прослеживается корреляционная связь между объемами производства и уровнем эмиссии диоксида серы. По нашей оценке, на 1 тонну произведенного комбинатом металла (никель, медь) в атмосферу выбрасывается ~ 350–710 кг диоксида серы. Анализ показывает, что наибольший вклад в концентрацию диоксида серы за 2005–2013 гг. приходится на январь – май и ноябрь (рис. 3). Доли вклада в общую

концентрацию  $\text{SO}_2$  в этот период варьируются от 4% в марте до 21 % в январе и ноябре. С июня по октябрь наблюдается заметное снижение концентрации диоксида серы (совокупная доля составляет 10 % от общего объема выбросов). Это связано, по-видимому, с погодными условиями. Максимальные концентрации диоксида серы достигаются в безветренную ясную погоду, во время сильных ветров концентрации, как правило, не столь велики, но шлейф от выброса тянется на сотни километров, захватывая часть территории Северного Ледовитого океана и огромные пространства суши [5]. В периоды обильных снегопадов диоксид серы переносится на еще большие расстояния, особенно при сильных ветрах, поскольку  $\text{SO}_2$  связывается замороженными кристаллами воды (снегом) и долго находится в приземном слое атмосферы.



**Рис. 3. Помесячный вклад в суммарный объем выбросов за 2005–2013 гг.**

### **Заключение**

Максимальный объем выбросов был зафиксирован в 2007 и 2008 годах, и составлял ~ 320 кт/год. Минимальный объем выбросов был в 2009 году и соответствовал массе ~160 кт/год. Временной анализ выбросов  $\text{SO}_2$  показал, что наибольшая годовая доля выбросов приходится январь-май и ноябрь (90 %), а оставшиеся 10 % – на июнь-октябрь.

Сравнительный анализ данных получаемых от ОМІ и данных наземной системы мониторинга комбината показал, что, с качественной точки зрения, оба метода мониторинга дают схожую картину, данные различается от 30 до 65 %.

Спутниковый метод контроля должен стать неотъемлемой частью системы экологического мониторинга ОАО «ГМК «Норильский Никель». Данные, получаемые от инструмента ОМІ, позволяют объективно оценить экологическую ситуацию в г. Норильске. Космический метод контроля дает возможность определить выбросы  $\text{SO}_2$  на различных высотах за короткий промежуток времени и оценить направление дальнейшего перемещения выбросов.

### **Список литературы**

1. Отчет о корпоративной социальной ответственности ОАО ГМК «Норильский никель», 2009 г. ([http://www.nornik.ru/\\_upload/editor\\_files/files/le1381.pdf](http://www.nornik.ru/_upload/editor_files/files/le1381.pdf)).
2. Официальный сайт NASA по глобальному мониторингу диоксида серы. [Электронный ресурс]. URL:<http://SO2.umbc.edu/omi>
3. Krotkov N.A., Carn S.A., Krueger P.K., Yang K. Band residual difference algorithm for retrieval of  $\text{SO}_2$  from the Aura Ozone Monitoring Instrument(OMI) // Remote Sensing. AURA Special Issue. 2002. P. 1259–1266.
4. Зуев Д.В., Кашкин В.Б. Анализ выбросов диоксида серы по данным инструмента ОМІ (спутник AURA) для Норильской промышленной зоны // Оптика атмосферы и океана. 2013. С. 793–797.

5. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учеб. пособие. М.: Логос, 2001. С. 73.

УДК 550.83

## ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИИ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА MODIS

М. Ю. Катаев<sup>(1)</sup>, А. А. Бекеров<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

<sup>(2)</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

e-mail: [kataev@mail.tomsknet.ru](mailto:kataev@mail.tomsknet.ru)

В статье рассматриваются геоинформационная система для контроля экологического состояния территории по данным спутникового прибора MODIS.

*Ключевые слова:* ГИС, спутниковые данные, вегетационные индексы, экология.

### Введение

Спектральные отражательные свойства растительного покрова определяются следующими основными физическими факторами: оптическими свойствами листа (количество хлорофилла), геометрией покрова и угловым распределением листьев, отражательной способностью почв, углом освещения и углом наблюдения, состоянием атмосферы, характеризующиеся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. На практике применяется множество вегетационных индексов (которые подобраны, как правило, эмпирически), позволяющих определить состояние и тип растительного покрова [1].

Онлайн мониторинг периодических временных рядов данных дистанционного зондирования для выявления изменений является весьма актуальной проблемой во многих прикладных областях, таких как мониторинг биомассы, обнаружение изменений растительного покрова растений и в других областях, где используются временные ряды данных и имеют периодическую (сезонную) компоненту. Точное и своевременное выявление изменений во временных рядах может предотвратить значительные убытки и негативные последствия на окружающую среду в нефтегазовой отрасли, и зачастую имеет решающее значение.

Мониторинг расположений и характера изменений растительного покрова имеет важное значение для землепользователей и объектов повышенной опасности. Временной охват снимков MODIS с 2000 г. [2] позволяет вести непрерывный ежедневный мониторинг территорий большой протяженности. В представленных снимках, разрешением 250 м, содержатся данные в двух каналах (в красном и в ближнем инфракрасном спектрах), на основе которых в данный момент рассчитываются 4 вегетационного индекса: нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) [3], трансформированный вегетационный (Transformed VI, TVI) [4], относительный вегетационный индекс (Ratio VI, RVI) [4] и еще один индекс, получен нами эмпирически.

### Разрабатываемая программная система

Для получения, обработки и анализа спутниковых данных нами разрабатывается программная система, структура которой показана на рис. 1. В настоящее время, при обработке основных применяемых алгоритмов, нами используются данные

спутникового прибора MODIS. В дальнейшем нами планируется расширить круг используемых данных, получаемых с помощью других спутниковых приборов.

Основой нашей программной системы являются сами спутниковые данные и сопутствующая им априорная информация (температура, ветер, влажность и др.), получаемая из других, открытых источников информации. После преобразования спутниковой и априорной информации выполняются расчеты индексов за определенный промежуток времени. На основе этой информации проводится расчет статистической информации, которая анализируется с целью принятия тех или иных решений.



**Рис. 1. Структура разрабатываемой системы**

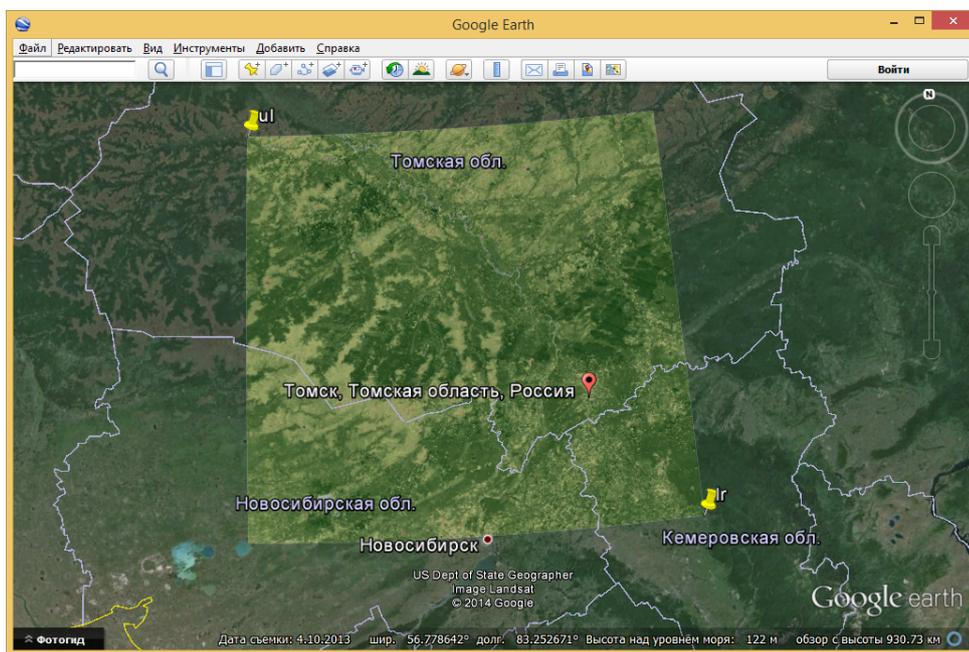
Программная система реализована как ИГИС (Интернет гео-информационная система). Система предназначена для графического отображения результатов расчетов в виде слоев, каждый из которых несет определенную информацию (вегетационные индексы, результаты анализа и др.).

Основной идеей является автоматизация процесса получения, обработки, расчета индексов, визуализации полученной информации и выявления изменений. Только с использованием автоматизированных средств представляется возможность в режиме реального времени проводить анализ на контролируемых территориях и в случае каких-либо изменений в данных принимать какое-либо решение. Данные, полученные и информация, полученная и созданная из этих данных, может легко интегрироваться в любые ГИС, в том числе и бесплатные.

### **Описание платформы программной системы**

Приложение состоит из 2х частей: клиентское приложение и сервер приложений. На сервере, где заключена основная логика получения и обработки спутниковых снимков, используются следующие технологии: язык программирования и научные вычисления – Python, для визуализации используется Geoserver, для http запросов и различных команд на получение данных за определенный период реализован REST интерфейс для доступа к информации на базе Python микрофреймворка Flask. При обращении к API пользователь указывает необходимые параметры (период времени, за который нужны данные, вид данных (NDVI, TVI и др.) формат (JSON, XML)) и в результате выводится информация для последующего использования и самостоятельного анализа. Спутниковые снимки после получения конвертируются, перепроецируются и обрезаются до необходимых размеров (заданной системы координат). В последующем эти данные используются для оперативного вычисления различных индексов за несколько лет. Полученные данные также архивируются и каталогизируются и опубликовываются на картографическом сервере с открытым

исходным кодом Geoserver, который позволяет с помощью спецификаций WMS и WMS-T не только доставлять данные до пользователей, но также и редактировать их и сохранять на сервере. На данный момент реализован вебинтерфейс для доступа к данным и отображение в Интернет ГИС системах, например, Google Earth (рис. 2).



**Рис. 2. Пример интеграции разрабатываемой системы с Google Earth**

На клиенте данные собираются в виде слоев и проецируются на цифровую карту (в качестве подложки используется openstreetmap). Веб-интерфейс построен таким образом, чтобы можно было визуализировать всю основную информацию (тренды индексов, отклонение от нормального распределения, разладку, отображение территорий с аномалиями).

Одним из основных компонентов является модуль расчета вегетационных индексов. Программа построена таким образом, чтобы ее можно было легко масштабировать, добавляя новые типы данных и методики расчета вегетационных индексов. Все рассчитанные индексы хранятся в виде tif файлов, которые имеют название MOD09GQ.2010023.h22v03.tif, MOD09GQ означает тип данных, 2010023 – год и день от 001 до 365 и h22v03 – наименование файлов в соответствии с файловой системой MODIS.

### **Исследуемая территория**

Ежедневно получаемые снимки MOD09GQ обрабатываются, перепроецируются и на их основе выполняется расчет указанных выше индексов на территории Томской области с координатами UL (широта  $59.233892^\circ$ , долгота  $78.698798^\circ$ ) и LR (широта  $55.032270^\circ$ , долгота  $86.791851^\circ$ ). На рис. 2 представлен снимок с рассчитанным вегетационным индексом NDVI отображенный в системе Google Earth. При необходимости площадь исследуемой территории увеличиваются до требуемых согласно данным в файле измерений MODIS.

Одной из задач, на которую ориентирована разрабатываемая нами программа является расчет изменений на исследуемой территории, который можно связать с экологическими изменениями. Для этого нами необходимо выполнить значительные статистические расчеты, которые позволяют выявить годовой цикл изменения того или

инного индекса на исследуемой территории. Учет годового цикла в поступающих спутниковых измерениях позволяет выявить изменения, которые необходимо отдельно анализировать. Например, к изменениям можно отнести разлив рек, сгоревший лес и др.

### **Выявление изменений**

Данные временных рядов для выявления изменений являются важным компонентом многих систем мониторинга, таких, как космические и авиационные средства съемки Земли, которые непрерывно анализируют изменения окружающей среды, зафиксированные сенсорами приборов. Данные дистанционного зондирования, получаемые со спутников имеют периодическую компоненту возникающую вследствие постоянно возникающих природных событий (например, сезоны года). Существует большое количество алгоритмов выявления изменений во временных рядах, формируемых по космическим снимкам [5].

На данный момент, все рассчитываемые индексы хранятся и используются для статистических расчетов, построения графиков изменений индекса, характеристики распределений, выявления разладки статистических характеристик распределений индексов и регрессионного анализа. Также во внимание принимается информация об освещенности солнцем, угле съемки, влажности, температуры для нивелирования различных эффектов при измерениях. Вся эта информация поможет определить характер изменений, прогнозировать в краткосрочном периоде будущие значения и в случае отклонения от накопленных за несколько лет результатов, данная территория будет выделяться и эта информация будет отправляться природопользователям.

Таким образом, разработанная нами программная система позволяет автоматически получать данные спутниковых измерений MODIS, для определенной территории, преобразовывать их и на этой основе рассчитывать вегетационные индексы. Полученные результаты позволяют получить изменения индексов во времени, за вычетом сезонных изменений. Далее выявленные изменения должны анализироваться и на основе анализа проводиться определенные решения (эта часть программной системы находится в стадии разработки и тестирования).

### **Список литературы**

1. А.С. Черепанов, Вегетационные индексы [Электронный ресурс] // Геоматика. 2011. № 2. URL: [http://geomatika.ru/pdf/2011\\_02/2011\\_02\\_017.pdf](http://geomatika.ru/pdf/2011_02/2011_02_017.pdf) (дата обращения: 19.02.2014).
2. Surface Reflectance Daily L2G Global 250m [Электронный ресурс] // Land processes distributed active archive center URL: [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table/mod09gq](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09gq) (дата обращения: 19.02.2014).
3. Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) [Электронный ресурс] // PVTS, Geospatial & Consulting services URL: [http://www.pvts.net/pdfs/ndvi/3\\_3\\_ndvi.PDF](http://www.pvts.net/pdfs/ndvi/3_3_ndvi.PDF) (дата обращения: 01.03.2014).
4. Nikolaos G. Silleos, Thomas K. Alexandridis, Ioannis Z. Gitas, Konstantinos Perakis, Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years // Geocarto International. Vol. 21, No. 4. December 2006.
5. R. S. Lunetta, et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data // Remote Sensing of Environment. 105(2):142–154. 2006.

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ  
ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ  
ПО ДАННЫМ ПРИБОРА MODIS**

М. Ю. Катаев<sup>(1)</sup>, А. А. Бекеров<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

<sup>(2)</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН e-mail:  
[kataev@mail.tomsknet.ru](mailto:kataev@mail.tomsknet.ru)

В статье рассматриваются результаты дистанционного зондирования и приводится описание геоинформационной системы для контроля экологического состояния территории по данным спутникового прибора MODIS, которая может решать часть задач в автоматическом режиме.

*Ключевые слова:* ГИС, спутниковые данные, вегетационные индексы, экология.

**Введение**

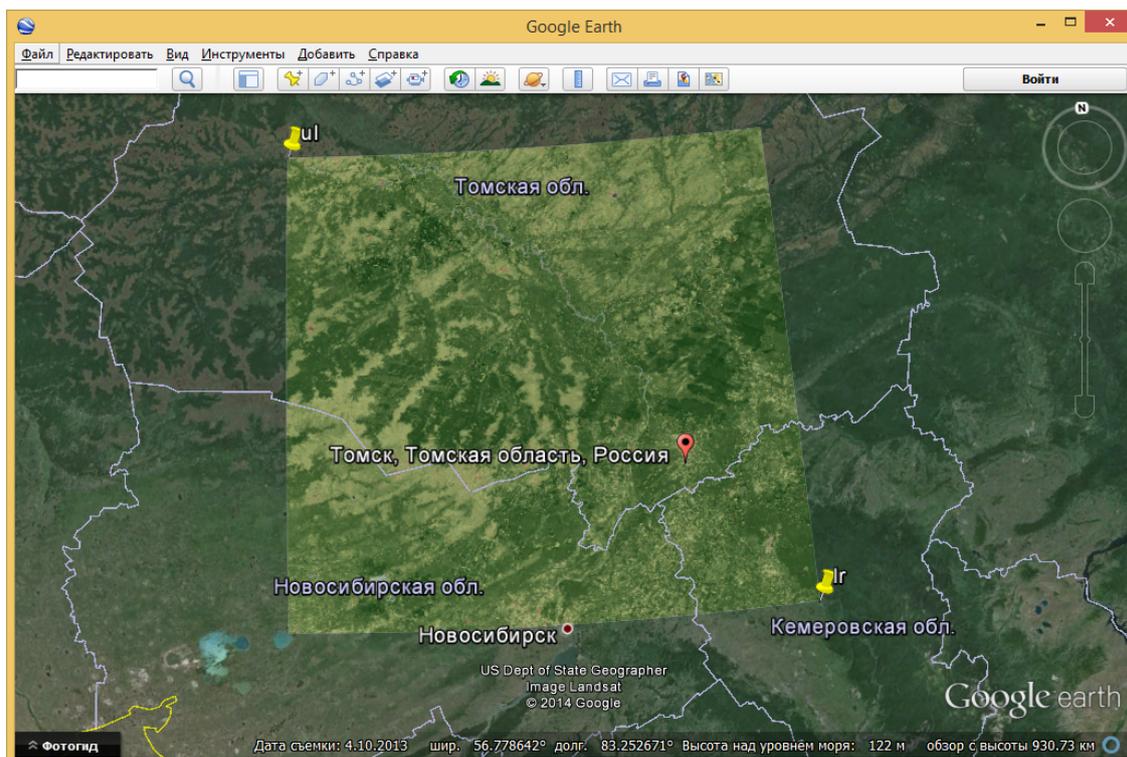
Нами в статье [1] приводится описание программной системы позволяющей проводить оценку состояния природной среды, в том числе и экологического состояния на основе обработки данных спутникового прибора MODIS. Программная система реализована в виде Интернет геоинформационной системы и позволяет проводить мониторинг изменений растительного покрова на основе известных алгоритмов, представленных в [2] на основе оценки и анализа пространственно-временного поведения вегетационных индексов (NDVI, TVI, RVI и др.).

Для обработки нами выбираются файлы MODIS типа MOD09GQ, которые обрабатываются, перепроецируются и на их основе выполняется расчет указанных выше индексов на территории Томской области с координатами UL (широта 59.233892°, долгота 78.698798°) и LR (широта 55.032270°, долгота 86.791851°).

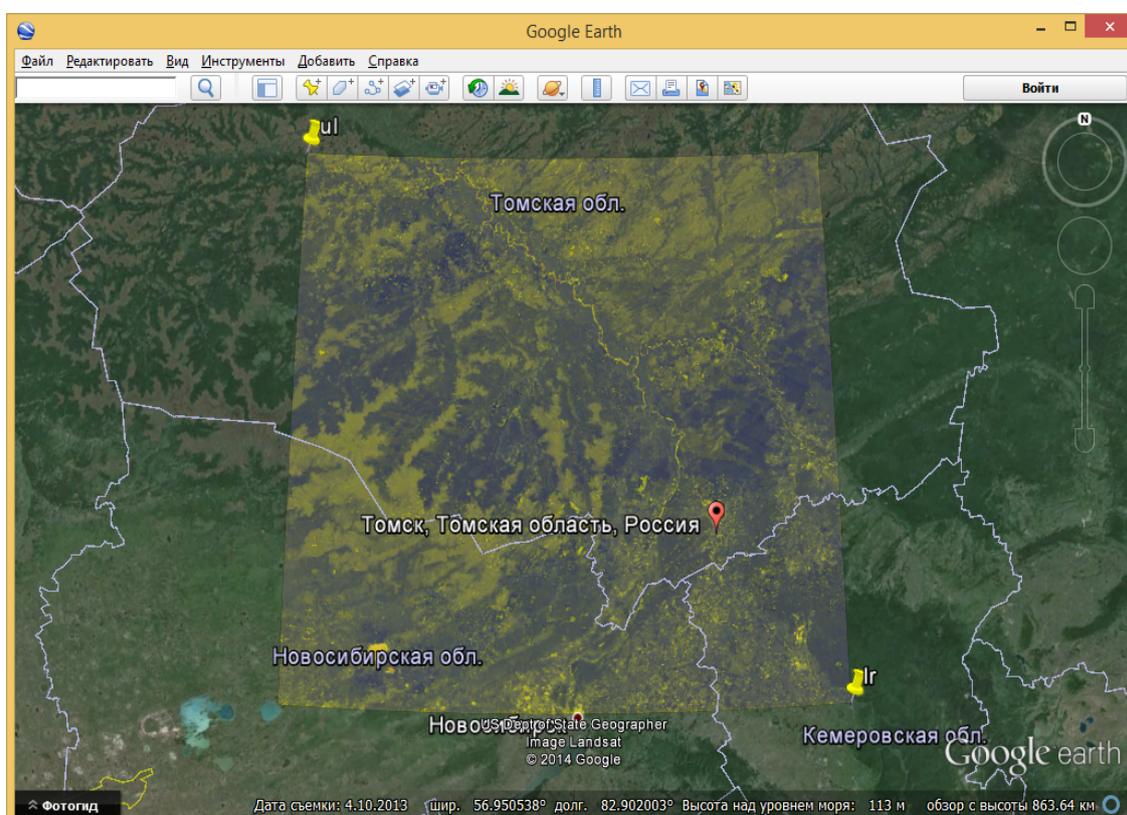
**Результаты мониторинга вегетационных индексов**

На рис. 1. представлен снимок с рассчитанным вегетационным индексом NDVI отображенный в системе Google Earth для части территории Томской области. Нами были получены спутниковые данные для этой территории для временного периода 2000-2013 г.г. Обработанные данные запоминаются в соответствующие архивы в трех типах файлов (geotif, txt и kml (специализированный файл для отображения в системе Google Earth)).

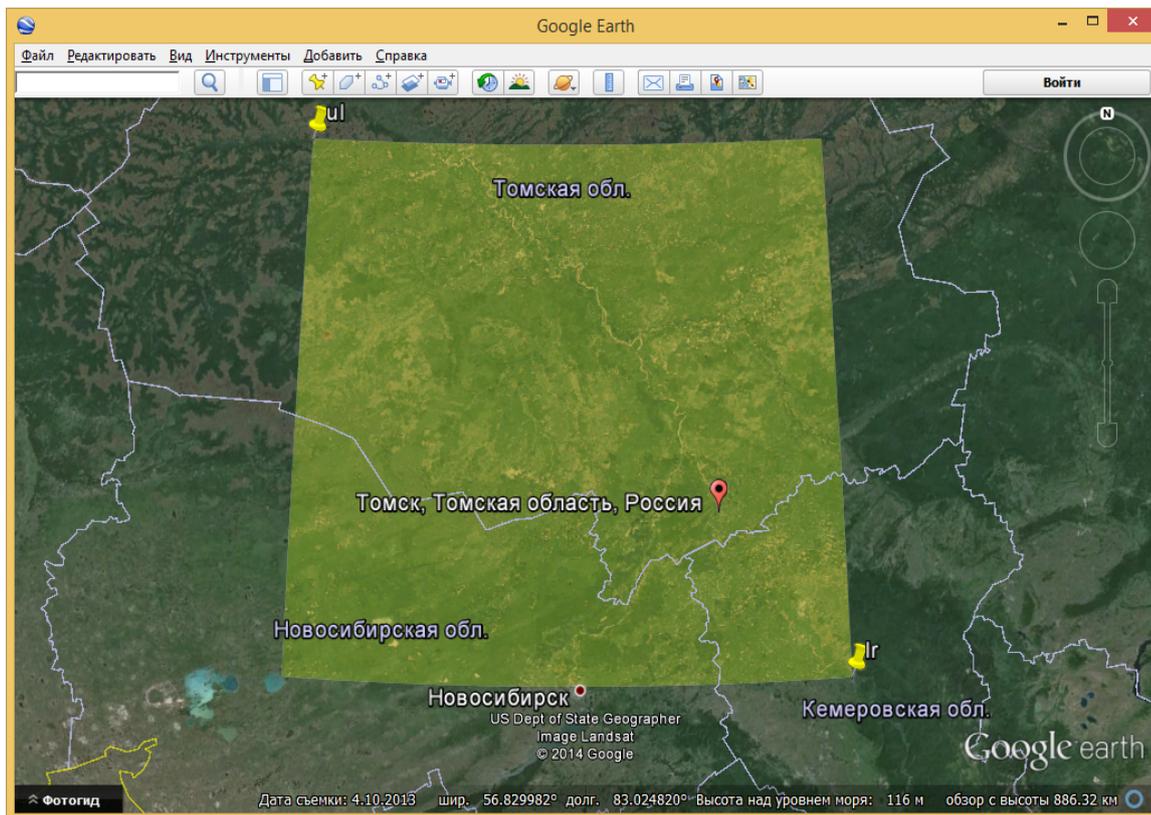
Подобные расчеты выполнены для таких индексов как TVI (рис. 2), NASH (рис. 3) и RVI (рис. 4).



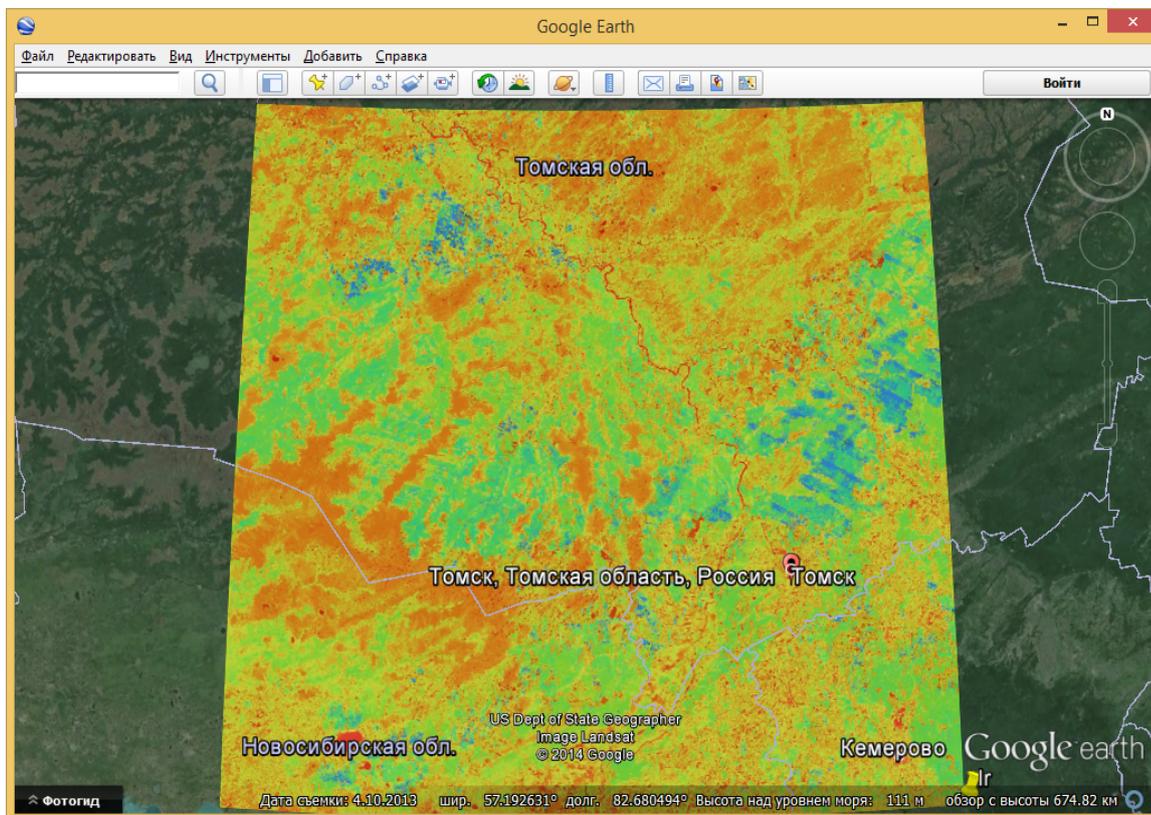
**Рис. 1. Отображение области расчета вегетационного индекса (NDVI) для территории Томской области в программной системе Google Earth**



**Рис. 2. Отображение области расчета вегетационного индекса (TVI) для территории Томской области в программной системе Google Earth**



**Рис. 3. Отображение области расчета вегетационного индекса (NASH) для территории Томской области в программной системе Google Earth**



**Рис. 4. Отображение области расчета вегетационного индекса (RVI) для территории Томской области в программной системе Google Earth**

### **Алгоритм экологического контроля**

Все рассчитанные индексы сохраняются в соответствующих разделах архива и над ними выполняются статистические расчеты: оценка среднего, дисперсии, вариаций, и построение плотности распределения. Все эти характеристики позволяют определить типичный, естественный ход индекса для каждого из пикселей полученного изображения.

Помимо данных измерений MODIS, нами из разнообразных открытых Интернет источников собираются априорные данные о температуре, давлении, ветре, влажности и др. параметрах в исследуемом районе. Изучение поведения априорных данных за тот же временной промежуток позволяет выявить корреляционные зависимости изменения значений индексов от априорных параметров и тем самым уточнить поведение вегетационных индексов в зависимости от естественных факторов, а также выявить участки территории, для которых в определенные промежутки времени происходит нарушение естественной вариации значений вегетационного индекса.

В итоге с помощью разработанной нами интернет геоинформационной системы (ИГИС) нами выполняется получение спутниковых данных прибора MODIS, рассчитываются вегетационные индексы и проводится их статистический анализ. Полученные результаты позволяют выявить пространственные и временные аномалии, когда происходит отклонение поведения значений вегетационных индексов от естественного (сезонного) хода.

### **Список литературы**

1. М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2014. №. 7. С. 652–656.
2. R. S. Lunetta, et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data // Remote Sensing of Environment. 2006. 105(2). P. 142–154.

**УДК 550.83**

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВЫМ ПРИБОРОМ GOSAT ДЛЯ ПОДСПУТНИКОВЫХ СТАНЦИЙ TCCON. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ CO<sub>2</sub>**

М. Ю. Катаев, А. К. Лукьянов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
e-mail: [kataev.m@sibmail.com](mailto:kataev.m@sibmail.com)

В статье приводятся результаты обработки реальных (восстановление общего содержания CO<sub>2</sub>) данных спутникового прибора (Фурье-спектрометра среднего разрешения) GOSAT для территории подспутниковых точек станций TCCON методом эмпирических ортогональных функций.

*Ключевые слова: спутниковые данные, метод эмпирических ортогональных функций.*

Точность определения газового состава атмосферы по данным спутниковых измерений обусловлена совокупностью разнообразных факторов: погрешность измерений прибора, абсолютная и спектральная калибровка, погрешности телеметрии, особенности алгоритма интерпретации, исходная спектроскопическая и априорная информация. Практическое использование данных о состоянии атмосферы возможно после тщательного анализа их соответствия предъявляемым требованиям точности,

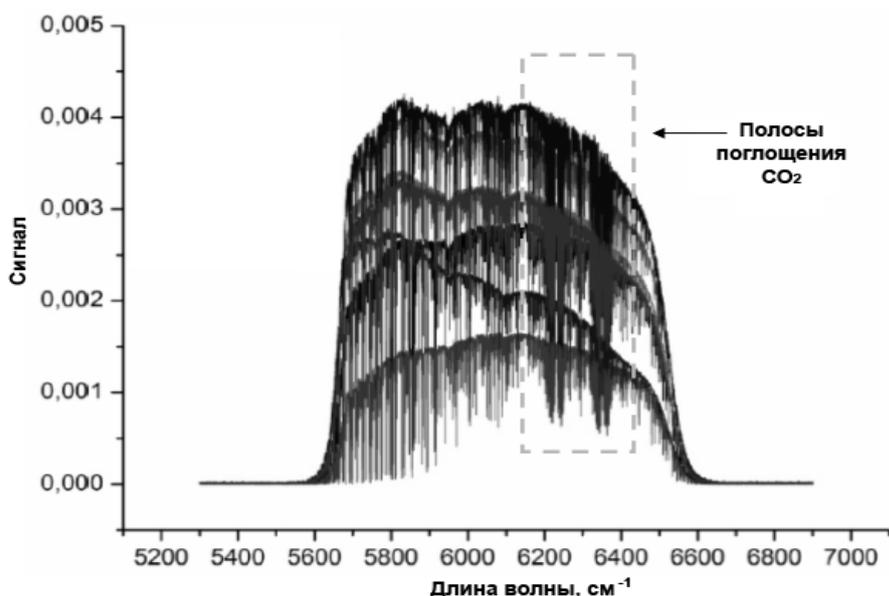
пространственного и временного разрешения, на основе интенсивных согласованных исследований по валидации спутниковых данных.

Для целей проверки возможности применения метода эмпирических ортогональных функций [1, 2] при обработке реальных сигналов, нами были использованы данные измерений международной сети станций TCCON (Total Carbon Column Observing Network) [<http://www.tccon.caltech.edu>]. На этих станциях проводится измерение общего содержания  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  и других атмосферных параметров. При этом общее содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  проводится прибором (Фурье-спектрометр среднего разрешения), по своим возможностям близкому к прибору, который установлен на спутнике.

Для подготовки выборки данных, нами была выбрана станция Lamont (36.604 с.ш., 97.486 з.д.), находящаяся практически в центре Северной Америки. Данные измерений станции, в течение практически каждого дня (исключение составляют облачные дни, когда измерения не выполняются), были получены для временного интервала 2010–2013 годы. Спутниковые измерения были собраны за этот же промежуток времени из области размером  $5 \times 5$  градусов, с центром в точке стояния станции Lamont. Всего было получено 5785 сигналов. Далее нами было выполнено согласование данных измерений GOSAT с данными измерений на станции Lamont по времени.

Каждый сигнал GOSAT представляет собой набор спектральных точек, получаемых Фурье-спектрометром в четырех каналах (около 20 тысяч точек), записанных в формате HDF. Нами выбирались данные второго канала, в спектральной области 1.6 мкм, (около 8000 точек), из которых для обработки отбирались данные (1800 точек), в которых расположены полосы поглощения углекислого газа (см. рис. 1). Далее все оставшиеся спектральные точки сигналов, за весь временной промежуток времени, проходили оценку на вариабельность. Для дальнейшей работы были оставлены наиболее изменчивые по величине спектральные точки сигнала, которых осталось всего 780. Таким образом, для обучения и тестирования нами было получено для станции Lamont 5785 сигналов, в каждом из которых было 780 спектральных точек.

Для проверки работоспособности алгоритма ЭОФ, нами выполнялось два варианта решения обратной задачи. Первый вариант связан с обучением и обработкой данных GOSAT для выборки в течение одного года (первого, т. е. 2010), а второй вариант, когда обучение остается первоначальным, а выборка для обработки поступает полностью за все годы (2010–2013). Выборка пар (сигнал спутника-значение  $\text{CO}_2$  станции TCCON) делилась на две части: обучающую (60 %) и тестовую (40 %). Также нами было реализовано два алгоритма метода ЭОФ: стандартный и модифицированный. Отличие модифицированного подхода от стандартного заключается учетом априорной информации (зенитный угол Солнца, общее содержание  $\text{H}_2\text{O}$ , оптическая толщина аэрозоля, характеристики рельефа) при расчете ковариационной матрицы. В методе ЭОФ ковариационная матрица является основой построения алгоритма.

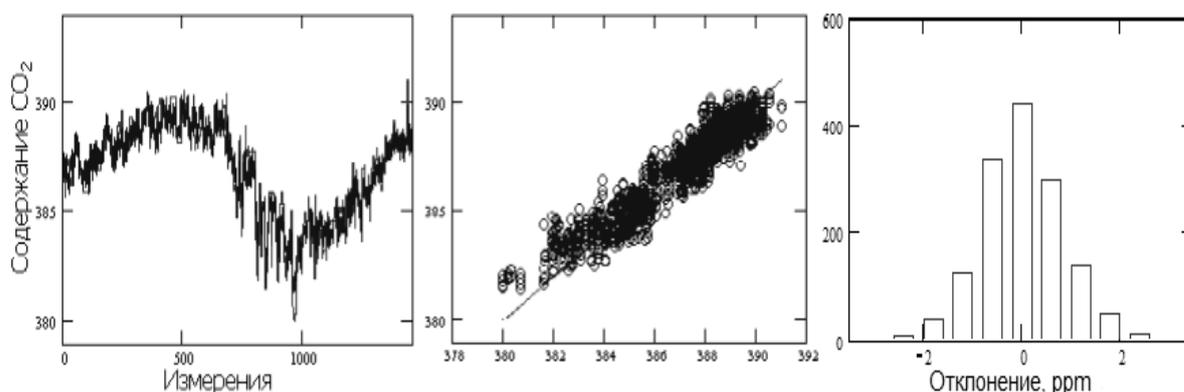


**Рис. 1. Реально измеренные спектры отраженного солнечного излучения**

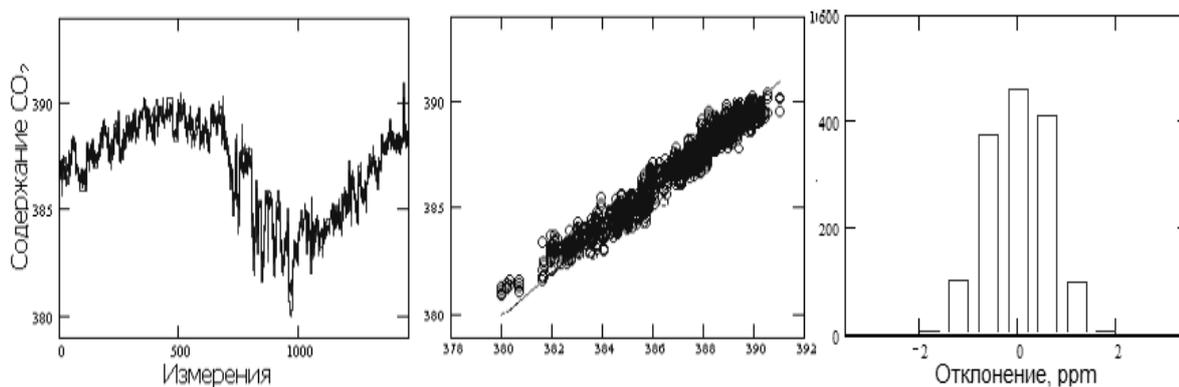
После обучения метода [1,2] и решения обратной задачи стандартным подходом ЭОФ, для тестовой выборки сигналов спутника, результаты восстановленного общего содержания  $\text{CO}_2$  сравнивались со значениями для станции Lamont, которые показаны на рис. 2.

Такая же процедура выполнялась для модифицированного подхода ЭОФ и показан на рис. 3. Сравнение результатов, представленных на рис. 2 и 3, особенно гистограмм, показывает, что учет априорной информации позволяет получить более близкую информацию об общем содержании  $\text{CO}_2$  к данным измерений на наземной станции.

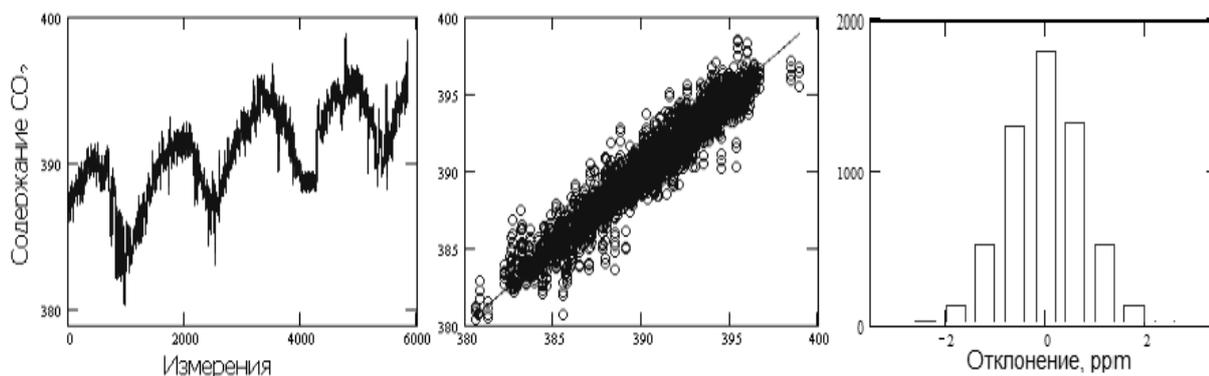
Далее нами была проведена обработка всей совокупности данных за несколько лет модифицированным методом ЭОФ и результаты представлены на рис. 4, из которого видно, что, не смотря на обучение метода ЭОФ с помощью данных для одного года, алгоритм имеет хорошую предсказательную способность (даже не смотря на наличие тренда роста содержания  $\text{CO}_2$  из года в год).



**Рис. 2. Результаты сравнения обработки измерений GOSAT методом ЭОФ стандартным подходом**



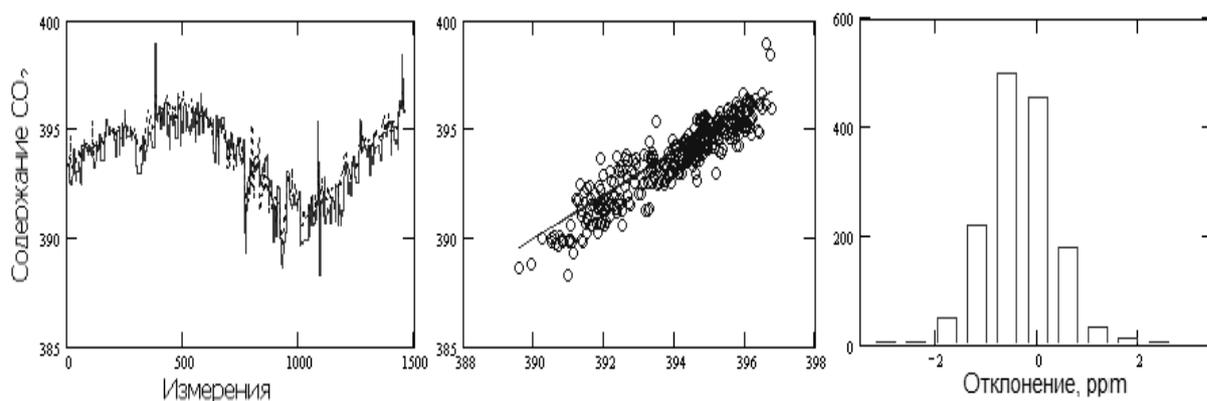
**Рис. 3. Результаты сравнения обработки измерений GOSAT методом ЭОФ модифицированным подходом (в матрице измерений добавлена априорная информация)**



**Рис. 4. Значения общего содержания  $\text{CO}_2$  для полной выборки за 2009–2012 гг.**

Кроме того нами было проведено тестирование метода на всей территории США. Для этого мы использовали, помимо станции Lamont, данные ещё двух подспутниковых станций TCCON: Park Falls (45.945 с.ш., 90.273 з.д.) и Four Corners (36.797 с.ш., 108.48 з.д.). Данные всех трёх станций были смешанны между собой. После этого на смешанных данных было проведено обучение системы. На рис. 5 показаны расчёты для станции Lamont за 2012 год.

Из рис. 5 хорошо видно, что смешивание данных различных наземных станций практически не повлияли на точность восстановления общего содержания  $\text{CO}_2$ , однако, привели к некоторому смещению. Это смещение связано с тем, что две другие станции TCCON расположены в местах с различным рельефом и типами поверхности (от станции Lamont), что сказывается на формировании спутникового сигнала.



**Рис. 5. Значения общего содержания CO<sub>2</sub> для станции Lamont при обучении на трёх станциях**

Таким образом, можно сделать вывод, что рассмотренный метод эмпирических ортогональных функций обработки данных измерений может быть применен к получению достоверной информации о пространственно-временном поведении углекислого газа на больших территориях.

#### **Список литературы**

1. Катаев М.Ю., Катаев С.Г., Андреев А.Г., Базелюк С.А., Лукьянов А.К. Непараметрические математические методы восстановления общего содержания CO<sub>2</sub> из данных спутникового мониторинга // Доклады ТУСУР. 2011. Т. 2(24). Ч. 3. С. 181–186.
2. Катаев М.Ю., Катаев С.Г., Максютлов Ш., Андреев А.Г., Базелюк С.А., Лукьянов А.К. Математические алгоритмы обработки и анализа данных спутникового Фурье-спектрометра в ближней ИК-области спектра // Изв. вузов «Физика». 2012. № 3. С. 84–90.

УДК 517.443

## **ВЫЧИСЛЕНИЕ N-МЕРНОГО БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ПО АНАЛОГУ АЛГОРИТМА КУЛИ-ТЬЮКИ**

М. В. Носков, В. С. Тутатчиков

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

e-mail: [mvnoskov@mail.ru](mailto:mvnoskov@mail.ru), [vtutatchikov@mail.ru](mailto:vtutatchikov@mail.ru)

Представлен алгоритм вычисления n-мерного преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки, использующий  $\frac{2^n - 1}{2^n} N^n \log_2 N$  комплексных умножений и  $nN^n \log_2 N$  комплексных сложений, где  $N = 2^s$  – число отсчетов по одной из осей. Представлен результат численного эксперимента в трехмерном случае.

*Ключевые слова:* многомерное преобразование Фурье, быстрые алгоритмы.

#### **Введение**

Широкое применение в цифровой обработке сигналов получили алгоритмы одно-, двух- и трехмерного преобразования Фурье [1]. Из-за возрастающей сложности и большого объема вычислений при увеличении размерности сигнала многомерное

дискретное преобразование Фурье сводится к комбинации одномерных по всем координатам. В данной статье приведен общий алгоритм вычисления n-мерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки, которые требуют меньше комплексных операций сложения и умножения, чем стандартный метод. Проведено тестирование полученного алгоритма в трехмерном случае при сравнении со стандартным алгоритмом в среде Matlab.

### Описание алгоритма

Рассмотрим сигнал  $f$ , который является n-мерным периодическим сигналом с периодом  $2^s$  по всем n координатам со значениями в комплексном пространстве. Отсчеты задаются как  $f(x_1, \dots, x_n)$ , где  $x_1, \dots, x_n = 0 : 2^s - 1$  – порядковые номера отсчетов. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) для данного сигнала  $f(x_1, \dots, x_n)$  задается формулой:

$$F(y_1, \dots, y_n) = \sum_{x_1=0}^{2^s-1} \dots \sum_{x_n=0}^{2^s-1} f(x_1, \dots, x_n) e^{\frac{2\pi i(x_1 y_1 + \dots + x_n y_n)}{2^s}}. \quad (1)$$

Преобразуем формулу (1) разбиением на четные и нечетные компоненты первой координаты  $x_1$ :

$$\begin{aligned} F(y_1, \dots, y_n) &= \sum_{x_1=0}^{2^s-1} \sum_{x_2=0}^{2^s-1} \dots \sum_{x_n=0}^{2^s-1} f(x_1, x_2, \dots, x_n) e^{\frac{2\pi i(x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n)}{2^s}} = \\ &= \sum_{x_1^1=0}^{2^{s-1}-1} \sum_{x_2=0}^{2^s-1} \dots \sum_{x_n=0}^{2^s-1} f(2x_1^1, x_2, \dots, x_n) e^{\frac{2\pi i(2x_1^1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n)}{2^s}} + \\ &+ \sum_{x_1^1=0}^{2^{s-1}-1} \sum_{x_2=0}^{2^s-1} \dots \sum_{x_n=0}^{2^s-1} f(2x_1^1 + 1, x_2, \dots, x_n) e^{\frac{2\pi i(2x_1^1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n)}{2^s}} e^{\frac{2\pi i y_1}{2^s}} = \\ &= g_{0, a_2, \dots, a_n}^1(y_1, \dots, y_n) + e^{\frac{2\pi i y_1}{2^s}} g_{1, a_2, \dots, a_n}^1(y_1, \dots, y_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f(2x_1^1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $f(2x_1^1 + 1, x_2, \dots, x_n)$  – n-мерные подсигналы сигнала  $f(x_1, \dots, x_n)$ , содержащие компоненты с четными и нечетными индексами первой координаты и нетронутыми остальными координатами. Размерность этих сигналов составляет  $2^{s-1} \times 2^s \times \dots \times 2^s$ . Заметим, что  $g_{0, a_2, \dots, a_n}^1(y_1, \dots, y_n)$ ,  $g_{1, a_2, \dots, a_n}^1(y_1, \dots, y_n)$  есть n-мерное ДПФ для подсигналов  $f(2x_1^1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $f(2x_1^1 + 1, x_2, \dots, x_n)$  согласно формуле (1). Нижний индекс  $g_{0, a_2, \dots, a_n}^1(y_1, \dots, y_n)$  обозначает разбиение координаты на четную (0) или нечетную (1) компоненту, либо отсутствие разбиения ( $a_2, \dots, a_n$ ), верхний индекс обозначает итерацию алгоритма. Аналогично верхний индекс  $x_1^1$  обозначает итерацию алгоритма.

Заметим, что множитель  $e^{\frac{2\pi i y_1}{2^s}}$  из формулы (2) обладает свойством симметрии относительно  $2^{s-1}$ , то есть для  $y_1^1 = 0 : 2^{s-1}$  и  $y_1 = y_1^1 + 2^{s-1}$  имеем:

$$e^{\frac{2\pi i y_1}{2^s}} = e^{\frac{2\pi i(y_1^1 + 2^{s-1})}{2^s}} = e^{\frac{2\pi i y_1^1}{2^s}} \cdot e^{\frac{2\pi i 2^{s-1}}{2^s}} = e^{\frac{2\pi i y_1^1}{2^s}} \cdot e^{\frac{\pi i}{2}} = -e^{\frac{2\pi i y_1^1}{2^s}}. \quad (3)$$

Из формулы (2) с учетом (3) получим:

$$\begin{aligned}
F(y_1^1, \dots, y_n) &= g_{0,a_2,\dots,a_n}^1(y_1^1, \dots, y_n) + e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} g_{1,a_2,\dots,a_n}^1(y_1^1, \dots, y_n), \\
F(y_1^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) &= g_{0,a_2,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) - e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} g_{1,a_2,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n),
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $y_1^1 = 0 : 2^{s-1}$ ,  $y_2, \dots, y_n = 0 : 2^s$ .

Далее разобьем вторую координату на четные и нечетные компоненты аналогично (2). Из (4) с учетом (3) для множителя  $e^{\frac{2\pi y_2}{2^s}}$  получим:

$$\begin{aligned}
F(y_1^1, y_2^1, \dots, y_n) &= g_{0,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1, \dots, y_n) + e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} g_{1,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1, \dots, y_n) + \\
&+ e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{0,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1, \dots, y_n) + e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{1,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1, \dots, y_n), \\
F(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1, \dots, y_n) &= g_{0,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1, \dots, y_n) - \\
&- e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} g_{1,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1, \dots, y_n) + e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{0,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1, \dots, y_n) - \\
&- e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{1,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1, \dots, y_n), \\
F(y_1^1, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) &= g_{0,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) + \\
&+ e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} g_{1,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) - e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{0,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) - \\
&- e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{1,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n), \\
F(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) &= g_{0,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) - \\
&- e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} g_{1,0,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) - e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{0,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n) + \\
&+ e^{\frac{2\pi y_1^1}{2^s}} e^{\frac{2\pi y_2^1}{2^s}} g_{1,1,a_3,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1}, y_2^1 + 2^{s-1}, \dots, y_n)
\end{aligned} \tag{5}$$

Продолжая разбиение остальных координат на четные и нечетные компоненты, получим формулу вида (6):

$$\begin{aligned}
F(y_1, \dots, y_n) &= \sum_{b_1=0}^1 \dots \sum_{b_n=0}^1 F(y_1^1 + 2^{s-1} b_1, \dots, y_n^1 + 2^{s-1} b_n) = \\
&= \sum_{b_1=0}^1 \dots \sum_{b_n=0}^1 \sum_{a_1=0}^1 \dots \sum_{a_n=0}^1 (-1)^{b_1+\dots+b_n} e^{\frac{2\pi(y_1^1 a_1 + \dots + y_n^1 a_n)}{2^s}} g_{a_1,\dots,a_n}^1(y_1^1 + 2^{s-1} b_1, \dots, y_n^1 + 2^{s-1} b_n) = \\
&= \sum_{b_1=0}^1 \dots \sum_{b_n=0}^1 \sum_{a_1=0}^1 \dots \sum_{a_n=0}^1 (-1)^{b_1+\dots+b_n} e^{\frac{2\pi(y_1^1 a_1 + \dots + y_n^1 a_n)}{2^s}}. \\
&\cdot \sum_{x_1^1=0}^{2^{s-1}-1} \dots \sum_{x_n^1=0}^{2^{s-1}-1} f(2x_1^1 + a_1, \dots, 2x_n^1 + a_n) e^{\frac{2\pi[(2x_1^1 + a_1)(y_1^1 + 2^{s-1} b_1) + \dots + (2x_n^1 + a_n)(y_n^1 + 2^{s-1} b_n)]}{2^s}},
\end{aligned} \tag{6}$$

где размерность конечных подсигналов  $g_{a_1, \dots, a_n}^1$  составляет.

Продолжим для каждой суммы  $g_{a_1, \dots, a_n}^1$  разбиение координат вида (6) на четные и нечетные компоненты до тех пор, пока не получим конечные ДПФ  $g_{a_1, \dots, a_n}^s$  размерности  $2 \times \dots \times 2$ , которые вычисляются непосредственно. Получим итоговую формулу (7) для вычисления n-мерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки:

(7)

где  $v$  - номер итерации применения разложения (6).

### Результаты тестирования в трехмерном случае

Для тестирования алгоритма была написана программа на языке программирования C++. Тестирование проводилось на персональном компьютере с характеристиками:

- Процессор: AMD FX-4170 4.2 GHz;
- Оперативная память: 8 Гб;
- Операционная система: Windows 7.

Было проведено сравнение со стандартным алгоритмом дискретного преобразования Фурье в среде Matlab в трехмерном случае. Результаты тестирования в секундах представлены в таблице.

**Таблица**

Размер	Matlab	Кули-Тьюки	Ускорение C++
32*32*32	0.002	0.002	~1.0
64*64*64	0.028	0.020	~1.4
128*128*128	0.282	0.188	~1.5
256*256*256	2.546	1.660	~1.5
512*512*512	-	14.736	

### Заключение

Модифицированный алгоритм n-мерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки требует  $\frac{2^n - 1}{2^n} N^n \log_2 N$  комплексных умножений и  $nN^n \log_2 N$  комплексных сложений, где  $N = 2^s$  – число отсчетов по одной из осей [2]. Стандартный алгоритм требует  $nN^n \log_2 N$  комплексных умножений и  $nN^n \log_2 N$  комплексных сложений [3]. Модифицированного алгоритм требует меньшее количество комплексных операций сложения и умножения и в трехмерном случае выполняется в 1.5 раз быстрее аналога в среде Matlab [4].

### Список литературы

1. Pissis S. Parallel Fourier Transformations using shared memory nodes. MSc in High Performance Computing. The University of Edinburgh Year of Presentation: 2008.
2. Старовойтов А.В. О многомерном аналоге алгоритма Кули-Тьюки // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, Вып. № 1(27). 2010. С. 69–72.
3. Tutatchikov V.S., Kiselev O.I., Noskov M.V., Calculating the n-Dimensional Fast Fourier Transform // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 429–433.
4. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ДВУМЕРНОГО АНАЛОГА АЛГОРИТМА КУЛИ-ТЬЮКИ К ОБРАБОТКЕ КОСМОСНИМКОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. С. Тутатчиков, И. В. Кольцова, О. И. Киселев  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: [vtutatchikov@mail.ru](mailto:vtutatchikov@mail.ru)

Представлен быстрый алгоритм цифровой обработки изображений – двумерный аналог алгоритма Кули-Тьюки, число операций в котором значительно меньше, чем при последовательном применении вычислений одномерного преобразования Фурье по строкам и по столбцам. Описана последующая фильтрация для улучшения исходного изображения.

*Ключевые слова:* дискретное преобразование Фурье, быстрые алгоритмы, обработка изображений.

### Введение

Один из способов цифровой обработки изображений – это вычисление дискретного преобразования Фурье двумерного сигнала и последующая фильтрация. Как правило, для вычисления двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) в литературе используется стандартный метод комбинации одномерных БПФ – так называемый алгоритм «по строкам, по столбцам» [1]. В [2, 3] более подробно описан алгоритм вычисления БПФ для сигнала с числом отсчетов  $2^s \times 2^s$  используя аналог алгоритма Кули-Тьюки. Число операций в этом алгоритме значительно меньше, чем при последовательном применении вычисления одномерного БПФ по строкам и по столбцам. Тестирование алгоритма на сигналах типа «изображение» показало, что скорость вычисления БПФ с помощью предложенного алгоритма примерно в 1.6 раза выше, чем при применении алгоритма «по строкам, по столбцам».

### Описание алгоритма

Рассмотрим сигнал  $f$ , который является двумерным периодическим сигналом с периодом  $2^s$  по первой и второй координате. Отсчеты задаются как  $f_{k,t}$ , где  $k, t = 0 : 2^s - 1$ . Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) для данного сигнала  $f$  задается формулой:

$$F_{l,m} = \sum_{k=0}^{2^s-1} \sum_{t=0}^{2^s-1} f_{k,t} e^{\frac{2\pi i k l}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m t}{2^s}}. \quad (1)$$

Двумерное ДПФ можно вычислить при помощи комбинации одномерных ДПФ. Для этого вычисляют  $F$  в следующем виде:

$$F_{l,m} = \sum_{k=0}^{2^s-1} \left[ \sum_{t=0}^{2^s-1} f_{k,t} e^{\frac{2\pi i k l}{2^s}} \right] e^{\frac{2\pi i m t}{2^s}}. \quad (2)$$

Сумма в квадратных скобках (2) представляет собой вычисление одномерного ДПФ, например, по строкам, тогда внешняя сумма представляет собой вычисление одномерного ДПФ по столбцам. Преобразуем исходную формулу (1) разбиением координат на четные и нечетные компоненты:

$$\begin{aligned}
F_{l,m} &= \sum_{k=0}^{2^s-1} \sum_{t=0}^{2^s-1} f_{k,t} e^{\frac{2\pi i k l}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m t}{2^s}} = \sum_{k_1=0}^{2^{s-1}-1} \sum_{t_1=0}^{2^{s-1}-1} f_{2k_1,2t_1} e^{\frac{2\pi i 2k_1 l}{2^{s-1}}} e^{\frac{2\pi i 2m 2t_1}{2^{s-1}}} + \\
&+ \left( \sum_{k_1=0}^{2^{s-1}-1} \sum_{t_1=0}^{2^{s-1}-1} f_{(2k_1+1),2t_1} e^{\frac{2\pi i 2k_1 l}{2^{s-1}}} e^{\frac{2\pi i 2m 2t_1}{2^{s-1}}} \right) e^{\frac{2\pi i l}{2^s}} + \left( \sum_{k_1=0}^{2^{s-1}-1} \sum_{t_1=0}^{2^{s-1}-1} f_{2k_1,(2t_1+1)} e^{\frac{2\pi i 2k_1 l}{2^{s-1}}} e^{\frac{2\pi i 2m 2t_1}{2^{s-1}}} \right) e^{\frac{2\pi i m}{2^s}} + \\
&+ \left( \sum_{k_1=0}^{2^{s-1}-1} \sum_{t_1=0}^{2^{s-1}-1} f_{(2k_1+1),(2t_1+1)} e^{\frac{2\pi i 2k_1 l}{2^{s-1}}} e^{\frac{2\pi i 2m 2t_1}{2^{s-1}}} \right) e^{\frac{2\pi i l}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m}{2^s}} = g_{0,0}^1(l,m) + e^{\frac{2\pi i l}{2^s}} g_{1,0}^1(l,m) + \\
&+ e^{\frac{2\pi i m}{2^s}} g_{0,1}^1(l,m) + e^{\frac{2\pi i l}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m}{2^s}} g_{1,1}^1(l,m),
\end{aligned} \tag{3}$$

где  $f_{2k_1,2t_1}$ ,  $f_{(2k_1+1),2t_1}$ ,  $f_{2k_1,(2t_1+1)}$ ,  $f_{(2k_1+1),(2t_1+1)}$  – двумерные подсигналы сигнала  $f_{k,t}$ , содержащие компоненты с четными и нечетными индексами по двум координатам. Размерность этих сигналов составляет  $2^{s-1} \times 2^{s-1}$ . Заметим, что  $g_{0,0}^1(l,m)$ ,  $g_{1,0}^1(l,m)$ ,  $g_{0,1}^1(l,m)$ ,  $g_{1,1}^1(l,m)$  есть двумерное ДПФ для подсигналов  $f_{2k_1,2t_1}$ ,  $f_{(2k_1+1),2t_1}$ ,  $f_{2k_1,(2t_1+1)}$ ,  $f_{(2k_1+1),(2t_1+1)}$  соответственно.

Можно показать, что множитель  $e^{\frac{2\pi i l}{2^s}}$  из формулы (3) обладает свойством симметрии относительно  $2^{s-1}$ , т.е. для  $l_1 = 0 : 2^{s-1} - 1$  и  $l = l_1 + 2^{s-1}$  имеем:

$$e^{\frac{2\pi i l}{2^s}} = e^{\frac{2\pi i (l_1 + 2^{s-1})}{2^s}} = e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} \cdot e^{\frac{2\pi i 2^{s-1}}{2^s}} = e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} \cdot e^{\pi} = -e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}}. \tag{4}$$

Аналогичное свойство справедливо и для множителя  $e^{\frac{2\pi i m}{2^s}}$ . Из формулы (3) с учетом (4) получим:

$$\begin{aligned}
F_{l_1, m_1} &= g_{0,0}^1(l_1, m_1) + e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} g_{1,0}^1(l_1, m_1) + e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{0,1}^1(l_1, m_1) + e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{1,1}^1(l_1, m_1), \\
F_{l_1 + 2^{s-1}, m_1} &= g_{0,0}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1) - e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} g_{1,0}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1) + e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{0,1}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1) - \\
&- e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{1,1}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1), \\
F_{l_1, m_1 + 2^{s-1}} &= g_{0,0}^1(l_1, m_1 + 2^{s-1}) + e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} g_{1,0}^1(l_1, m_1 + 2^{s-1}) - e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{0,1}^1(l_1, m_1 + 2^{s-1}) - \\
&- e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{1,1}^1(l_1, m_1 + 2^{s-1}), \\
F_{l_1 + 2^{s-1}, m_1 + 2^{s-1}} &= g_{0,0}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1 + 2^{s-1}) - e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} g_{1,0}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1 + 2^{s-1}) - \\
&- e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{0,1}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1 + 2^{s-1}) + e^{\frac{2\pi i l_1}{2^s}} e^{\frac{2\pi i m_1}{2^s}} g_{1,1}^1(l_1 + 2^{s-1}, m_1 + 2^{s-1}),
\end{aligned} \tag{5}$$

где  $l_1, m_1 = 0 : 2^{s-1} - 1$ .

Продолжим для каждой из сумм  $g_{0,0}^1(l,m)$ ,  $g_{1,0}^1(l,m)$ ,  $g_{0,1}^1(l,m)$ ,  $g_{1,1}^1(l,m)$  описанную процедуру разбиения координат на четные и нечетные компоненты до тех пор, пока не получим конечные суммы  $g_{0,0}^s(l,m)$ ,  $g_{1,0}^s(l,m)$ ,  $g_{0,1}^s(l,m)$ ,  $g_{1,1}^s(l,m)$

размерности  $2 \times 2$ , дискретное преобразование Фурье которых вычисляем непосредственно [3].

Двумерное БПФ по аналогу алгоритма Кули-Тьюк сигнала  $f_{k,t}$  размерности  $2^s \times 2^s$  требует  $3 \cdot 2^{2s-2}s$  операций комплексных умножений и  $2^{2s+1}s$  операций комплексных сложений [3]. Стандартный метод разбиения исходного сигнала на комбинацию одномерных требует  $2^{2s}s$  операций комплексных умножений и  $2^{2s}s$  операций комплексных сложений.

### Результаты тестирования

Для тестирования алгоритма была написана программа на языке программирования C++. Тестирование проводилось на персональном компьютере с характеристиками:

- Процессор: AMD FX-4170 4.2 GHz;
- Оперативная память: 8 Гб;
- Операционная система: Windows 7.

Было проведено сравнение со стандартным алгоритмом двумерного быстрого преобразования Фурье в среде Matlab [4]. Результаты тестирования в секундах приведены в таблице. В качестве исходных данных выступал космоснимок в различном разрешении (по степеням 2).

**Таблица**

Размер	Matlab	Кули-Тьюки	Ускорение C++
128*128	0.001	0.001	~1
256*256	0.005	0.004	~1
512*512	0.027	0.017	~1.6
1024*1024	0.125	0.087	~1.4
2048*2048	0.620	0.389	~1.6
4096*4096	2.634	1.637	~1.6
8192*8192	13.609	6.904	~2
16384*16384	-	20.383	

### Фильтрация полученного Фурье-преобразования

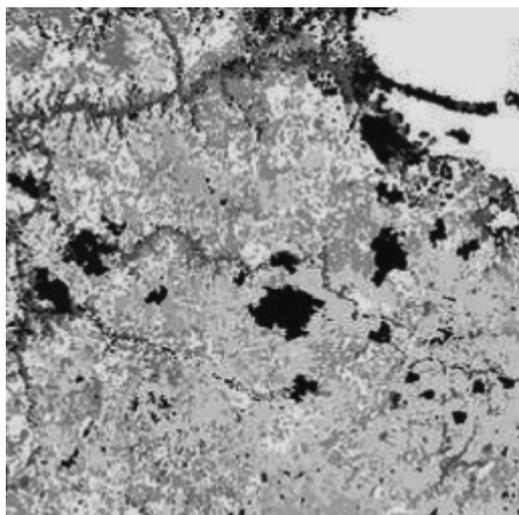
В [5] описана связь частоты со скоростью изменения двумерного сигнала. Следовательно, частоты в Фурье-преобразовании напрямую связаны с вариацией яркости на изображении. Низкие частоты соответствуют медленно меняющимся компонентам изображения, которые совпадают со средней яркостью изображения или плавным изменениям яркости. Более высокие частоты соответствуют более быстрым изменениям яркости, которые являются границами объектов и другими деталями изображения, характеризующиеся резкими изменениями яркости, например, шум.

К полученному Фурье-образу можно применить различные фильтры для улучшения исходного изображения. Например, если ослабить высокие частоты и оставить нетронутыми низкие, то изображение после выполнения обратного дискретного преобразования Фурье будет содержать меньше резких деталей. Аналогично, если ослабить низкие частоты, то в полученном изображении уменьшится яркость в больших гладких областях и выделятся переходные зоны быстрого изменения яркости (то есть контуры).

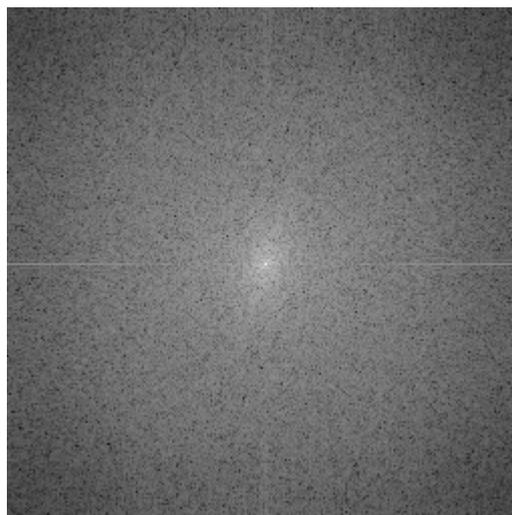
### Примеры изображений

Пример исходного космоснимка представлен на рис. 1. Он получен на основе данных дистанционного зондирования Земли. На рис. 2 показан центрированный Фурье –

спектр исходного изображения в логарифмических координатах. В центре изображения мы видим яркое пятно высоких частот, а на границе расположены низкие частоты.



**Рис. 1. Исходное изображение**



**Рис. 2. Центрированный Фурье-спектр в логарифмических координатах**

#### **Заключение**

Модифицированный алгоритм двумерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки требует меньшее число комплексных операций сложения и умножения и выполняется в 1.6 раз быстрее аналога в среде Matlab.

#### **Список литературы**

1. Pissis S. Parallel Fourier Transformations using shared memory nodes. MSc in High Performance Computing. The University of Edinburgh Year of Presentation. 2008.
2. Старовойтов А.В., О многомерном аналоге алгоритма Кули-Тьюки // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. Вып. № 1(27). 2010. С. 69–72.
3. Tutatchikov V.S., Kiselev O.I., Noskov M.V., Calculating the n-Dimensional Fast Fourier Transform // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 429–433.
4. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

## ДЕШИФРИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПО ТЕПЛОВЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ С РЕСУРСНЫХ СПУТНИКОВ НА ПРИМЕРЕ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

М. Ю. Грищенко<sup>(1)</sup>, Р. В. Жарков<sup>(2)</sup>, А. В. Устюхина<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>(2)</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

e-mail: [m.gri@geogr.msu.ru](mailto:m.gri@geogr.msu.ru)

В работе представлены результаты дешифрирования проявлений вулканической активности на Курильских островах по тепловым разносезонным космическим снимкам. Составлены карты тепловых аномалий исследуемых территорий. Результаты, полученные по космическим снимкам, подтверждаются данными полевых обследований.

*Ключевые слова:* тепловые снимки, вулканическая активность, Курильские острова, тепловые аномалии.

### Введение

Вулканическая активность является сложнопредсказуемым и не до конца изученным явлением. Она представляет большую опасность для людей, проживающих в вулканопасных зонах.

Один из методов изучения вулканической деятельности – применение данных дистанционного зондирования в тепловом инфракрасном диапазоне (тепловых космических снимков) [4]. Удобство этого метода заключается в том, что съемка в этом диапазоне позволяет выявлять районы выброса значительного количества тепла, то есть тепловые аномалии, которые могут быть связаны с вулканической активностью. Помимо этого, дистанционное зондирование Земли позволяет исследовать труднодоступные районы. В качестве изучаемых территорий были выбраны некоторые вулканы Курильских островов и их окрестности: влк. Экарма (о. Экарма), влк. Синарка (о. Шиащкотан), влк. Заварицкого (о. Симушир), влк. Иван Грозный (о. Итуруп), влк. Менделеева (о. Кунашир) и влк. Головнина (о. Кунашир).

### Материалы и методика

Целью работы является выявление, изучение и картографирование проявлений вулканической активности по тепловым космическим снимкам. Проявления вулканической активности могут быть локализованы в виде тепловых аномалий – отклонений от фонового значения интенсивности теплового излучения территории, приуроченных к участку местности. Тепловое поле местности характеризуется существенной изменчивостью, в связи с чем для географических исследований целесообразно использовать разновременные снимки. Наиболее эффективным методом изучения тепловых аномалий представляется их дешифрирование по разносезонным тепловым космическим снимкам [1]. Использование таких снимков позволяет выявить сезонную изменчивость тепловых аномалий.

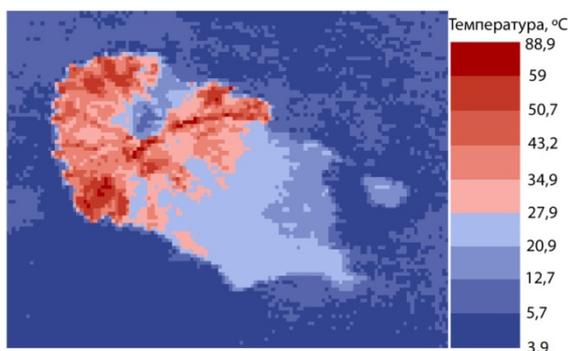
В работе использованы следующие материалы: космические снимки в тепловом диапазоне, полученные съемочными системами TM, ETM+, TIRS и ASTER, изображения температур земной поверхности по данным ASTER, топографические карты и результаты полевых обследований изучаемых территорий, полученные в ходе экспедиций сотрудников лаборатории вулканологии и вулканопасностей Института морской геологии и геофизики ДВО РАН на изучаемые вулканы. Космические снимки

получены с интернет-порталов EarthExplorer и NASA Reverb. Проведено сопоставление космических данных и данных полевых обследований (местоположение тепловых аномалий, их интенсивность и зарегистрированная температура).

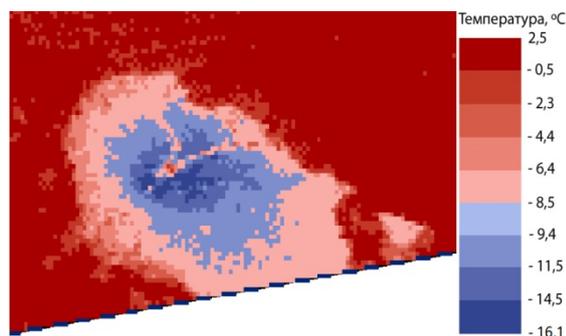
Изображения температур земной поверхности по данным ASTER пересчитаны в градусы Цельсия. Тепловые аномалии выявлены по разносезонным тепловым космическим снимкам. Полученные тепловые аномалии классифицированы по устойчивости и сезону наиболее интенсивного проявления.

### Результаты и их обсуждение

Выявлено, что значения температур, полученных по космическим снимкам, в целом совпадают со значениями, полученными в ходе полевых обследований. На рис. 1 представлено изображение температур земной поверхности вулкана Пик Сарычева на период крупного извержения. Температура некоторых лавовых потоков достигает  $90^{\circ}\text{C}$ , что соответствует температурам, полученным в ходе полевых обследований ( $80\text{--}100^{\circ}\text{C}$ ). Однако, в ходе полевых обследований были обнаружены отдельные, небольшие по площади, фумаролы, температура которых достигала  $500^{\circ}\text{C}$ , но они не отобразились на изображении ввиду недостаточного для этого пространственного разрешения ( $90\text{ м}$ ). На рис. 2 представлено изображение температур земной поверхности на ту же территорию, изображение получено спустя 10 месяцев после извержения. На изображении выделяется только два лавовых потока – северный и восточный. Температуры в области кратера составляют около  $3^{\circ}\text{C}$ , а температура в области потоков составляет около  $-2^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура на склонах конуса достигает  $-16^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 1. Изображение температур земной поверхности по данным ASTER за 25 июня 2009 г. на о. Матуа (результат квантования исходного)**

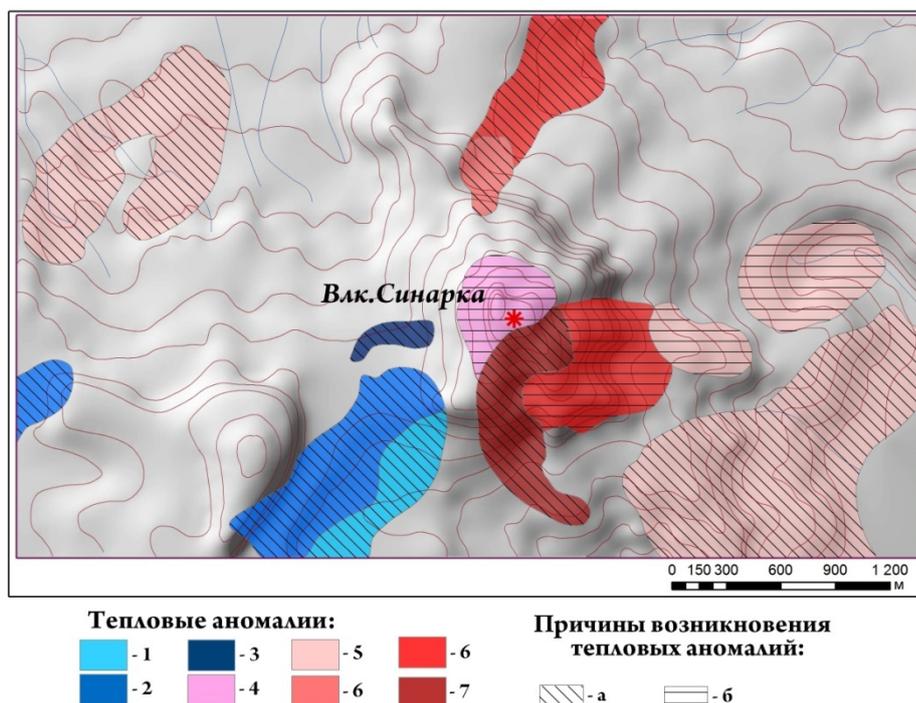


**Рис. 2. Изображение температур земной поверхности по данным ASTER за 4 апреля 2010 г. на о. Матуа (результат квантования исходного)**

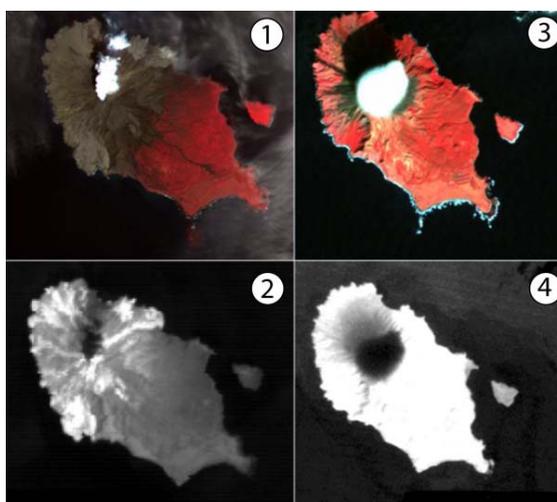
На основе анализа разносезонных тепловых снимков составлены карты тепловых аномалий, которые отражают их пространственно-временную изменчивость. Пример карты тепловых аномалий приведен на рис. 3.

Отрицательные тепловые аномалии (интенсивность теплового излучения ниже, чем у окружающих объектов) преимущественно расположены в южной части вулканического массива, они связаны с рельефом местности – крутизной и экспозицией склонов, а также с наличием водных объектов. Положительные тепловые аномалии (интенсивность теплового излучения выше, чем у окружающих объектов) сосредоточены в области кратера, на южных, восточных, юго-восточных склонах, а также у подножия северного и северо-западного склона. По данным космических снимков положительная аномалия на Центральном экструзивном куполе, связанная с вулканической активностью, интенсивнее проявляется весной и осенью. Устойчивые

весной и летом положительные аномалии у подножья восточного склона соответствуют положению Северо-восточного фумарольного поля с горячими источниками [2].



**Рис. 3. Тепловые аномалии вулкана Синарка и его окрестностей. Отрицательные: 1 – устойчивые весной; 2 – устойчивые весной и летом; 3 – устойчивые весной и осенью. Положительные: 4 – устойчивые весной и осенью; 5 – устойчивые весной; 6 – устойчивые весной и летом; 7 – устойчивые летом; 8 – устойчивые почти весь год. Причины возникновения тепловых аномалий: а – ландшафтные особенности местности; б – проявления вулканической активности**



**Рис. 4. Различия изображений облачности и пеплового облака на снимках в видимом и тепловом диапазонах на примере вулкана Пик Сарычева на о. Матуа. 1 – снимок системы ASTER за 25 июня 2009, видимый и ближний инфракрасный диапазон; 2 – снимок системы ASTER за 25 июня 2009, тепловой диапазон; 3 – снимок системы ETM+ за 3 октября 2002, видимый и ближний инфракрасный диапазон; 4 – снимок системы Landsat за 3 октября 2002, тепловой диапазон**

Интересные результаты получены для вулкана Пик Сарычева, крупное извержение которого произошло в начале июня 2009 года [3]. На фрагменте снимка в тепловом диапазоне за 29 июня 2009 г. наблюдается отчетливо выраженная отрицательная тепловая аномалия в кратерной области вулкана. Она связана с образованием облака над крупным парогозовым столбом, высота которого в день съемки составляла около трех километров. На тепловом снимке выделяются и положительные аномалии, которые совпадают с положением лавовых и пирокластических потоков. Хорошо дешифрируются радиально расположенные от кратера барранкосы, так как в них накапливается слой пирокластики значительной толщины.

На примере вулкана Пик Сарычева выявлено, что по тепловым снимкам можно однозначно разделять облачность, связанную с вулканической активностью и обычную атмосферную облачность. Например, на рис. 4 представлены два снимка в видимом и ближнем инфракрасном и два снимка в тепловом диапазонах. На рисунке видно, что низкая атмосферная облачность отображается пикселями, занимающими большую площадь и имеющими более низкую яркость.

### **Выводы**

1. В результате анализа тепловых снимков выявлено наличие проявлений вулканической активности на всех рассматриваемых участках, кроме кальдеры Заварицкого, что полностью подтверждается данными полевых обследований. Наиболее значительные аномалии выявлены на вулкане Пик Сарычева и связаны с вулканическим извержением. Подводные выходы газогидротерм выявлены на озерах Горячее и Кипящее в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир), термальные источники и водотоки, которые они подпитывают, выделены в районах вулканов Иван Грозный (о. Итуруп) и вулканов Головнина и Менделеева (о. Кунашир), парогозовая и фумарольная активность идентифицирована на вулканах Синарка (о. Шиашкотан) и Экарма (о. Экарма).

2. Выявлено общее совпадение значений температур земной поверхности, полученных по космическим и полевым данным. Локальные, незначительные по площади участки, к которым приурочены повышения или понижения температуры, не всегда отображаются на тепловых снимках, ограничения связаны с пространственным разрешением снимков.

3. Карты тепловых аномалий представляют сезонную динамику тепловых аномалий, причинами возникновения которых являются: вулканическая активность, крутизна и экспозиция склонов, особенности растительности, характер подстилающей поверхности.

4. Установлено, что по тепловым космическим снимкам можно однозначно разделять атмосферную облачность и облачность, которая образовалась вследствие вулканической активности.

### **Список литературы**

1. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Картографирование тепловых аномалий Москвы по разносезонным тепловым снимкам // Геоэкологические проблемы Новой Москвы. М.: Медиа-ПРЕСС. 2013. С. 70–76.

2. Жарков Р.В., Козлов, Д.Н., Дегтерев А.В. Современная фумарольная гидротермальная активность вулкана Синарка (о. Шиашкотан, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1 (вып. 17). С. 179–185.

3. Козлов, Д.Н., Жарков Р.В. Тепловизионная съемка активных вулканов Курильских островов в 2009-2011 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1 (вып. 19). С. 231–239.

4. Шилин Б.В. Тепловая аэросъёмка при изучении природных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат. 1980. 247 с.

УДК 004.932

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СКРЫТОЙ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Е. И. Орешкина

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет

им. академика М. Ф. Решетнева»

e-mail: [ms.oreshkina@inbox.ru](mailto:ms.oreshkina@inbox.ru)

В работе исследована зависимость качества маркированного изображения от пропускной способности изображения-контейнера, позволяющая выбрать оптимальное заполнение изображения текстовой информацией. Выявлена несостоятельность метрики оценки качества SSIM на данных методах нанесения цифровых водяных знаков. Определено влияние типа изображения на качество сокрытия в нем цифрового водяного знака.

*Ключевые слова:* цифровые водяные знаки, скрытая информация, показатели искажений, маркированное изображение.

В информационном обществе все больше возникает потребность в защите авторских прав. Наиболее уязвимой становится мультимедийная информация, дальнейшая судьба которой трудно предсказуема после попадания в сеть Интернет. Нанесение цифровых водяных знаков (ЦВЗ) – технология, применяемая для защиты цифрового мультимедиа-контента путем встраивания в него авторской информации. В статье рассмотрены статические изображения с авторской информацией в виде текстового сообщения.

**Целью работы** является рассмотрение изменений качества изображения в зависимости от глубины внедрения цифрового водяного знака в биты изображения и определение влияния типа контейнера на качество процесса нанесения ЦВЗ.

Данная проблематика затронута в научных статьях, особенно близка по проведению экспериментальной части статья [1], однако в ней автор рассматривает влияние типа изображения-оригинала на качество полученного стегоконтейнера. Вопрос о густоте нанесения ЦВЗ остается открытым. В более простой и конкретизированной формулировке данный вопрос выражается следующим образом: «сколько бит в каждом пикселе можно отвести под скрываемое сообщение, чтобы максимально использовать вместимость контейнера и не испортить итоговое изображение». В данной статье предлагается обоснованный ответ на этот вопрос, полученный эмпирическим путем.

Все методы нанесения ЦВЗ можно разделить по области встраивания на две основные группы: пространственные и частотные. Преимуществом пространственных методов является простая реализация за счет отсутствия больших математических расчетов и подготовительных преобразований исходного изображения, неизменяемый размер контейнера, высокая пропускная способность. Преимуществом частотных методов встраивания является устойчивость к различным преобразованиям маркированного изображения [2]. В работе применяется пространственный метод наименьшего значащего бита. Положительной особенностью этого метода является возможность варьировать пропускную способность изображения. Если использовать один бит каждой компоненты цветного пикселя в формате *RGB*, в одном пикселе

можно скрыть 3 бита сообщения. Способы изменения пропускной способности будем называть моделью размещения, и записывать: «модель 1-1-1». Наиболее удобной можно считать модель 2-3-3, так как пиксель хранит байт информации.

Для оценки качества полученного изображения существуют различные метрики, которые помогают установить целесообразность использования метода нанесения ЦВЗ. Одна из наиболее часто используемых эталонных метрик – метрика *PSNR* (*peak signal-to-noise ratio*). Если значение больше 37 дБ, то различия не заметны для человека, если меньше 20 дБ – разница между изображениями существенна.

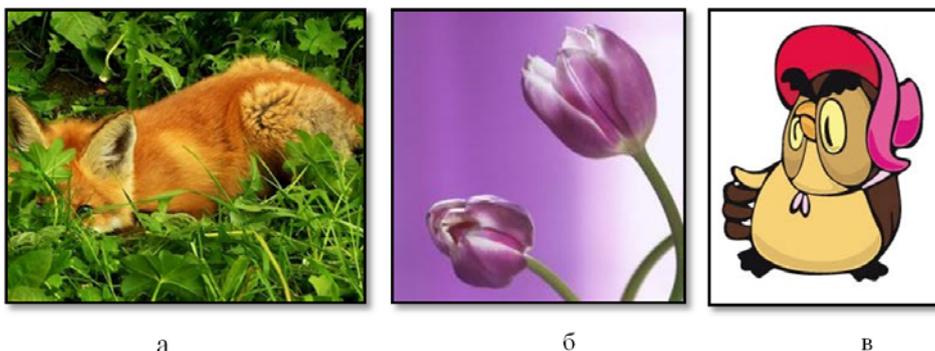
Еще одна метрика – *SSIM* (от английского – *structure similarity index measure*) – индекс структурного сходства, вычисляется по компоненте яркости изображения [3]. Диапазон значений индекса подобия находится в интервале  $[-1, 1]$ .

Все изображения можно поделить на три группы по степени текстурированности:

1. Сильно текстурированные. Изображения, содержащие множество пестрых элементов, детализированные, не имеющие однотонных областей. Такому типу соответствуют картины природы (рис. 1а).

2. Средне текстурированные. Имеют однотонные области и детализированные элементы. Пример данного типа изображений представлен на рис. 1б.

3. Мало текстурированные. Такие изображения состоят из больших однотонных участков. Как правило, выполнены с помощью компьютерной графики (рис. 1в).



**Рис. 1. Типы изображений: а) сильно текстурированные; б) средне текстурированные; в) мало текстурированные**

Были получены экспериментальные результаты по оценке качества маркированных изображений в зависимости от их типа и модели размещения в срезе двух описанных ранее метрик. Результаты занесены в таблицу.

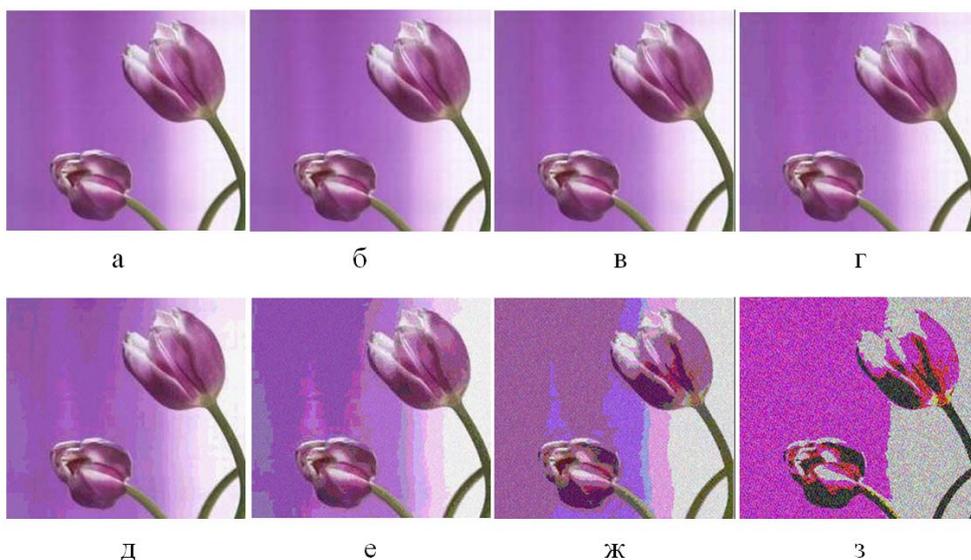
**Таблица**

**Результаты тестирования трех типов изображений**

		Модель 1-1-1	Модель 2-2-2	Модель 3-3-3	Модель 4-4-4	Модель 5-5-5	Модель 6-6-6	Модель 7-7-7
<i>mage1</i>	<i>P</i>	54, 416	47, 974	41, 385	35, 030	29, 111	23, 188	16, 656
	<i>S</i>	0,9 99971	0,9 99875	0,9 99422	0,9 97867	0,9 90343	0,9 63312	0,8 27866
<i>mage2</i>	<i>P</i>	54, 732	48, 307	41, 721	35, 362	28, 664	23, 876	17, 025
	<i>S</i>	0,9 99955	0,9 99807	0,9 99112	0,9 96727	0,9 83956	0,9 48757	0,7 76802
<i>mage3</i>	<i>P</i>	53, 068	49, 011	40, 716	31, 582	25, 295	18, 531	12, 233
	<i>S</i>	0,9 99974	0,9 99906	0,9 9954	0,9 97669	0,9 88047	0,9 48079	0,7 33315

Последовательность маркированных изображений, полученная в ходе тестирования при увеличении количества изменяемых бит в пикселе, представлена на рис. 2. В качестве примера взято средне текстурированное изображение.

При использовании модели 5-5-5 (рис. 2е) невооруженным глазом заметны появившиеся за счет сокрытия текста помехи. Помехи слабые, о чем сообщает значение  $PSNR = 28,66$ , в то время как значение  $SSIM = 0,98$ . На последнем кадре с высокой плотностью размещения (рис. 2з) высокий шумовой фон, метрика  $PSNR$  дает низкий результат – меньше двадцати. Из определения следует, что такое значение характеризует «испорченное» изображение. Структурный индекс подобия снизил свое значение относительно предыдущих вариантов, однако этого недостаточно, для адекватной оценки качества маркирования пространственными методами. Для того чтобы определить на сколько влияет тип изображения-контейнера на качество получаемого стегаконтейнера, необходимо обратиться к гистограмме на рис. 3.



**Рис. 2.** Искажение изображения при увеличении количества бит кодирования: а) исходное изображение; б) маркированное изображение, модель 1-1-1 - з) модель 7-7-7



**Рис. 3.** Гистограмма значение PSNR для каждой модели размещения

Из диаграммы видно, что два первых типа изображения (сильно и средне текстурированные) не зависимо от модели имеют приблизительно равные значения. Мало текстурированное изображение имеет подобные показания для моделей до трех бит (как можно видеть из рис. 2, модели до трех бит не содержат визуальных помех), а далее метрика *PSNR* дает оценку ниже остальных. Следовательно, для нанесения ЦВЗ можно использовать изображения любого типа, если при выборе модели размещения соблюдается основной принцип стеганографии – незаметность скрываемой информации.

#### **Выводы**

–метрика структурного подобия *SSIM* не состоятельна в оценке пространственных методов нанесения ЦВЗ;

–изображение при маркировании начинает «портиться» с замещения четырех и более незначущих бит любой компоненты цвета пикселя. Если сообщение скрывается в трех и меньше младших битах – оно визуально не заметно, так как шум минимален.

–малотекстурированные изображения более восприимчивы к встраиванию цифровых водяных знаков, чем другие типы изображений.

#### **Список литературы**

1. С. Н. Борисова. Оценка качества стеганосистемы // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. 2013. № 10(14). С. 16.

2. В. Г. Грибунин, И. Н. Оков, В. И. Туринцев. Цифровая стеганография. М.: СОЛОН-Пресс, 2002. С. 272.

3. Z. Wong, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, E.P. Simoncelli. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing, 2004. P. 600–612.

**УДК 004.932.2**

## **УСТРАНЕНИЕ РАЗМЫТИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВИДЕОКАМЕРЫ**

В. В. Буряченко

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет им. академика

М. Ф. Решетнева»

Институт информатики и телекоммуникаций

e-mail: [buryachenko@sibsau.ru](mailto:buryachenko@sibsau.ru)

Проведен обзор методов устранения размытия, возникающего при движении видеокамеры и объектов в кадре. Предложен метод оценки размытости кадра видеопоследовательности на основе градиентной оценки изображения. Разработан метод устранения размытия объектов для видеопоследовательностей, основанный на разделении изображения на гладкие и детализированные регионы и применения к ним анизотропного фильтра Гаусса и нерезкого маскирования по направлению движения.

*Ключевые слова:* размытие изображения, оценка движения, стабилизация видеопоследовательности.

#### **Введение**

При съемке видеопоследовательности часто возникают негативные эффекты, связанные с размытостью кадра. Это может быть вызвано как нестабильным движением камеры, так и движением объектов в кадре. Размытие объектов уменьшает

эффективность работы алгоритмов оценки движения, стабилизации видеопоследовательностей, потому что делает менее надежным расчет особенных точек на изображении. Кроме того при размытии движения ухудшается визуальное качество изображения при восприятии человеком.

В некоторых работах устранение размытия применяется совместно со стабилизацией видеопоследовательностей [11, 2], которые предназначены для сглаживания движения камеры при дрожании видеопоследовательности. Хотя эти подходы успешно выполняют стабилизацию содержания, они не влияют на эффект размытия одного или нескольких кадров. Большинство систем стабилизации видеопоследовательности основаны на отслеживании точечных особенностей для оценки движения камеры. Однако, отслеживание особенностей часто ненадежно в связи с отсутствием достаточного числа резких особенностей изображения. Поэтому восстановление резких кадров на основе размытых по причине движения камеры важно для достижения хороших результатов стабилизации. По этой причине авторы [3] считают, что устранение размытости кадров должно выполняться до применения алгоритмов стабилизации видеопоследовательности. Это противоречит предыдущим работам по устранению размытости [4], где простая технология устранения размытия применялась после того, как входная видеопоследовательность стабилизировалась.

### **Предлагаемый метод устранения размытия**

При движении камеры на видеопоследовательности возникают нежелательные эффекты, а именно размытие движущихся объектов и недостаточная четкость объектов заднего плана. Для повышения качества размытых кадров разработан метод, использующий анизотропный фильтр Гаусса с адаптивным автоматическим подбором обрабатываемых регионов в кадре. При движении камеры и наличии движущихся объектов сложно определить значение ядра размытия, т. к. направление размытия может быть различным на одном кадре. Усовершенствованный метод устранения размытия движущихся объектов состоит из следующих шагов:

1. Оценка размытости кадров видеопоследовательности на основе градиентной информации.
2. Разделение изображения на детализированные и гладкие регионы.
3. Нахождение контурной информации с применением фильтра Робертса.
4. Применение фильтра Гаусса для детализированных регионов с автоматическим подбором маски обработки.
5. Применение нерезкого маскирования для гладких регионов.
6. Синтез результирующего изображения.

Следует учесть, что размытие изображения происходит только при определенных условиях, таких как сильное дрожание, быстрое движение объектов или длительная экспозиция камеры. Следовательно, не все кадры подвержены данному эффекту, и требуется определить, какие кадры являются размытыми.

### **Оценка размытости кадра**

Оценка четкости изображения выполняется на основе градиентной информации по всему текущему кадру и заданному порогу размытия  $T$ . Тогда степень размытости текущего кадра  $g_n$  оценивается по формуле:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_n^2(I_{i,j}) < T \times \max \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{n-K}^2(I_{i,j}), \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{n-(K+1)}^2(I_{i,j}), \dots, \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{n-1}^2(I_{i,j}) \right\}, \quad (1)$$

где  $T$  – порог размытия  $0 \leq T \leq 1$ ;  $g_n$  – значение градиента функции, описывающей изображение  $I(i, j)$ ;  $I(i, j)$  – значение функции интенсивности в точке с координатами  $(i, j)$ ;  $K$  – номер предыдущего опорного кадра.

Оценка размытости кадра по предложенной формуле (1) осуществляется при условии, что некоторые из предыдущих  $n$  кадров сцены являются резкими. Примеры найденных кадров с высокой и низкой размытостью представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Примеры кадров видеопоследовательности «Sam\_1.avi»: а), б) – кадры 59 и 68 с высокой и низкой резкостью соответственно; в), г) – увеличенные участки кадров**

### Разделение изображения на гладкие и детализированные регионы

На втором шаге осуществляется разделение изображения на детализированные и гладкие регионы. Оно выполняется за счет оценки суммы квадратов разностей интенсивности в области обработки размером  $5 \times 5$  пикселей по формуле (2).

$$\beta_L(x, y) = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (I_{i,j} - I_{(i+1),(j+1)})^2, \quad (2)$$

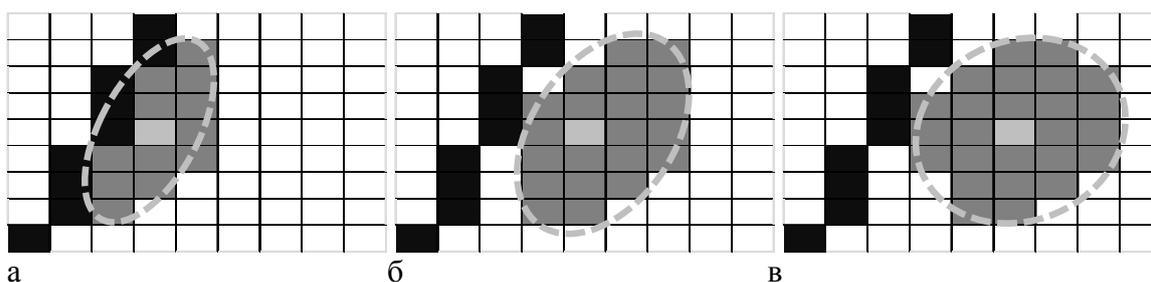
После чего изображение делится на детализированные и гладкие регионы в зависимости от значения  $\beta_L(x, y)$ . Строится бинарная карта  $F(x, y)$ , описывающая положение детализированных регионов на изображении:

$$F(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } \beta_L(x, y) < T_{fl}, \\ 1, & \text{в других случаях} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $T_{fl}$  – порог, автоматически выбираемый в зависимости от суммарного значения градиента  $g_n$ , рассчитываемого в формуле (3).

Следующим шагом является нахождение контуров объектов на изображении, которое может осуществляться фильтром Робертса. Для детализированных регионов необходимо применить анизотропный фильтр Гаусса для сглаживания негативных эффектов размытия изображения. Для этого, в зависимости от удаленности пиксела от контура, рассчитанного оператором Робертса, выбираются различные области обработки

фильтра (рис. 2). Необходимо также сохранить чёткую граничную информацию, поэтому пикселы, найденные как контуры объекта исключаются из обработки.



**Рис. 2. Пример адаптивного подбора маски для анизотропного фильтра Гаусса: а) пиксел, наиболее близкий к границе; б) пиксел рядом с границей; в) пиксел, находящийся далеко от границы**

### Фильтрация изображения для устранения размытия

Анизотропный фильтр Гаусса применяется к пикселам детализированных регионов изображения с учетом текущего значения яркости пиксела оригинального изображения, поскольку необходимо только устранить размытие изображения, сохранив при этом достаточную четкость. Параметры фильтра рассчитываются с учетом ориентации относительно границы и энергии  $\beta_L(x, y)$  области обработки. Параметры анизотропного фильтра рассчитываются путем масштабирования различным образом по направлениям  $(x, y)$ . Тогда эллиптический Гауссиан с осями, ориентированными вдоль системы координат описывается по формуле (4).

$$g(x, y; \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right\}, \quad (4)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  – разрешение фильтра Гаусса по осям координат, выбираемое в зависимости от удаленности обрабатываемого пиксела с координатами  $(x, y)$  от контура объекта в соответствии с рис. 2.

Для областей пикселов, в которых  $\beta_L(x, y) \geq T_\beta$ , и при этом они не являются граничными пикселами, применяется нерезкое маскирование для повышения резкости: фильтр, основанный на вычитании нерезкого (размытого) изображения из оригинального кадра. Нерезкое маскирование выполняется в соответствии с направлением размытия движения.

Последним шагом метода устранения размытия является синтез изображения, полученного путем применения фильтра Гаусса для детализированных регионов, нерезкого маскирования для гладких регионов и сохранения граничной информации, выделенной фильтром Робертса (рис. 3).



**Рис. 3. Повышение четкости кадра видеопоследовательности sam1.avi: а) – оригинальное изображение; б) – сглаживание анизотропным фильтром Гаусса; в) – результирующее изображение**

## Заключение

Разработан быстрый метод устранения размытия объектов для видеопоследовательностей, позволяющий повысить визуальное качество изображения, а также эффективность применяемых методов оценки движения. На основе градиентной оценки изображения на видеопоследовательности автоматически находятся наиболее размытые кадры сцены, к которым применяется устранение размытия. Метод основан на разделении изображения на детализированные и гладкие регионы, к которым применяются различные алгоритмы для сглаживания изображений объектов. К детализированным регионам применяется анизотропный фильтр Гаусса с адаптивно рассчитанной маской обработки. В гладких регионах используется нерезкое размытие по направлению движения, позволяющее минимизировать негативные эффекты размытия кадра.

## Список литературы

1. Grundmann M. Auto-directed video stabilization with robust L1 optimal camera paths / M. Grundmann, V. Kwatra, I. Essa // In Proc. CVPR 2011. P. 225-232.
2. Liu F., Gleicher M., Wang J., Jin H., Agarwala A. Subspace video stabilization // In ACM Transactions on Graphics. Vol. 30(4). 2011. Pp. 1-10.
3. Cho S., Wang J. Video Deblurring for Hand-held Cameras Using Patch-based Synthesis // ACM Transactions on Graphics. Vol. 31. No. 4/64. 2012.
4. Matsushita Y., Ofek E., Ge W., Tang X., Shum H.-Y. Full-Frame Video Stabilization with Motion Inpainting. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 28. No. 7. 2006. Pp. 1150-1163.

УДК 551.326.7, 621.396.969

## МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МОРСКОГО ЛЬДА В АРКТИКЕ ПО СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ

Н. Ю. Захваткина<sup>(1,2)</sup>, И. А. Бычкова<sup>(3)</sup>, В. А. Волков<sup>(1)</sup>

- <sup>(1)</sup>ФБГУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,  
<sup>(2)</sup> «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию  
имени Нансена» (Фонд «Нансен-центр»)  
<sup>(3)</sup> «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (АНИИ)  
e-mail: [natalia.piotrovskaya@niersc.spb.ru](mailto:natalia.piotrovskaya@niersc.spb.ru), [vladimir.volkov@niersc.spb.ru](mailto:vladimir.volkov@niersc.spb.ru),  
[bychkova@aari.ru](mailto:bychkova@aari.ru)

С применением радиолокационных данных разработана классификация морских льдов Арктики по возрасту с учетом региональных особенностей видов льдов для разных секторов Арктики с использованием метода Байеса. Оценка априорных вероятностей каждого вида льда получена с помощью анализа карт ледовой обстановки. Разработан метод автоматизированного разделения ледяного покрова и водной поверхности на основе Метода опорных векторов с использованием текстурного анализа радиолокационных изображений.

*Ключевые слова:* морские льды, арктические моря, спутник, радиолокатор с синтезированной апертурой, байесовская классификация, априорная вероятность, метод опорны векторов, текстура.

## **Введение**

Для освоения природных ресурсов Арктики необходимо совершенствовать системы мониторинга ледяного покрова арктических морей, основанные на использовании данных спутниковых наблюдений. Спутниковые системы позволяют обеспечивать потребителей оперативной информацией о ледяном покрове труднодоступных полярных районов. Для арктических регионов самым востребованным видом спутниковых данных является информация радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) – в силу всепогодности радиолокации и независимости от естественной освещенности.

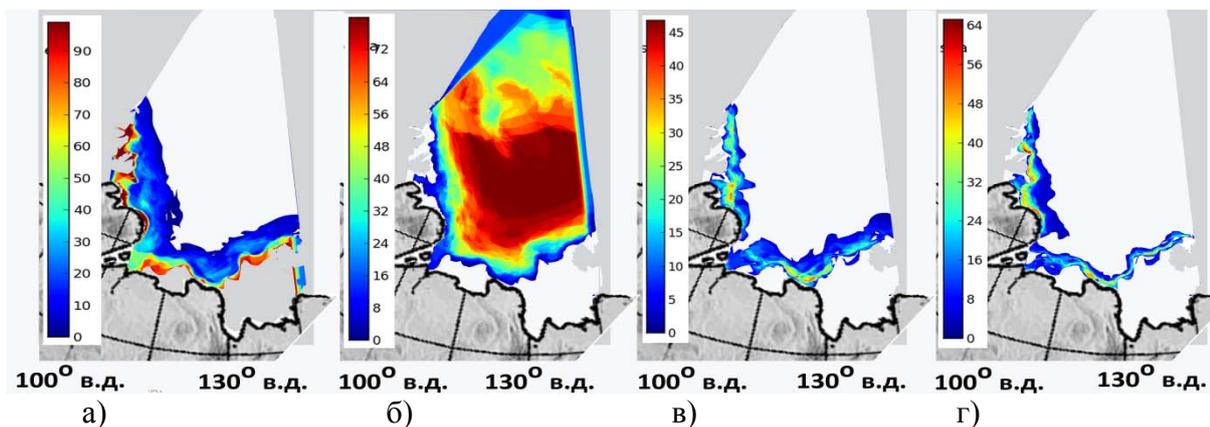
### **Спутниковые радиолокационные данные**

Классификация ледяного покрова арктических морей выполнялась в работе по данным радиолокаторов С-диапазона (5,6 см) спутника ENVISAT и RADARSAT-2 с разрешением 150 м и 100 м соответственно. Основным прямым дешифровочным признаком РСА-изображения морского льда является яркость, которая может значительно изменяться в зависимости от вида льда, его форм и шероховатости поверхности (Смирнов и др., 2010; Спутниковые методы, 2011). В задачах классификации льдов широко применяются методы, основанные на статистическом анализе двумерных полей, в частности такие методы, как байесовская классификация, нейронные сети, метод опорных векторов (Zakhvatkina, Alexandrov, 2013). Такие методы классификации используют спутниковые данные об интенсивности отраженного сигнала, переведенные в значения удельной эффективной площади рассеяния поверхностей (УЭПР). Применение УЭПР при использовании спутниковых изображений позволяет перейти от относительных значений интенсивности рассеянного поверхностью сигнала к абсолютным, что, в свою очередь, обеспечивает сравнение разновременных изображений морского льда, выявление динамических изменений в структуре ледяного покрова.

### **Классификация льдов по возрасту: метод Байеса**

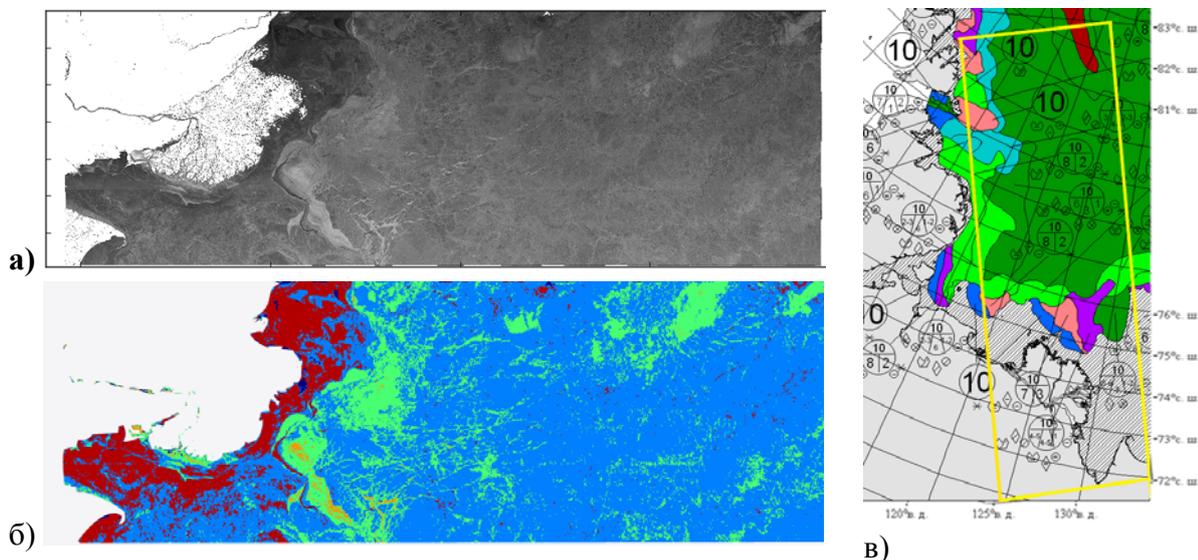
Под классификацией понимается отнесение объектов наблюдений к одному из заранее известных классов. Классификация по Байесу относится к методам «обучения с учителем», называемым контролируемым или управляемым обучением. Отличие байесовской классификации от других методов классификации состоит в том, что она исходит из известной заранее априорной вероятности существования объекта данного класса. Еще одно ограничение методики состоит в необходимости знания достоверных значений апостериорных вероятностей для каждого вида льда в конкретном районе (Zakhvatkina, Alexandrov, 2013). С использованием метода Байеса разработан алгоритм классификации льдов по возрасту с учетом региональных особенностей этих видов льдов для разных секторов Арктики для данных, получаемых с РСА ENVISAT и RADARSAT-2.

Для успешного применения на практике правила Байеса необходимо с наилучшей точностью знать условные плотности распределения и априорные вероятности существования конкретных ледяных образований в данном регионе в данный период года. Для оценки априорной вероятности использовались статистические оценки, полученные по выборке из карт ледовой обстановки, подготовленных в ААНИИ на основании регулярных спутниковых данных последних лет ([www.aari.ru](http://www.aari.ru)). Возрастные градации льда на этих картах были определены ледовыми экспертами. Анализ карт ледовой обстановки в арктических морях позволил построить сезонные и ежемесячные карты априорных вероятностей основных видов льдов (многолетнего, нескольких стадий развития однолетнего, молодого и начальных) для нескольких частей Арктики, в том числе моря Лаптевых (рис. 1). Карты были построены путем осреднения сплоченности льдов для каждого месяца за период с 2008 по 2012 гг.



**Рис. 1. Распределение средневзвешенной сплоченности (в процентах) основных видов льда в море Лаптевых в апреле, построенное по данным комплексных карт ледовой обстановки АНИИ за 2008-2012 гг. а) однолетний тонкий лед; б) однолетний средний и толстый лед; в) молодой лед; г) нилас и начальные виды льда. Отсутствие льда данного типа соответствует белому цвету. Зоны припайного льда не выделялись**

На рис. 2 приведен пример байесовской классификации льда на РСА-изображении ENVISAT. При классификации льда по спутниковым радиолокационным снимкам условные плотности распределения значений УЭПР (апостериорные вероятности) определялись по участкам рассматриваемых видов льдов, выделенных визуально на калиброванных изображениях, и были взяты как «характерные» для заданной части Арктики. Результат классификации оценивался на основе визуальной интерпретации и путем сравнения с ледовой картой АНИИ.



**Рис. 2. Классификация Байеса по РСА-изображению с ИСЗ ENVISAT, 11 апреля 2011 г. : а) Калиброванное РСА-изображение; б) результат классификации. Синий – однолетний средний или толстый лед; зеленый – однолетний тонкий лед; оранжевый – молодой лед; коричневый – вода/нилас. В данном случае припай не выделялся отдельным классом, поэтому был отнесен к воде\нилас. в) фрагмент региональной ледовой карты АНИИ, 05 апреля 2011 г. Зеленый – толстый однолетний; светло-зеленый – тонкий однол.; синий – однолетний средний; розовый – серый; сиреневый – молодой; синий – нилас**

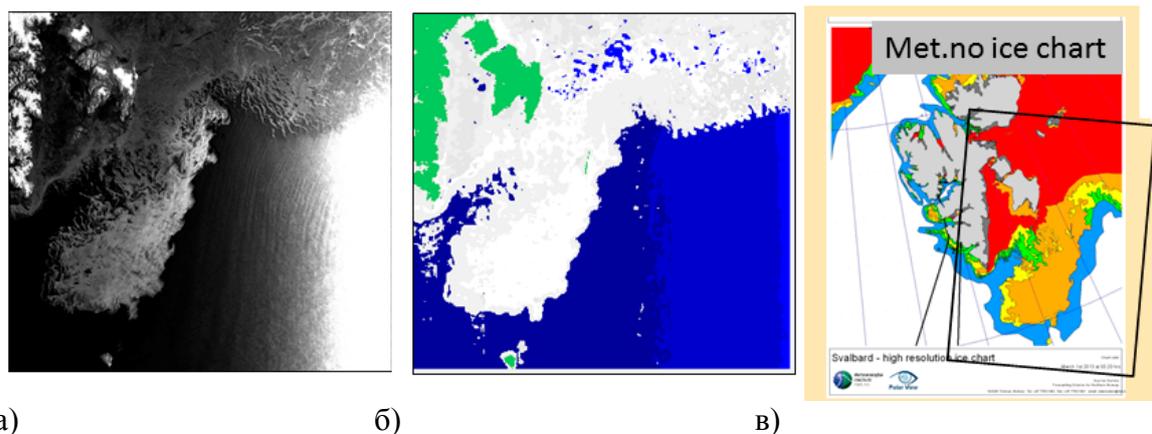
### Разделение лед/водная поверхность

Открытая водная поверхность при сильном ветровом волнении в микроволновом диапазоне может иметь такие же рассеивающие свойства как серый, серо-белый или многолетний лед. Спокойная водная поверхность на радиолокационных изображениях проявляется как зона низкого отраженного сигнала – имеет темный тон, практически такой же как в случае наблюдения однолетнего тонкого льда.

В условиях сильного ветра и развитого волнения, распознавание пространств открытой воды на фоне льдов значительно облегчается при использовании РСА-изображений с двумя поляризациями (ГГ и ГВ), благодаря возникающей значительной разнице в сигнале от воды и льда (Geldsetzer and Yackel, 2009; Yu et al., 2012).

В рамках нескольких международных проектов, совместно с Фондом «Нансен-центр» в г. Санкт-Петербурге и г. Берген, для разграничения на спутниковых снимках пространств, занятых льдом и свободных ото льда, был разработан классификатор, основанный на различии в поляризационных свойствах воды и льда. Классификатор основан на методе опорных векторов и предполагает работу в автоматизированном режиме (Leigh et al., 2014).

Классификация методом опорных векторов относится к классу методов «обучения с учителем». В задаче распознавания формируются векторы образцов каждого класса (льда и воды) – объекты, про которые заранее известно к какому классу они принадлежат. Метод опорных векторов заключается в построении оптимальной разделяющей гиперплоскости. Точность классификации определяется некоторой геометрической линией (в общем случае – оптимальной разделяющей гиперплоскостью), расстояние от которой до каждого класса максимально, т. е. разделяет классы наилучшим образом. Вектора, лежащие ближе всех к разделяющей гиперплоскости, называются опорными векторами.



**Рис. 3.** Пример автоматизированной классификации РСА-изображения, полученного с RADARSAT-2, 01 марта 2013 г. а) исходное РСА-изображение; б) результат классификации. Синий – вода; белый – лед; зеленый – земля. в) фрагмент ледовой карты НМИ, 01 марта 2013 г. Сплоченность: красный – 9\10 – 10\10, оранжевый - 7\10 – 9\10, желтый - 4\10 – 7\10, зеленый - 4\10 – 1\10, синий – вода

Для разделения классов «лед» и «вода» обучающие вектора классификатора формируются по данным, полученным с помощью текстурного анализа. Для реализации классификатора осуществляется анализ текстурных характеристик РСА-изображений, основанный на расчете матриц совместной встречаемости. Метод опорных векторов, примененный для автоматизированного разделения объектов

лед / вода на спутниковых радиолокационных снимках RADARSAT-2 в проливе Фрама (рис. 3), показал хорошее совпадение результатов классификации с экспертным анализом ледовой обстановки. Точность разделения «лед\вода» при сравнении с данными ледовыми картами Норвежского Метеорологического Института (НМИ) составила 94 % при анализе результатов автоматизированной классификации РСА-изображений за период с 1 марта 2013 до 15 ноября 2013 гг. (2778 РСА-изображений). Результаты автоматизированной классификации представлены на <http://web.nersc.no/project/maires/sadweb.py>.

### **Заключение**

Современные радиолокационные спутники позволяют обеспечить потребителей оперативной информации о состоянии ледяного покрова в конкретном районе моря, о наличии полыней и разводий, месте нахождения и направлении дрейфа опасных ледяных образований. Такая информация востребована в настоящее время и используется для прокладки оптимального маршрута судов в Арктических морях, ледового менеджмента при ведении буровых работ на шельфе и при эксплуатации месторождений углеводородов.

### **Список литературы**

1. Zakhvatkina N., V. Alexandrov, O.M. Johannessen, S. Sandven, I. Frolov. Classification of sea ice types in ENVISAT synthetic aperture radar images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 51, issue 5. 2013. Pp. 2587–2600. 10.1109/TGRS.2012.2212445.
2. Смирнов В.Г., Бушуев А.В., Бычкова И.А., Захваткина Н.Ю., Лошилов В.С. Спутниковый мониторинг морских льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2(85). С. 62–76.
3. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ. 2011. 246 с.
4. Geldsetzer, T. and Yackel, J. J.: Sea ice type and open water discrimination using dual co-polarized C-band SAR // Canadian Journal of Remote Sensing. 35, 73–84. 2009. Pp. 2598–2613.
5. Yu P., A.K.Qin, David A. Clausi. Feature extraction of dual-pol SAR imagery for sea ice image segmentation // Canadian Journal of Remote Sensing. 38(03). 2012. Pp. 352–366.
6. Leigh, S.; Zhijie Wang; Clausi, D.A. Automated Ice–Water Classification Using Dual Polarization SAR Satellite Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol.52, no. 9. Sept. 2014. Pp.5529 -5539. doi: 10.1109/TGRS.2013.2290231.

**УДК 528.72:004.93**

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ТЕРРИТОРИИ ЗАСТРОЙКИ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ**

А. О. Потатуркин, С. М. Борзов  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
e-mail: [sgnl\\_05@mail.ru](mailto:sgnl_05@mail.ru), [borzov@iae.nsk.su](mailto:borzov@iae.nsk.su)

Определены пространственные признаки, обладающие наибольшей эффективностью при выделении антропогенных территорий на спутниковых изображениях среднего разрешения.

Предложен и продемонстрирован комбинированный метод обнаружения изменений территории застройки по разновременным многоспектральным данным спутника SPOT-4.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, обнаружение изменений, спектральные и пространственные признаки.*

**Введение.** При автоматизированной обработке многоспектральных цифровых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) наибольшую популярность приобрели подходы, основанные на попиксельном анализе соотношений спектральных компонент. Однако при этом отмечается, что опытный дешифровщик с успехом решает большинство задач классификации основываясь лишь на монохромных изображениях, т. е. с использованием исключительно данных о пространственном распределении яркости. Этот факт заставляет исследователей направлять значительные усилия на разработку подходов к включению пространственных признаков изображений в процесс автоматизированной интерпретации данных с целью повышения его эффективности.

В частности, авторами в предыдущих работах предложен метод выделения антропогенных территорий на основе анализа структурных признаков спутниковых изображений высокого пространственного разрешения [1]. Показано, что для этой цели целесообразно формировать признаки, характеризующие число и параметры особых точек, выделенных детектором Харриса [2]. При этом установлено, что с уменьшением разрешения эффективность данных признаков резко падает [3]. По этой причине в рамках настоящей работы была поставлена задача определить наиболее эффективные пространственные признаки для разделения антропогенных и природных зон на изображениях среднего разрешения и на этой основе разработать метод обнаружения изменений в застройке путем обработки разновременных спутниковых данных.

**Метод обработки данных.** Предлагаемый метод обнаружения антропогенных изменений на поверхности Земли по данным ДЗЗ в качестве базового использует технологию CBAD (cluster-based anomaly detector) [4], заключающуюся в сегментации базового (более раннего) изображения и оценке в тестируемом (более позднем) изображении параметров распределений пикселей, находящихся в границах сформированных сегментов. К изменившимся пикселям будут отнесены те, которые отклонены от центров соответствующих распределений более чем на  $3\sigma$ . Данный подход при обнаружении изменений в застройке имеет ряд существенных преимуществ, как над классическими разностными методами, так и над пост-классификационными. В первую очередь это большая стабильность при обработке изображений, полученных с различных аппаратов в разных условиях освещения, а также при наличии естественных суточных и сезонных изменений наблюдаемых сцен.

Практическая реализация указанной технологии при решении задач обнаружения вновь возводимых объектов застройки по разновременным изображениям показала, что она характеризуется большим количеством ложных обнаружений. Помимо объектов строительства, обнаруживаемых по наличию участков вскрытых грунтов и снижению количества растительности, происходит выделение территорий, относящихся к землям сельскохозяйственного назначения (при проведении на них соответствующих работ), схожих с обнаруживаемыми объектами по спектральным признакам. Другим источником ошибок являются небольшие изменения площади и яркостных параметров ранее существующих антропогенных объектов. Подобные изменения в данном случае интереса также не представляют.

Для устранения указанных ошибок на предварительном этапе обработки с использованием пространственных признаков осуществляется выделение антропогенных территорий на базовом и тестируемом изображениях. С целью определения наиболее

эффективного при решении поставленной задачи пространственного признака было проведено исследование на тестовой выборке фрагментов.

Сравнивались традиционные статистические признаки первого и второго порядка [5], структурные признаки на основе детектора Харриса [2], а также признак, характеризующий максимальный угол обзора, через который для каждого пикселя может наблюдаться окрестность, не заслоненная другими пикселями контура [6]. Последний признак считается следующим образом:

- на фрагменте проводится выделение границ (например, оператором Canny);
- для каждого выделенного пикселя все выделенные пиксели в окрестности  $n \times n$  сортируются против часовой стрелки, после чего находится максимальный угол  $\phi$  между двумя ближайшими по сортировке пикселями (рис. 1);
- обнуляются все пиксели, значение  $\phi$  которых больше заданного порога;
- количество оставшихся выделенных пикселей является значением данного признака.

В качестве тестовых были использованы по десять фрагментов изображений спутника SPOT-4 для природных и антропогенных зон размером  $50 \times 50$  пикселей. Для каждого фрагмента было вычислено значение каждого признака. Затем на основе полученных данных была проведена оценка разделимости по классам природных и антропогенных зон на основе метода Неймана-Пирсона [3]. По результатам исследования лучший результат (наибольшую разделимость) с коэффициентом 9 продемонстрировал метод поиска максимального угла обзора, тогда как следующий по эффективности признак (контраст по матрице смежности Харалика) обладает коэффициентом 4.9.

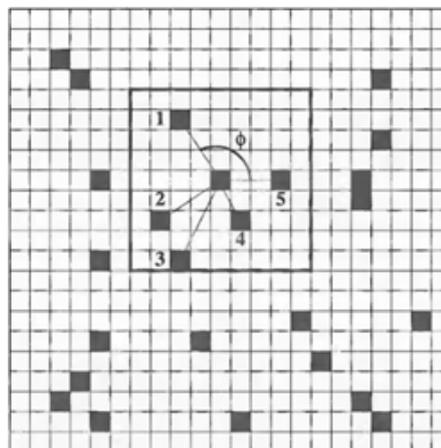
Далее, на базовом изображении из пикселей, отнесенных к антропогенным территориям, исключаются пиксели с высоким значением вегетационного и водного индексов (т. е. растительность и вода) и формируется маска антропогенных объектов [7]. Маска природных зон тестируемого изображения формируется из пикселей, не отнесенных к антропогенной территории на более позднем изображении.

Сформированные таким образом маски на заключительном этапе обработки применяются к карте изменений, полученной с использованием технологии CBAD, и маскируют значительную часть ложных обнаружений.

**Экспериментальное исследование.** Предложенный метод исследован на примере обнаружения объектов в окрестности города Барнаул (Алтайский край) по многоспектральным данным спутника SPOT-4. На рис. 1, а, б приведены два одновременных изображения земной поверхности, полученные 28 августа 2010 г. и 1 августа 2011 г. соответственно. С учетом размеров обрабатываемых изображений  $2000 \times 2000$  пикселей и разрешения снимков 20 м. Общая площадь контролируемого участка составляет  $1600 \text{ км}^2$ .

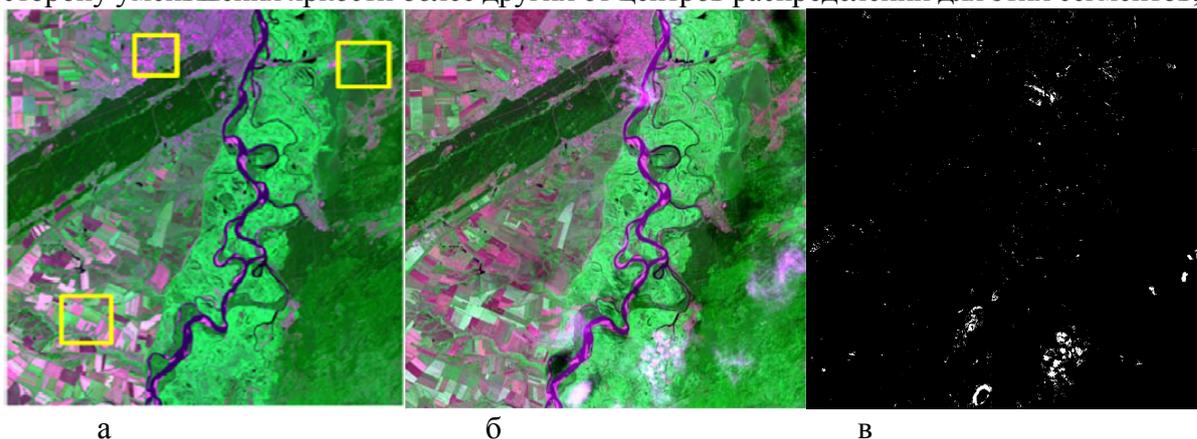
Для представленных изображений в соответствии с изложенным выше методом:

- формируются маски антропогенных объектов по базовому изображению и маски природных зон по тестируемому;
- с использованием метода максимального правдоподобия выполняется контролируемая сегментация базового изображения;
- в границах сформированных сегментов на тестовом изображении определяются пиксели, отклонившиеся в красном (R) и в коротковолновом инфракрасном (SWIR)



**Рис. 1. Максимальный угол обзора  $\phi$**

каналах в сторону увеличения или в зеленом (G) и в ближнем инфракрасном (NIR) в сторону уменьшения яркости более других от центров распределений для этих сегментов;

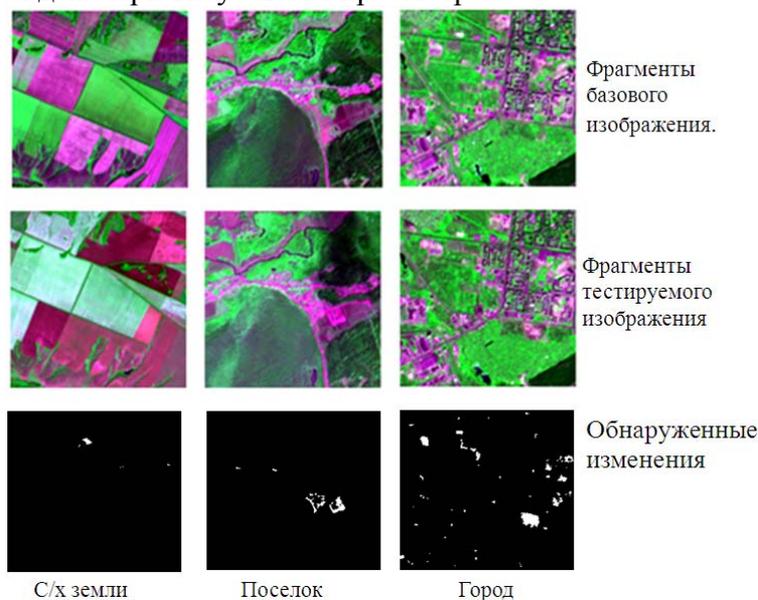


**Рис. 2. Исходные разновременные изображения (а, б), обнаруженные изменения (в)**

- в полученной карте изменений маскируются пиксели, отмеченные в маске антропогенных объектов опорного изображения или в маске природных зон тестируемого.

Выделенные в результате выполнения указанных процедур изменения показаны на рис. 2, в. Следует отметить, что наиболее существенные по площади отметки обусловлены появлением на тестируемом изображении облаков. Эта проблема в рамках данной работы не рассматривалась, поскольку она легко решается при наличии ряда последовательных разновременных изображений.

Результаты обработки отмеченных на рис. 2, а фрагментов представлены на рис. 3. Первый фрагмент содержит земли сельскохозяйственного назначения. На данной территории произошли существенные изменения, однако в контексте решаемой задачи они выделению не подлежат. Второй – изображение коттеджного поселка, который расширяется на прилегающей территории. Третий – относится к зоне плотной застройки, здесь также наблюдается появление новых объектов. Выполнение перечисленных процедур позволило обнаружить на поверхности Земли изменения, связанные со строительством новых объектов, определение которых является непростой задачей даже при визуальном просмотре.



**Рис. 3. Обнаруженные изменения на тестовых фрагментах изображений**

**Заключение.** Исследована эффективность различных пространственных признаков при разделении природных и антропогенных территорий по спутниковым данным среднего разрешения. Показано, что лучшие результаты достигаются при использовании признака, характеризующего максимальный угол свободного обзора. На этой основе разработан метод обнаружения антропогенных изменений на поверхности Земли, сочетающий обработку спектральных и текстурных признаков. На первом этапе производится сегментация базового изображения по спектральным признакам и формирование пространственных масок антропогенных объектов в базовом и природных зон в тестируемом изображениях с учетом их текстурных характеристик. На втором – в тестируемом изображении в границах сформированных сегментов выделяются пиксели, отклонившиеся более других от центров распределений и не отмеченные ни одной из масок. Данный метод позволяет выполнить обнаружение изменений на поверхности Земли, вызванных строительством новых объектов, не прибегая к трудоемкой и требующей большого объема обучающих выборок детальной классификации изображений.

### **Список литературы**

1. Борзов С.М., Нежевенко Е.С., Потатуркин О.И. Поиск объектов неприродного происхождения с использованием их структурных особенностей // *Автометрия*. № 5. 2010. С. 36–42.
2. Harris C. and Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector // *Proceedings of The Fourth Alvey Vision Conference*. 1988. Manchester. Pp 147–151.
3. Борзов С.М., Потатуркин А.О. Исследование эффективности пространственных признаков при классификации спутниковых изображений различного масштаба // *Вестник НГУ. Серия «Информационные технологии»*. № 3. 2012. С. 58–65.
4. Carlotto, M.J., 2005. A Cluster-Based Approach for Detecting Man-Made Objects and Changes in Imagery // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 43(2). Pp. 374–387.
5. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // *ТИИРЭ* 5. 1979. С. 98–118.
6. M. Petrou, P. Gacia. *Sevilla Image Processing Dealing with Texture*. Wiley, New York, 2006. 618 p.
7. Борзов С.М., Козик В.И., Потатуркин О.И. Поиск объектов неприродного происхождения на основе многоспектральной обработки данных дистанционного зондирования Земли // *Автометрия*, 2010. № 6. С. 9–15.

**УДК 004.932**

## **АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ВИЗУАЛЬНЫХ СЛОВ**

А. В. Проскурин

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. академика М. Ф. Решетнева»

Институт информатики и телекоммуникаций

e-mail: [Proskurin.AV.WOF@gmail.com](mailto:Proskurin.AV.WOF@gmail.com)

В статье предложен алгоритм формирования визуальных слов без обучения с учителем, состоящий из трех основных частей: сегментации изображений, извлечения признаков изображений, кластеризации векторов признаков. Представлены экспериментальные результаты исследования алгоритма и его основные преимущества.

*Ключевые слова:* автоматическое аннотирование, визуальные слова.

## 1. Введение

В последнее десятилетие во многих областях человеческой деятельности наблюдается резкий рост генерации изображений. В связи с этим встает вопрос об их эффективном поиске. Мощным инструментом для решения этой проблемы является системы поиска на основе автоматического анализа содержания изображения, в которых поиск осуществляется с помощью сравнения низкоуровневых признаков (таких как цвет или текстура). При этом пользователю, как правило, необходимо предоставить изображение-запрос, концепция которого соответствует желаемому результату поиска. Также в последнее время активно исследуется подход к автоматическому аннотированию изображений (ААИ) на основе их содержания. В данном подходе на основе обучающих изображений автоматически определяется семантическая модель, при помощи которой новым изображениям присваиваются ключевые слова.

Основой многих методов анализа содержания изображений и почти всех методов ААИ является представление изображений в виде наборов визуальных слов [1]. Большинство предложенных алгоритмов формирования визуальных слов основано на кластеризации низкоуровневых признаков изображений алгоритмом  $k$ -средних, что приводит к трем основным проблемам: необходимо заранее указывать количество кластеров; начальная инициализация центров кластеров сильно влияет на результат кластеризации; при добавлении новых данных необходимо проводить кластеризацию с самого начала. Для решения этих проблем предлагается алгоритм формирования визуальных слов без обучения с учителем, характерной чертой которого является автоматическая адаптация под новые данные в процессе дополнительного обучения.

## 2. Описание алгоритма

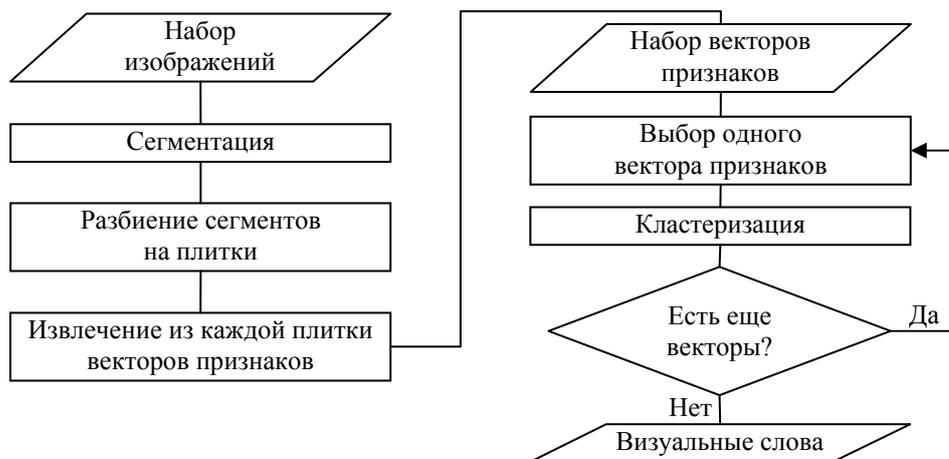
Предложенный в этой работе алгоритм формирования визуальных слов условно можно разделить на три этапа: сегментирование набора изображений, извлечение векторов низкоуровневых признаков, кластеризация полученных векторов. Рассмотрим каждый этап подробнее.

На первом этапе осуществляется разбиение изображений на однородные области. Для этого предлагается использовать двухуровневое сегментирование: вначале все изображение делится на сегменты с помощью какого-либо алгоритма автоматической сегментации (например, алгоритма нормальных разрезов), после чего каждый сегмент разбивается на максимально возможное количество прямоугольных плиток. Такая сегментация имеет ряд преимуществ. Во-первых, полученные области более однородны, чем при использовании алгоритма автоматической сегментации и разбиения изображения на плитки по отдельности. Во-вторых, полученные области имеют прямоугольную форму, что требуется для извлечения многих низкоуровневых признаков (в результате работы алгоритмов автоматической сегментации сегменты имеют произвольную форму). В этом исследовании в качестве автоматического алгоритма сегментации использовался алгоритм JSEG [2], а размер извлекаемых плиток установлен равным  $16 \times 16$  пикселей.

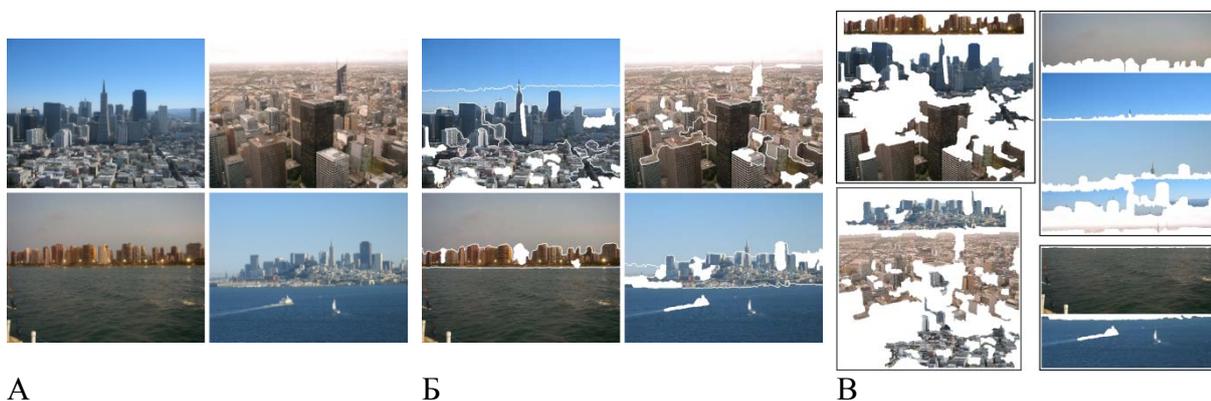
На втором этапе каждая полученная область описывается с помощью набора визуальных признаков. При этом основными считаются цветовые и текстурные (признаки формы малоинформативны в связи с большим разнообразием объектов, их размеров и проекций). Также полезными являются фрактальные признаки, характеризующие статистическое самоподобие объектов. Более подробно ознакомиться с использованным вектором признаков можно в работе [3].

На последнем этапе полученные векторы низкоуровневых признаков кластеризуются, таким образом формируя визуальные слова. Для этого предлагается использовать расширенную самоорганизующуюся растущую нейронную сеть

(ESOINN) [4]. ESOINN состоит из одного слоя, который постепенно подстраивается под структуру входных данных, определяя количество кластеров и их топологию. Использование ESOINN позволяет избавиться от недостатков большинства существующих алгоритмов формирования визуальных слов, основанных на алгоритме  $k$ -средних. Во-первых, ESOINN начинает кластеризацию с двух случайным образом выбранных векторов, выбор которых слабо влияет на последующую кластеризацию. Во-вторых, ESOINN автоматически определяет количество кластеров. В-третьих, ESOINN обучается последовательно – при добавлении новых данных нет необходимости в повторной кластеризации всех данных. Последняя особенность позволяет создавать ААИ системы, которые можно «дообучать» в течение жизненного цикла, что особенно важно в сети Интернет. Оригинальный алгоритм ESOINN в этом исследовании был модифицирован таким образом, что количество начальных узлов выбирается равным среднему количеству сегментов, полученных после первого шага сегментации. В дальнейшем будем называть данную модификацию как dESOINN.



**Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования визуальных слов без обучения с учителем**



**Рис. 2. Пример визуальных слов, сформированных с помощью dESOINN: а) оригинальные изображения; б) сегментированные изображения с удаленными небольшими регионами; в) визуальные слова**

Определение точности заключалось в вычислении параметра *precision*:

$$precision = \frac{1}{C} \cdot \sum_{i=1}^C \frac{B_i}{A_i}, \quad (1)$$

где  $C$  – количество кластеров;  $A_i$  – количество сегментов в  $i$ -м кластере;  $B_i$  – количество визуально однородных сегментов, составляющих большинство в  $i$ -м кластере.

Вычисления повторялись 100 раз, после чего точность усреднялась. В качестве параметра «число кластеров» выбиралось наиболее частое значение. Для алгоритма *k*-средних использовалось количество кластеров, полученное с помощью ESOINN.

Для экспериментов использовался компьютер со следующими параметрами: материнская плата PC Acer JM50-HR, процессор Intel Core i5-2430M 2,4 ГГц, оперативная память Kingston 1333 МГц (PC3-10700) DDR3 10 Гб. Вычисления производились с использованием одного процессорного ядра.

В таблице приведены числовые данные по количеству кластеров, точности и времени выполнения расчетов для двух алгоритмов кластеризации.

Из таблицы видно, что формирование визуальных слов с помощью dESOINN точнее, чем с помощью метода *k*-средних. Также полученные кластеры являются близкими к восприятию визуальных сегментов человеком. Формирование визуальных слов с помощью dESOINN для небольшого набора изображений происходит в 3–5 раз медленнее, чем с помощью метода *k*-средних. Однако их использование для кластеризации больших наборов выгодно, поскольку сеть ESOINN обучается новым данным адаптивно с сохранением предыдущих данных.

**Таблица**

**Результаты сравнения точности и времени выполнения трех алгоритмов**

Номер набора	Кол-во визуальных слов	k-means			dESOINN		
		Кол-во кластеров	Precision, %	Время, мс	Кол-во кластеров	Precision, %	Время, мс
00	5	5	65.70	66	5	<b>67.28</b>	186
01	3	5	82.34	96	5	<b>84.66</b>	182
02	5	5	62.70	58	5	<b>66.63</b>	193
03	4	4	68.51	43	4	<b>71.47</b>	182
04	3	5	83.75	89	5	<b>90.58</b>	215
05	5	6	69.03	150	6	<b>70.68</b>	236
06	4	4	71.63	58	4	<b>73.71</b>	175
07	4	4	69.97	65	4	<b>73.84</b>	251
08	6	8	66.21	142	8	<b>69.52</b>	223
09	6	6	62.82	100	6	<b>81.83</b>	232

#### 4. Заключение

В статье предложен алгоритм формирования визуальных слов без обучения с учителем, состоящий из трех этапов: сегментирования изображений, извлечения векторов низкоуровневых признаков и кластеризации полученных векторов. Этап сегментации предложено разделить на два шага: автоматическую сегментацию алгоритмом JSEG и разбиение полученных сегментов на прямоугольные области. Для описания областей используется вектор признаков, включающий цветные, текстурные и фрактальные признаки. Полученные векторы признаков затем кластеризуются с помощью расширенной самоорганизующейся растущей нейронной сети. Это позволяет решить три основные проблемы алгоритмов формирования визуальных слов, основанных на алгоритме *k*-средних: необходимость указывать количество кластеров; сильное влияние на результат кластеризации начальной инициализации центров кластеров; обучение в течение жизненного цикла с сохранением предыдущих данных.

В дальнейших работах планируется разработать быстрый алгоритм сегментации изображений на однородные прямоугольные плитки, используя локальный показатель однородности, а также модифицировать этап кластеризации для автоматического изучения семантической модели и последующего аннотирования новых изображений.

### Список литературы

1. Zhang D., Islam Md. M., Lu G. A review on automatic image annotation techniques // Pattern Recognition. Vol. 45. Issue 1. 2012. Pp. 346–362.
2. Deng Y., Manjunath B. S. Unsupervised Segmentation of Color-Texture Regions in Images and Video // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 23(8). 2001. Pp. 800–810.
3. Проскурин А. В., Формирование визуальных слов для автоматического аннотирования изображений на основе самоорганизующейся нейронной сети // 16-я междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». В 2 т. Т. 2. М., 2014. С. 487–491.
4. Проскурин А. В., Расширенная самоорганизующаяся растущая нейронная сеть для кластеризации данных в онлайн режиме // IX Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». В 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2013. С. 178–182.
5. IAPR TC-12 Benchmark [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-i6.informatik.rwth-aachen.de/imageclef/resources/iaprtc12.tgz> (дата обращения: 20.11.2013).

УДК 004.942

## МОДЕЛИ СОВМЕЩЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТОЧЕК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЛАНДШАФТНЫХ СЦЕН

А. А. Ткачева

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. академика М. Ф. Решетнева»

Институт информатики и вычислительной техники

e-mail: [tkacheva@sibsau.ru](mailto:tkacheva@sibsau.ru)

При проведении наземной лазерной съемки результатом является множество точек лазерных отражений, формирующих цифровую модель местности. Качество и точность получаемой модели зависит не только от типа применяемого сканера и плотности сканирования, но и от точности используемого алгоритма совмещения лазерных точек. В данной статье рассматривается модификация ICP-алгоритма.

*Ключевые слова:* трехмерное моделирование ландшафтных сцен, наземное лазерное сканирование, алгоритм ICP.

Для решения задач инженерной геодезии технология наземного лазерного сканирования используется все шире. По сравнению с другими методами измерений она предоставляет целый ряд преимуществ, особенно важных при реконструкции ландшафтных сцен. Топоъемка данных объектов традиционными методами требует больших трудозатрат на этапе полевых измерений. Кроме того, при использовании таких методов совсем не редки ситуации, когда отдельные измерения оказываются пропущенными или их качество вызывает вопросы. Обнаруживается это лишь на этапах камеральной обработки и, как следствие, возникает необходимость в повторных измерениях на объекте. Все это приводит к очевидным отрицательным результатам: удорожанию проекта, срыву сроков выполнения работ и непрогнозируемому качеству результатов.

Современные технологии наземного лазерного сканирования исключили подобные проблемы: сроки полевых работ значительно снизились, а съемка с одной точки охватывает все множество объектов, видимых с этой точки. При этом результаты

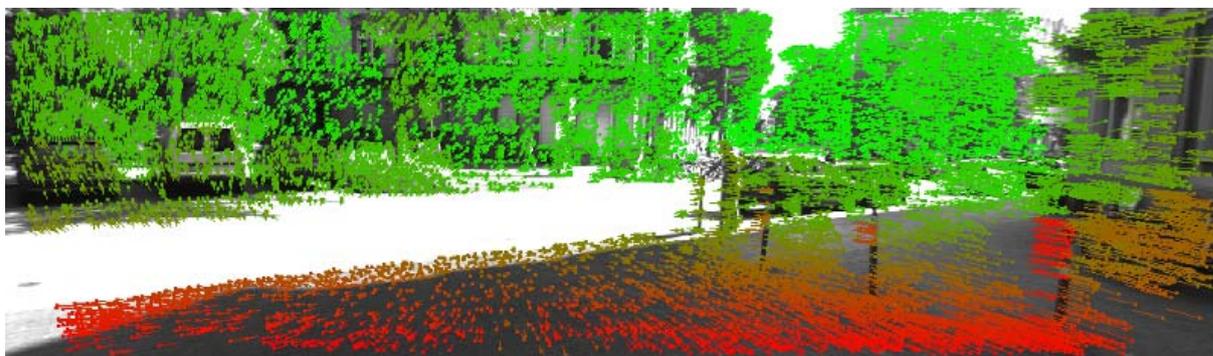
измерений существенно выше по качеству, поскольку содержат более полную информацию об объекте съемки. Результатом полевых работ с использованием лазерного сканирования являются миллионы точек (облако точек) и панорамная фотосъемка, полученные лазерным сканером на каждом месте замера. Они несут максимально полную информацию об объекте сканирования.

В рамках камеральной обработки на основе облака точек решаются самые разные прикладные задачи:

- Получение трехмерной модели объекта
- Получение чертежей (в том числе чертежей сечений)
- Выявление дефектов различных конструкций посредством сравнения с проектной моделью
- Определение и оценка значений деформации посредством сравнения с результатами измерений, произведенных ранее
- Получение топографических планов методом виртуальной съемки.

Технология камеральной обработки основе результатов лазерного сканирования реализована в различных коммерческих программных продуктах, таких как *CSoft Development*, *Micromine*, *CREDO* и др. Все эти пакеты позволяют создавать интеллектуальные модели объекта для их последующего использования заказчиком. Стоимость таких пакетов достаточно высока и они, прежде всего, ориентированы на получение моделей промышленных объектов, создание же ландшафтных сцен, в особенности моделей растительности, в данных пакетах затруднена. Это объясняется тем, что объектам природы по сравнению с антропогенными присуща некоторая хаотичность в их структуре. Поставим перед собой задачу разработки собственного алгоритма камеральной обработки облака точек объектов с ветвящейся структурой.

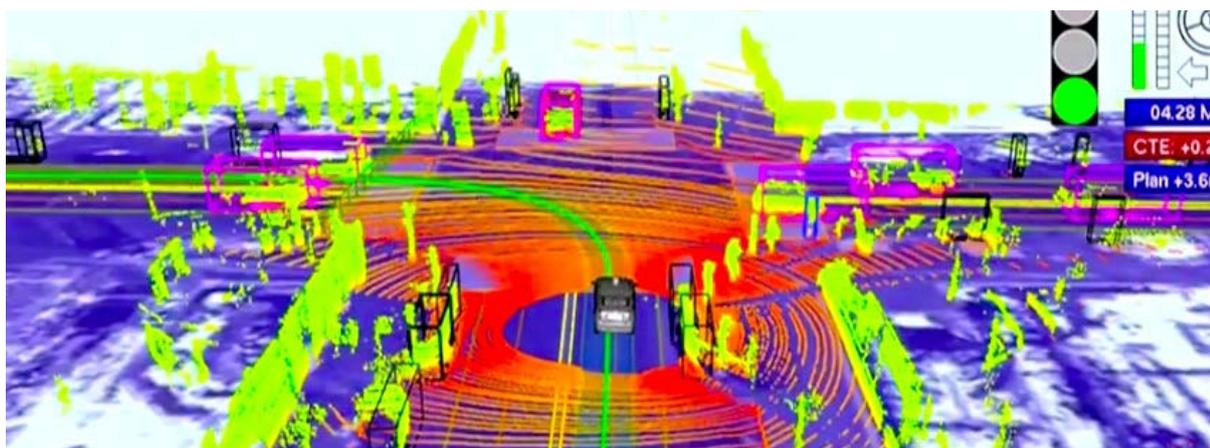
Задача восстановления трехмерной модели сцены по данным лазерного сканирования решается в Технологическом институте Карлсруэ. В рамках построения трёхмерных карт города (рис.1) используется библиотека *LibVisio2* для совмещения 3D сцен.



**Рис. 1. Трехмерная модель сцены, полученная с помощью библиотеки *LibVisio2***

Рассмотрим ещё один проект «Беспилотный автомобиль», основные идеи которого были высказаны в сентябре 2011 года компанией *Google*. Ядром системы является 64-лучевой лазерный светодальномер, установленный на крыше автомобиля. Прибор помогает сгенерировать детальную объемную карту окружающего пространства. Затем машина комбинирует измерения лазера с высокоточными картами мира и производит различные типы моделей данных, которые позволяют вести движение, избегая препятствия и проблемы с законом. Также на борту установлены другие сенсоры, включая четыре радара на переднем и заднем бамперах, камеру рядом с зеркалом заднего вида; *GPS*-датчик системы, блок инерциальных измерений и

колесный датчик, которые определяют положение транспортного средства и отслеживают движение.



**Рис. 2. Модель перекрестка, созданная компанией Google**

Данная разработка компании *Google* зависит от тщательности проработанных карт поверхности Земли, что, является неотъемлемым условием для точного определения местоположения машины. Использование системы глобальной навигации может дать погрешность в несколько метров.

Приведем описание алгоритма. Предварительный этап – получение трехмерного облака точек с наземного лазерного сканера. На практике объекты необходимо сканировать с различных углов, а затем объединить результаты в единую систему координат (данную процедуру часто называют регистрацией или взаимным ориентированием). Т.о, регистрация – это совмещения различных 3D сцен (облаков точек) в одну целостную сцену. Её целью является нахождение взаимного расположения и ориентации одного изображения сцены относительно другого, и наилучшим образом совместить перекрывающиеся области точек.

Далее необходимо выбрать алгоритм, который бы для каждого двух облаков точек, полученных при помощи сканирования изображения с разных сторон, находил оптимальное совмещение. В качестве такого алгоритма был использован алгоритм *ICP* (*iterative closest point*). Данный итеративный алгоритм состоит из трех основных шагов:

- Связка точек по критерию ближайшего соседа (поиск для каждой точки множества  $D$  пары из множества  $M$ )
- Оценка параметров преобразования с помощью функции среднеквадратичной стоимости (вычисление преобразования (смещение и поворот), минимизирующего среднеквадратичное расстояние ( $MSE$ ) между парными точками)
- Применение рассчитанного преобразования к множеству  $D$  и обновление среднеквадратичной ошибки

Задача поиска ближайшего соседа заключается в отыскании среди множества элементов, расположенных в многомерном метрическом пространстве, элементов близких к заданному согласно некоторой функции близости. Для решения этой задачи используется модель  $k-d$  деревьев.

При поиске  $n$  ближайших соседей к вектору  $q$  в построенном дереве сначала оно обходится вниз до листа содержащего «ближайшую» к  $q$  точку - первое приближение. Затем во время спуска по дереву заполняется список поддеревьев, также запоминаются расстояния до них, которое определяется как минимальное расстояние от точки  $q$  до любой точки, находящейся в границах значений поддерева. Из списка выбирается ближайшее к  $q$  поддерево и продолжается поиск в нём, расстояние до каждого нового

найденного претендента сравнивается с радиусом сферы найденных точек с центром в точке  $q$ . Если данное расстояние меньше, то точку на сфере заменяем этим претендентом. Алгоритм работает до тех пор, пока в списке есть поддеревья с расстоянием, меньшим радиуса сферы найденных точек.

На шаге оценки параметров преобразования с помощью функции среднеквадратичной стоимости алгоритм производит поиск соответствующих ближайших точек и вычисляет трансформацию (смещение и поворот):

$$E(R, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|m_i - (Rd_i + t)\|^2,$$

$$N = \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_d} \omega_{ij},$$

$$v = ((d_{1_1}, mf(d_{1_1})), (d_{1_2}, mf(d_{1_2})), \dots, (d_{1_{N_d}}, mf(d_{1_{N_d}}))),$$

где  $N_m$  и  $N_d$  – количество точек в соответствующих облаках  $M$  и  $D$ ;  $\omega_{ij}$  – веса пар точек;  $v$  – матрица соответствия точек облаков  $M$  и  $D$ ;  $f(x)$  – функция поиска, возвращающая ближайшую точку.

Значения весов определяются следующим образом  $\omega_{ij}=1$ , если  $m_i$  является ближайшей точкой к  $d_j$ , иначе  $\omega_{ij}=0$ . Предполагается, что на последнем шаге итерации нахождения соответствующих пар точек, данный вектор окажется верным.

На каждой итерации алгоритма трансформация может быть посчитана при помощи любого из четырёх методов:

- Метод *SVD* (сингулярное разложение матрицы)
- Метод кватернионов
- Метод с использованием ортонормированных матриц
- Метод, связанный с вычислением двойных кватернионов [1]

Итерации заканчиваются, когда среднеквадратичная ошибка будет мала. В данной реализации алгоритма использовался метод кватернионов. Одной из основных проблем алгоритма является ограничение области сходимости: он работает только при условии, что облака точек не сильно сдвинуты друг относительно друга. Иначе необходимо вручную задавать начальную матрицу трансформации поиска значений начального ориентирования моделей. Для решения данной проблемы Велижевым А.Б. [2–3] было предложено разбить решение задачи взаимной ориентации точечных моделей на два главных этапа:

- Оценка матрицы угловой ориентации  $R$
- Оценка вектора сдвига  $T$ .

Для оценки матрицы угловой ориентации для исходного точечного представления объекта выполнялось построение ориентационной гистограммы, обладающей важным свойством инвариантности к преобразованию сдвига. Получение ориентационной гистограммы для точечной модели требует вычисления нормалей в каждой точке. Для эффективного вычисления нормалей произвольно организованная точечная модель преобразовывается в восьмеричное дерево, каждая ячейка которого содержит исходные точки. После нахождения угловой ориентации каждая точка второй точечной модели поворачивается в соответствии с найденными углами. В результате чего, точечные модели оказываются выровненными друг относительно друга по угловой ориентации. Затем выполняется оценка сдвига с помощью сравнения воксельных представлений каждой из точечных моделей на основе дискретного преобразования Фурье.

Другой проблемой описанного алгоритма является зависимость от качества предобработки лазерных данных, возникает необходимость в использовании

алгоритмов устранения шума. Возникновение шумовых точек могут иметь различную природу, а, следовательно, применяются различные способы их устранения. Одними из наиболее часто встречающихся шумов являются «граничные». Они вызываются одновременным попаданием луча на различные поверхности, находящиеся на разном удалении. В таком случае функция, характеризующая отраженный сигнал, будет иметь два максимума, на этом основывается автоматическая фильтрация - отбраковка точек лазерных отражений, имеющих несколько локальных максимумов на функции интенсивности возвращенного сигнала.

Данная реализация алгоритма не очень эффективна в случае с сильно зашумленными входными данными. Также её применение не возможно в случае сильно повернутых сцен, так как изначальная матрица трансформации одного облака точек относительно другого не высчитывается.

### Список литературы

1. Цисарж В., Марусик Р. Математические методы компьютерной графики. Киев: Факт, 2004. 464 с.

2. Велижев, А.Б. Разработка и исследование алгоритмов автоматического взаимного ориентирования трехмерных дискретных моделей объектов, полученных в результате лазерного сканирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.34 / Велижев Александр Брониславович. М., 2008. 20 с.

3. Чибуничев А.Г., Велижев А.Б. Автоматическое сопоставление облаков точек, полученных в результате наземного лазерного сканирования, с использованием ориентационных гистограмм [Текст] // «Геодезия и аэрофотосъемка». М., 2008. № 3. С. 112–119.

УДК 519.24

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С БОЛЬШИМИ ОШИБКАМИ В ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ОЦЕНИВАНИЯ

А. Н. Рогалев<sup>(1)</sup>, А. А. Рогалев<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН

<sup>(2)</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

e-mail: [rogalyov@icm.krasn.ru](mailto:rogalyov@icm.krasn.ru), [ran@akadem.ru](mailto:ran@akadem.ru)

В статье рассматриваются задачи, в которых приходится обрабатывать измерительную информацию с аномально большими ошибками (сбоями). Исследуется метод наименьших модулей (МНМ) для решения этих задач оценивания, состоящий в минимизации  $l_1$  – нормы вектора невязки, что позволяет снизить влияние измерений со сбоями при получении искомой оценки параметров. Сравниваются подходы реализации МНМ, основанные на задаче линейного программирования, на методе внутренней точки и на методе вариационно-взвешенных квадратических приближений. Приводятся примеры решения практических задач.

Для задач обработки информации с большими ошибками ошибки измерений рассматриваются в виде процесса, не выходящего за пределы заранее заданных границ. Это направление получило название гарантированного, а впоследствии гарантирующего направления [5], [2]. Оно основано на минимаксной постановке [7], [3], [1], [2], в которой минимизация целевой функции с помощью выбора коэффициентов линейного

фильтра осуществляется на классе ошибок с произвольной корреляцией. Основные причины возникновения минимаксного направления – это недостатки и противоречия классических методов оценивания (априорного и апостериорного), основанных на гипотезе о независимости, нормальности и т.д. ошибок измерения. Практическая эффективность метода наименьших квадратов (инженеры склонны считать его математическим принципом, математики – физическим) естественным образом утвердило мнение об обоснованности использования модели независимых ошибок измерения. Выполненные затем проектные работы (в части априорного оценивания и использованием свойства состоятельности) утвердили уверенность в достижении требуемой точности путем увеличения соответствующих объемов: измерений, измерительных систем, наземных станций и т. д.

Однако состоятельность этих методов была опровергнута при апостериорном анализе [4], [6] и, в значительной степени, теми запусками космических аппаратов, для которых реальные точностные характеристики параметров движения значительно уступают проектным данным. Принцип полезности каждого измерения заменен на принцип неравноценности всего состава измерений, что привело к поиску наиболее информативных мест.

Пусть измеряется некоторая функция  $\xi_i(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$  от совокупности интересующих нас величин  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ . При желании каждое непосредственное измерение можно рассматривать как частный случай косвенного измерения, когда

$$\xi_i(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k, \dots, \theta_N) \equiv \xi_i(\theta_k) \equiv \theta_k.$$

С учетом ошибок измерений связь между результатами измерений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и неизвестными параметрами  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$  описывается следующей системой уравнений

$$\xi_i(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) + \Delta_i = x_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $\Delta_i = \Delta_i^1 + \Delta_i^2, i = 1, 2, \dots, n$ , – ошибка  $i$ -го измерения, являющаяся суммой двух основных составляющих: ошибки модели  $\Delta_i^1$  и ошибки  $\Delta_i^2$ , представляющей собой сумму всех остальных ошибок.

Из фундаментальной системы уравнений (1) отбирают ровно столько уравнений, сколько необходимо для определения неизвестных параметров. Как только получено достаточно хорошее начальное приближение  $\xi_1^{(0)}, \xi_2^{(0)}, \dots, \xi_N^{(0)}$  так сразу получается возможность некоторого упрощения исходной системы уравнений (1). Теперь при обработке измерений целесообразно отыскивать поправки  $\delta\theta_1, \delta\theta_2, \dots, \delta\theta_N$  к начальному приближению  $\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \dots, \theta_N^{(0)}$ , предполагая, что связь между измерениями, в качестве которых выступает  $\delta x_i = x_i - \xi_i^{(0)}, i = 1, 2, \dots, n$ , и искомыми поправками  $\delta\theta_j, j = 1, 2, \dots, N$

представляет собой линейную зависимость вида  $\delta x_i = \sum_{j=1}^N b_{ij}^{(0)} \delta\theta_j^{(0)}$ . При этом поправки

$\delta\theta_j$ , как правило, вычисляются при обработке данных избыточных измерений.

Метод наименьших квадратов с наибольшей точностью [4] определяет оценки при обработке измерений, имеющие ошибки, подчиненные нормальному закону. Оптимальность МНК зависит от предположения о нормальном характере распределения ошибок, а также о точных числовых характеристиках законов распределения. Если хотя бы одно из этих двух предположений нарушается, встает вопрос о сравнении МНК с другими методами получения оценок. Значительные сложности возникают при отбраковке грубых, посторонних и других аномальных измерений. Их появление вызывает отклонение полученных оценок от истинных значений определяемых параметров, при этом все последующие измерения, относящиеся к данному процессу,

могут отбраковываться как посторонние. Поэтому, чтобы убрать влияние расходимости итерационных процессов, связанные с уточнением начального приближения, целесообразно иметь подстраховывающие схемы получения оценок. К числу таких схем относятся вычислительные схемы метода наименьших модулей (минимаксного метода).

Пусть требуется найти вектор  $\theta$ , который обращает в минимум выражение

$$H(\theta) = H(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) = \sum_{i=1}^{n_1} P_i |x_i - \xi_i(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)|. \quad (2)$$

Здесь  $n_1$  – число измерений;  $x_i - k$  – мерный вектор измерений, составляющие которого  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$  будем считать некоррелированными,  $P_i$  – весовая матрица  $i$ -го измерения, уже не являющаяся обратной корреляционной матрицей ошибок измерений. Если составляющие вектора  $x_i$  коррелированы и имеют ковариационную матрицу ошибок то, проанализировав собственные значения матрицы можно найти линейное преобразование вектора  $x_i$  такое, что составляющие нового вектора будут некоррелированы. Если провести, как обычно, линеаризацию фундаментальной системы уравнений, то вместо (2) следует минимизировать выражение

$$\Phi(z) = \sum_{i=1}^{n_1} p_i \left| \delta x_i - \sum_{j=1}^N b_{ij} z_j \right|, \quad (3)$$

где  $z_j = \theta_j - \theta_j^{(0)}$ ,  $\delta x_i = x_i - \xi_i^0$ ,  $b_{ij} = \left. \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_j} \right|_{\theta = \theta^{(0)}}$ .

Поэтому в качестве весов целесообразно использовать величины, обратно пропорциональные средеквадратическим ошибкам измерения.

В докладе рассматриваются реализации двух различных способов минимизации выражения (3). Первый из них связан с использованием идей линейного программирования, а второй – с использованием вариационно-взвешенных квадратичных приближений, являющихся обобщением вычислительной схемы метода наименьших квадратов.

Задача линейного программирования, может быть решена как при помощи широко известного симплекс-метода, так и при помощи более современного метода внутренней точки. Однако решение задач большой размерности с помощью этих алгоритмов не совсем тривиально, оно требует чрезмерно большого выделения памяти. Для решения задачи (3) предлагается также метод вариационно-взвешенных квадратичных приближений (называемый также алгоритмом Вейсфелда [1]). Все эти алгоритмы являются итерационными, поэтому возникает необходимость получения критериев их остановки, особенно при обработке большого количества измерений.

Идея алгоритма Вейсфелда заключается в следующем. Вместо минимизации негладкой функции  $I(q)$  производится последовательность итераций, на каждой из которых ищется вектор, минимизирующий специальную квадратичную по  $q$  форму

$$Q(q, q^{(k-1)}) = \sum_{i=1}^N W_i^{(k-1)} |z_i - H_i^T q|^2,$$

где  $k$  – номер итерации;  $W_i^{(k-1)} = \left( |z_i - H_i^T q^{(k-1)}| \right)^{-1}$  – весовой коэффициент, соответствующий  $i$ -й компоненте вектора невязки на предыдущем шаге;  $q^{(k-1)}$  – вектор, полученный на предыдущей итерации.

В качестве начального вектора  $q^{(0)}$  (при  $k = 0$ ), берется некоторое априорное (возможно, грубое) значение неизвестного параметра, которое требуется уточнить.

Отметим, что задача нахождения минимума функции  $Q(k, q^{(k-1)})$  представляет собой проблему взвешенного МНК, для которой существуют очень простые и хорошо известные алгоритмы решения. Если на каком-либо шаге выполнится условие:  $Q(q, q^{(k)}) \geq Q(q^{(k)}, q^{(k)})$  для всех  $q$ , то можно доказать, что  $q^{(k)}$  – точное решение проблемы (3) [1]. Если на каждом шаге приведенное выше условие не выполняется, то последовательность будет бесконечной. Указанный способ получения квадратичной формы  $Q(q, q^{(k)})$  наталкивается на вычислительные сложности при малых значениях компонент вектора невязки  $z - H^T q^{(k)}$ . Если одна из его компонент становится равной нулю, то вычислить весовой коэффициент  $W_i^{(k)} = (z_i - H_i^T q^{(k)})^{-1}$  на данном шаге невозможно. Для решения этой проблемы используется прием регуляризации. Пусть  $\alpha > 0$  – достаточно малое число, тогда  $i$ -е слагаемое в  $Q(q, q^{(k)})$  задается так [1]:

$$\begin{cases} \frac{\alpha}{2} + \frac{(z_i - H_i^T q)^2}{2\alpha}, & \text{если } |z_i - H_i^T q^{(k)}| \leq \alpha, \\ \frac{(z_i - H_i^T q)^2}{|z_i - H_i^T q|}, & \text{если } |z_i - H_i^T q^{(k)}| > \alpha. \end{cases}$$

Для сравнения этих двух методик в статье для случая большого количества измерений, строилась следующая модельная задача. Обработывался массив измерений, соответствующий неподвижному объекту (скорость объекта, приемника сигнала,  $V = 0$ ). При этом учитывались сигналы, поступившие на протяжении длительного интервала времени ( $t = 1, \dots, L, L > 1000$ ) в предположении, что скорость объекта оставалась постоянной. Кроме того, исходные измерения в некоторые моменты времени содержали аномально большие ошибки, что сильно искажает оценку, полученную при помощи МНК.

Рассматривалось несколько генеральных совокупностей, подчиняющихся каждая своему распределению, и следующую двухэтапную схему: Сначала мы выбираем совокупность, которой будет принадлежать очередное наблюдение, затем производим наблюдение. Если “потерять” информацию из первого этапа – “забыть” совокупность, к которой принадлежит каждое наблюдение, распределение полученной выборки окажется смесью распределений. Распределение вероятностей совокупностей, а также параметры каждого отдельного распределения вместе называются параметрами смеси.

**Таблица 1**

**Улучшение оценок параметров при сложных распределениях ошибок за счет использования МНМ**

	Относительное улучшение точности оценки МНМ по сравнению с МНК для сложного распределения
X	6.23 %
Y	78.15 %
Z	81.46 %
Vx	40.96 %
Vy	76.55 %
Vz	96.34 %

С другой стороны, метод минимакса требует для своего осуществления значительно меньших сведений об ошибках исходных данных и обеспечивает гарантированную оценку точности получаемых результатов. Однако находимые в результате значения максимальных ошибок оценок параметров системы или их максимальных дисперсий часто оказываются сильно завышенными, так как их

определение базируется на допущении о практически невероятном сочетании различных погрешностей исходных данных.

Таблица 2

**Точность оценок параметров движения при равномерном распределении ошибок измерений в пределах 50 метров**

Итоговая точность оценки, м		
	МНК	МНМ
X	-0.433	-1.42
Y	1.343	3.72
Z	-2.917	-6.1
V <sub>x</sub>	-0.009	-0.008
V <sub>y</sub>	-0.058	-0.084
V <sub>z</sub>	0.05	0.077

**Список литературы**

1. Акимов П.А., Матасов А.И. Уровни неоптимальности алгоритма Вейсфелда в методе наименьших модулей // Автоматика и телемеханика. № 2. 2010.
2. Белоусов Л.Ю. Оценивание параметров движения космических аппаратов. М., ФИЗМАТЛИТ, 2002.
3. Лидов М.Л. Минимаксные методы оценивания // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2010. № 71. с URL: <http://library.keldysh.ru/preprints.asp?id=2010-71>
4. Лидов М.Л. К априорным оценкам точности определения параметров по методу наименьших квадратов // Космические исследования. 1964. Т. 2. № 5.
5. Лидов М.Л., Бахшиян Б.Ц., Матасов А.И. Об одном направлении в проблеме гарантирующего оценивания // Космические исследования. 1991. Т. 29. № 5.
6. Рао С. Линейные статистические методы и их применение. М.: Наука. 1968.
7. Эльясберг П.Е. Об устойчивости оценок точности определения орбит по результатам измерений // Космические исследования. 1986. Т. 16. № 5.

УДК 629.78; 630.52:587/588

**МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

И. М. Данилин

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

e-mail: [danilin@ksc.krasn.ru](mailto:danilin@ksc.krasn.ru)

Обсуждаются перспективы инновационного метода мониторинга лесных экосистем на основе данных лазерной локации, цифровой аэрокосмической съемки, спутникового геопозиционирования и ГИС, разработанного в Институте леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук.

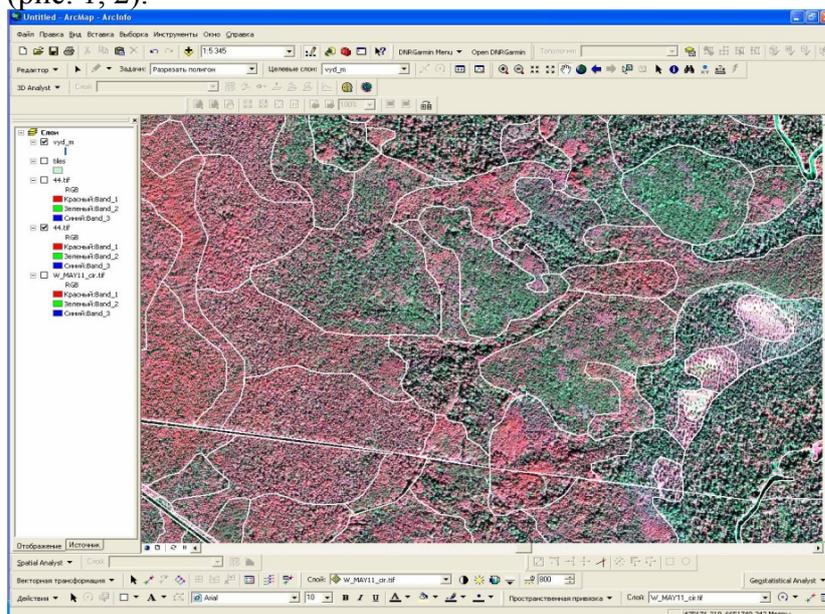
*Ключевые слова:* лесные экосистемы, мониторинг, лазерная локация, цифровая аэрокосмическая съемка, геопозиционирование, ГИС.

В Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (2013 г.), разработан и апробирован инновационный метод инвентаризации и мониторинга лесов на основе лазерной локации, цифровой аэрофотосъемки, спутникового геопозиционирования и ГИС.

В продолжение и развитие ранее выполненных исследований [1–4, 7–9], основной целью данной работы, явилось определение возможностей получения таксационных показателей лесных выделов и составление тематических лесных карт (планов лесонасаждений, окрашенных по породам) в производственных масштабах, а также практическая отработка и совершенствование технологии выполнения работ и автоматизированного определения таксационных показателей насаждений на основе данных лазерной локации и цифровой аэро съемки, адаптации программного обеспечения, позволяющего обрабатывать аэро съемочные данные и получать таксационные характеристики насаждений.

Опытные аэрокосмосъемочные работы выполнялись на территории Красноярского края в летний период 2012–2013 гг., с использованием спутниковой системы высокого разрешения WorldView-2, воздушного лазерного сканера RIEGL Q560, совмещенного с цифровым аэро съемочным комплексом IGI DigiCAM, включающим цифровую камеру Hasselblad H39mp и фазовый GPS-приемник Novatel OEM 4/5. Аэрокосмосъемочные данные сопоставлялись с наземными инструментальными измерениями на таксационно-дешифровочных пробных площадях и полигонах.

Дешифрирование цифровых аэрокосмических снимков производилось в интерактивном режиме с использованием базовой программы ArcGis [5] и функции пространственного анализа «Spatial Analyst». На цифровых аэрокосмоснимках и лазерных сканах выполнялось наложение и совмещение границ таксационно-дешифровочных пробных площадей, с опознаванием и контролем на местности (рис. 1, 2).

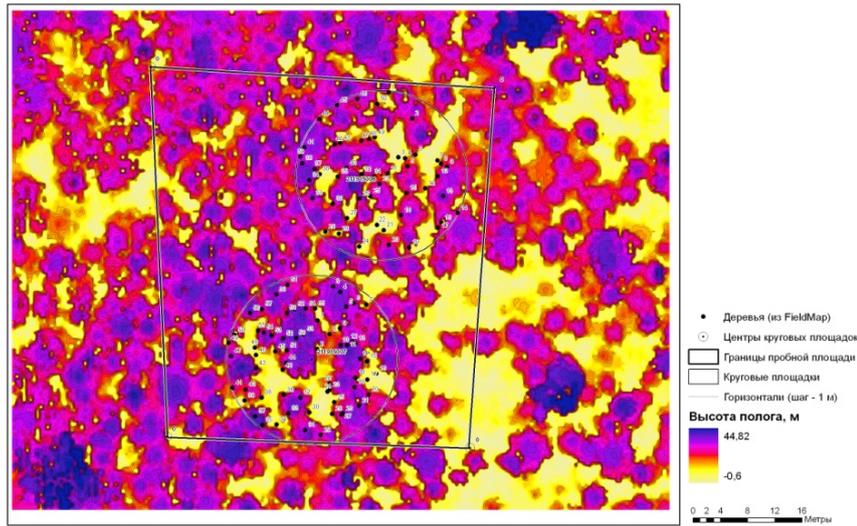


**Рис. 1. Контурное дешифрирование таксационных выделов, выполненное специалистом таксатором по цифровому космическому снимку WorldView-2 (NIR, ближний инфракрасный диапазон, геометрическое разрешение 50 см на пиксель)**

Были установлены взаимосвязи таксационно-дешифровочных признаков древостоев, по которым в автоматическом режиме актуализировались средние высоты, средние диаметры стволов, средние возрасты, полноты и запасы составляющих древесных пород. При выполнении статистических расчетов использовался программный продукт StatSoft [6] (рис. 3).

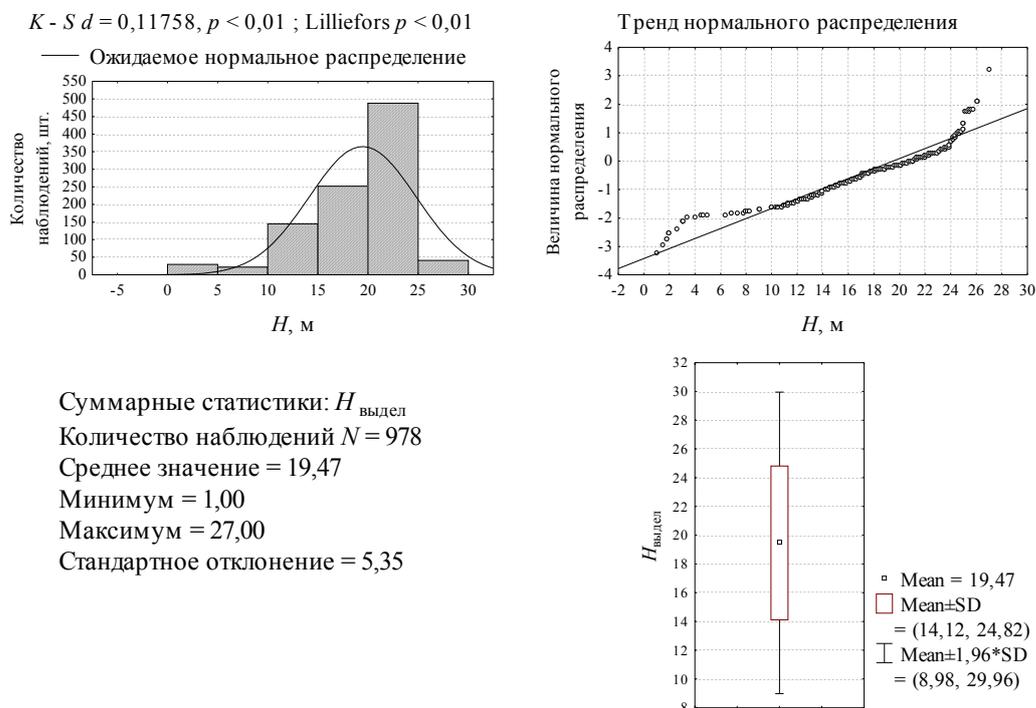
Сопоставление результатов измерений характеризуется достаточно высокими индексами детерминации ( $R^2 = 0.899–0.919$ ).

Наибольшая случайная ошибка определения верхней высоты древостоя по данным лазерной аэро съемки не превысила –7,8 %. Случайная ошибка для всех случаев находится в пределах –59,4 см или –2,1 %.

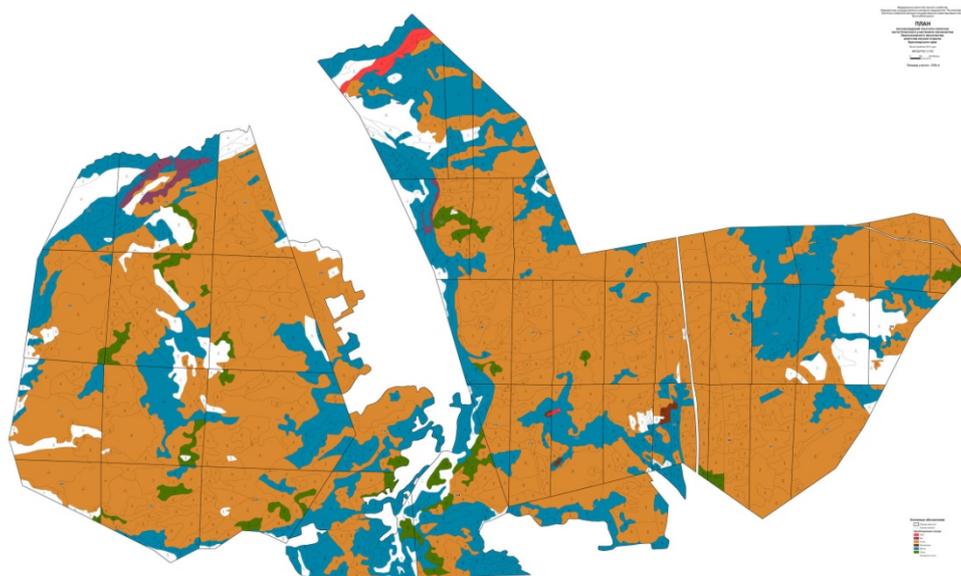


**Рис. 2. Плановое отображение площади проекций древесного полога и индикации изолиний распределения деревьев по высоте по лазерным данным, с наложением границ таксационно-дешифровочной пробной площади и инвентаризационных кругов постоянного радиуса системы наземной таксации FieldMap**

По данным дистанционного зондирования и наземных измерений на таксационно-дешифровочных пробных площадях составлен в формате ArcGis цифровой план лесонасаждений опытного полигона в Емельяновском лесничестве Красноярского края (рис. 4).



**Рис. 3. Гистограмма и основные статистики распределения повыделных высот, определенных при лазерной таксации в Емельяновском лесничестве Красноярского края**



**Рис. 4. Цифровой план лесонасаждений опытного полигона в Емельяновском лесничестве Красноярского края**

Составлены методические рекомендации по использованию воздушной лазерной локации и цифровой аэро- и космической фотосъемки для целей таксации и мониторинга лесов в лесном фонде Российской Федерации.

Рассчитаны примерные нормативы стоимости затрат на проведение работ по таксации и мониторингу леса с использованием метода лазерной локации и цифровой аэро- и космической съемки.

#### **Список литературы**

1. Данилин И.М., Медведев Е.М. Технология мониторинга и инвентаризации лесных ресурсов на основе лазерной локации, цифровой аэрофотосъемки и спутникового геопозиционирования // Журнал СФУ. Сер. «Техника и технологии». 2011. 4 (3). С. 326–336.
2. Данилин И.М., Фаворская М.Н. Описание программных модулей использования данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки лесных территорий // Иссл. Земли из космоса. 2013. 2. С. 1–12.
3. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: Учеб. пособ., 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геокосмос; Красноярск: ИЛ СО РАН. 2007. 229 с.
4. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: Учебн. для вузов. Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2005. 392 с.
5. ArcGis. 2014. <http://www.esri.com/software/arcgis>
6. StatSoft. Statistica 8.0. 2014. <http://www.statsoft.com/#>
7. Straub C., Dees M., Weinacker H., Koch B. Using airborne laser scanner data and CIR orthophotos to estimate the stem volume of forest stands // Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. 2009. N 3. P. 277–287.
8. Suvanto A., Maltamo M. Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas // Silva Fennica. 2010. V. 44 (1). P. 91–107.
9. Wulder M., Han T., White C., Sweda T., Tsuzuki H. Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 110. P. 123–137.

## МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Ю. П. Цветков<sup>(1)</sup>, О. М. Брехов<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН

<sup>(2)</sup>Московский авиационный институт

e-mail: [tsvetkov@izmiran.ru](mailto:tsvetkov@izmiran.ru), [obrekhov@mail.ru](mailto:obrekhov@mail.ru)

Рассмотрен новый подход к исследованию глубинного строения земной коры магнитометрическими методами. Магнитные измерения выполнялись с использованием стратосферного аэростата одновременно тремя скалярными магнитометрами, равномерно разнесенными по вертикали в пределах высот 25–31 км. Показано, что только аэростатные градиентные магнитные съемки на измерительной базе, равной 6 км, позволяют получить адекватное аномальное МПЗ от глубинных источников, что позволяет надежно интерпретировать глубинные магнитные источники.

*Ключевые слова:* стратосферные градиентные геомагнитные съемки, аэростаты, аномальное магнитное поле Земли, земная кора, строение.

### Введение

Предлагается новый подход к исследованию глубинного строения земной коры, одной из целей которого - оценка природно-ресурсного потенциала. В результате жизнедеятельности человечества полезные ископаемые приповерхностного залегания исчерпываются. Необходимо добычу сырья проводить на более глубоких горизонтах земной коры, чему способствует разработка новых методов геологоразведки. На сегодня известны примеры рентабельной добычи минерального сырья на глубинах до 5 км. В геологической службе Франции (BRGM) создана лаборатория, ведущая поиск глубокозалегающих месторождений минерального сырья, которые могут быть гигантскими. Поиск ведется по аномалиям земной коры, проявляющимся в современных геофизических полях. Предлагаемый подход к изучению глубинного строения земной коры способен улучшить достоверность поиска глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых. Метод глубинного зондирования основан на измерениях геомагнитного поля и его вертикального градиента.

Такие магнитные измерения можно выполнять на борту стратосферных аэростатов. Выше велопаузы (~18 км) в атмосфере существуют регулярные зональные воздушные течения, вместе с которыми стратосферный аэростат может совершать кругосветные полеты вдоль географических параллелей [1]. Следовательно, аэростатные магнитные съемки можно успешно выполнять на территории всего земного шара, в том числе и в труднодоступных для наземных съемок регионах.

Важными параметрами геомагнитного поля являются его градиенты, особенно вертикальные градиенты как наиболее информативные [2]. Однако, получение вертикальных градиентов аномального МПЗ от источников, расположенных на нижних горизонтах земной коры, эффективных для изучения состава МПЗ, является мировой проблемой, до сих пор не решенной на практике [3]. Нами эта проблема была решена путем применения градиентометра с длиномерной (6 км) измерительной базой, ориентированной вдоль вертикали по полю силы тяжести [4].

Россия занимает уникальное положение в мире для полетов стратосферных аэростатов – протяженность ее территории для трасс таких полетов с запада на восток составляет 10 000 км и, практически, нет препятствий для полетов над Сибирью и кругосветным полетам российских аэростатов над Северным Ледовитым океаном.

Нами был выполнен ряд магнитных съемок на стратосферных аэростатах по трассе Камчатка-Поволжье.

### Методика экспериментальных исследований

Для получения значимых вертикальных градиентов аномального МПЗ от глубинных источников используется аэростатный магнитный градиентометр (АМГ) с длинномерной (6 км) измерительной базой, ориентированной вдоль вертикали по полю силы тяжести [4]. Вид магнитного градиентометра на борту аэростата приведен на рис. 1.

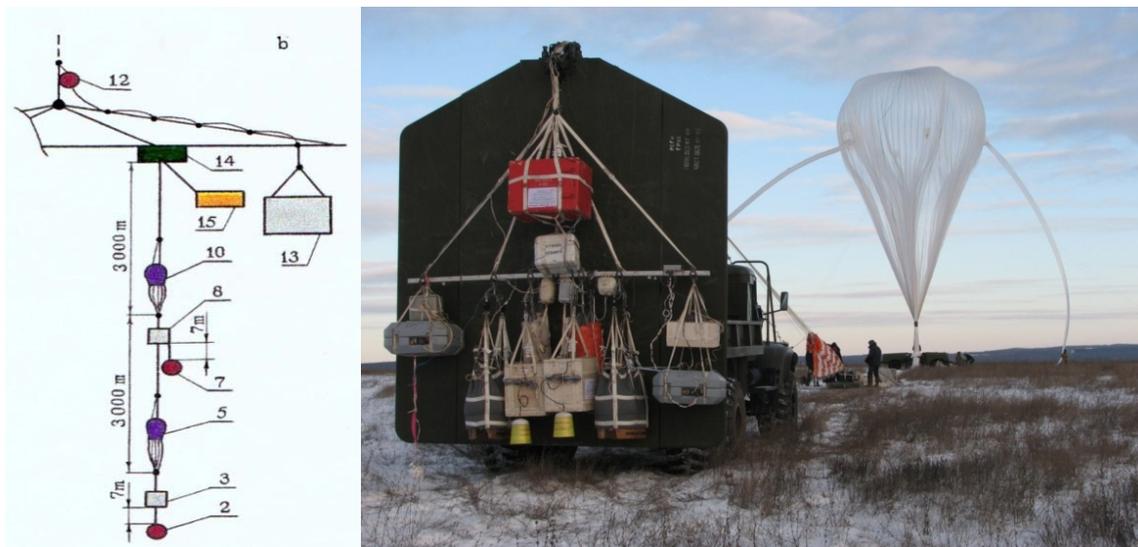
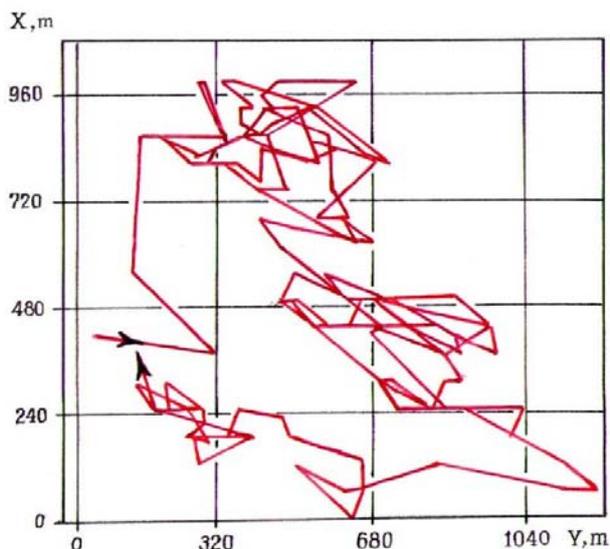


Рис. 1. Вид аэростатной системы: 3, 8, 13 – магнитометры; 2, 7, 12 – датчики магнитометров; 5, 10, 15 – парашюты

Тросонакопитель системы развертывания градиентометра ячеистого типа вмещает 6 км троса диаметром 3,5-4,5 мм, выполняющего функцию равномерного распределения магнитометров в пространстве [5]. Развертывание осуществляется автоматически при взлете аэростата в два этапа – на высоте 3 км и 6 км. Измерительная система размещается в трех контейнерах каждый массой ~25 кг. Каждый контейнер включает протонный магнитометр, навигационный GPS-приемник, бортовую ЭВМ сбора и пакетирования информации, модем «ГлобалТел» для передачи научной информации по спутниковым каналам радиосвязи в сеть Интернет, аккумуляторные батареи для питания РЭА. Необходимую точность измерения магнитных градиентов при использовании тросовой системы обеспечивают скалярные протонные магнитометры, датчики которых нечувствительны к своему азимутальному положению. Приборная точность измерения скаляра МПЗ составляла 1 нТл. [6], вертикального градиента – 1,5 нТл. Измерения МПЗ, выполняемые тремя разнесенными в пространстве магнитометрами, позволяют получать из дифференциалов истинные градиенты МПЗ. Выполненные аэростатные градиентные магнитные съемки на длинномерной измерительной базе обладают мировой новизной [7].

В возмущенном воздушном течении нижний магнитометр отклоняется от вертикали, проходящей через верхний магнитометр. Отклонения могут достигать значений в 1,5 км (рис. 2).



**Рис. 2. Отклонения нижнего приборного контейнера от вертикальной оси, проходящей через верхний контейнер при длине базы, равной 6 км**

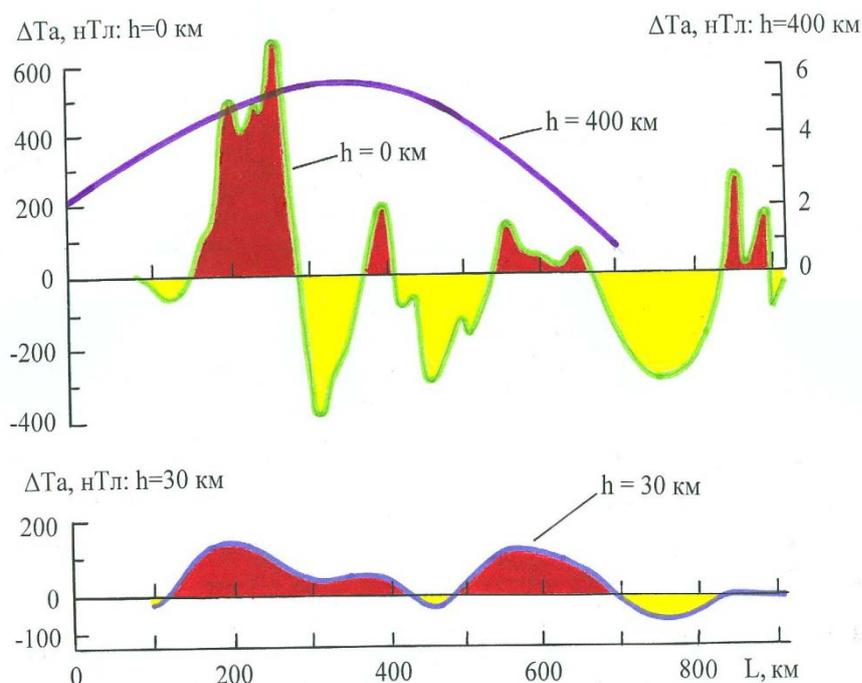
Эти отклонения приводят к модуляции нормального МПЗ, отражающейся в ошибке получения аномального МПЗ, и величины этой модуляции могут быть учтены по данным GPS-приемников и данным синтеза МПЗ по модели нормального МПЗ в точке местоположения магнитометра в момент магнитных измерений [8].

### **Результаты эксперимента**

Во второй половине прошлого столетия считалось, что высотные магнитные съемки не нужны. Это объяснялось тем, что пересчет наземных магнитных данных допускает высокую степень надежности получения магнитных полей на любом высотном уровне верхнего полупространства. Но попытки такого пересчета не увенчались успехом, что объяснялось ограниченностью территории, взятой для пересчета. Однако аэростатные магнитные эксперименты показали, что пересчет и должен привести к неудовлетворительному результату.

Карта аномального МПЗ территории СССР [9], построена по данным аэромагнитных съемок, в основном, выполненных в середине 1970-х годов, когда не было надежных глобальных аналитических моделей нормального МПЗ. Это отрицательно сказалось на выделении данных аномального МПЗ из аэромагнитных съемок, в результате чего допущенный остаток нормального поля в выделенном аномальном МПЗ не оценен. Вместе с этим, пренебрежение полями глубинных источников, малоинтенсивных на поверхности Земли, но заметных и значимых в отсутствии локальных магнитных аномалий), возможно привело к искажению представления аномальной компоненты регионального МПЗ. При использовании этих магнитных данных, а карты аномального МПЗ являются основной базой данных для пересчета поля вверх, пересчет и не должен быть удовлетворительным. На рис. 3 показано формирование Камско-Эмбенской спутниковой магнитной аномалии ( $h = 400$  км) из аномалий ( $h = 0$  км), снятых по трассе полета с карты [9], и магнитных аномалий ( $h = 30$  км), полученных по аэростатным данным за вычетом главного поля, синтезированного по модели IGRF.

Графики ( $h = 0$  км) и ( $h = 30$  км) отличаются тем, что отношение суммарных величин положительных и отрицательных магнитных аномалий составляет 1,3 и 7 соответственно. На каком-либо высотном уровне аномальное МПЗ является суперпозицией наземных полей, то осреднение приземных данных действует на поле примерно так же, как пересчет на высоту. На основе этого положения исследована возможность формирования спутниковой магнитной аномалии из полей, полученных на наземном и аэростатном высотных уровнях.



**Рис. 3. Процесс формирования спутниковой магнитной аномалии**

Анализ полей, снятых с карты (кривая  $h = 0$  км на рис. 3), показывает, что ввиду практического равенства положительных и отрицательных магнитных аномалий при осреднении происходит их аннигиляция, и по этим данным спутниковая магнитная аномалия сформирована быть не может. С другой стороны, аэростатная реализация (кривая  $h = 30$  км на рис. 3) позволяет сформировать спутниковую магнитную аномалию. Это еще раз показывает непригодность аномального поля, снятого с карты [9], для пересчета поля в верхнее полупространство. Следовательно, на данный момент для создания повысотной структуры аномального МПЗ необходимы непосредственные данные разновысотных съемок.

### **Выводы**

1. Высота проведения магнитной съемки в числовом выражении ориентировочно должна соответствовать глубине залегания слоя земной коры, зондирование строения которого предполагается выполнить.
2. Только аэростатные градиентные магнитные съемки на измерительной базе, равной 6 км, позволяют получить неискаженные величины аномального МПЗ от глубокозалегающих источников, что позволяет надежно интерпретировать глубинные магнитные источники.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ. Грант № 14-05-00204.

### **Список литературы**

1. Школьный Е.П., Майборода Л.А. Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. Л.: Гидрометиздат, 1973. 307 с.
2. Цирульский А.В., Майер В.И. Об интерпретации повысотных аэромагнитных наблюдений // Физика Земли. 1986. № 5. С. 76–82.

3. Nelson J.B., Marcotte D.V., Hardwick C.D. Comments on “Magnetic field gradients and their uses in the study of the Earth's magnetic field” of by Harrison and Southam // J. Geomag. Geoelectr., 1992. V. 44. P. 367–370.

4. Николаев Н.С., Крапивный А.В., Баранов Я.В., Брехов О.М., Цветков Ю.П., Пчелкин А.В. Высокоточный аэростатный градиометр со спутниковыми каналами связи // Датчики и Системы. 2008. № 1. С. 16–0.

5. Черников С.П., Цветков Ю.П., Брехов О.М., Крапивный А.В., Николаев Н.С. Компьютерная модель динамики процесса автоматического развертывания аэростатного магнитного градиентометра // Датчики и системы. 2009. № 6. С. 20–23.

6. Кириаков В.Х., Любимов В.В., Цветков Ю.П. Протонный магнитометр для стратосферного аэростатного комплекса // VIII междунар. конф. Прага, 2012. Тр. конф. Изд-во “Education and Science”, 2012. С.46–51,

7. Цветков Ю.П., Кузнецов В.Д., Головкин В.П. О.М.Брехов и др. Выделение аномального магнитного поля Земли из аэростатных магнитных съемок на высотах 20–40 км // Доклады академии наук. 2011. Т. 436. № 2. С. 262–266.

8. Цветков Ю.П., Брехов О.М., Филиппов С.В. и др. Экспериментальные оценки погрешности измерений вертикальных геомагнитных градиентов в стратосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47. № 4. С. 543–547.

9. Карта аномального магнитного поля территории СССР. Масштаб 1:2500000 / Отв. ред. З.А.Макарова. М.: ГУГК, 1974. 16 л.

**УДК 528.8.04**

## **АНАЛИЗ ДАННЫХ GCOM-W1 И NDVI (MODIS) ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА**

А. С. Ященко

ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет»

e-mail: [x\\_rays1@mail.ru](mailto:x_rays1@mail.ru)

Представлены результаты анализа радиометрических данных GCOM-W1 и NDVI для территории юга Западной Сибири и Северного Казахстана. Сделаны выводы о перспективах использования спутниковых данных GCOM-W1 для оценки влияния растительности на собственное радиотепловое излучение естественных почв.

*Ключевые слова:* Дистанционное зондирование, микроволновая радиометрия.

### **Введение**

Динамично развивающееся человеческое общество оказывает всё возрастающее воздействие на окружающую среду. Многие изменения, происходящие, как в локальных природно-территориальных комплексах, так и глобальных масштабах, всецело определяются антропогенным воздействием: сокращение площади лесов, появление и исчезновение внутренних водоёмов, деградация и эрозия почв и т.д. В связи с этим возникает острая необходимость в оперативном мониторинге гидросферы, атмосферы и поверхности суши.

Дистанционные методы зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются, в некоторых случаях, разумной альтернативой наземной сети станций экологического контроля. Подавляющая часть орбитальной группировки ресурсных спутников имеет на борту сенсоры оптического диапазона. Однако дистанционный мониторинг некоторых параметров поверхности суши и Мирового Океана (например, влажности

поверхностного слоя почв, скорости приводного ветра) возможен лишь с помощью микроволновых радиометрических методов ДЗЗ.

Данные о влажности поверхностного слоя почв востребованы во многих отраслях науки и экономики: метеорологии, климатологии, сельском хозяйстве, лесном хозяйстве и др. По этой причине работы направленные на разработку новых и усовершенствовании имеющихся методов и алгоритмов определения влажности поверхностного слоя почв является актуальными.

### **Влияние растительности на радиотепловое излучение естественных почв**

На данный момент эксплуатируются два орбитальных аппарата данные которых могут использоваться для определения влажности почв: SMOS и GCOM-W1. Основным инструментом, установленным на борту SMOS, является 2-D интерференционный радиометр MIRAS, работающий в диапазоне частот 1,400–1,427 ГГц (L-диапазон) [1]. Аппарат позволяет получать радиометрические снимки поверхности в диапазоне углов зондирования от 0° до 65°. Радиометр AMSR-2, установленный на спутнике GCOM-W1, позволяет измерять радиояркостную температуру ( $T_B$ ) поверхности на частотах 6,9 ГГц; 7,1 ГГц; 10,7 ГГц; 18 ГГц; 23 ГГц; 37 ГГц и 89 ГГц [2]. Спутник GCOM-W1, в отличие от SMOS, проводит съёмку поверхности в режиме конического сканирования под фиксированным углом зондирования в 55°.

Выражение, определяющее величину  $T_B$  естественных почв покрытых растительностью, имеет вид [3]:

$$T_B = (1 - \omega) * (1 - \gamma) * (1 + \gamma R) T_V + (1 - \omega) \tag{1}$$

где  $\omega$  – альbedo поверхности;  $T_V$  – температура в толще растительности;  $T_p$  – эффективная температура почвы;  $\gamma = \exp(-\tau/h)$  коэффициент поглощения в растительности;  $h$  – оптическая глубина зондирования;  $\theta$  – угол зондирования;

$R$  – коэффициент отражения по мощности. Комплексный коэффициент отражения по амплитуде – определяется выражением:

$$r_p = ((1 - Q)r_{0p} + Qr_p) \exp(-h * \cos \theta) \tag{2}$$

где  $r_p$  – коэффициент отражения по амплитуде от шероховатой среды на  $p$ -поляризации;  $r_{0p}$  – френелевский коэффициент отражения по амплитуде от гладкой среды на  $p$ -поляризации;  $r_{0s}$  – френелевский коэффициент отражения от гладкой среды на ортогональной поляризации;  $Q$  – параметр определяющий степень перекрёстного влияния излучений на двух поляризациях;  $h$  – параметр шероховатости, зависящий от длины волны и стандартного отклонения высот неровностей;  $\theta$  – угол зондирования;  $N$  – эмпирический параметр, зависящий от типа и степени шероховатости поверхности, а также от поляризации принимаемого излучения.

В работе [4] были приведены первые экспериментальные результаты, свидетельствующие о значительном вкладе излучения растительности на общее радиотепловое излучение поверхности естественных почв. Авторы утверждают, что на частоте 1,4 ГГц относительный вклад травы высотой 10 см и 30 см в общую интенсивность излучения составляет 20 % и 60 % соответственно, а на частоте 5 ГГц

возрастает до 65 % и 90 % соответственно. По этой причине, а так же ввиду большей, по сравнению с более высокими частотами, глубины зондирования L-диапазон является более подходящим для дистанционного мониторинга влажности.

Пренебрежение вклада излучения растительности на общей поверхности в L-диапазоне может приводить к росту погрешности восстановления влажности. Алгоритм восстановления влажности SMOS предполагает нахождение по эмпирически найденным зависимостям с NDVI и LAI [3]. Однако глобальные данные о NDVI и LAI (спутники Terra и Aqua) предоставляются не чаще 1-го раза в 16 дней, что, существенно превышает периодичность съёмки SMOS. По мнению автора, одним из альтернативных способов определения вклада растительности в излучение естественных почв в L-диапазоне является привлечение радиометрических данных на более высоких частотах. Идея использовать данные микроволновых радиометров для определения состояния растительности не является новой. В конце 80-х годов были получены первые результаты исследований возможности использования спутниковых данных на частоте 37 ГГц (радиометр SMMR) для мониторинга состояния растительности в глобальных масштабах [5]. Отмечено, что нормализованная разность радиоярких температур на ортогональных поляризациях (MPDI) на указанной частоте может быть использована для контроля состояния растительности лишь в аридных и полуаридных зонах. В работе [6] представлены результаты детального сравнительного анализа микроволновых данных AMSR-E (6,9 ГГц; 10,7 ГГц; 18 ГГц; 23 ГГц и 37,5 ГГц) со значениями NDVI. Однако в [6] приведены лишь качественные результаты, без определения степени корреляционной зависимости между NDVI и интенсивностью микроволнового излучения для разных климатических зон.

### **Результаты исследования**

Данные GCOM-W1 для широт, относящихся к югу Западной Сибири, предоставляются с периодичностью до 4-х раз за сутки. Характерные размеры пикселей радиометрических снимков GCOM-W1 составляют от 62×35 км для частоты 6,9 ГГц до 5×3 км для частоты 89 ГГц. В процессе анализа использовались радиометрические снимки GCOM-W1 Level 1R. Тестовый режим работы аппарата GCOM-W1 был закончен в июле 2012 года. По этой причине, для анализа были взяты ряды данных за период весна-осень 2013 г. Данные о NDVI извлекались из продукта MYD13C1. Поскольку периодичность получения данных GCOM-W1 и MODIS Level 3 существенно отличается, в процессе сравнения временных рядов  $T_B$  и NDVI проводилось усреднение значений  $T_B$  за период между двумя соседними датами предоставления данных о NDVI. Так же проводилось усреднение данных NDVI в пределах территории излучающей в пиксель радиометрического снимка GCOM-W1. На рис. 1 представлены усреднённые в пределах территории излучающей в пиксель радиометрического снимка AMSR-2 временные ряды NDVI и исходные значения  $T_B$  на частоте 6,9 ГГц для территории засушливой степи Северного Казахстана (1), границы степной и лесостепной зоны в Омской области (2) и южной тайги на севере Омской области (3). Как можно видеть из приведённых данных временной ход NDVI и  $T_B$  на качественном уровне соответствует процессам, протекающим в приповерхностных слоях соответствующей климатической зоны в летний период.

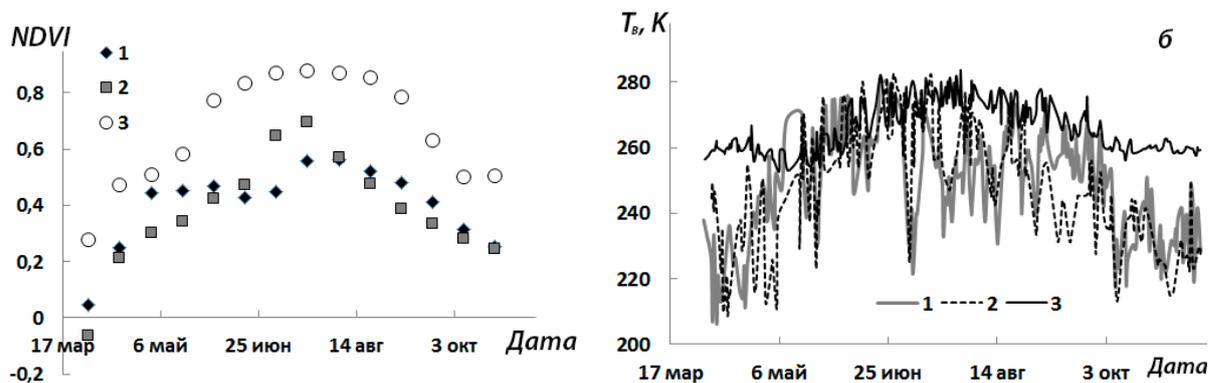


Рис. 1. Временной ход NDVI (а) и радиояркостной температуры на частоте 6,9 ГГц (б) для участков с координатами центра (1) - 52,12° с.ш., 73,17 ° в.д.; (2) – 54,2° с.ш., 73,26 ° в.д.; (3) – 57,7° с.ш., 73,9 ° в.д.

На рис. 2 представлены зависимости NDVI от  $T_B$  на трёх частотах. Как можно видеть из приведённых данных наилучшая зависимость между NDVI и  $T_B$  наблюдается для участка с координатами 54,2° с.ш. и 73,26° в.д. лежащего на границе степной и лесостепной климатических зон. Поскольку  $T_B$  зависит не только от влажности и наличия растительности, но и от температуры излучающей среды, для минимизации влияния этого параметра был проведён анализ MPDI на разных частотах. В результате выяснено, что среди анализируемых участков высокая корреляционная зависимость между NDVI и MPDI наблюдается на низких частотах зондирования аппарата GCOM-W1 (6,9-18 ГГц) для участка 2. Два оставшихся участка имели гораздо менее выраженную зависимость NDVI от MPDI (см. рис. 3).

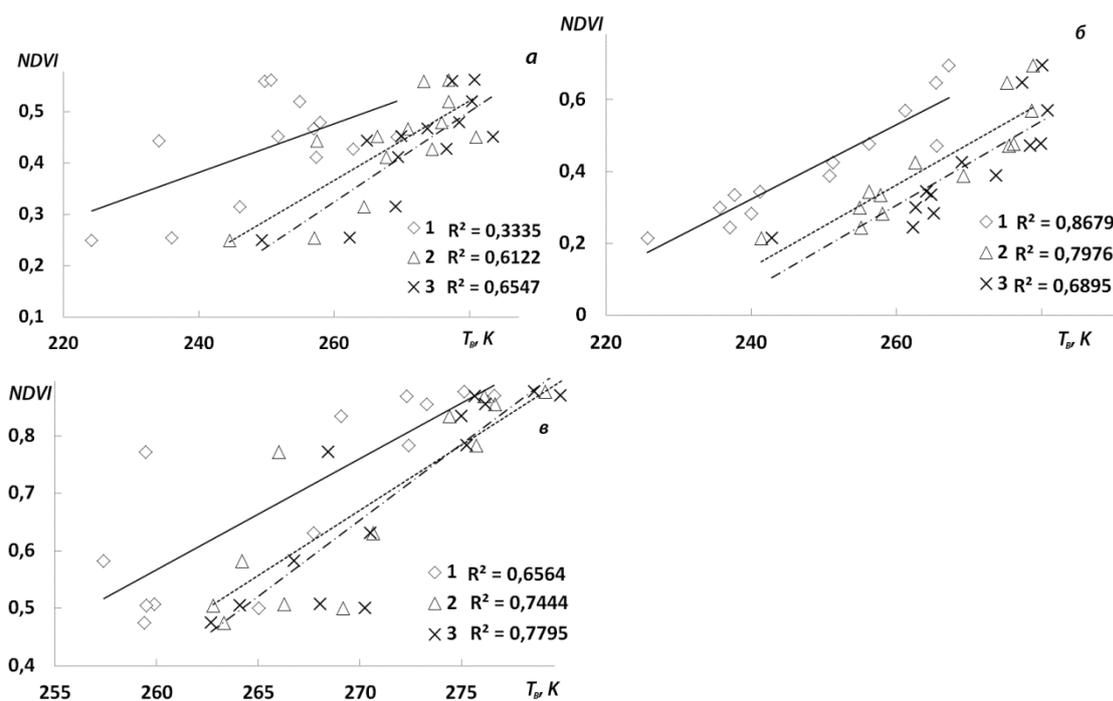
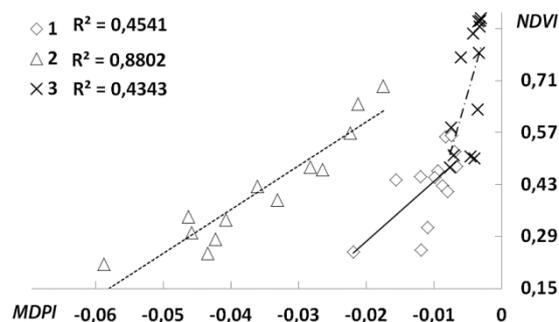


Рис. 2. Зависимости NDVI от  $T_B$  на частоте 6,9 ГГц (1), 18 ГГц (2) и 37 ГГц (3) для участков с координатами (а) - 52,12° с. ш., 73,17 ° в.д.; (б) – 54,2° с.ш., 73,26 ° в.д.; (в) – 57,7° с.ш., 73,9 ° в.д. Пунктирные линии - тренд,  $R^2$  – достоверность аппроксимации



**Рис. 3. Нормализованная разница радиояркостных температур (данные с наилучшими корреляционными зависимостями) для участка 1 на частоте 37 ГГц, участка 2 на частоте 6,9 ГГц, участка 3 на частоте 18 ГГц. Пунктирные линии - тренд,  $R^2$  – достоверность аппроксимации**

### Заключение

Проведённый анализ данных для территории юга Западной Сибири показал, что радиометрические данные GCOM-W1 коррелируют с данными NDVI. Наилучшая корреляционная зависимость наблюдается для территорий относящихся к границе степной и лесостепной климатических зон. Как следствие, представляется возможным использовать радиометрические данные GCOM-W1 для оценки состояния растительности в этой климатической зоне. Для использования данных GCOM-W1 в процессе восстановления влажности почв по данным SMOS необходимо проведение дополнительных исследований, конечным результатом которых будет являться количественная взаимосвязь между радиационными характеристиками растительности частотах работы GCOM-W1, радиофизическими характеристиками растительности на частоте SMOS и реальными параметрами растительного слоя полученными в процессе наземных измерений.

### Список литературы

1. [ESA EO Missions: SMOS](https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos) // URL:<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos> (дата обращения 14.06.2014).
2. [SHIZUKU \(GCOM-W1\) to Provide Geophysical Quantity Product](http://global.jaxa.jp/press/2013/05/20130517_shizuku_e.html) // URL:[http://global.jaxa.jp/press/2013/05/20130517\\_shizuku\\_e.html](http://global.jaxa.jp/press/2013/05/20130517_shizuku_e.html) (дата обращения 14.06.2014).
3. Kerr Y.H., Waldteufel P., Richaume P., Wigneron J.-P. et al. "The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm" // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V.50. N. 5. P. 1384–1403.
4. Kirdiashev K. P., Chukhlantsev A. A., and Shutko A. M. Microwave radiation of the Earth's surface in the presence of vegetation cover" // Radio Eng. Electron Phys. 1979. V. 24. P. 256–264. (English Trans)
5. Choudhury B. J., Tucker C. J., Golus R. E., & Newcomb W. W. Monitoring vegetation using Nimbus-7 scanning multichannel microwave radiometer's data // International Journal of Remote Sensing. 1987. V. 8. N. 3. P. 533–538.
6. Shi Jiancheng, Jackson T., Tao J., Du J., Bindlish R., L. Lu, Chen K.S. Microwave Vegetation Indices for Short Vegetation Covers from Satellite Passive Microwave Sensor AMSR-E // Remote Sensing of the Environment. 2008. V. 112. N. 12. P. 4285–4300.

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РЕЛЬЕФА И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ НА ОСНОВЕ БИСТАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ СИГНАЛАМИ ГЛОНАСС И GPS

В. Л. Миронов, К. В. Музалевский  
ФГБУН «Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН»  
e-mail: [rsdkm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdkm@ksc.krasn.ru)

В данной работе в ходе теоретического моделирования для сельскохозяйственных почв типичных для территории Сибири показана принципиальная возможность измерения рельефа почвенного покрова относительно фазового центра приемной антенны сигналов ГЛОНАСС и GPS, а также вариации влажности поверхности почвы на расстояниях, не превышающих 6 кратную высоту расположения антенны над поверхностью земли.

*Ключевые слова:* ГЛОНАСС, GPS, бистатическая локация, рефлектометрия, рельеф, топография, влажность почвы.

### Введение

В настоящее время активно ведутся исследования применения сигналов, излучаемых спутниками глобальных навигационных систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS для бистатической радиолокации поверхности Земли. В основном ведутся работы с целью измерения влажности почвы, высоты уровня воды в водохранилищах, высоты растительности сельскохозяйственных культур [1, 2]. Однако возможность измерения пространственной вариаций влажности почвы и рельефа поверхности почвы с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS слабо изучено. Имеется всего лишь несколько работ, в которых указывается на данную возможность, однако не приводится ни алгоритма, ни конкретных просчетов с соответствующей интерпретацией [3]. В данной работе рассмотрен алгоритм, на основе которого проведены расчеты и решена обратная задача по восстановлению рельефа почвенного покрова, а так же пространственной вариации влажности поверхности почвенного покрова.

### Метод измерения рельефа и пространственной вариации влажности почвенного покрова

Предлагаемый метод измерения основан на интерференционной картине, фиксируемой приемником сигналов ГНСС по мере подъема спутников ГНСС над горизонтом. Интерференция возникает за счет сложения в приемной антенне полей прямых и отраженных от почвенного покрова волн. Угловая форма интерферограммы зависит от амплитуды и фазы отраженной волны, которые определяются влажностью почвенного покрова и его рельефом. Напряжение на выходе антенны приемника ГНСС (для определенности будем считать приемную антенну вертикальной поляризации) вблизи шероховатой границы раздела двух сред, можно представить в следующем виде

$$U(\theta) = F(\theta) \cdot \left[ \sqrt{1 + |\Gamma_V(\theta, \varepsilon)|^2} + 2|\Gamma_V(\theta, \varepsilon)| \cos[2k_0 H_r(\theta) \cos \theta + \varphi_V(\theta)] + A \cdot S(\theta) \right] \quad (1)$$

$$|\Gamma_V(\theta, \varepsilon)| = |R_V(\theta, \varepsilon)| \exp(-0.5[2k_0 H_r \cos \theta]^2), \quad (2)$$

где  $F(\theta)$  – диаграмма направленности антенны;  $R_V$  – коэффициент отражения Френеля;  $k_0$  – волновое число свободного пространства;  $H_r$  – среднеквадратичное отклонение высот неровностей поверхности почвы (шероховатость);  $\theta$  – угол падения электромагнитной волны, излученной спутником ГНСС (отсчитывается от нормали к

поверхности почвы);  $\varphi_V$  – фаза коэффициента отражения Френеля;  $|S(\theta)| \leq 1$  – случайная величина распределенная по нормальному закону;  $\varepsilon = \varepsilon(W, C)$  – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почвы;  $W$  – объемная влажность почвы;  $C$  – содержание глины в почве. КДП почвы рассчитывалась на основе модели [4]. В качестве приемной антенны сигналов ГНСС возьмем элементарный диполь, максимум диаграммы направленности которого ориентирована на горизонт, тогда диаграмма направленности антенны запишется в виде

$$F(\theta) = U_0 \sin \theta, \quad (3)$$

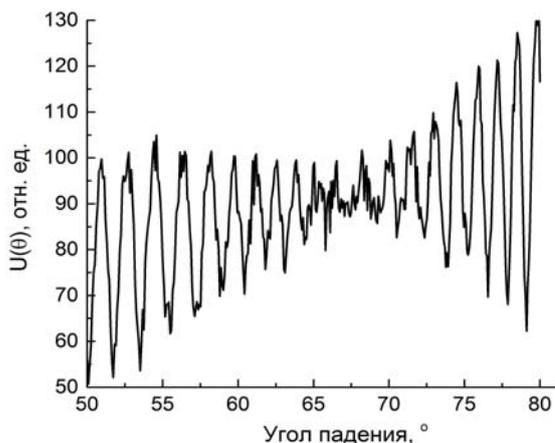
здесь  $U_0$  – напряжение при положении спутника ГНСС на горизонте. Для численного моделирования зададим высоту расположения антенны над поверхностью земли равной  $H_0 = 4$  м, а закон изменения рельефа и объемной влажности поверхности почвы (относительно места расположения антенны) в виде функций

$$h(\theta) = 0,2 \cos \theta + 0,05 \cos(8\pi \cdot \cos \theta), \quad (4)$$

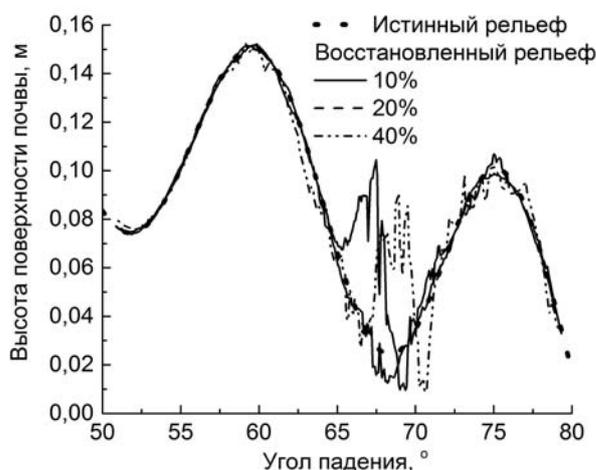
$$W(\theta) = 0,05 + 0,2 \cos \theta, \quad (5)$$

соответственно. Отметим, что в формулах (4), (5) угол падения  $\theta$  связан с координатой удаленной от точки положения антенны вдоль поверхности земли на расстояние  $x$  выражением  $x = (H_0 + h(\theta)) \cdot \text{tg} \theta$  (расстояние не превышает 6-ти кратную высоту расположения антенны над поверхностью земли, при максимальном угле зондирования  $80^\circ$  доступного при измерении аппаратурой МРК-32). На рис. 1 приведена типичная интерференционная картина, рассчитанная при содержании глинистой фракции в почве  $C = 0,3$ , амплитуде шумов  $A = 0,03$  (что соответствует 10 % от амплитуды интерференционного сигнала),  $U_0 = 100$  отн. ед.,  $H_0 = 0,02$  м, частота электромагнитной волны, излучаемой спутников ГНСС принималась равной 1,57542 ГГц.

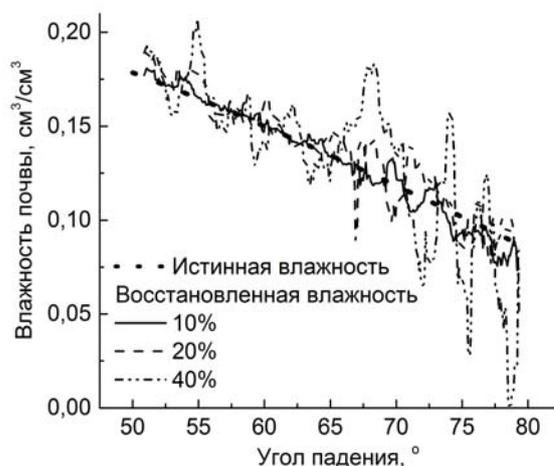
Метод измерения рельефа и пространственного распределения влажности поверхности почвы состоит из нескольких этапов. Интерференционная картина, рассчитанная на основе выражений (1)–(5), служила модельным представлением измеренного сигнала  $U^m(\theta)$ . Обратная задача при восстановлении рельефа и влажности поверхности почвы решалась путем минимизации нормы невязки между модельным представлением, измеренного сигнала  $U^m(\theta)$  при различной амплитуде шумов, и теоретически рассчитанном сигнале,  $U^{th}(\theta)$ , по формулам (1)–(3) при  $A = 0$ . При этом минимизация происходила в скользящем окне шириной равной среднему периоду интерференционной картины, который определялся как расстояние между двумя последовательными максимумами и минимумами. Внутри скользящего окна при минимизации нормы невязки подбирались влажность почвы  $W_i$ , высота антенны, которая задавалась линейной функцией  $H(\theta) = h_i + \Delta h_i \cdot \theta$  и  $U_0$ , при этом найденным значениям приписывался средний угол в текущем скользящем окне. Шероховатость почвы была известна и задавалась равной  $H_0 = 0,02$  м. На рис. 2 и рис. 3 изображены восстановленный рельеф и пространственное распределение влажности поверхности почвы при различной зашумленности интерференционного сигнала.



**Рис. 1. Типичная интерферограмма, записываемая приемником ГНСС при приеме на антенну**



**Рис. 2. Высота поверхности почвы, восстановленная относительно высоты антенны приемника ГНСС при различной амплитуде шумов**



**Рис. 3. Влажность поверхности почвы, восстановленная при различной амплитуде шумов исходного интерференционного сигнала**

Как видно из рис. 2 и рис. 3 при увеличении уровня шумов с 10 % до 40 % (от амплитуды интерференционного сигнала) возрастает погрешность восстановления высоты и влажности поверхности почвы с 0,002 м до 0,008 м и с 0,004 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> до 0,02 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, соответственно в терминах среднеквадратичного отклонения. При этом, максимальные погрешности наблюдается при угле Брюстера (порядка 67°, см. рис. 1) в результате сильного искажения интерференционной картины. Отметим, что достигнутый уровень погрешности показывает принципиальную возможность практического измерения рельефа и пространственного распределения влажности поверхности почвы.

### **Заключение**

В данной работе проведено теоретическое исследование принципиальной возможности измерения рельефа и пространственной вариации влажности поверхности почвенного покрова с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS. Моделирование

проводилось для типичных сельскохозяйственных почв Красноярского края, с содержанием глины 30 %. Теоретические оценки показывают, что при существенном зашумленном интерференционном сигнале от спутника ГНСС, погрешность восстановления рельефа и влажности поверхности почвы не превышают 0,8 см и 0,02 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, соответственно. Для практического внедрения созданного метода необходима его дальнейшее экспериментальное тестирование в натуральных условиях.

Работа выполнена в рамках проекта Президиума РАН «Спутниковая радиолокационная интерферометрия вертикальных деформаций земной поверхности вследствие техногенной сейсмичности».

### **Список литературы**

1. Rodriguez-Alvarez N., Bosch-Lluis X., Camps A., Vall-llossera M., Valencia E., Marchan-Hernandez J.F., Ramos-Perez I. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47. No. 11. Pp. 3616–3624.

2. Rodriguez-Alvarez N., Monerris A., Bosch-Lluis X., Camps A., Vall-llossera M., Marchan-Hernandez J.F., Ramos-Perez I., Valencia E., Martinez-Fernandez J., Sanchez-Martin N., Baroncini-Turricchid G., Perez-Gutierrez C. Soil moisture and vegetation height retrieval using GNSS-R techniques // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2009. Vol. 3. Pp. III-869-III-872.

3. Alberto Alonso Arroyo. Master Thesis: Water surface monitoring using GNSS-R Opportunity Signals. 2012. 104 p.

4. Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V. Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47. No. 7. Pp. 2059–2070.

**УДК 528**

## **МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ РАДИОМЕТРА MIRAS SMOS**

**В. Л. Миронов, К. В. Музалевский**  
ФГБУН «Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН»  
e-mail: [rsdkm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdkm@ksc.krasn.ru)

В данной работе предложен метод измерения температурной зависимости диэлектрической проницаемости почвенного покрова полуострова Ямал на основе спутниковых данных о угловых зависимостях радиояркостной температуры, измеренной на вертикальной и горизонтальной поляризациях космическим аппаратом SMOS на частоте 1,4 ГГц. Полученные зависимости, позволяют проводить измерение температуры почвы полуострова Ямал.

*Ключевые слова:* Арктика, вечная мерзлота, деятельный слой, радиометр, SMOS, полуостров Ямал, диэлектрическая проницаемость, температура почвы.

### **Введение**

В последнее время активно ведутся исследования в области измерения из космоса температуры почвы в зоне вечной мерзлоты с использованием микроволновых

радиометров. Ключевым элементом при решении обратной задачи в уравнении радиометрии является комплексная диэлектрическая проницаемость, которая зависит от плотности сухого сложения,  $\rho_d$ , влажности,  $m_g$ , и температуры,  $T$ , почвы. В настоящее время имеется лишь одна модель комплексной диэлектрической проницаемости почвы богатой органикой, образцы которой были отобраны на Северном склоне Аляски [1]. В виду труднодоступности арктических территорий и не возможности отбора почвенных образцов с высоким пространственным разрешением, в данной работе предлагается метод измерения температурной зависимости диэлектрической проницаемости (ДП) почвенного покрова на основе данных радиометра MIRAS космического аппарата SMOS.

### Метод измерения температурной зависимости ДП почвы полуострова Ямал

Экспериментальная часть проекта основана на измерениях угловых зависимостей (угол визирования от  $5^\circ$ – $60^\circ$ ) радиояростной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях радиометром MIRAS космического аппарата SMOS [2] на частоте 1,4 ГГц (центр пиксела совпадал с координатой почвенно-климатической станции); синхронных подспутниковых измерениях температуры почвы почвенно-климатической станцией, установленной на тестовом участке (70.301389 С.Ш., 68.841306 В.Д.) в районе Бованенковского нефтегазового месторождения на полуострове Ямал [3]. Спутниковые и наземные данные получены за период с 13 сентября 2010 г. по 17 августа 2011 г. Временная зависимость радиояростной температуры, измеренной радиометром MIRAS космического аппарата SMOS на вертикальной и горизонтальной поляризациях при угле визирования  $40^\circ$  изображена на рис. 1. На основе этих зависимостей легко идентифицировать талое и мерзлое состояние поверхности почвы полуострова Ямал (отмечено на рис. 1 вертикальными линиями). Из рис. 1 видно, что с начала октября 2010 г. по конец мая 2011 г. почва в районе Бованенковского нефтегазового месторождения была мерзлой. Данные зависимости могут быть использованы для построения карт почвенного покрова полуострова Ямал характеризующие талое или мерзлое состояние почвы.

Теоретическое моделирование радиояростной температуры в микроволновом диапазоне основано на полуэмпирической L-MEB модели [4]

$$T_{B,p}^{th}(\theta) = \eta_p(\theta) \cdot T_s, \quad (1)$$

$$\eta_p(\theta) = \{1 - [1 - Q] \Gamma_p(\theta, \varepsilon_s, H_r, N_p) + Q \Gamma_q(\theta, \varepsilon_s, H_r, N_q)\}, \quad (2)$$

$$\Gamma_{p,q}(\theta, \varepsilon_s, H_r, N_{p,q}) = |R_{p,q}(\theta, \varepsilon_s)|^2 \cdot \exp(-H_r \cos^{N_{p,q}} \theta), \quad (3)$$

$$Q = 0.1771 H_r, N_H = 1.615(1 - \exp(-H_r / 0.359)) - 0.238, N_V = 0.767 H_r - 0.099, \quad (4)$$

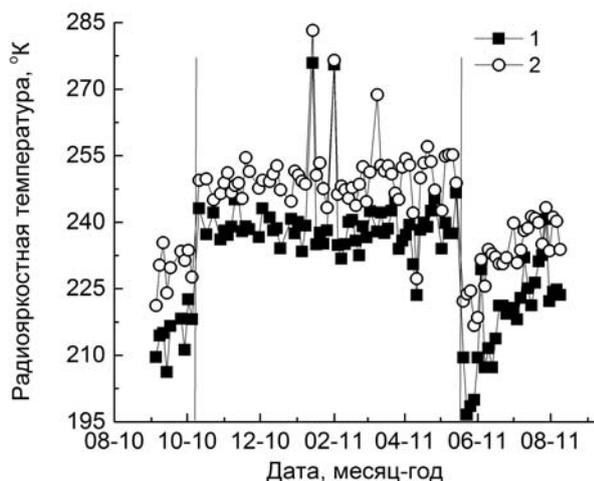
где  $\eta_p(\theta)$  - излучательная способность почвы;  $T_s$  - температура почвы;  $R_{p,q}(\theta, \varepsilon_s)$  - коэффициент отражения Френеля;  $H_r$  - фактор шероховатости поверхности почвы;  $Q$  - межполяризационный фактор (изменяется от 0 до 1);  $\varepsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость почвы. Сочетания пар  $p = H, q = V$  и  $p = V, q = H$  соответствуют радиояростным температурам при приеме на антенны с горизонтальной и вертикальной поляризациями. В виду высокой проникающей способности волн L-диапазона, влиянием снежного и растительного покрова в первом приближении пренебрегалось. Метод измерения диэлектрической проницаемости почвенного покрова полуострова Ямал основан на решении обратной задачи при минимизации функционала следующего вида:

$$F = \sum_{i=1}^N |T_{B,H}^m(\theta_i) - T_{B,H}^{th}(\theta_i)|^2 + |T_{B,V}^m(\theta_i) - T_{B,V}^{th}(\theta_i)|^2 \quad (5)$$

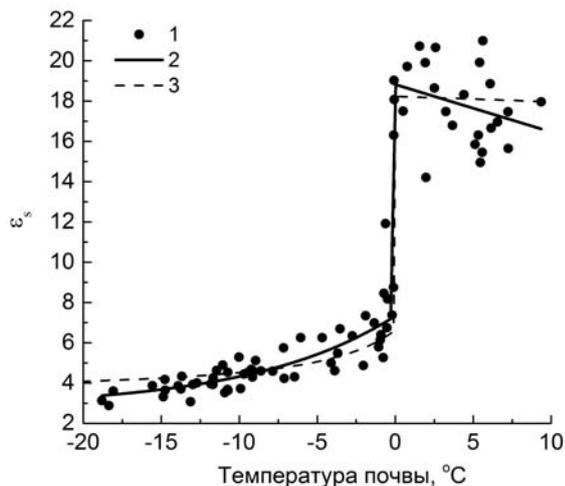
где  $T_{B,H}^m(\theta_i), T_{B,V}^m(\theta_i)$  - измеренные с помощью SMOS радиояростные температуры на горизонтальной и вертикальной поляризациях в диапазоне углов визирования

$5^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$ ;  $N$  – общее число углов визирования. Задача минимизации функционала (5) решалась на основе алгоритма Левенберга-Марквардта [5] при этом варьировались параметры  $H_r$ ,  $\varepsilon_s$  см. теоретическую модель (1)–(4). Для каждого дня съемки найденное значение диэлектрической проницаемости сопоставлялось с температурой поверхности почвы, измеренной почвенно-климатической станцией (см. рис. 2). Видно, что в мерзлом состоянии диэлектрическая проницаемость не является константой, а меняется более чем в два раза при изменении температуры почвы от минус  $20^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$ . Подобная температурная зависимость диэлектрической проницаемости хорошо изучена и объясняется фазовыми переходами между связанной и свободной водой в мерзлой почве [1]. Предполагая, что поверхностный слой арктической тундровой почвы полуострова Ямал богат органикой, для оценки плотности сухого сложения и влажности почвы (до момента замерзания) применим модель арктической тундровой почвы [1] (т.к. в [1] почва замерзала при минус  $6^\circ\text{C}$ , в этой модели ось температуры была искусственно сдвинута на 6 градусов). В результате регрессионного анализа (см. рис. 2 кривая 3) получены следующие оценки для плотности сухого сложения ( $0,54 \text{ г/см}^3$ ) и объемной влажности ( $0,7 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) почвы. Данные оценки близки к характеристикам поверхностного слоя (первые сантиметры) типичных арктических тундровых почв. Оптимальная регрессионная зависимость (среднеквадратичное отклонение 0,8), описывающая измеренные значения диэлектрической проницаемости (см. рис. 2, точки) от температуры почвы, была найдена в следующем виде (см. рис. 2, кривая 2):

$$\varepsilon_s = \begin{cases} 2,8 + 4,5e^{T/9,2}, & T \leq 0, \\ 18,8 - 0,2T, & T > 0. \end{cases} \quad (6)$$



**Рис. 1. Временной ход радиояркостной температуры, измеренной в районе Бованенковского нефтегазового месторождения, на фиксированном угле визирования  $40^\circ$ . 1 - горизонтальная и 2 - вертикальная поляризации**



**Рис. 2. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости почвы. 1 – измеренные значения на основе данных SMOS, 2 – регрессионная зависимость, рассчитанная по формуле (6), 3 – расчет по модели из [1]**

Производя таким образом калибровку для конкретного района, возможно найти подобную эмпирическая зависимость (см. рис. 2 кривая 1 и 2), которая может быть использована в качестве входной модели диэлектрической проницаемости в уравнении радиометрии (1)–(4), далее задача минимизации (5) решается аналогично относительно температуры почвы  $T_s$ . В дальнейшем данный подход предполагается апробировать для различных участков полуострова Ямал и для более длительного временного отрезка.

## **Заключение**

В данной работе предложен метод измерения из космоса температурной зависимости диэлектрической проницаемости почвы полуострова Ямал. Данный подход открывает перспективу оперативного измерения температурной зависимости диэлектрической проницаемости почвы арктической тундры на обширных территориях, что в дальнейшем позволит создавать в реальном масштабе времени на основе спутниковых данных космического аппарата SMOS региональные температурные карты почвенного покрова арктической тундры. Это позволит существенно увеличить пространственное разрешение получаемых данных по сравнению с сильно разреженной в арктическом регионе сетью почвенно-климатических станций.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-17-00656.

## **Список литературы**

1. Mironov V.L., De Roo R.D., Savin I.V. Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. No. 6. Pp. 2544–2556.
2. ESA SMOS: [Электронный ресурс]. Заглавие с экрана: SMOS. Режим доступа URL: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/SMOS](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS). (Дата обращения: 04.03.2014).
3. UAF (Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks): [Электронный ресурс]. Заглавие с экрана: Permafrost laboratory. Режим доступа URL: <http://permafrost.gi.alaska.edu/site/vd3>. (Дата обращения: 04.03.2014).
4. Lawrence H., Wigneron J.-P., Demontoux F., Mialon A., Kerr Y.H. Evaluating the Semiempirical H-Q Model Used to Calculate the L-Band Emissivity of a Rough Bare Soil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. Vol. 51. No. 7. Pp. 4075–4084.
5. Golub G.H., Van Loan C.F. Matrix Computations. Johns Hopkins University Press, 1996. 694 p.

**УДК 528.8.04, 528.88**

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ**

А. Ю. Зверева, Г. В. Лобанов

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет им. ак. И. Г. Петровского»

e-mail: [Zverek1206@mail.ru](mailto:Zverek1206@mail.ru), e-mail: [lobanov\\_grigorii@mail.ru](mailto:lobanov_grigorii@mail.ru)

Проанализированы факторы, определяющие величину индекса MOD09 на поверхностях с разными типами почв. Сопоставлены распределения коэффициента контрастности структуры почвенного покрова и зонального отношения MOD09 для типичных почв агроландшафтов региона.

*Ключевые слова:* спектральные характеристики почв, вегетационный индекс, дистанционное зондирование.

Использование спектральных характеристик поверхности в мониторинге почв повышает возможности учёта в организации землепользования пространственной структуры почвенного покрова. Большое разнообразие свойств пахотных почв на сравнительно небольших по площади территориях во многом обусловлено спецификой ведения хозяйства, как усиливающей, так и сглаживающей различия естественного

плодородия. Особенности структуры, содержание гумуса, физико-механические характеристики существенно различаются в области распространения почв одного таксона на территориях староосвоенных регионов. Сложная структура почвенного покрова, подтверждённая традиционными изысканиями, отражается и в материалах спутниковой съемки, что позволяет рассматривать дистанционную оценку свойств почв как перспективный элемент организации мониторинга сельскохозяйственных земель. Практическое применение спутниковой съемки ограничено сложностью и неоднозначностью связи спектральных характеристик поверхности и свойств почв, которая зависит кроме собственно особенностей почв от погодных условий, типа севооборота, состава и продуктивности сельхозкультур. Развитие метода предполагает сопоставление данных спутниковой и почвенной съемки в разных хозяйственных и почвенно-климатических условиях с учётом разнообразия спектральных характеристик поверхности

Для пахотных угодий Брянской области, отличающихся мозаичностью и мелкоконтурностью, пространственный анализ разнообразия спектральных характеристик поверхности рассматривается нами как потенциальный метод учёта в мониторинге сложности почвенного покрова. Предполагается, что степень неоднородности спутникового изображения участков пахотных земель определяет различия объема работ традиционной почвенной съемки.

Сравнение спектральных характеристик выполнено для 265 участков пахотных земель площадью 100 га за март-октябрь 2010–2013 гг. Участки расположены на слабопересеченных водораздельных равнинах в разных почвенно-климатических условиях. Использованы значения показателя (продукта в терминологии разработчиков) MOD09Q1 – средняя величина коэффициентов спектральной яркости пикселей спутникового изображения в каналах 620–670 нм и 841–876 нм (красная и ближняя инфракрасная зона) с пространственным разрешением 250 м, рассчитанная за 8 дней [2]. Выбор показателя обоснован большей возможностью отразить разнообразие почвенного покрова в сравнении с иными продуктами семейства с разрешением 500 и 1000 м и учесть влияние частой смены погодных условий, характерной для западной части Русской равнины. Коэффициенты яркости характеризуют, хотя и неоднозначно, в разные фенологические сезоны: состояние снежного покрова, физические свойства открытой поверхности почвы, особенности растительности – видового состава, физиологического статуса, проективного покрытия. Обработка первичных данных выполнена в программном комплексе ENVI 4.5.

Соотношение яркости в красной и инфракрасной зоне используются для расчёта вегетационных индексов – показателей, при прочих сходных условиях, характеризующих биологическую продуктивность угодий. Основной задачей сравнения определен поиск и обоснование особенностей распределения спектральных характеристик почвенного покрова в пространстве и времени для оценки возможностей и ограничений использования материалов дистанционного зондирования в мониторинге почв пахотных земель.

Прежде всего, оценивалась чувствительность показателя к сезонным изменениям состояния ландшафта. Значения нормализованного индекса разности яркости в красной и инфракрасной зоне спектра (далее – NDVI – normalized difference vegetation index или индекс) закономерно и устойчиво изменяются от марта к октябрю (табл. 1). Индекс рассчитывается как отношение разности коэффициентов спектральной яркости в красной и ближней инфракрасной зоне к их сумме.

Близкая к нулю, а иногда отрицательная величина индекса в конце зимы объясняется влиянием снежного покрова – высокими коэффициентами спектральной яркости в обеих зонах. Значения быстро увеличиваются в апреле-мае, достигают максимума в июне и июле и плавно снижаются к поздней осени (к ноябрю).

Максимальные значения соответствуют состоянию наибольшей биологической продуктивности агроландшафтов.

**Таблица 1**

**Распределение средних значений NDVI для пахотных земель Брянской области и температуры воздуха (°C) в 2010–2013 гг.**

Год	Показатели	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
2010	NDVI	-0,005	0,328	0,624	0,743	0,702	0,554	0,576	0,551
	T°C	-0,2	10,7	19,2	22,5	26,6	24,9	14,7	5,2
2011	NDVI	0,081	0,418	0,635	0,646	0,652	0,577	0,638	0,620
	T°C	-1,6	9,0	16,8	20,8	23,5	19,4	13,8	6,9
2012	NDVI	0,007	0,348	0,701	0,784	0,727	0,662	0,626	0,402
	T°C	-1,0	10,9	17,9	18,5	22,8	19,0	14,2	7,7
2013	NDVI	0,009	0,277	0,682	0,740	0,735	0,637	0,608	0,476
	T°C	-4,7	8,7	18,9	20,6	19,4	19,3	11,0	7,4

Ведущие механизмы динамики – изменение температуры поверхности, потока встречного излучения и, следовательно, яркости в ближней инфракрасной зоне; интенсивности поглощения в красной зоне растительностью в разных фазах вегетации. Динамика NDVI хорошо согласуется с изменением температуры – коэффициент корреляции в разные годы составляет от 0,65 до 0,91, хотя по отдельным спектральным зонам связь менее тесная. В 2010 г. с аномально сухой жаркой погодой значения индекса минимальны – сказывается, вероятно, угнетение растительности засухой.

Закономерности пространственного распределения значений индекса, менее устойчивы и, по-видимому, зависят от сочетания специфики хозяйственной деятельности и почвенно-климатических условий. Средние значения индекса, рассчитанные для административных районов Брянской области за 8 месяцев года, изменяются в 2010–2013 гг. от 0,45 до 0,57 (табл. 2).

**Таблица 2**

**Распределение средних и ранжированных значений NDVI для пахотных земель в границах административных районов Брянской области в 2010–2013 гг.**

Год	2010		2011		2012		2013	
	NDVI	Ранг	NDVI	Ранг	NDVI	Ранг	NDVI	Ранг
Брасовский	0,460	11	0,525	10	0,483	11	0,473	11
Выгоничский	0,471	15	0,537	11	0,492	15	0,483	8
Гордеевский	0,472	17	0,538	13	0,508	7	0,487	2
Дубровский	0,488	13	0,538	12	0,520	6	0,488	13
Жуковский	0,489	8	0,546	18	0,522	12	0,489	12
Злынковский	0,492	12	0,553	16	0,522	8	0,507	15
Климовский	0,495	7	0,558	14	0,529	17	0,513	10
Клинцовский	0,498	1	0,558	7	0,529	3	0,514	3
Красногорский	0,511	2	0,565	2	0,532	2	0,522	6
Мглинский	0,521	18	0,577	15	0,533	1	0,528	17
Новозыбковский	0,528	6	0,592	17	0,539	16	0,528	4
Погарский	0,530	3	0,634	9	0,540	9	0,528	18
Почепский	0,532	4	0,657	6	0,542	10	0,533	1
Рогнединский	0,534	9	0,664	3	0,551	4	0,538	7
Стародубский	0,536	10	0,667	5	0,557	13	0,538	16
Суражский	0,538	5	0,671	8	0,558	5	0,543	9
Трубчевский	0,538	14	0,673	4	0,559	18	0,551	14
Унечский	0,549	16	0,729	1	0,567	14	0,584	5

Использование административных районов как единиц сравнения имеет, хотя и не бесспорные основания. Во-первых, различаются почвенно-климатические условия сельскохозяйственно освоенной части районов. Пограничное положение территории области по отношению к крупным природным регионам определяет разнообразие ландшафтов. В западной части области преобладают предполесские, центральной – предопольские и опольские, северной – моренные ландшафты с дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами в разной степени изменёнными многолетним использованием. На участках западного склона Среднерусской возвышенности в восточной части области распространены эрозионные ландшафты с серыми и темно-серыми лесными почвами. Во-вторых, по административным районам систематизируются статистические данные об урожайности, направлении и интенсивности почвенных мелиораций, соотношения площади под разные виды культур – показателям, которые нами рассматриваются как элементы модели распределения значений NDVI с учётом специфики хозяйственной деятельности.

Устойчивой связи величины NDVI и, что особенно важно, его положения в ряду значений с определенными почвенно-климатическими условиями не выявлено. От года к году изменяются не только средние значения индекса, но и порядок распределения районов по его величине. Характер распределения определяется по нашему мнению отличиями в хозяйственной деятельности – как эффективностью, видовым составом культур и её динамикой. За четырехлетний период выявлена более тесная связь низких значений индекса с территорией районов, отличающихся лучшими агроклиматическими ресурсами, интенсивным сельским хозяйством, большой долей земель под паром и пропашными культурами. Высокие значения индекса связаны с территориями менее обеспеченными теплом, используемыми преимущественно под зерновые, большой долей залежных земель. Физические основы влияния землепользования на величину NDVI могут объясняться разным проективным покрытием поверхности под пропашными, зерновыми культурами, залежью и землями под паром.

Разнообразие значений индекса в границах районов, выраженное через статистические характеристики распределения, также неоднозначно. Значения среднего отклонения зависят от погодных условий. В годы с жаркой, и особенно, сухой погодой в вегетационном периоде (2010, 2012) разнообразие значений на большем количестве участков уменьшается; с относительно благоприятными агроклиматическими условиями – увеличивается. Предварительная оценка природных и антропогенных факторов распределения NDVI показывает, что разнообразие значений в границах районов обратно связано с интенсивностью сельскохозяйственного использования и прямо – с неоднородностью структуры почвенного покрова, обусловленной частой сменой условий почвообразования.

Описанные особенности позволяют выделить следующие направления использования спектральных характеристик поверхности в мониторинге почв – проведение почвенной съемки с разной частотой в зависимости от разнообразия спектральных характеристик; оценка потенциальных потерь урожая, связанных с погодными условиями через динамику величины NDVI, поиск участков с устойчиво высокими и низкими значениями индекса и причин их существования.

### **Список литературы**

1. Природные ресурсы и окружающая среда субъектов Российской Федерации. Центральный федеральный округ. Брянская область / Администрация Брянской обл.; под ред. Н. Г. Рыбальского, Е. Д. Самотесова, А. Г. Митюкова. М.: НИИ-Природа, 2007.

2. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility. Version 1.3 <http://modis-sr.ltdri.org>

## АЛГОРИТМ ПОИСКА ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ TERRA/MODIS

Е. А. Старченко, А. А. Романов  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: [katestar\\_work@yahoo.com](mailto:katestar_work@yahoo.com)

На основе данных дистанционного зондирования Земли был построен и проанализирован временной ряд, который включает в себя данные по 4 продуктам спектрорадиометра MODIS, а также климатические данные за последние 12 лет. Был разработан алгоритм по выявлению интервалов геохимических аномалий.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, геохимические аномалии, временной ряд, продукты Terra/Modis.

Перспективы Енисейского кряжа на обнаружении промышленно значимых золоторудных объектов в настоящее время оцениваются неоднозначно. По результатам множества обобщающих металлогенических исследований практически все золотое оруденение контролируется долгоживущими системами Ишимбинского, Татарского, Усть-Ангарского и Приенисейского разломов, расположенным в центральной части кряжа. Вместе с тем, выявленные в результате геолого-поисковых работ прямые признаки золоторудной минерализации (россыпи и рудопроявления золота, литогеохимические аномалии золота и его элементов спутников) свидетельствуют о необходимости более тщательного изучения этой части региона [1].

Технологии дистанционного зондирования применяются в геологии с середины прошлого века, цели и задачи применения варьируются очень широко: от задач картографирования и построения цифровых моделей рельефа, до аналитических задач по геоморфологии, геологоразведки. Одной из ключевых задач проводимого исследования является установление взаимно-однозначной связи между золоторудными месторождениями и спектральными характеристиками подстилающей поверхности Земли на основе спутниковых данных среднего и низкого пространственного разрешения.

Красноярский край по общему потенциалу золотоносности является одним из лидеров в Российской Федерации. На территории края выявлено 305 месторождений и перспективных проявлений золота, Нойбинское месторождение является одним из них. Как правило, крупные залежи полезных ископаемых сопровождаются аномальными концентрациями тех или иных химических элементов в почве. Геохимический анализ играет немаловажную роль при разведке месторождений, построение и анализ геохимических моделей позволяет спрогнозировать участки перспективных проявлений золота [2].

Существует ряд работ проводимых в этой области – основная идея заключалась в поиске мест метасоматоза. Преимущественно все работы проводились на территории, которая лишена растительного покрова [3, 4]. Отличительной чертой проводимого исследования является изучение спектральных характеристик растительного покрова на территории месторождений Енисейского Кряжа. В результате поисковых работ проводимых в период 2006–2011 гг., в пределах Нойбинского месторождения были собраны пробы и проведен их геохимический анализ. Результатом полевых работ является векторная карта геохимических аномалий по 15 химическим элементам. Фрагмент таких данных представлен в табл. 1.

**Таблица 1**

Name	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Br	Pb	Rb	Sr	Zr
309_01_001 <sub>3</sub>	286	447	139	1902	4432	218	1715	281	313	212	586	235	96
309_01_002	282	637	167	2742	6517	236	1612	322	395	232	696	240	97

Из современной геологии известно, что все глубинные процессы и структурные изменения так или иначе проявляют себя на поверхности земли. Одним из таких примеров является влияние геохимических аномалий на растительность. Американский ученый Foу в 80-х годах описал влияние геохимии на окрас и форму растительности [5]. Можно сделать предположение, что с изменением формы и цвета изменились и спектральные характеристики, которые регистрируют сканеры спутниковых системы. Таким образом глобальной задачей всего исследования является поиск корреляционных связей между геохимическими аномалиями и спектральными характеристиками объектов, которые располагаются на участках с повышенной концентрацией химических элементов в почве. В рамках данной работы была поставлена цель, выделить временные интервалы геохимических аномалий. В качестве пространственных данных для исследования использовались продукты MODIS, а именно EVI, NDVI, GPP и LAI.

NDVI – нормализованный относительный индекс растительности, простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Используется для решения задач оценки растительного покрова. EVI – индекс нового поколения, он позволяет выделить больше градаций в районах с высокой зеленой биомассой и имеет преимущества для мониторинга растительности, поскольку влияние атмосферы в значениях EVI минимизировано.

В основе исследования лежит анализ данных и построение временных рядов по данным, полученным за последние 12 лет. Для исследования был выбран период с мая по сентябрь включительно для анализа всего вегетационного цикла. Были определен перспективный участок Нойбинского месторождения – Нижне-Нойбинский рудный узел.

Было принято решение анализировать данные растительного покрова по 5 месяцам (май, июнь, июль, август, сентябрь), для того чтобы охватить весь вегетационный цикл растительности. Индексы NDVI и EVI строятся с периодом в 16 дней. Таким образом на каждый месяц приходится по 2 растра. Индексы GPP и LAI строятся с периодом 8 дней. Каждый растр обрабатывался по одному алгоритму.

1. С помощью специально разработанной программы для данных MODIS перевели данные в формат GeoTiff;

2. Произвели вырезку данных ДЗЗ на исследуемые территории;

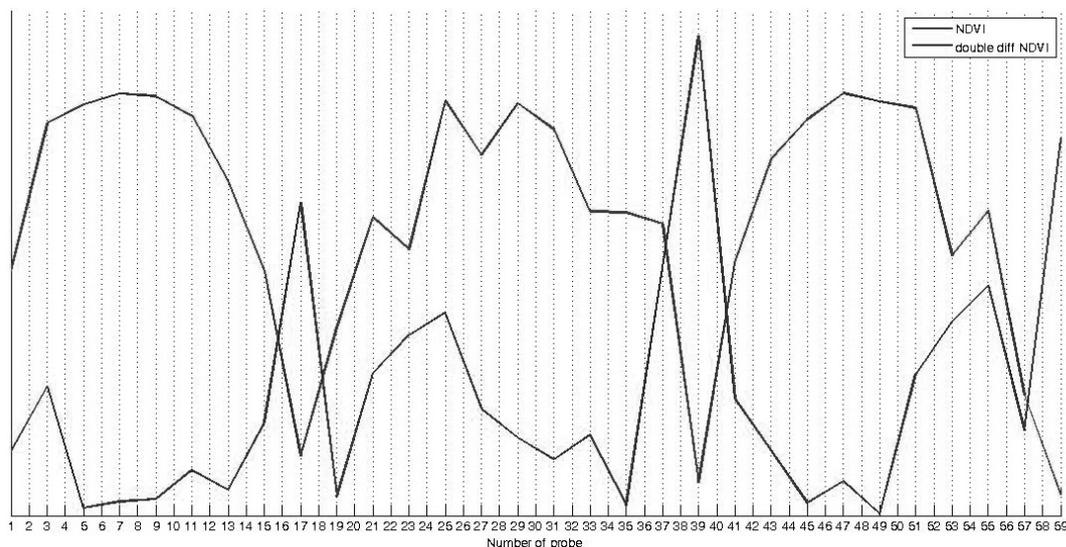
3. Посчитали среднее значение для каждого из 4 продуктов MODIS.

Таким образом были собраны и обработаны все имеющиеся данные для растительности в период с 2000 г. по 2012 г. Результатом обработки этих данных являются 2 таблицы для каждого рудного узла содержащие по 256 строк. В табл. 2 приведены данные для Нижне-Нойбинского Рудного Узла.

**Таблица 2**

Дата	NDVI	EVI	Дата	LAI	GPP
8_may_2000	0,063391176	0,0928492754	8_may_2000	1	10,166667
24_may_2000	0,4837968254	0,185678125	16_may_2000	2,666667	87,166667
09_jun_2000	0,7763791667	0,3958162162	24_may_2000	7	174,6
25_jun_2000	0,8138184615	0,44556	01_jun_2000	3	82,8

Для визуализации и дальнейшей обработки полученных значений использовался пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MathLab. При поиске аномальных значений данных по каждому из продуктов MODIS, за отличительный признак были приняты скачкообразные изменения статистических данных. «Скорость» этих изломов значительно превосходит относительно плавные сезонные изменения показателей растительности. Для выделения резко изламывающихся сигналов было применено двойное дифференцирование. В результате этой операции был получен график отображающий крутизну “изломов” представленные на рис. 1.



**Рис. 1. Результат двойного дифференцирования индекса растительности NDVI в период за 3 года**

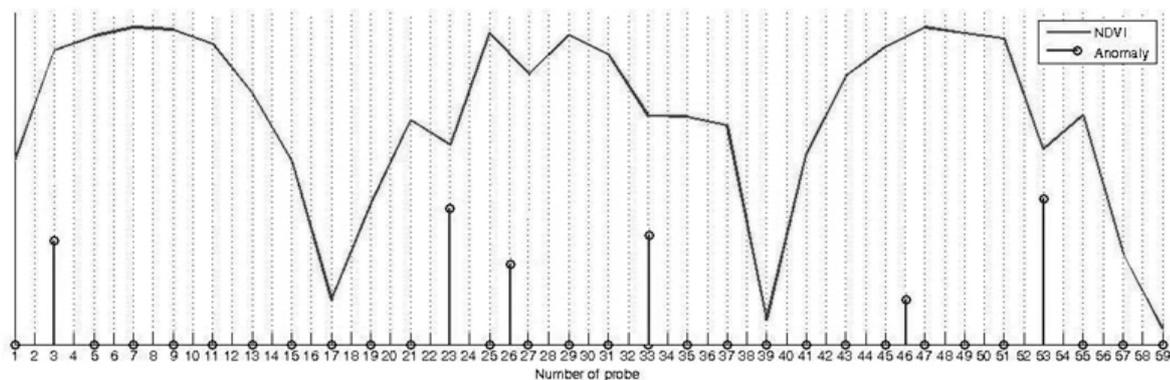
Вторым этапом введение порогового детектора, т. е. значения “крутизна” которых не превышала естественного сезонного изменения приравнивались к нулю. Все значимые отклонения от нормы фиксировались на графике, представленном на рис. 2.

Такой алгоритм обработки позволил выделить аномальные значения для индексов растительности NDVI, EVI, а так же для показателей LAI и GPP.

Следующим этапом является выделение тех временных интервалов, которые содержат одновременно аномальные значения по 4 показателям характеризующих растительность. Таким образом, было выделено 8 временных интервалов:

1. 26 июня 2001 года
2. 26 июня 2002 года
3. 5 августа 2007 года
4. 9 июня 2008 года
5. 27 июля 2008 года
6. 13 августа 2009 года
7. 28 июля 2010 года

13 августа 2010 года В дальнейшем планируется применять данные со спутников среднего пространственного разрешения, съемка которых проводилась в указанные промежутки времени.



**Рис. 2. Значимые отклонения для индекса NDVI в период с 2000 по 2002 год**

### Список литературы

1. Фисенко В. Г. Термобарогеохимические особенности кварца золоторудных объектов восточного склона Енисейского кряжа // Молодежь и наука: Докл. VIII Всерос. конф., 15–16 апр. 2012 г. Красноярск: СФУ, 2012.
2. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. М.: Изд-во ГосИздгеолЛит, 1951. 543 с.
3. Cosmas Pitia Kujjo Thesis Application of remote sensing for gold exploration in the Nuba mountains // Sudan. 2010. 110 p.
4. Chen, F.; Niu, Z.; Sun, G.Y.; Wang, C.Y.; Teng, J. Using low-spectral-resolution images to acquire simulated hyperspectral images // J. Remote Sens. 2008. 29. Pp. 2963–2980.
5. Foy C. D., Chaney R.L., White M.C, The physiology of metal toxicity in plants // Ann. Rev. Plant Physiol. 1978. 29. Pp. 511–566.

УДК 528.854, 528.88

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СУКЦЕССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

К. А. Рубанов, А. А. Романов

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

e-mail: [ikit.vt06@yandex.ru](mailto:ikit.vt06@yandex.ru)

Работа направлена на исследование применимости нейросетевого подхода к распознаванию данных ДЗЗ в условиях ограниченности обучающих данных. Производится сравнение классического статистического метода и искусственной нейронной сети. Результаты работы показывают, что присущий гетерогенным данным закон нормального распределения не всегда обеспечивает преимущество статистическим алгоритмам, а нейросетевой подход имеет большой потенциал для классификации данных ДЗЗ.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, распознавание образов, управляемая классификация, искусственные нейронные сети, статистический анализ.

Одним из важнейших этапов исследования сукцессионных процессов с использованием данных дистанционного зондирования Земли является тематическая обработка. Основной подход при тематической обработке – это использование аппарата распознавания образов. В качестве классического метода, применяемого при картографировании лесной поверхности, закрепилось использование статистического

анализа. Чаще всего применяется метод максимального правдоподобия, использующий модель вероятности для определения границ решения. Результаты дистанционного зондирования часто подвержены случайным изменениям, скрывающим характерные различия между интересующими классами. Благодаря своей природе статистический анализ позволяет учесть эти изменения и потенциально уменьшить их отрицательное влияние на точность классификации [1].

Помимо этого, исследуемые классы могут перекрываться в пространстве измерений: некоторые измерения одного класса могут быть неотличимы от измерений других классов. В большинстве этих случаев методы статистического распознавания образов позволяют производить классификацию высокой точности. Наряду со статистическим подходом все более широкое применение находят другие алгоритмы: методы нейросетевой, объектно-ориентированной классификации, опорных векторов и др. Выбор того или иного алгоритма обусловлен прежде всего предметной областью и конкретной задачей, стоящей перед исследователем, а также имеющимися в наличии данными, как космических наблюдений, так и полевых исследований.

Кроме того, все нарастающий прогресс в развитии характеристик спутниковых систем дистанционного зондирования показывает необходимость в разработке новых методов, позволяющих с требуемой точностью проводить обработку данных ДЗЗ. Подтверждением может служить большое количество научных работ, посвященным исследованию применимости различных методов распознавания для разных типов данных [2–8].

Некоторые достоинства статистического анализа:

1. Способность учитывать случайный характер вариаций природных процессов, скрывающих характерные различия между классами.

2. Минимизация количества ошибок распознавания, возникающих вследствие неопределенности относительно правильности идентификации обучающих образов, используемых для определения дискриминантных функций.

3. Возможность получения наиболее правильных результатов классификации данных, в случае реального перекрытия изучаемых классов в пространстве измерений. Причиной чего нередко является спектральная близость пикселей разных классов.

Использование нормального распределения обеспечивает математически интерпретируемую аналитическую форму для границ решений и при совпадении этого предположения с реальной картиной обеспечивает оптимальное распознавание. Однако материалы ДЗЗ не всегда соответствуют распределению Гаусса, что характерно для данных приборов с синтезированной апертурой. Кроме того, некоторые исследования показывают, что присущий гетерогенным данным закон нормального распределения не всегда обеспечивает статистическим алгоритмам выигрыша в качестве классификации. Также метод максимального правдоподобия эксплуатирует только спектральные характеристики и в некоторых случаях проигрывает в качестве распознавания более простым методам, учитывающим взаимные связи пикселей.

Использование нейронных сетей для классификации данных ДЗЗ обусловлено их следующими особенностями:

1. Отсутствием необходимости наличия априорной информации относительно входных данных.

2. Формированием нелинейных границ решений в пространстве признаков.

3. Устойчивостью к ошибкам при обработке неполных или частично некорректных входных образов.

4. Высокой степенью генерализации входных данных.

Значительным отличием этого метода распознавания от статических алгоритмов является то, что границы решения не фиксируются детерминированным правилом, применяемым к характерным признакам прототипа, а определяются в итеративной

форме путем минимизации критерия ошибки при обработке обучающих данных. Возможность нейронной сети различать те или иные образы обусловлена ее весовыми коэффициентами. В процессе обучения они итеративно корректируются в направлении конфигурации, которая позволяет сети определять представляющие интерес образы прототипа [9]. Непараметрические классификаторы на основе нейронных сетей показывают хорошие результаты и активно используются для распознавания данных безотносительно функции распределения плотности вероятности. Однако возникает вопрос о сложности математической интерпретации правил, детерминирующих отнесение пикселей к тому или иному классу. Помимо этого, процесс обучения нейронной сети обычно занимает значительно больше времени, чем классификация изображения традиционными алгоритмами.

Сравнение методов статистического анализа и нейросетевого подходов к распознаванию материалов ДЗЗ проведено в рамках работы по исследованию сукцессионных процессов 2005 и 2012 годов по данным спутника Landsat 5.

В результате проведения группой экологов полевых исследований летом 2005 и 2012 годов были получены данные, содержащие информацию о 82 точках исследуемой территории. Характеристика каждой точки описывает преобладающий тип лесной породы в данной точке. На основании этих материалов была генерализована обучающая выборка, содержащая 5 классов растительности.

Характеристика обучающих данных и материалов полевых исследований представлена табл. 1.

**Таблица 1**

Класс	Количество точек	Количество пикселей в обучающей выборке	
		2005	2012
Ель	20	220	240
Пихта	12	120	110
Сибирский кедр	16	240	220
Лиственница сибирская	22	320	280
Сосна обыкновенная	12	180	240
Всего	82	1080	1090

После выбора и отбора материалов для тематической обработки был проведен ряд классификаций каждым из сравниваемых методов с целью получения результатов наилучшего качества. Для сравнения полученных изображений использовался метод генерации матриц ошибок, позволяющий характеризовать как погрешности классификации для каждого класса, так и ошибки, связанные с неверной классификацией, а также аппарат каппа-статистики. В качестве контрольных данных для оценки точности классификации использовались топографические карты и эталонные выборки, полученные из обучающих образцов.

Из табл. 2 видно, что наилучшее качество распознавания обеспечил нейросетевой подход, как для данных 2005, так и для 2012 года.

**Таблица 2**

Метод классификации	Средняя точность производителя (producer's accuracy)		Средняя точность пользователя (user's accuracy)		Средняя точность (overall accuracy)		Каппа-коэффициент	
	2005	2012	2005	2012	2005	2012	2005	2012
Метод максимального правдоподобия	0,74	0,78	0,79	0,81	0,78	0,8	0,72	0,73
Нейросетевой подход	0,82	0,86	0,88	0,91	0,86	0,88	0,81	0,84

Проведенный анализ подтвердил широкие возможности нейронных сетей по распознаванию данных ДЗЗ. Как видно из показателей точности распознавания, закон нормального распределения, чаще всего присущий гетерогенным данным, не обеспечил статистическим алгоритмам преимущества перед нейросетевым подходом. Нейросетевой алгоритм может обеспечить высокий уровень распознавания в случаях неприменимости нормального закона распределения к исследуемой информации, что актуально, к примеру, для материалов ДЗЗ приборов с синтезируемой апертурой. Неправильное задание и неточная оценка функции распределения играет решающую роль в точности распознавания статистических алгоритмов.

Результаты данной работы показывают, что нейронные сети имеют большой потенциал для использования при классификации данных ДЗЗ. Однако следует отметить, что процесс распознавания с помощью нейронной сети занял гораздо больше времени, чем использование статистических алгоритмов, что показывает необходимость разработки и применения специализированных архитектур для решения конкретных задач. Более тонкая настройка процесса обучения и конфигурирования структуры нейронной сети должна обеспечить сокращение временных затрат на классификацию.

### **Список литературы**

1. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пос. М.: Логос, 2001. 264 с.
2. Hepner G.F., Logan T., Ritter N., Bryant N. Artificial neural network classification using a minimal training set: comparison to conventional supervised classification // *Photogram. Eng. and Rem. Sens.* 1990. V. 56. № 4. Pp. 469–473.
3. Benediktsson J.A., Swain P.H., Ersoy O.K. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data // *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 1990. V. 28. № 4. Pp. 540–552.
4. Lee J., Weger R.C., Sengupta S.K., Welch, R.M. // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing.* 1990. Vol. 28. Pp. 846–855.
5. Kanellopoulos I., Varfis A., Wilkinson G.G., Megier J. Neural network classification of multi\_date satellite imagery // *Proc. Intern. Geosci. Rem. Sens. Symp. (IGARSS'91).* 3–6 Jun 1991. Espoo, Finland. 1991. V. 4. Pp. 2215–2218.
6. Bischof H., Schneider W., Pinz A.J. Multispectral classification of Landsat images using neural networks // *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 1992. V. 30. Pp. 482–490.
7. Roli F., Giacinto G., Vernazza G. Comparison and combination of statistical and neural network algorithms for remote\_sensing image classification // *Neurocomputation in remote sensing data analysis: processing of concerted action COMPARES (connectionist methods for preprocessing and analysis of remote sensing data)* / Eds. I. Kanellopoulos, G.G. Wilkinson, F. Roli, J. Austin. Heidelberg: Springer, 1997. Pp. 117–125.
8. Keramitsoglou I., Sarimveis H., Kiranoudis C.T., Sifakis N. Radial basis function neural networks classification using very high spatial resolution satellite imagery: an application to the habitat area of Lake Kerkini (Greece) // *Intern. J. Rem. Sens.* 2005. V. 26. № 9. Pp. 1861–1880.
9. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИЛЬБЕРТА-ХУАНГА ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ

Е. С. Нежевенко, А. С. Феоктистов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

e-mail: [nejevenko@iae.nsk.su](mailto:nejevenko@iae.nsk.su), e-mail: [feoktistov.artem@gmail.com](mailto:feoktistov.artem@gmail.com)

В статье представлено применение двумерного преобразования Гильберта-Хуанга (ННТ) для выделения текстурных признаков. Приведен обзор различных методик ННТ и представлены некоторые новые методы. Разработано программное обеспечение для выполнения двумерного ННТ. Экспериментальные результаты приведены в последней части статьи, их эффективность оценивается по сравнению с традиционными методами текстурной сегментации.

*Ключевые слова:* преобразование Гильберта-Хуанга, текстурная сегментация, обработка изображений.

### **Введение**

Классификация текстур является одной из основных и в тоже время сложных задач обработки изображений и компьютерного зрения. Большинство техник обработки изображений нуждаются в знании, где находится та или иная область интереса. Классификация текстур позволяет получить необходимую для этого информацию. Начиная с основополагающей работы [1], было предложено огромное количество таких методов, все их можно классифицировать следующим образом: статистические методы [2], структурные методы [3], методы, использующие в своей основе математическую модель [4], методы, основанные на фильтрации [5]. В большинстве своем все предложенные методы основаны на предположениях о линейности и стационарности функций, описывающих структуры. Только в последние годы появились новые методы для анализа нестационарных и нелинейных данных.

В данной статье будет рассмотрен один из таких методов – преобразование Гильберта-Хуанга (ННТ) [6] и его различные модификации применительно к задаче сегментации текстур. Это относительно новый подход обработки изображений, его основное отличие заключается в использовании адаптивного базиса разложения сигнала, в то время как остальные методы используют априорные, фиксированные базисы.

### **Преобразование Гильберта-Хуанга**

ННТ включает две части: разложение на эмпирические моды (EMD) и спектральный анализ Гильберта (HSA). Последний позволяет найти мгновенные амплитуды и мгновенные частоты сигнала, которые полностью его характеризуют. Однако корректно это можно сделать, только имея аналитический сигнал. Именно разложение любого сигнала на сумму аналитических сигналов, называемых внутренними модами, и обеспечивает EMD. Множество применений ННТ для анализа медицинских, сейсмических, радио сигналов, распознавания речи и других (создатель этого метода Хуанг разработал его для анализа нелинейно искаженных волн тайфунов), показали его высокую эффективность для анализа одномерных нелинейных и нестационарных процессов. По сравнению с преобразованием Фурье и вейвлет анализом он позволяет получить значительно лучшее временное и частотное разрешение.

## Сегментация текстур

В ходе исследования преобразования ННТ нами была разработана программа в среде Matlab, основными модулями которой являются модули преобразования Хуанга и Гильберта. Для поиска локальных экстремумов реализованы операторы морфологической реконструкции (эрозии и дилатации [7, 8]). Для построения огибающих Хуанг предложил использовать кубические сплайны [6]. Однако в случае двумерных изображений интерполяция кубическими сплайнами дает сильные возмущения на краях изображений, поэтому для построения огибающих была использована аппроксимация с помощью RBF функций [9]. Метод RBF аппроксимации имеет некоторые преимущества по сравнению с аппроксимацией сплайнами. Центры базисных функций не обязательно должны располагаться в узлах сетки. Кроме того, RBF хорошо подходит для интерполяции неоднородных данных. Экспериментальные результаты подтверждают это. В качестве тестовых изображений использовались как реальные, так и синтезированные изображения из набора текстур Brodatz [10] размером 200x200 пикселей, для принятия решения об остановке процесса декомпозиции были реализованы два классических варианта: критерий S и критерий  $SD_{\max}$  [6]. В качестве основного был использован критерий S, хотя было также проверено, что критерий  $SD_{\max}$  так же дает хорошие результаты уже при значениях  $SD_{\max}$  меньше 0.1.

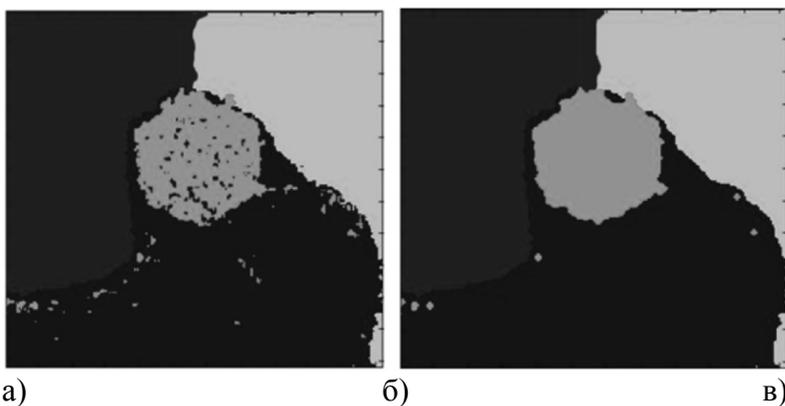
Как было сказано выше, разложение на эмпирические моды позволяет применить к ним преобразование Гильберта, что дает возможность выделить признаки, характеризующие изображения, такие как мгновенные частоты и амплитуды для каждого пикселя каждой моды:

$$H_s(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} dt ,$$
$$Z(t) = s(t) + iH_s(t) = a(t)e^{i\theta(t)} ,$$
$$a(t) = \sqrt{s(t)^2 + H_s(t)^2} , \theta(t) = \arctan \left[ \frac{H_s(t)}{s(t)} \right] ,$$

где  $a(t)$  и  $\theta(t)$  – соответственно, амплитуда и фаза сигнала во время  $t$ . Мгновенная частота может быть вычислена по формуле  $\omega(t) = d\theta(t)/dt$ . Соответственно при применении преобразования Гильберта-Хуанга к изображению для каждого пикселя возникает  $2*N$  признаков, где  $N$  – это число полученных эмпирических мод. Наиболее простым и распространенным методом сегментации текстур по признакам является метод главных точек (k-means clustering). На рис. 1 показан пример применения этого метода к сегментации синтетического мультитекстурного изображения.

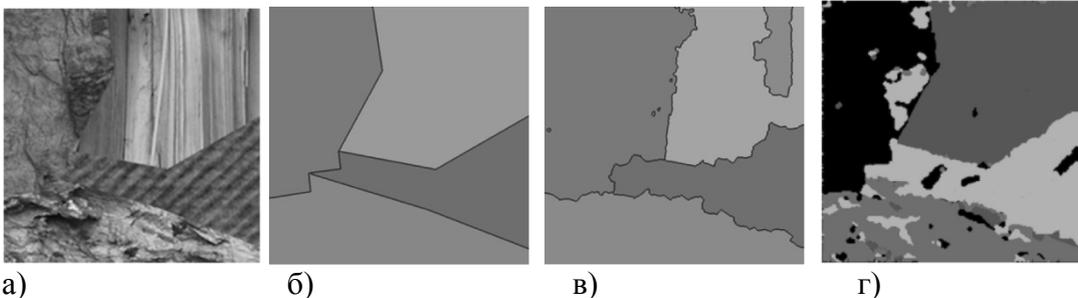
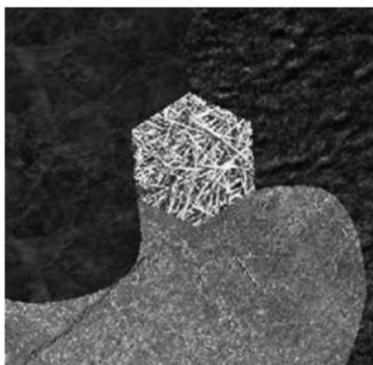
При использовании ННТ с дальнейшим применением к сегментированному изображению операторов М-дилатации и М-эрозии на выходе получаем ошибку распознавания 6 % рис. 2. Если сегментацию проводить методом главных точек без использования ННТ, получим ошибку распознавания 31 %.

Приведенный пример иллюстрирует то, что даже при использовании достаточно простого подхода к сегментации в совокупности с разложением на эмпирические моды можно получить достаточно высокое качество распознавания. Сравним результаты работы предложенного алгоритма с более эффективными алгоритмами сегментации текстур. Для этих целей использовался интернет портал [11], созданный специально для сравнения качества сегментирования различных алгоритмов. Результаты сегментации лучшим алгоритмом портала и предложенным алгоритмом представлены на рис. 2.



**Рис. 1. Изображение и сегментация его на текстуры: а) исходное изображение; б) изображение, сегментированное с помощью ННТ; в) изображение, сегментированное с помощью ННТ после дилатации и эрозии**

Основным параметром сравнения является процент правильно сегментированных текстур. Максимальное значение, представленное на сайте – 84.5 %. Среднее значение по всем представленным алгоритмам – 42.9 %. Алгоритм, предложенный нами, дает результат 48.7 %.



**Рис. 2. Сравнение алгоритмов сегментации на примере одного изображения: а) исходное изображение; б) эталонная сегментация; в) сегментация лучшим алгоритмом, представленным на сайте; г) сегментация предложенным алгоритмом**

Стоит заметить, что основной целью создания данного алгоритма являлось не получение максимального качества сегментации мультитекстурных изображений, а демонстрация перспективности использования эмпирических мод для сегментации изображений. На это указывает тот факт, что результаты получены с использованием только эмпирических мод, без применения каких-либо дополнительных методик.

### **Заключение**

В настоящей статье представлен новый подход к текстурной сегментации изображений. Двумерное преобразование Хуанга позволяет произвести наиболее

экономичное разложение изображения по частотным составляющим, поскольку при этом используются только те частоты, которые присутствуют в изображении. А к получающимся при этом модам – аналитическим функциям – применимо преобразование Гильберта, в результате которого вычисляются мгновенные частоты и амплитуды, используемые как признаки текстур. Этот метод основан исключительно на анализе структуры самого изображения, не использует обучающих выборок и поэтому является полностью адаптивным, кроме того он позволяет обрабатывать нелинейные и нестационарные функции, которыми, как правило, и являются текстурные изображения. Мы продемонстрировали применение метода к реальным и синтетическим изображениям. Имея в распоряжении представление изображения в виде композиции эмпирических мод, представляющих пространственные частоты изображения, мы можем сосредоточить свое внимание на анализе только их, а не всего изображения. Поэтому двумерны ННТ это новый подход, позволяющий извлечь текстурные признаки без задания каких-либо параметров.

### **Список литературы**

1. Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур ТИИРЭ 5. 1979. С. 98–118.
2. M.L. Comer, E.J. Delp, Segmentation of textured images using a multiresolution Gaussian autoregressive model // IEEE Trans. on Image Processing. 1999. 8 (3). Pp.408–420.
3. Tuceryan, Texture segmentation using Voronoi polygons // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. 12 (2). Pp. 211–216.
4. B.B. Chaudhuri, N. Sarkar, Texture Segmentation Using Fractal Dimension // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1995. 17 (1). Pp. 72–77.
5. T. Randon, J.H. Husoy, Filtering for texture classification: a comparative study // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1999. 21 (4). Pp. 291–310.
6. N. Huang, et al., The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis, Proc. R. Soc., Lond. A 454 (1998) 903–995.
7. S. Beucher, Geodesic reconstruction, saddle zones and hierarchical segmentation, Image Anal. Stereol. 20 (2001) 137–141.
8. L. Vincent, Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms, technical report 91-16, Harvard Robotics Laboratory, November 1991, IEEE Trans. Image Process. 2 (2) (1993) 176–201.
9. J.C.Carr, W.R.Fright, R.K.Beatson, Surface interpolation with radial basis functions for medical imaging, Comput. Graph. Proc., Annu. Conf. Ser. (SIGGRAPH 2001) (2001) 67–76.
10. P. Brodatz, Textures: A Photographic Album for Artists and Designers // Dover publications, New York, 1966.
11. Haindl, M., Mikes, S. Texture segmentation benchmark // In: 19th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2008, pp. 1–4. IEEE Comput. 500., Los Alamitos (2008).

## ТЕМАТИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА РЕГИОНАЛЬНОМ И ФЕДЕРАЛЬНОМ УРОВНЕ

Е. А. Гаврилюк, Д. В. Ершов

ФГБУН РАН «Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов»

Лаборатория мониторинга лесных экосистем

e-mails: [egor@ifi.rssi.ru](mailto:egor@ifi.rssi.ru), [ershov@ifi.rssi.ru](mailto:ershov@ifi.rssi.ru)

Работа посвящена вопросам создания тематической карты растительности на всю территорию России и отдельных ее регионов автоматизированными методами, основанной на данных спутниковой съемки Landsat-TM\ETM+. Кратко описаны основные методологические и технологические решения, используемые на текущий момент в ЦЭПЛ РАН для создания подобных карт, а также результаты их практической реализации.

*Ключевые слова:* данные ДЗЗ, Landsat, тематическое картографирование, лесные экосистемы, ГИС, дистанционный мониторинг.

В последние несколько лет на основе данных среднего и высокого пространственного разрешения создана целая серия тематических карт растительности, как глобального/континентального масштаба, так и отдельных стран или их регионов. Последние достижения в этой области знаний отмечены публикациями различных коллективов и, в частности, серия карт растительности ИКИ РАН (TerraNorte, 250 м) [1], карты изменений покрытых лесом территорий за 12 лет (Global Forest Change, 30 м) от университета Мэриленда (США) [2]. В лаборатории мониторинга лесных экосистем ЦЭПЛ РАН в рамках фундаментальных и тематических прикладных программ ведутся работы по исследованию и разработке методических и технологических основ системы дистанционного мониторинга лесных экосистем России на региональном уровне по спутниковым данным Landsat. Создание электронных тематических карт лесных и других наземных экосистем является одной из первоочередных задач. Основной принцип работы системы заключается в автоматизации процесса создания тематических карт растительности крупных регионов с периодичностью раз в пять лет по безоблачным разносезонным композитным изображениям Landsat. Эти работы проводятся в тесной кооперации с отделом «Технологии спутникового мониторинга» ИКИ РАН.

Остановимся на основных этапах тематического картографирования безоблачных композитных изображений, технология построения которых изложены в более ранних работах с участием авторов [3].

### **Картографирование лесных экосистем по спутниковым данным Landsat**

В настоящее время общая методика получения растрового тематического изображения по спутниковым данным Landsat-TM\ETM+ и составления на его основе карты растительности лесных экосистем представляет собой автоматизированную цепочку процессов геопространственной обработки с минимальным интерактивным участием в ней эксперта на этапе подготовки эталонной выборки. На рис. 1 приведена полная последовательность процессов и результатов их выполнения, начиная от исходных космических снимков и заканчивая картой растительности. Наиболее полно отдельные этапы данной методики описаны в [4] и [5], здесь же остановимся только на самых общих моментах:

- Разносезонные композиты для создания эталонной выборки и классификации формируются из данных спутниковой съемки Landsat 5 и 7 [6] за период с 2006 по 2010 годы;
- Эталонная выборка формируется в полуавтоматическом режиме из результатов взаимной фильтрации пространственной сегментации и кластерного анализа разносезонных композитов Landsat с привлечением в качестве справочных материалов Карты растительности России ИКИ РАН (по данным Terra-MODIS) за 2010 год и Глобальной карты изменений лесного покрова с 2000 по 2012 год университета Мэриленда (по данным Landsat);
- Тематическая классификация многозонального всесезонного спутникового композита осуществляется с помощью оригинального локально-адаптивного статистического алгоритма, разработанного в ЦЭПЛ РАН [7];
- Легенда создаваемых карт соответствует легенде из [1] (см. рис. 3);
- Актуализация полученных карт (до состояния 2013 года) проводится по данным продукта [2] и летним композитным изображениям Landsat 8 в автоматическом режиме;
- В качестве векторных элементов географической основы при составлении и оформлении электронной карты лесных экосистем на отдельные регионы используются открытые данные проекта OpenStreetMap [8].



**Рис. 1. Общая технологическая схема картографирования лесных экосистем по спутниковым данным Landsat**

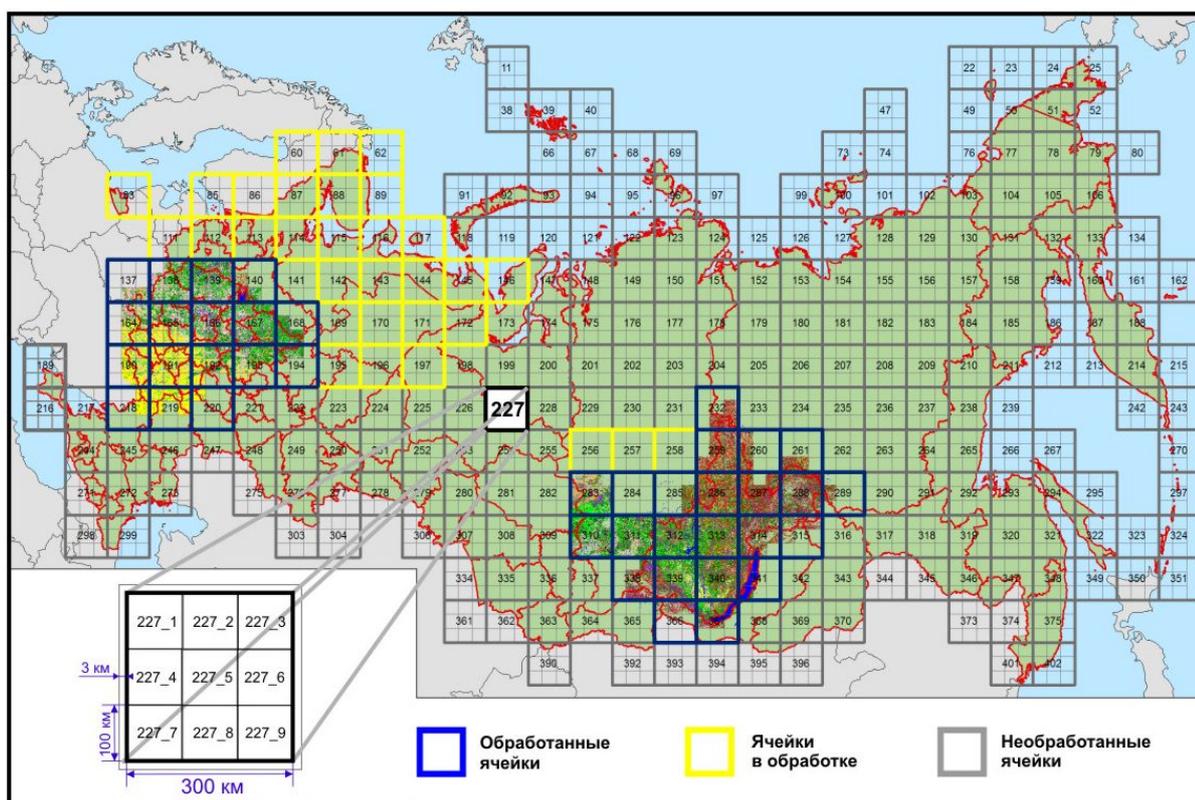
Оценка точности карт растительности производится по таким характеристикам, как площадь покрытая лесом (общая и по группам пород) с использованием данных Государственного учета лесного фонда за 2003 год. Работы по данному направлению ведутся в настоящее время и будут представлены в докладе.

### **Создание карт в масштабах регионов и всей страны**

Поскольку единовременная обработка спутниковых изображений по вышеприведенной схеме на всю страну или даже на ее отдельные крупные регионы технологически затруднительна в виду слишком больших объемов данных, немалую роль играет системная дифференциация территории для последовательного вовлечения отдельных участков в процесс обработки. На рис. 2 представлена схема разграфки территории России по регулярной сети квадратов размером 300x300 км в равновеликой конической проекции Альберса. Такой размер ячейки используется при локально-адаптивной классификации разносезонных композитов, т.к. это максимально возможный объем данных для единовременной обработки полностью в оперативной

памяти сервера в текущей программной реализации алгоритма – увеличения размеров изображения ведет к замедлению вычислений на порядок.

Классификация как можно большей территории «в один проход» классификатора необходима для минимизации возможности появления «швов» при составлении карт из отдельных квадратов на крупные регионы или всю территорию страны. Для этой же цели ячейки имеют взаимные перекрытия шириной в 3 км. Процессы, предшествующие классификации – создание и моделирование разносезонных композитов, в свою очередь, проводятся для ячеек размером 100x100 км (суб-ячеек), с последующей агрегацией в одну большую ячейку, что позволяет добиться максимального быстродействия за счет использования оптимального количества снимков для создания каждого композита – суб-ячейки сопоставимы по размеру с одиночными сценами Landsat. Эталонная выборка для классификации также формируется в масштабе суб-ячеек. При этом экспертный анализ для подготовки эталонов, – единственный процесс, требующий непосредственного интерактивного участия оператора, проводится для суб-ячеек через одну, а промежуточные суб-ячейки классифицируются за счет перекрытий по зональной статистике. Это позволяет вдвое сократить время работы оператора. Полученные после тематической классификации квадраты собираются в единое покрытие на конкретный регион, субъект или Федеральный округ и оформляется в интерактивном режиме в соответствии с назначением для электронного представления или же для печати.

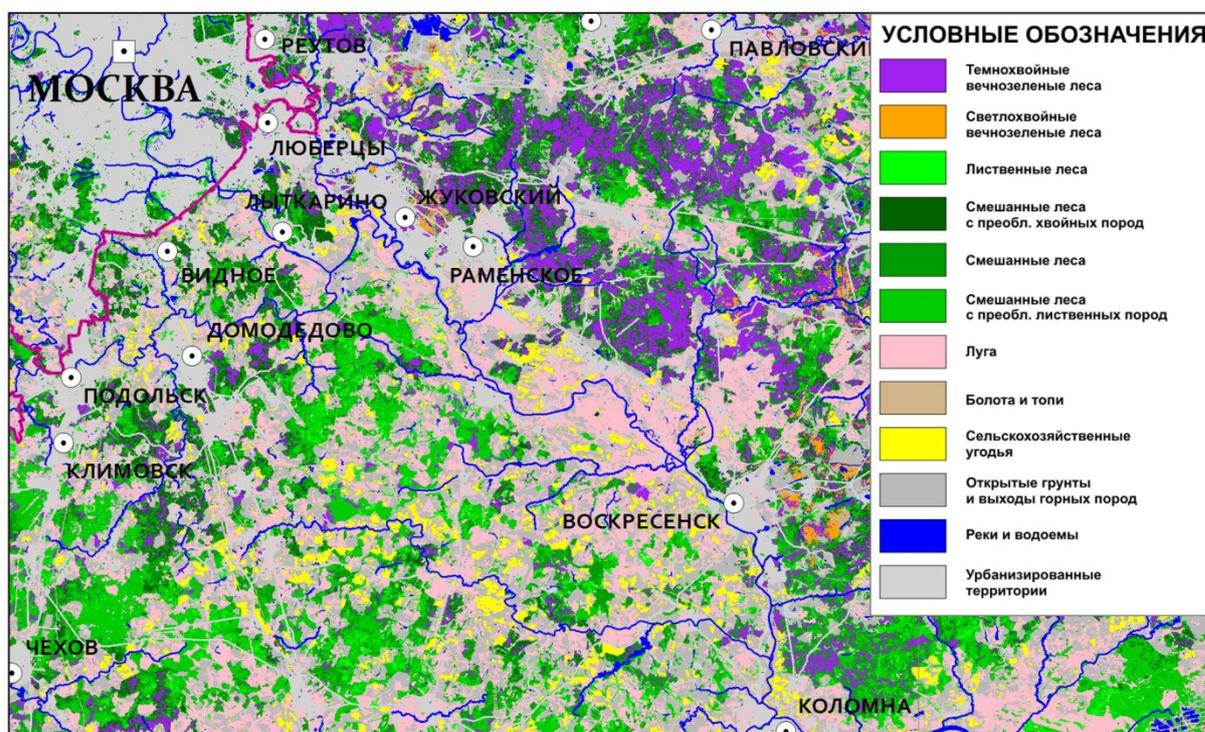


**Рис. 2. Схема регулярной сети ячеек обработки спутниковых данных Landsat на территорию России**

### Текущие результаты

В настоящее время, в ходе выполнения нескольких научно-исследовательских и прикладных проектов тематическими картами растительности лесных экосистем

полностью или частично покрыто 40 ячеек регулярной сети (более 3,5 млн. км<sup>2</sup>). Основная их часть приходится на территорию Центрального Федерального округа и Иркутской области. На рис. 3 представлен фрагмент карты Центрального ФО с легендой. К концу текущего года планируется полностью покрыть картами Северо-Западный Федеральный округ (30 ячеек). Также ведутся исследования, направленные на полную автоматизацию процесса формирования эталонной выборки, а также максимального сокращения времени обработки спутниковых данных, с целью к концу 2015 года иметь карту растительности лесных экосистем пространственным разрешением 30 м (масштабом примерно 1:200000) на всю Россию. Исследуется возможность ежегодной актуализации (внесение изменений) карты растительности за пятилетний период по данным спутниковой съемки Landsat 8. Такая карта будет служить основой для карт производных показателей лесного покрова (породная структура, запас древостоя и т.п.), а также для оценки статистических показателей – покрытой лесом площади, качественных и количественных изменений в лесном покрове для проведения инвентаризации лесов, оценки их ресурсного потенциала лесов, экосистемных функций и услуг, как в масштабах всей страны, так и по отдельным субъектам, что и является основной целью создания системы дистанционного мониторинга лесных экосистем.



**Рис. 3. Фрагмент карты лесных экосистем Центрального Федерального округа**

#### Список литературы

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сб. науч. ст. 2011. Т. 8. № 4. М.: ООО «ДоМира», 2011. С. 285–302.

2. Hansen, M.C., P.V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S.A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S.V. Stehman, S.J. Goetz, T.R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov,

L. Chini, C.O. Justice, and J.R.G. Townshend. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." *Science* 342 (15 November): 850–53.

3. Белова Е.И., Ершов Д.В. Предварительная обработка временных серий изображений Landsat-TM/ETM+ при создании безоблачных композитных изображений местности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 73–82.

4. Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В. Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 15–23.

5. Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В. Тематическое картографирование породной структуры лесов на основе спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+ // Пятая Всерос. конф. с междунар. участием «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве» Москва, ЦЭПЛ РАН, 22-24 апреля 2013 г. Сб. тр. конф. С. 112–115.

6. Landsat Glovis USGS archive [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://glovis.usgs.gov/>, свободный. – Яз. англ.

7. Ковганко К.А., Ершов Д.В. Алгоритм тематической классификации спутниковых изображений и его программная реализация в среде ArcGIS Desktop // Десятая Всерос. Открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 12–16 ноября 2012 г. Сб. тезисов конф.

8. GIS-Lab: Данные OpenStreetMap в формате Shape и PostGIS [Электронный ресурс] // – Режим доступа: [http://gis-lab.info/projects/osm\\_shp/region](http://gis-lab.info/projects/osm_shp/region), свободный. – Загл. с экрана.

УДК 528.854.2; 004.93'11

## МЕТОД СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА ПРИЗНАКОВ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

И. А. Пестунов, П. В. Мельников

Институт вычислительных технологий СО РАН

e-mail: [pestunov@ict.nsc.ru](mailto:pestunov@ict.nsc.ru), e-mail: [pvlvlml@gmail.com](mailto:pvlvlml@gmail.com)

В работе предлагается подход к снижению размерности пространства признаков при распознавании гиперспектральных изображений, основанный на использовании метода главных компонент. Экспериментально показано, что предлагаемая методика позволяет на порядок сократить число используемых при классификации спектральных признаков без значительного ухудшения качества распознавания.

*Ключевые слова:* гиперспектральное изображение, выделение информативных признаков, метод главных компонент, обучаемая классификация, метод опорных векторов.

### Введение

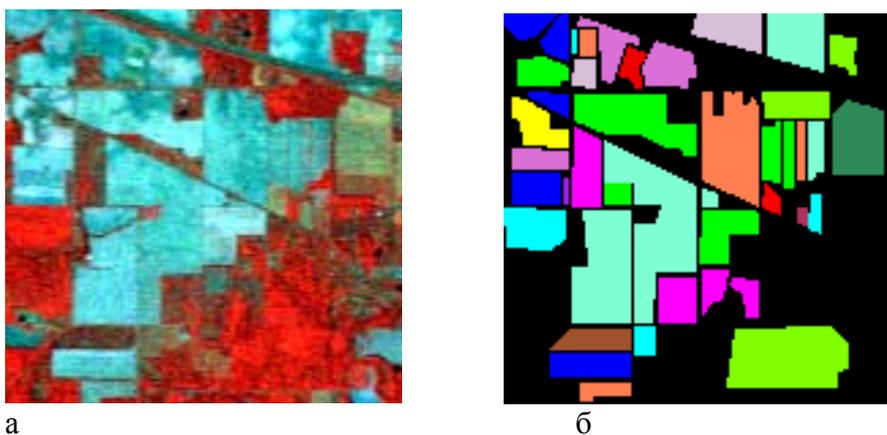
В настоящее время в связи с интенсивным развитием средств и технологий дистанционного зондирования все большую актуальность приобретает задача распознавания гиперспектральных изображений. Главными особенностями таких изображений являются большое количество спектральных каналов, которое может достигать нескольких сотен, и малая ширина каждого канала (порядка нескольких нанометров). Гиперспектральные изображения фактически являются трехмерными

массивами данных, в которых два измерения соответствуют пространственным координатам, а третье представляет собой номер спектрального канала; поэтому гиперспектральные изображения также называют «гиперкубами» [1].

Значительное увеличение числа каналов в гиперспектральном изображении приводит к тому, что большинство существующих алгоритмов обработки мультиспектральных изображений становятся непригодными для гиперспектральных изображений. Ограничения могут быть связаны как с теоретической невозможностью работы с данными большой размерности, так и с неприемлемым увеличением времени работы или объема используемой памяти. Одним из подходов к решению данной проблемы является разработка новых эффективных алгоритмов классификации, учитывающих особенности гиперспектральных изображений [2, 3]. Другим подходом является выделение информативных подсистем признаков, которые позволят использовать алгоритмы, хорошо зарекомендовавшие себя при обработке традиционных мультиспектральных изображений [4]. При высоком спектральном разрешении и большом количестве каналов соседние каналы обычно обладают значительной взаимной корреляцией, и извлекаемая из них информация может оказаться избыточной. Поэтому задача выбора минимальной информативной подсистемы признаков является актуальной [5].

В настоящей работе предлагается процедура генерации минимальных систем информативных признаков и снижения размерности пространства признаков при распознавании гиперспектральных изображений, основанная на методе главных компонент.

При разработке данного метода использовалось гиперспектральное изображение Indian Pines, полученное сенсором AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) 12 июня 1992 г. [6]. Это изображение часто используется при разработке и исследовании алгоритмов анализа гиперспектральных изображений [7]. Размер изображения составляет 145x145 пикселей, каждый пиксель представлен вектором из 224 значений спектральных яркостей в диапазоне 400–2500 нм. Для данного изображения имеется также эталонная обучающая выборка, представляющая 16 тематических классов (посадки кукурузы, сои, люцерны, пшеницы и т. д.). RGB-композит исходного изображения (каналы 54, 112, 204) и эталонная картосхема представлены на рис. 1.



**Рис. 1. а – RGB-композит тестового гиперспектрального изображения Indian Pines; б – эталонная картосхема этого изображения**

#### **Описание предлагаемого метода**

Анализ корреляционной матрицы исходного гиперспектрального изображения показывает, что сильно коррелированными спектральные каналы располагаются

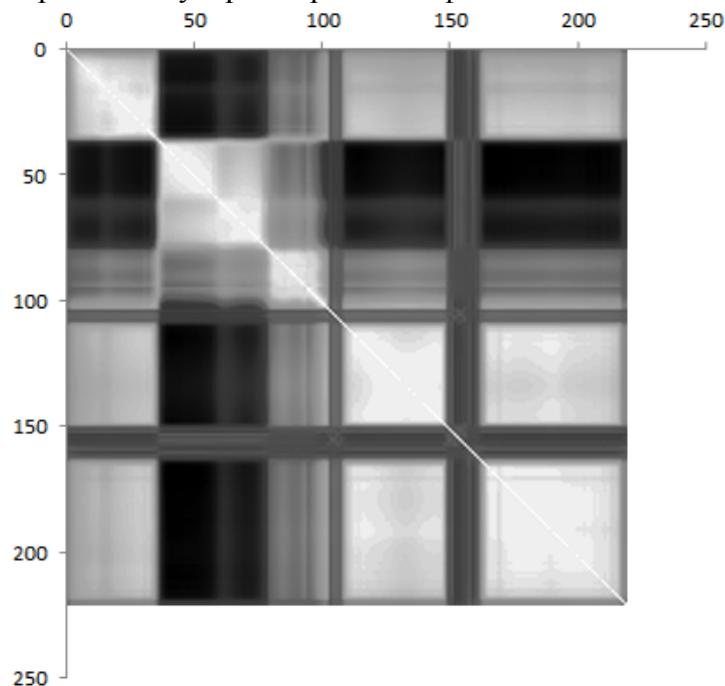
группами. Фрагмент корреляционной матрицы для каналов 32–37, где проходит граница между двумя блоками, имеет вид:

...	1.00	0.91	0.96	0.15	0.12	0.11
		1.00	0.80	0.14	0.05	0.05
			1.00	0.03	0.09	-0.1
				1.00	0.72	0.89
					1.00	0.98
						1.00
...						

На рис. 2 вся матрица представлена в виде полутонового изображения, на котором яркость каждого пикселя отражает значение соответствующего элемента матрицы корреляции (черный – отрицательная корреляция, белый – положительная, серый – отсутствие корреляции).

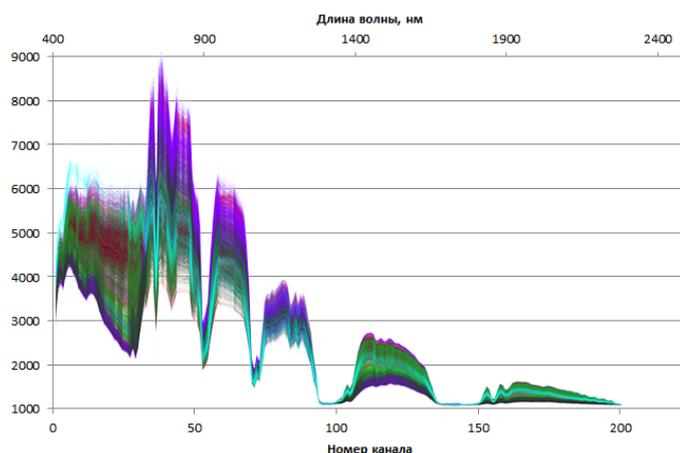
Проведенный анализ матрицы корреляции показывает, что на изображении можно выделить пять групп каналов, которые обладают высокой внутригрупповой корреляцией и приблизительно соответствуют видимому, ближнему и среднему инфракрасному диапазонам спектра. Схожих результатов можно добиться путем визуального анализа спектральных кривых пикселей изображения (см. рис. 3). Кроме того, анализ спектральных кривых показывает, что каналы 99–110 и 148–166 обладают малой дисперсией и не содержат полезной информации. Это обусловлено тем, что в этих диапазонах спектра находятся полосы поглощения воды.

Блок каналов видимого спектра был дополнительно разбит на четыре подблока, соответствующих синему, зеленому, желтому и красному диапазонам, так как они играют важную роль при классификации типов и состояния растительного покрова [8, 9].



**Рис. 2. Полутоновая визуализация корреляционной матрицы гиперспектрального изображения Indian Pines**

**Рис. 3. Спектральные кривые пикселей эталонной картосхемы изображения Indian Pines (цветом показана принадлежность пикселей к классам эталонной картосхемы)**

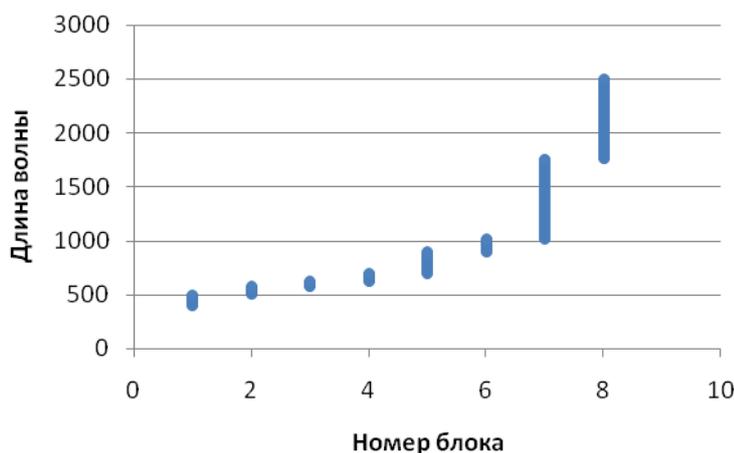


Итоговое разбиение каналов исходного изображения на восемь блоков приведено на рис. 4.

Таким образом, были выделены блоки спектральных каналов исходного изображения, внутри которых наблюдается сильная корреляция. Для снижения избыточности информации внутри блоков предлагается применить к каждому блоку метод главных компонент. Этот метод предназначен для выделения некоррелированных комбинаций признаков среди коррелированных данных [10, 11]. Метод главных компонент заключается в следующем. Пусть  $x_1, \dots, x_m$  – векторы исходных данных, в данном случае – векторы спектральных яркостей пикселей гиперспектрального изображения. Требуется найти ортогональную систему координат, в которой корреляции между отдельными координатами векторов данных равны нулю. Задача сводится к диагонализации выборочной ковариационной матрицы  $\Sigma =$ ,

$$c_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{i1} - \bar{X}_1)(x_{ij} - \bar{X}_j).$$

Решение задачи о поиске ортогональных систем координат с наибольшей дисперсией по координатам – это ортонормированный набор собственных векторов  $\{a_1, \dots, a_m\}$  матрицы  $\Sigma$ , расположенных в порядке убывания собственных значений  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots$ . В базисе из собственных векторов матрица ковариации диагональна, поэтому коэффициент корреляции между различными координатами равен нулю. Для положительно определенной симметричной матрицы, которой является матрица ковариации, нахождение собственных чисел и собственных векторов совпадает с задачей поиска длин и направлений полуосей соответствующего эллипса, а полученная система координат является ортогональной.  $i$ -я координата векторов данных в новом базисе является искомой  $i$ -й главной компонентой и имеет дисперсию  $\lambda_i$ .



**Рис. 4. Разбиение спектрального диапазона изображения на 8 интервалов (блоков)**

Из полученных главных компонент необходимо выбрать те, которые содержат достаточное количество информации об объектах на изображении. Сделать это можно различными способами:

1. Путем визуального анализа полученных компонент. Этот способ позволяет относительно точно оценить информативность каждого признака, однако субъективен и не может обеспечить повторяемость результатов.

2. Путем исследования дисперсии каждой компоненты или собственных значений ковариационной матрицы, полученной в результате применения метода главных компонент. Признаки, обладающие дисперсией больше заданного порога, считаются информативными и используются для дальнейшего исследования. Данный метод использовался в данной работе при проведении экспериментов.

3. Пропорционально количеству признаков в блоке, для которого считаются главные компоненты. Этот подход не всегда дает корректные результаты, так как блок может иметь значительное количество каналов, однако все они могут быть сильно коррелированными, обладать большой избыточностью информации и, соответственно, малым количеством информативных главных компонент.

Таким образом, применяя к отдельным блокам каналов метод главных компонент, можно получить новые некоррелированные признаки, и, используя дисперсию в каждом из них, оценить количество информативных некоррелированных каналов в исходном блоке. На рис. 5, а представлены пять каналов исходного гиперспектрального изображения (каналы 20–24, составляющие один блок), на рис. 5, б – главные компоненты, вычисленные по этим каналам. Видно, что для дальнейшей обработки можно использовать только первые две главные компоненты, так как остальные компоненты обладают слишком малой дисперсией, являются малоинформативными и практически шумовыми.

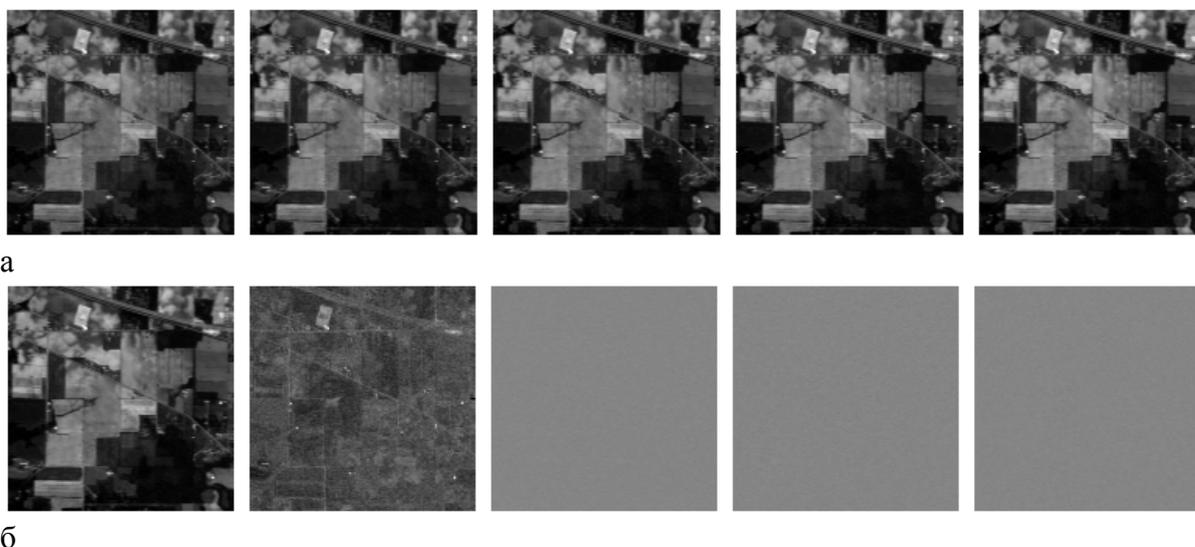
В соответствии с предлагаемой методикой из 224 каналов исходного изображения было получено 23 признака. В табл. 1 показано число главных компонент, которое было использовано для каждого блока каналов.

Таким образом, предлагаемый алгоритм выделения признаков можно записать в виде последовательности шагов.

*Шаг 1.* Разделение множества каналов изображения на блоки на основе визуального анализа корреляционной матрицы или спектральных кривых пикселей.

*Шаг 2.* Вычисление собственных векторов и собственных чисел матрицы корреляции для каждого блока.

*Шаг 3.* Выбор главных компонент, обладающих достаточной информативностью. Компонента считается информативной и попадает в итоговый набор признаков, если она обладает дисперсией большей, чем 5% дисперсии первой главной компоненты.



**Рис. 5.** а – каналы 20-24 исходного гиперспектрального изображения; б – главные компоненты, вычисленные по этим каналам

**Таблица 1**  
**Количество информативных главных компонент для каждого из блоков каналов**

Номер блока	1	2	3	4	5	6	7	8
Количество исходных каналов	11	7	5	8	21	13	66	60
Количество главных компонент	1	2	2	2	4	2	6	4

### Результаты экспериментальных исследований

Для проверки эффективности предложенного метода было произведено сравнение результатов классификации гиперспектрального снимка с использованием всех спектральных каналов и с использованием выделенных с помощью предложенного метода.

Для обучаемой классификации использовался метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM), который приобрел широкую популярность в последние годы [12, 13]. SVM является одним из немногих алгоритмов, которые можно эффективно применять для классификации гиперспектральных данных [14]. Он реализован во многих пакетах обработки данных дистанционного зондирования.

Для оценки качества классификации была использована процедура скользящего экзамена, позволяющая получить несмещенную оценку вероятности ошибки классификации [15].

В ходе эксперимента была выполнена классификация по трем наборам признаков:

- 1) все нешумовые каналы исходного изображения (188 признаков);
- 2) 23 признака, полученные с помощью предлагаемого метода;
- 3) набор из 8 признаков, составленный из первых главных компонент каждого блока каналов.

Результаты классификации по каждому из этих наборов данных показаны в табл. 2. Анализ таблицы показывает, что предложенный алгоритм позволяет существенно сократить число используемых признаков при незначительном ухудшении качества классификации.

**Таблица 2**

**Точность классификации при использовании различных наборов признаков**

Набор признаков	Количество признаков	Точность классификации, %
Все шумовые каналы исходного изображения	188	92.04
Признаки на основе предлагаемого алгоритма	23	91.11
Первые главные компоненты из каждого блока	8	80.48

**Заключение**

В работе предложен метод выделения информативного набора признаков для задач, связанных с распознаванием гиперспектральных изображений. Предложенный подход основан на применении метода главных компонент к блокам коррелированных каналов и выборе информативных компонент путем анализа собственных чисел матрицы ковариации. Алгоритм позволяет на порядок сократить количество используемых при распознавании признаков без существенного ухудшения качества классификации.

Показана эффективность предложенного метода в задачах обучаемой классификации на примере распознавания гиперспектрального изображения Indian Pines, полученного с сенсора AVIRIS (с помощью классификатора SVM).

Дальнейшее улучшение качества распознавания гиперспектральных изображений может быть достигнуто путем включения в обработку пространственных признаков (текстура, локальный контекст и др.).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-07-12202-офи\_м, 14-07-31320-мол-а).

**Список литературы**

1. Borengasser M. Hyperspectral Remote Sensing – Principles and Applications. CRC Press, 2004. 128 p.
2. Plaza A. et al. Recent advances in techniques for hyperspectral image processing // Remote sensing of environment. 2009. Vol. 113. S110–S122.
3. Ablin R. et al. A Survey of Hyperspectral Image Classification in Remote Sensing // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2013. Vol. 2, Is. 8. Pp. 2986-3003.
4. Du L.P. et al. Reducing dimensionality of hyperspectral data with diffusion maps and clustering with k-means and Fuzzy ART // International Journal of Systems, Control and Communications 3.3. 2011. Pp. 232–251.
5. Bruce L.M., Koger C.H., Jiang L. Dimensionality reduction of hyperspectral data using discrete wavelet transform feature extraction // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. Pp. 2331–2338.
6. Porter W.M. Enmark H.E. System overview of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) // SPIE Proc. 1987. Vol. 834. Pp. 22–31.
7. Hyperspectral Remote Sensing Scenes [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ehu.es/ccwintco/index.php/Hyperspectral\\_Remote\\_Sensing\\_Scenes](http://www.ehu.es/ccwintco/index.php/Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes) (дата обращения: 22.06.2014).

8. The benefits of the eight spectral bands of WorldView-2. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8SPECTRAL-WP\\_0.pdf](http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8SPECTRAL-WP_0.pdf) (дата обращения: 22.06.2014).
9. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
10. Многозональные аэрокосмические съемки Земли / под ред. Сагдеева Р.З. М.: Наука, 1981. 303 с.
11. Карасиков В.А. и др. Алгоритмы тематической обработки и их экспериментальное исследование // Аэрокосмические исследования Земли. Обработка видеoinформации на ЭВМ / Под ред. В.Г. Золотухина. М.: Наука, 1978. С. 143–150.
12. Cristianini N., Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods / Cambridge University Press. 2000. ISBN 0-521-78019-5.
13. LIBSVM – A Library for Support Vector Machines [Электронный ресурс]. URL: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/> (дата обращения: 22.06.2014).
14. Bernard Kévin et al. Spectral-spatial classification of hyperspectral data based on a stochastic minimum spanning forest approach // Image Processing, IEEE Transactions on 21.4. 2012. Pp. 2008-2021.
15. Fukunaga K. Introduction to Statistical Pattern Recognition. 2nd Ed. N.Y.: Academic Press, 1990. 590 p.

УДК 004.932.2; 004.93'14; 528.854.2

## МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ АНСАМБЛЯ СЕТОЧНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

И. А. Пестунов, С. А. Рылов

Институт вычислительных технологий СО РАН  
e-mail: [pestunov@ict.nsc.ru](mailto:pestunov@ict.nsc.ru), e-mail: [RylovS@mail.ru](mailto:RylovS@mail.ru)

Предлагается метод построения ансамбля иерархических сеточных алгоритмов кластеризации для сегментации мультиспектральных спутниковых изображений. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие высокую эффективность этого метода.

*Ключевые слова:* иерархические сеточные алгоритмы кластеризации, ансамблевый подход, сегментация мультиспектральных спутниковых изображений.

### Введение

Сегментация является одним из важнейших этапов анализа цифровых изображений [1]. Она заключается в разбиении изображения на непересекающиеся области на основе однородности (похожести) их спектральных и/или пространственных (текстура, размер, форма и др.) характеристик.

Наиболее распространенный подход к сегментации спутниковых изображений основан на использовании алгоритмов кластеризации данных [2]. К главным особенностям задачи кластеризации спутниковых данных относятся: 1) большой объем исходных данных (порядка  $10^6$ – $10^7$  пикселей), 2) отсутствие априорной информации о количестве и вероятностных характеристиках классов и 3) наличие «шума» и выбросов в данных. Указанные особенности накладывают существенные ограничения на алгоритмы кластеризации, подходящие для обработки спутниковых изображений; «хороший» алгоритм должен: 1) обладать низкой вычислительной сложностью;

2) обеспечивать возможность выделения заранее неизвестного числа кластеров, характеризующихся разной формой, размером и плотностью, при минимальном уровне априорных предположений и наличии «шума»; 3) обладать простотой настройки параметров.

В настоящей работе предлагается метод построения ансамблей сеточных иерархических алгоритмов кластеризации для сегментации мультиспектральных спутниковых изображений, которые удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Ансамблевый подход является одним из наиболее перспективных направлений в кластерном анализе [3–8]. Данная работа развивает исследования авторов, начатые ранее [9–12].

### Сеточный иерархический алгоритм кластеризации ССАН

Предлагаемый алгоритм кластеризации ССАН основывается на алгоритме ССА [9], который сочетает в себе преимущества сеточного [13] и плотностного подходов: высокую вычислительную эффективность и способность выделять кластеры, имеющие сложную структуру. Для описания предлагаемого алгоритма введем несколько определений.

Пусть множество классифицируемых объектов  $X$  состоит из векторов, лежащих в пространстве признаков  $R^d$ :  $X = \{x_i = (x_i^1, \dots, x_i^d) \in R^d, i = \overline{1, N}\}$ . Векторы  $x_i$  лежат в прямоугольном гиперпараллелепипеде  $\Omega = [l^1, r^1] \times \dots \times [l^d, r^d]$ , где  $l^j = \min_{x_i \in X} x_i^j$ ,  $r^j = \max_{x_i \in X} x_i^j$ . Под *сеточной структурой* будем понимать разбиение пространства признаков гиперплоскостями:  $x^j = (r^j - l^j) \cdot i / m + l^j$ ,  $i = 0, \dots, m$ ,  $m$  – число разбиений  $\Omega$  по каждой размерности. Минимальным элементом этой структуры является *клетка* (замкнутый прямоугольный гиперпараллелепипед, ограниченный гиперплоскостями). Введем общую нумерацию клеток (последовательно от одного слоя клеток к другому). Клетки  $B_i$  и  $B_j$  ( $i \neq j$ ) являются смежными, если их пересечение не пусто. Множество смежных с  $B$  клеток обозначим через  $A_B$ . *Плотностью*  $D_B$  клетки  $B$  назовем отношение  $D_B = N_B / V_B$ , где  $N_B$  – количество элементов множества  $X$ , попавших в клетку  $B$ ;  $V_B$  – объем клетки  $B$ . Клетку  $B$  будем считать непустой, если  $D_B > 0$ .

Непустая клетка  $B_i$  непосредственно связана с непустой клеткой  $B_j$  ( $B_i \rightarrow B_j$ ), если  $B_j$  – максимальная по номеру клетка, удовлетворяющая условиям:  $B_j = \arg \max_{B_k \in A_{B_i}} D_{B_k}$  и  $D_{B_j} \geq D_{B_i}$ . Непустые клетки  $B_i$  и  $B_j$  непосредственно связаны ( $B_i \leftrightarrow B_j$ ), если  $B_i \rightarrow B_j$  или  $B_j \rightarrow B_i$ . Непустые клетки  $B_i$  и  $B_j$  связаны ( $B_i \sim B_j$ ), если существуют  $k_1, \dots, k_l$  такие, что  $k_1 = i$ ,  $k_l = j$  и для всех  $p = 1, \dots, l-1$  выполнено  $B_{k_p} \leftrightarrow B_{k_{p+1}}$ .

Введение отношения связности порождает естественное разбиение множества непустых клеток на компоненты связности  $\{G_1, \dots, G_S\}$ . Под *компонентой связности* будем понимать максимальное множество попарно связанных клеток. *Представителем компоненты связности*  $G$  назовем максимальную по номеру клетку  $Y(G)$ , удовлетворяющую условию:  $Y(G) = \arg \max_{B \in G} D_B$ .

Компоненты связности  $G_i$  и  $G_j$  смежные, если существуют смежные клетки  $B_i$  и  $B_j$  такие, что  $B_i \in G_i$  и  $B_j \in G_j$ . Определим расстояние между смежными компонентами связности  $G_i$  и  $G_j$  по формуле:

$$h_{ij} = \min_{P_{ij} \in \mathfrak{R}_{ij}} \left[ 1 - \min_{B_{k_t} \in P_{ij}} D_{B_{k_t}} / \min(D_{Y_i}, D_{Y_j}) \right].$$

Здесь  $\mathfrak{R}_{ij} = \{P_{ij}\}$  – множество всех цепей между представителями компонент связности  $P_{ij} = \langle Y_i = B_{k_1}, \dots, B_{k_t}, B_{k_{t+1}}, \dots, B_{k_l} = Y_j \rangle$  таких, что для всех  $t=1, \dots, l-1$ : 1)  $B_{k_t} \in G_i \cup G_j$ ; 2)  $B_{k_t}, B_{k_{t+1}}$  – смежные клетки.

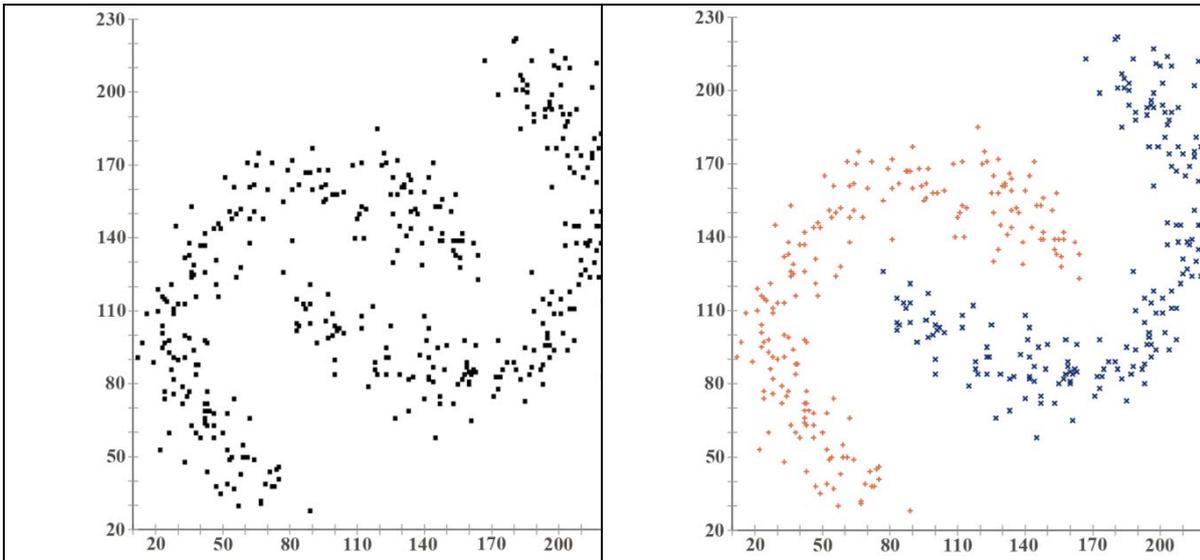
Пусть  $\Theta(G_i, G_j) = \Theta_{ij} = \{Q_{ij}\}$  – множество всех цепей из компонент связности  $Q_{ij} = \langle G_i = G_{k_1}, \dots, G_{k_t}, G_{k_{t+1}}, \dots, G_{k_l} = G_j \rangle$  таких, что для всех  $t=1, \dots, l-1$ :  $G_{k_t}, G_{k_{t+1}}$  – смежные компоненты. Тогда расстояние между произвольными компонентами связности  $G_i$  и  $G_j$  вычисляется по формуле:

$$h_{ij} = \min_{Q_{ij} \in \Theta_{ij}} \left[ \max_t h_{k_t, k_{t+1}} \right].$$

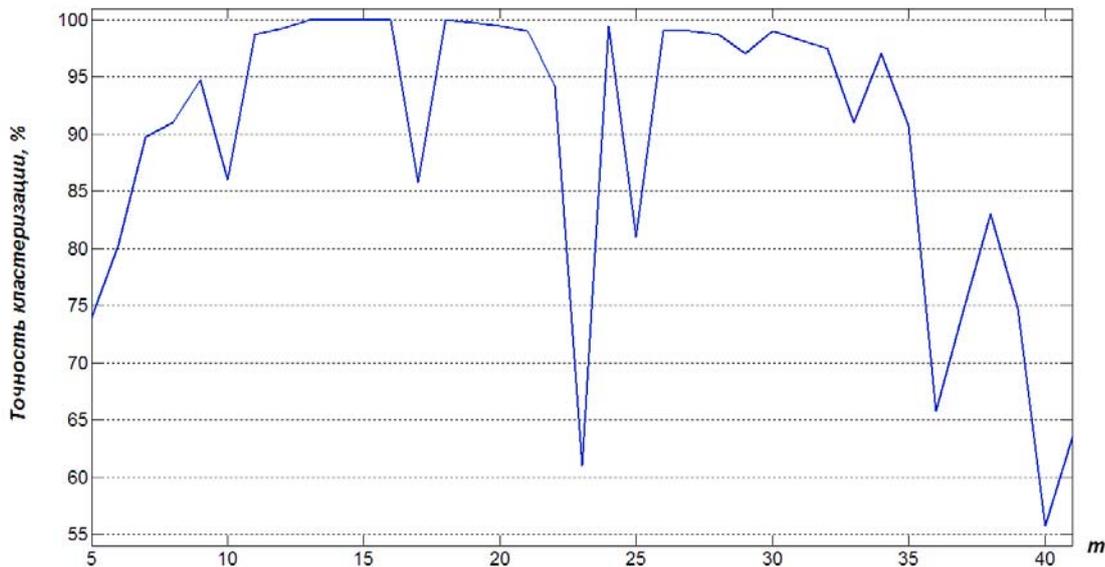
В случае, если множество  $\Theta_{ij}$  пусто, то полагаем  $h_{ij} = 1$ .

Очевидно, что введенное расстояние является метрикой. Таким образом, можно сформировать матрицу расстояний между компонентами связности  $\{h_{ij}\}$ . Для получения окончательного разбиения данных на кластеры применим стандартный агломеративный метод построения дендрограммы, который в качестве входной информации использует попарные расстояния между объектами [14]. В результате получаем информацию об иерархической структуре данных, только элементами иерархии в данном случае являются не исходные элементы данных, а компоненты связности. Благодаря использованию сеточной структуры число компонент относительно мало, поэтому построение иерархии требует минимальных вычислительных затрат.

Результаты экспериментальных исследований показали, что результаты работы предложенного алгоритма существенно зависят от параметра  $m$ , который определяет масштаб элементов сеточной структуры. На рис. 1 приведена модель «Бананы», которая состоит из 400 двумерных точек, сгруппированных в два линейно неразделимых класса. Модель построена с помощью инструментария [15] с параметром 0.7. На рис. 2 приведен график зависимости точности кластеризации от параметра  $m$ .



**Рис. 1. Модель «Бананы» (слева) и результат правильной кластеризации (справа)**



**Рис. 2. График зависимости точности кластеризации предложенным иерархическим алгоритмом ССАН от параметра сетки  $m$  для модели «Бананы»**

**Ансамблевый иерархический алгоритм кластеризации ЕССАН**

Для точного разделения на кластеры необходимо использовать достаточно мелкую сетку, однако при этом возникает большее число компонент связности и возрастает влияние «шума». Из-за того, что расстояния определяются через цепочку соседних компонент, алгоритм может «не увидеть» крупные структуры, которые при использовании мелкой сетки распадаются на множество компонент связности. При этом эти структуры и их взаимосвязи могут быть выявлены на сетках другого масштаба.

Для эффективного использования разномасштабной информации и повышения устойчивости результатов кластеризации предлагается применить ансамблевый подход. В качестве элементов ансамбля в данном случае будут выступать результаты кластеризации предложенного иерархического алгоритма при различных значениях параметра сетки  $m$ . Использование для формирования коллективного решения таких распространенных методов как голосование или построение согласованной матрицы различий, применяющихся непосредственно к результатам кластеризации, не позволяет

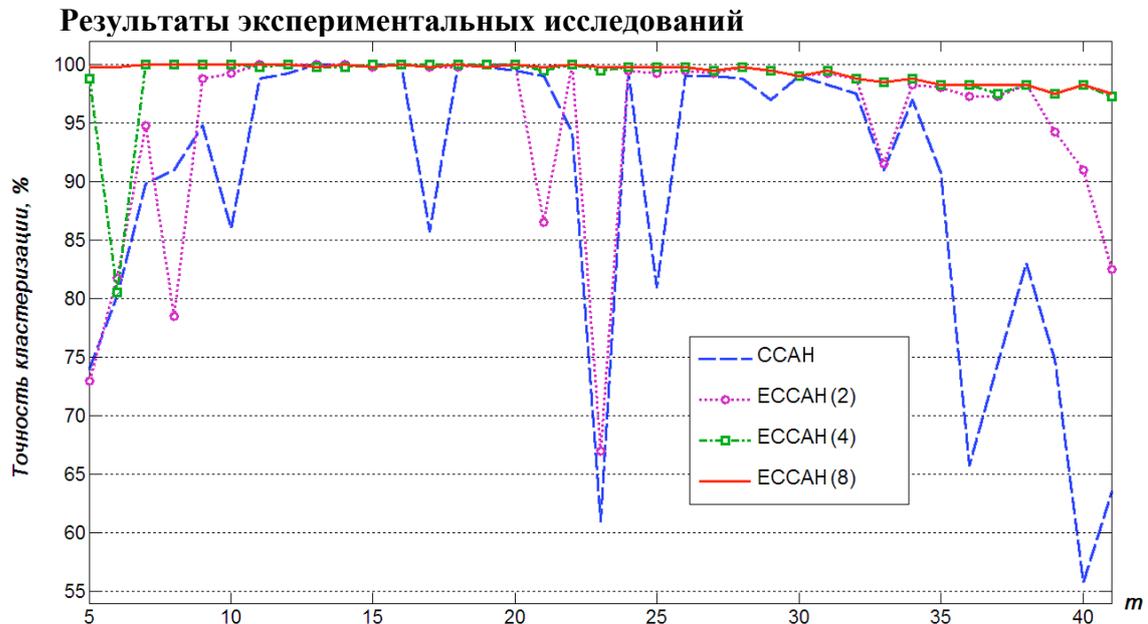
учитывать всю информации о связях между трудноразделимыми компонентами. Поэтому при построении ансамбля предлагается использовать полученные матрицы расстояний между компонентами связности, которые характеризуют вероятность попадания компонент в один кластер на основе плотностного критерия на данном масштабе сетки.

Таким образом, для формирования ансамбля предложенный выше сеточный алгоритм запускается  $L$  раз при различных значениях параметра сетки  $m$ . В результате получается  $L$  матриц расстояний между компонентами связности  $\{h_{ij}^{(1)}\}, \dots, \{h_{ij}^{(L)}\}$ . Консолидированная матрица связности  $\{H_{ij}\}$  (размер которой совпадает с размером  $\{h_{ij}^{(L)}\}$  для разбиения с самой мелкой сеткой) строится следующим образом:

$$H_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L h^{(k)}(G_i^{(k)}, G_j^{(k)}),$$

где  $G_i^{(k)}$  является компонентой, к которой отнесена клетка-представитель компоненты  $G_i^{(L)}$  при  $k$ -м запуске алгоритма кластеризации. Такой подход позволяет в полной мере учитывать информацию об иерархической структуре данных на всех масштабах сетки. Полученный таким образом ансамблевый алгоритм ЕССАН также является иерархическим, для получения окончательного решения к матрице связности применяется стандартный агломеративный метод построения дендрограммы по методу полной связи, использующий в качестве входной информации попарные расстояния между компонентами (матрицу связности).

Экспериментальные исследования показали, что применение ансамблевого подхода позволяет повысить качество результатов кластеризации и их устойчивость к изменению параметра сетки. График на рис. 3 показывает динамику изменения точности результатов кластеризации при увеличении числа используемых сеток (параметр сетки  $m$  брался из набора  $\{m, m+2, \dots, m+2 \cdot (L-1)\}$ ).



**Рис. 3. График изменения точности кластеризации ансамблевого алгоритма ЕССАН для модели «Бананы» в зависимости от параметра начальной сетки  $m$  при различном числе используемых сеток (1, 2, 4, 8)**

Многочисленные эксперименты на модельных данных показали способность алгоритма справляться с различными сложными ситуациями. Во всех экспериментах использовался ансамбль из восьми элементов.

Для экспериментального сравнения с другими алгоритмами использовался программный пакет ELKI [16], включающий в себя такие известными алгоритмами кластеризации, как: K-means, EM, DBSCAN, OPTICS, DeLiClu, SLINK.

На рис. 4, а представлена модель из восьми нормально распределенных классов, расположенных на различных расстояниях друг от друга. Классы сгруппированных в три изолированные группы, в одной из которых имеются значительные пересечения, что существенно затрудняет их разделение. Разработанный подход позволяет не только эффективно разделить все восемь классов (рис. 4, б), но и выявить иерархическую структуру данных (рис. 4, б-г).

Даже алгоритмы  $k$ -средних и EM, разработанные для разделения нормально распределенных классов, успешно справляются с данной моделью лишь при удачной инициализации центров. В тоже время такие методы, как DBSCAN, OPTICS и DeLiClu, ни при каких параметрах не способны разделить все восемь кластеров. В результате их применения получается шесть кластеров (подобно рис. 4, в).

Предложенный алгоритм ССАН также успешно справляется с данной моделью. Однако, при добавлении случайного «шума» (10 % от общего числа точек), алгоритм достигает результат полного разделения (рис. 4, б), но возникают проблемы обнаружением иерархической структуры (рис. 4, б-г). В то же, время благодаря применению ансамблевого подхода (алгоритм ЕССАН), даже при зашумлении данных удается построить полную иерархию кластеров, причем с ростом числа элементов ансамбля решение этой задачи значительно упрощается.

Еще одна модель, представленная на рис. 5, состоит из семи кластеров, различающихся по форме, размеру и плотности [3]. Кроме того, в данных присутствует «шум». Тем не менее, при использовании достаточно мелких сеток ( $m \geq 60$ ) ансамблевый алгоритм успешно выделяет все семь кластеров. Алгоритмы  $k$ -средних и EM с этой моделью не справляются, а алгоритм DBSCAN справляется только при некоторых значениях параметрах ( $\text{minpts}$ : 2–4 для  $\text{eps} = 2$ ; 6 для  $\text{eps} = 3$ ; 14 для  $\text{eps} = 4$ ; 32 для  $\text{eps} = 5$ ), которые достаточно сложно подобрать. Более совершенные методы OPTICS и DeLiClu позволяют получить правильное разбиение при применении алгоритма SLINK с порогом 3 к их иерархическим результатам.

Важным преимуществом предложенного алгоритма является его высокая вычислительная эффективность, достигаемая, в частности, за счет применения технологий параллельных вычислений. В таблице представлено сравнение времени работы предложенного алгоритма на описанных выше моделях и реальных изображениях (цветное RGB-изображение размером  $452 \times 588$  и фрагмент четырехканального изображения размером  $250 \times 200$ , полученного со спутника Alos) и алгоритмов, реализованных в программном пакете ELKI [16]. Хотя этот пакет не гарантирует максимальную скорость работы включенных в него алгоритмов, он является наиболее эффективным из доступных средств, в частности благодаря возможности использования  $R^*$ -дерева для индексации. Предложенный алгоритм ЕССАН и комплекс ELKI реализованы на языке программирования Java. Обработка проводилась на четырехядерной ПЭВМ с тактовой частотой 3.2 ГГц и объемом оперативной памяти 8 Гбайт.

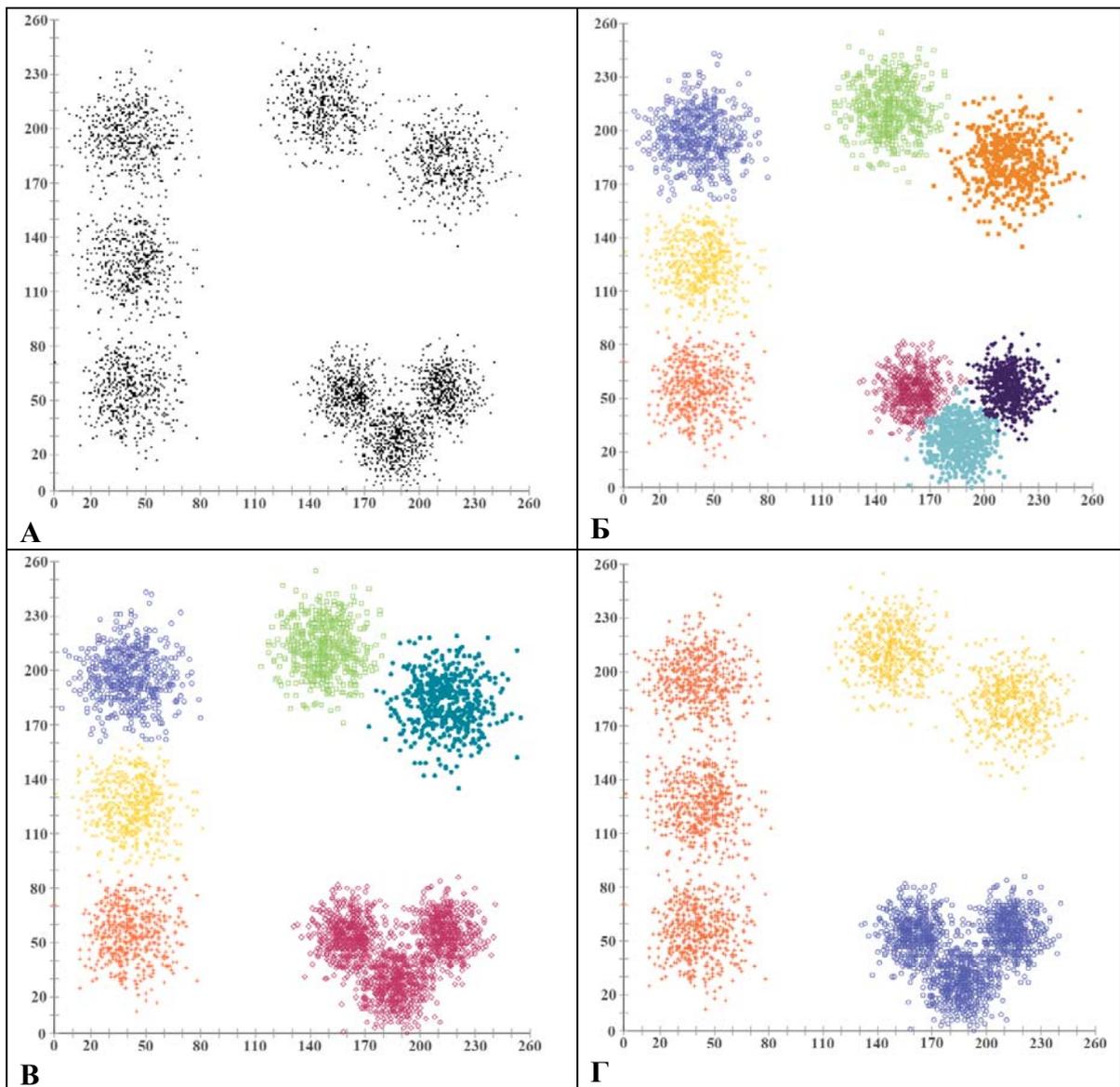
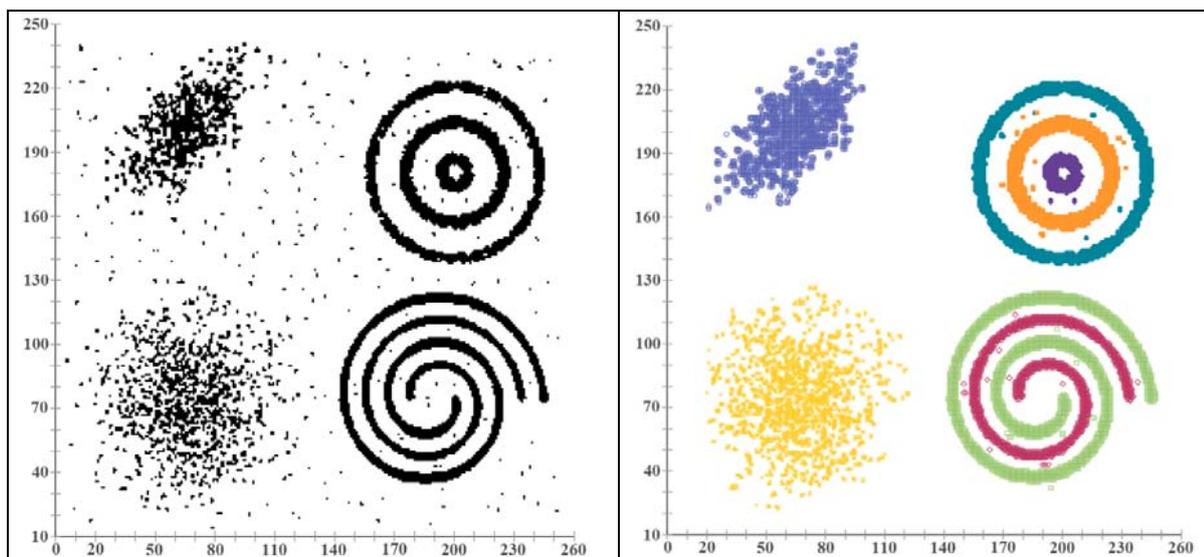


Рис. 4. а – модель, состоящая из восьми нормально распределенных классов; б, в, г – результаты кластеризации с помощью предложенного ансамблевого алгоритма при параметре объединения дендрограммы 0.4, 0.6 и 0.95 соответственно

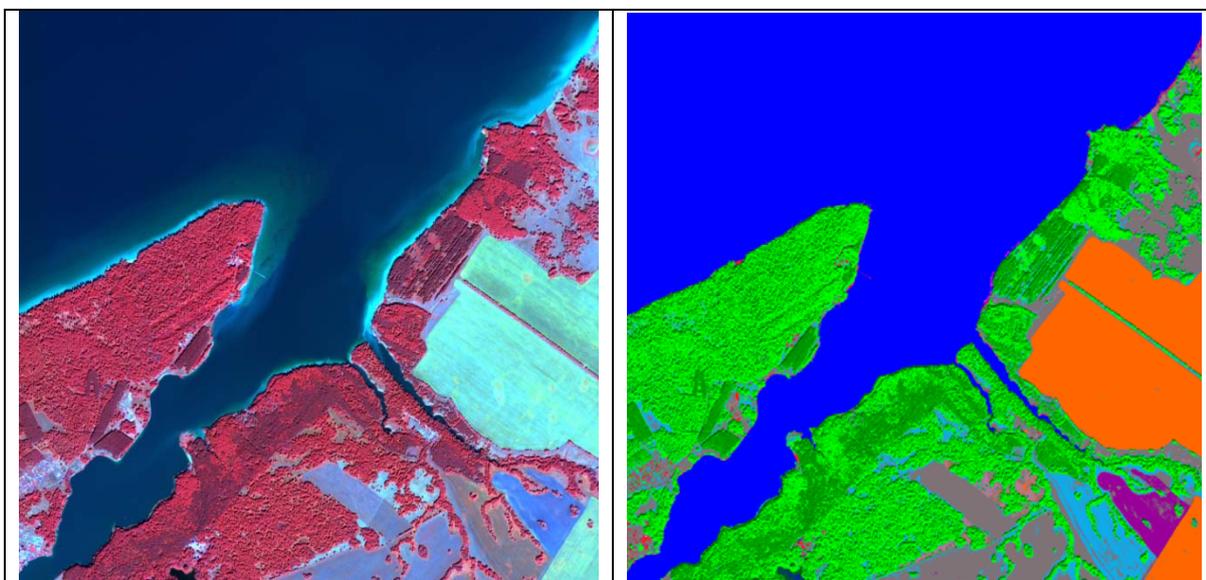
Таблица

Сравнение времени работы алгоритмов кластеризации  
(использовались наиболее оптимальные параметры, время указано в секундах)

	Модель «Бананы»	Модель 2 (рис. 4)	Модель 3 (рис. 5)	RGB-изображение	Спутниковый снимок Alos
Объем данных	400	4 000	9 388	265 776	50 000
<b>ЕССАН</b>	<b>0.005</b>	<b>0.003</b>	<b>0.055</b>	<b>0.02</b>	<b>0.07</b>
K-means Lloyd	0.03	0.08	0.06	1	0.6
EM	0.65	18.4	1.45	78	43
DBScan	0.06	0.35	1.3	136	25
DeLiClu	0.19	0.73	2	430	35
OPTICS	0.03	0.4	1.8	390	55



**Рис. 5. Модель из семи классов, различающихся по форме, размеру и плотности (слева), и результат ее кластеризации предложенным алгоритмом (справа)**



**Рис. 6. Пример обработки снимка WorldView-2 (2048×2048 пикселей): слева – RGB-композит (каналы 7, 4, 1) исходного изображения; справа – результаты кластеризации**

На рис. 6 приведен пример обработки снимка, полученного со спутника WorldView-2, с использованием алгоритма ЕССАН. При кластеризации использовались четыре канала: 1, 4, 6, 7. Размер изображения – 2048×2048 пикселей, время обработки составило 0.6 секунды.

### **Заключение**

В представленной работе предложен иерархический ансамблевый алгоритм кластеризации ЕССАН для сегментации спутниковых изображений. Результаты приведенных экспериментов на модельных и реальных данных подтверждают высокое качество получаемых решений и их устойчивость к изменению настраиваемых параметров. Возможность получения иерархической системы вложенных кластеров значительно облегчает процесс интерпретации результатов. Высокое быстродействие

алгоритма ЕССАН позволяет проводить обработку изображений в диалоговом режиме. Алгоритм ЕССАН допускает распараллеливание, позволяющее повысить быстродействие при реализации его на многопроцессорных вычислительных системах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00249-а, 14-07-31320-мол-а) и РНФ (грант № 14-14-00453).

### Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс М. Цифровая обработка изображений // Техносфера, 2006. С. 812.
2. Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений // Вестник КемГУ. 2012. № 4/2 (52). С. 110–125.
3. Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means // *Patt. Recogn. Lett.* 2010. Vol. 31, is. 8. P. 651–666.
4. Ghaemi R., Sulaiman M., Ibrahim H., Mustapha N. A Survey: Clustering Ensembles Techniques // *World Acad. of Sci., Engineering and Technology.* 2009. Vol. 3. N 2. P. 535–544.
5. Hope P., Hall L., Goldgof D. A scalable framework for cluster ensembles // *Patt. Recogn.* 2009. Vol. 42. P. 676–688.
6. Kashef R., Kamel M. Cooperative clustering // *Patt. Recogn.* 2010. Vol. 43. P. 2315–2329.
7. Jia J., Liu B., Jiao L. Soft spectral clustering ensemble applied to image segmentation // *Front. Comput. Sci. China.* 2011. Is. 5 (1). P. 66–78.
8. Franek L., Jiang X. Ensemble clustering by means of clustering embedding in vectorspaces // *Patt. Recogn.* 2014. Vol. 47. P. 833–842.
9. Куликова Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Непараметрический алгоритм кластеризации для обработки больших массивов данных // Тр. 14 конф. «Математические методы распознавание образов». Изд-во MAKS Press, 2009. С. 149–152.
10. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Синявский Ю.Н. Сегментация многоспектральных изображений на основе ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации // Вестник СибГАУ. 2010. № 5(31). С. 56–64.
11. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Куликова Е.А., Рылов С.А. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных // *Автометрия.* 2011. Т. 47. № 3. С. 49–58.
12. Пестунов И.А., Рылов С.А. Алгоритмы спектрально-текстурной сегментации спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Вестник КемГУ. 2012. № 4/2 (52). С. 104–110.
13. Pango M.R., Mohan V. A survey of grid based clustering algorithms // *Intern. J. Eng. Sci. and Technology.* 2010. Vol. 2(8). P. 3441–3446.
14. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 559 с.
15. Heijden F., Duin R., Ridder D., Tax D. Classification, parameter estimation and state estimation, an engineering approach using Matlab. // 1st Ed. Wiley. 2004. P. 440. ISBN 0470090138.
16. Achtert E., Kriegel H., Schubert E., Zimek A. Interactive Data Mining with 3D-Parallel-Coordinate-Trees // *Proc. ACM Intern. Conf. on Management of Data (SIGMOD).* NY, 2013. P. 1009–1012.

**КРУПНОМАСШТАБНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ  
СТРУКТУРЫ СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ  
И ВЫЯВЛЕНИЕ СООБЩЕСТВ С РЕДКИМИ  
И УНИКАЛЬНЫМИ ВИДАМИ РАСТЕНИЙ  
НА ТЕРРИТОРИИ ЮЖНОЙ СИБИРИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Н. Б. Ермаков<sup>(1)</sup>, И. А. Пестунов<sup>(2)</sup>, М. А. Полякова<sup>(1)</sup>, О. А. Дубровская<sup>(2)</sup>,  
С. А. Рылов<sup>(2)</sup>, Ю. Н. Синявский<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Центральный сибирский ботанический сад СО РАН

<sup>(2)</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН

e-mail: [brunnera@mail.ru](mailto:brunnera@mail.ru), [galatella@mail.ru](mailto:galatella@mail.ru), [pestunov@ict.nsc.ru](mailto:pestunov@ict.nsc.ru), [olga@ict.nsc.ru](mailto:olga@ict.nsc.ru),  
[rylovs@mail.ru](mailto:rylovs@mail.ru), [yorikmail@gmail.com](mailto:yorikmail@gmail.com)

В работе представлены результаты крупномасштабного моделирования пространственной организации степной растительности, которые демонстрируют важные закономерности формирования растительного покрова горно-степного пояса. Показано, что основе мультиспектральных спутниковых изображений, полученных со спутника WorldView-2, можно проводить достоверные наблюдения за малейшим изменением границ фитоценозов.

*Ключевые слова:* картографическое моделирование, степная растительность, спутниковые изображения, высокое пространственное разрешение, сегментация изображений, ансамблевый алгоритм кластеризации ЕССА.

### **Введение**

Картографическое моделирование растительного покрова – одно из фундаментальных и приоритетных направлений современной науки о растительности. Оно опирается на большой объем фактических данных и новые разработки в области геоинформационных технологий [1]. Традиционно для картографического моделирования растительности широко используются спутниковые изображения низкого и среднего пространственного разрешения (NOAA/AVHRR, Terra+Aqua/MODIS, Landsat, SPOT). В последнее годы, благодаря стремительному прогрессу в области создания и развития средств и технологий дистанционного зондирования Земли, стали доступны данные высокого разрешения (4 м и лучше) [2].

Современные технологии дистанционного зондирования и обработки данных позволяют строить карты растительности различного масштаба. Кроме того, благодаря использованию снимков высокого разрешения и новым методам их обработки, открываются возможности детального изучения закономерностей формирования растительного покрова и обнаружения местообитаний редких и уникальных видов растений, в том числе занесенных в Красную книгу. Эта возможность очень актуальна при картографическом моделировании степной растительности горно-степных районов, т.к. представленные там сообщества зачастую имеют небольшие размеры, их растительный покров характеризуется высокой гетерогенностью и образует сложную мозаику, обусловленную различным сочетанием эколого-топографических факторов на которые растительность откликается изменением видового состава.

В настоящее время для территории Южной Сибири существуют карты среднего и мелкого масштаба, отражающие основные закономерности пространственной структуры зональных типов растительности высокого ранга, в то время как важные закономерности формирования растительности на ландшафтном уровне остаются не раскрыты. Снимки среднего разрешения позволяют исследовать растительность только

на уровне сочетаний сообществ, что не дает возможности разносторонне изучить и отобразить не только полное разнообразие растительности, но и причины формирования пространственных структур. При анализе изображений высокого разрешения размер описываемых площадок ( $10 \times 10 \text{ м}^2$ ) превосходит размер пикселя изображения приблизительно в 25 раз, что позволяет строить картографические модели актуальной растительности и отображать ее на уровне фитоценозов.

Настоящее исследование посвящено изучению особенностей и моделированию структуры степного растительного покрова в горно-степных ландшафтах Северо-Минусинской котловины с использованием мультиспектральных изображений высокого пространственного разрешения и новых оригинальных технологий их дешифрирования.

### **Объект исследования**

Объектом исследования является естественная степная растительность на территории Ширинского района (Северо-Минусинская межгорная котловина) в окрестностях озера Иткуль. Абсолютные высоты территории колеблются в диапазоне от 540 до 650 метров, координаты центра ключевого полигона –  $54^\circ 28' 08,96'' \text{ N}$ ;  $90^\circ 08' 36,34'' \text{ E}$ . Исследуемая территория расположена между крупными горными системами – Кузнецкое Алатау на западе, Западный Саян с южной стороны котловины и Восточный Саян окаймляет восточную часть. Рельеф территории представлен плоскими или волнистыми формами. Территория котловины расположена в дождевой тени Кузнецкого Алатау и характеризуется ультраконтинентальным климатом, который проявляется в резко выраженных изменениях температуры воздуха по сезонам года, месяцам и суткам. В холодное время года здесь преобладает ясная, сухая и очень морозная погода. Осадков выпадает незначительное количество. Распределение снежного покрова очень неравномерное, количество снега в степной зоне минимально, вследствие чего влагообеспеченность растений в начале вегетации низкая. Летом погода жаркая, умеренно ясная, маловетренная. Основное количество осадков (до 95% годовой нормы) выпадает в летний период в виде дождя [3-5].

### **Материалы и методы**

Исследования проводились с использованием 110 геоботанических описаний степной растительности, выполненных по стандартной методике на площадках  $10 \times 10 \text{ м}^2$  в период 2012-2013 годы [6, 7]. На основе геоботанических описаний создана база данных с использованием европейского пакета TURBO(VEG) [8]. Определение типов сообществ для отображения при картировании выполнено в рамках эколого-флористического подхода [9]. Названия растений приведены в соответствии с [10, 11]. Флоро-фитоценотическая целостность выделенных единиц протестирована методом градиентного анализа, реализованного в специализированном пакете DECORANA [12].

Исследование разнообразия пространственной организации растительного покрова выполнено с использованием мультиспектрального изображения высокого пространственного разрешения WorldView-2, приобретенного компанией «СОВЗОНД». Обработка изображений осуществлялась в два этапа.

На первом этапе обработки по изображению ключевого участка вычислялась корреляционная матрица  $P$ , верхний треугольник которой имеет вид:

$$P^+ = \begin{pmatrix} 1.00 & 0.98 & 0.92 & 0.95 & 0.96 & 0.08 & -0.28 & -0.26 \\ & 1.00 & 0.94 & 0.97 & 0.96 & 0.13 & -0.23 & -0.21 \\ & & 1.00 & 0.98 & 0.97 & 0.41 & 0.04 & 0.06 \\ & & & 1.00 & 0.99 & 0.29 & -0.09 & -0.06 \\ & & & & 1.00 & 0.21 & -0.17 & -0.15 \\ & & & & & 1.00 & 0.91 & 0.92 \\ & & & & & & 1.00 & 0.99 \\ & & & & & & & 1.00 \end{pmatrix}.$$

Анализ корреляционной матрицы показал, что некоторые компоненты вектора спектральных яркостей имеют сильную взаимную корреляцию. Это означает, что часть каналов не несет полезной информации и их использование лишь усложнит процесс обработки. В связи с этим был осуществлен выбор минимального набора признаков, обеспечивающего необходимое качество классификации.

Для классификации растительности целесообразно одновременно использовать 3-й (510–580 нм) и 4-й (585–625 нм) спектральные каналы, а также 6-й канал (705–745 нм), который позволяет оценить состояние здоровья растительного покрова [13]. Каналы из ближнего инфракрасного диапазона спектра (7-й и 8-й) реагируют на изменение структуры мезофилла (листовой мякоти зеленых растений), но 7-й канал (770–895 нм) более чувствителен к типу подстилающей поверхности, чем 8-й (860–1040 нм). Таким образом, для построения итоговой картосхемы были использованы 3-й, 4-й, 6-й и 7-й каналы.

На втором этапе по выбранному набору признаков выполнялась сегментация изображения с помощью вычислительно эффективного ансамблевого алгоритма кластеризации ЕССА [14].

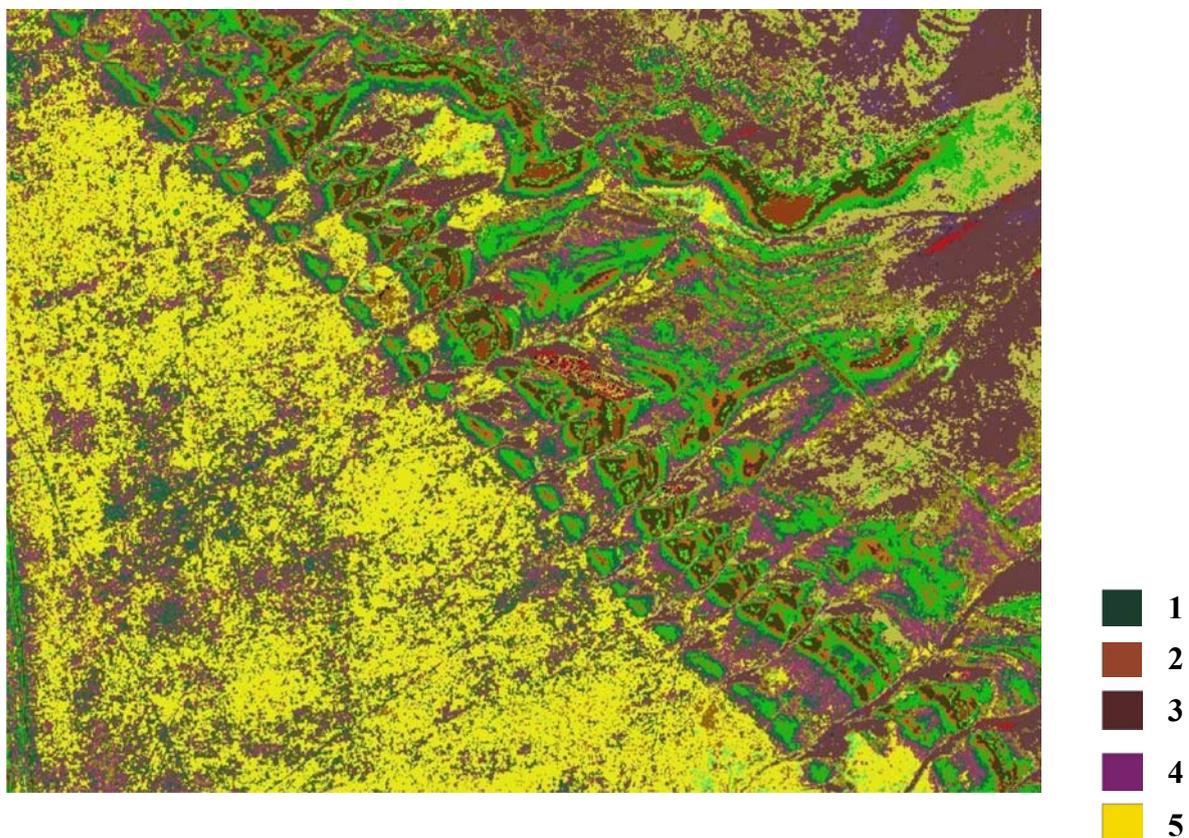
### Результаты исследования

В процессе исследования выполнено картографическое моделирование и построена крупномасштабная картосхема, фрагмент которой представлен на рисунке. Она позволяет описать сложную структуру и обнаружить важные закономерности формирования степных растительных сообществ с участием редких, эндемичных и уникальных видов.

Структура степей образована закономерным сочетанием растительных сообществ, обусловленным особенностями рельефа ключевого участка, а также связанными с ним экологическими и эдафическими факторами. Было выделено две мезокомбинации. Первая представляет собой сочетание сообществ петрофитных и непетрофитных степей в ландшафте с хорошо выраженным грядовым комплексом. В ней можно выделить микрокомбинации, которые различаются по приуроченности к экспозиции склона и представляют собой микропоясные ряды сообществ.

Первый микропоясный ряд характерен для наиболее крутых склонов южных, юго-западных и юго-восточных экспозиций. Микропоясный ряд начинается с комплекса осоково-кобрезиевых петрофитных степей (*Androsaco dasyphyllae-Caricetum pediformis*) с участием гляциальных реликтовых (*Kobresia filifolia*, *Minuartia verna*, *Sagina saginoides*, *Androsae dasyphylla*), а также редких и эндемичных (*Phlox sibirica*, *Oxytropis chakassiensis*) видов. Ниже по склону степи с участием криофитов замещаются доминирующими здесь злаково-разнотравными петрофитными степями (*Youngio tenuifoliae-Agropyrietum cristati*) с участием редких видов (*Adenofora rupestris*, *Oxytropis includens*, *O. nuda*, *O. ammphila*). В нижних пологих частях южных склонов, а также по

их шлейфам, на хорошо развитых почвах распространены сообщества овсяницево-разнотравных степей (*Thalictro foetidi-Festucetum valesiacaе*) с участием видов, занесенных в Красную Книгу Хакасии (*Carex humilis*, *Lilium pumilum*) и их кустарниковых вариантов с *Caragana pygmaea*).



**Рисунок.** Крупномасштабная картосхема ключевого полигона (окрестности озера Иткуль), отражающая разнообразие степной растительности с участием редких и уникальных растений: 1 – *Androsaco dasyphyllae-Caricetum pediformis* и субассоциация: *A.d.-C.p. helictotrichetosum desertorum*; 2 – *Youngio tenuifoliae-Agropyrietum cristati*; 3 – *Artemisio glaucae-Caricetum pediformis*; 4 – *Thalictro foetidi-Festucetum valesiacaе*; 5 – *Achnathero sibirici-Stipetum krylovii*

Второй микропоясный ряд расположен на более пологих склонах северных экспозиций. Их верхние части занимают более мезофильные варианты осоково-кобрезиевых степей (*Androsaco dasyphyllae-Caricetum pediformis helictotrichetosum desertorum*). Ниже по северному склону располагаются петрофитные мезоксерофитные полынно-осоково-разнотравные степи (*Artemisio glaucae-Caricetum pediformis*). Средние части склонов заняты преимущественно сочетанием сообществ умеренно влажных непетрофитных осоково-разнотравных (*Pulsatillo patentis-Caricetum pediformis*) и овсецово-разнотравных (*Bupleuro multinervi-Helictotrichetum desertorum*) степей с участием видов, занесенных в Красную книгу Хакасии [15] и Красную книгу РФ (*Stipa pennata*, *S. zaleski*). Эти типы степей преобладают на большинстве северных склонов, вплоть до шлейфов.

Вторая мезокомбинация занимает плоские или слабоогнутые широкие части рельефа, расположенные между грядами. Здесь структура степной растительности

представлена сочетанием ксеромезофитных разнотравно-злаковых (*Achnathero sibirici-Stipetum krylovii*) и разнотравных (*Thalictro foetidi-Festucetum valesiacaе*) степей, распространенных на хорошо развитых почвах.

### Заключение

Выполнено дешифрирование крупномасштабной картосхемы, построенной по снимку высокого пространственного разрешения WorldView-2, и моделирование пространственной организации степной растительности. Продемонстрированы важные закономерности формирования растительного покрова горно-степного пояса, представлено четкое очертание контуров на уровне отдельных фитоценозов. По данным дистанционного зондирования проведены достоверные наблюдения за мельчайшими изменениями границ сообществ, что имеет большое значение для охраны уникальных реликтовых сообществ и произрастающих в них редких и уникальных видов растений, а также мониторинга сохранившихся естественных степных участков в целом. Это особенно актуально при исследовании степей Южной Сибири, которые не включены в территории заповедников и подвержены сильному антропогенному воздействию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-04-90446-Укр-ф-а, 14-07-31320-мол-а) и РНФ (грант № 14-14-00453).

### Список литературы

1. Ермаков Н.Б., Алсынбаев К.С., Попов Д.Ю., Суляев Я.С. Картографическое моделирование пространственной организации растительного покрова // Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 276–288.
2. Болсуновский М.А., Бутин В.В. Новейшие спутники ДЗЗ и ближайшие перспективы систем высокого и сверхвысокого разрешения // Тез. докл. Десятой Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2012. [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf)
3. Никольская Л.А. Хакасия. Экономико-географический очерк. Красноярск: Красноярское кн. изд-во, 1968. 243 с.
4. Гавлина Г.Б. Климат Хакасии // Природные условия и сельское хозяйство Хакаской автономной области. М., 1954. С. 21–29.
5. Прокофьев С.М. Природа Хакасии: Пособие. Абакан: Хакасское кн.изд-во, 1993. 205 с.
6. Полевая геоботаника. М.: Изд-во АН СССР, 1964. Т. 3. 530 с.
7. Полевая геоботаника. Л., 1972. Т. 4. 336 с.
8. Hennekens S.M. TURBO(VEG). Software package for input, processing, and presentation of phytosociological data. User's guide. // Lancaster: IBN-DLO, 1996. University of Lancaster. 59 p.
9. Westhoff V., van der Maarel E. The Braun-Blanquet approach. / In: Whittaker, R.H. (ed.) // Handbook of vegetation science. Pt 5: Classification and ordination of communities. Junk, The Hague, 1973. P. 617–726.
10. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
11. Ignatov M.S., Afonina O.M. Check-List of Mosses of the Former USSA // Arctoa. Delphes Ltd., 1992. Vol. 1(1-2). P. 1–85.
12. Hill M.O. DECORANA and TWINSpan, for Ordination and Classification of Multivariate Species Data: A New Edition, Together with Supporting Programs, in FORTRAN 77. Huntington: Inst. Terrestr. Ecol., 1979. 58 p.

13. The benefits of the eight spectral bands of WorldView-2. [http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8SPECTRAL-WP\\_0.pdf](http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8SPECTRAL-WP_0.pdf).
14. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Куликова Е.А., Рылов С.А. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных // Автометрия. 2011. Т. 47. № 3. С. 49–58.
15. Красная книга Республики Хакасия: редкие и исчезающие виды растений и грибов. Новосибирск: Наука, 2012. 288 с.

УДК 004.932.2

## ИЗМЕРЕНИЕ КОМПАКТНОСТИ СКОПЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ЦИФРОВОМ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Т. Н. Сизова, Д. А. Перфильев

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

e-mail: [s\\_tatyana@bk.ru](mailto:s_tatyana@bk.ru), e-mail: [perfilyev7775@yandex.ru](mailto:perfilyev7775@yandex.ru)

В статье предлагается способ измерения скопления объектов изображения на основе признака компактности.

### Введение

В ряде современных исследований в различных областях, использующих в качестве модели цифровое изображение, все чаще ставится задача выделения и описания более сложных конструкций представленных на изображении, чем описание свойств отдельного объекта. В работах [1–9] приводятся результаты исследования в области металлографии, в которых отмечается, что в большей мере свойства металлов и сплавов, определяются взаимным расположением различных металлографических объектов. На сегодня существует ряд технологий реализованных в системах анализа и интерпретации изображений, позволяющих вычислять распределение и плотность объектов. Однако дальнейшая интерпретация свойств скопления объектов выполняется на основе знаний эксперта.

Аналогичные задачи решаются при анализе данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Исследования свойств объектов отображенных на космоснимках интегрируют в себе комплекс задач в областях геоинформатики, гидрологии, климатологии, почвоведения и т.д.

### 1. Методы измерения относительного содержания объектов на изображении

В литературе можно встретить примеры описания работы систем анализа металлографических изображений и изображений сформированных на основе данных ДЗЗ [10–14], применяющих аналогичные методики (алгоритмы) ориентированные на измерение соотношения содержания объектов и фона на изображении. Обычно используется следующее соотношение:

$$Q = \frac{N_1}{N} 100\%,$$

где  $Q$  – процент покрытия изображения;  $N_1$  – количество пикселей сегментированного изображения представляющих фон;  $N$  – общее количество пикселей бинарного изображения.

Не затрагивая проблему получения сегментированного изображения, можно отметить, что в целом подобным методикам анализа свойственен общий недостаток. Они не учитывают характер скопления объектов на изображении.

В работах [8, 9] для выделения и измерения скопления эвтектики предложено анализировать значение коэффициента геометрической концентрации –  $c_i(t_i)$ , применяя соотношение:

$$c_i(t^i) = \frac{NS_i}{\Delta NS_i},$$

где  $t^i$  – цель анализа (класс объектов  $CuAl_2$ );  $\Delta NS_i$  – площадь треугольной области, образованной тремя геометрическими центрами областей представляющих эвтектику, находящихся на минимальном евклидовом расстоянии друг от друга;  $NS_i$  – сумма площадей областей, представляющих вершины треугольной области.

Аналогично предлагается измерять геометрическую плотность объектов расположенных в объеме.

Несмотря на очевидные преимущества методики, она также имеет свои недостатки. Прежде всего, следует отметить, что измерение не учитывает особенность формы областей в выделенном классе.

Практические исследования [1, 2, 7, 8] показывают, что повышение концентрации металлографических объектов приводит к изменению формы от округлой с плавными границами к вытянутой форме с изрезанными границами, а так же снижению дезориентировки. Например, области эвтектики, имеющие вытянутые формы с изрезанными границами, характеризуются как зоны с избыточной энергией ориентированные в направлении образования дефекта.

## 2. Измерение компактности скопления объектов на цифровом металлографическом изображении

Наряду с текстурными признаками, топологические признаки оценки формы области считаются более информативными. Они также устойчивы к масштабированию, повороту, смещению изображения. Среди топологических признаков, признак «толщины» является более информативной оценкой формы области и ее ориентации на изображении [15, 16]:

$$T_i = |\mu_i - \sigma_i|, \quad (1)$$

где  $\mu_i$  – математическое ожидание случайной величины;  $r_i$ ;  $\sigma_i$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины;  $r_i$ ;  $r_i$  – расстояние от точки представляющей геометрический центр тяжести области до ее граничной точки.

Для измерения свойств скопления объектов на цифровом металлографическом изображении предлагается анализировать компактность:  $k_i$ , – формы и ориентации области:  $T_i$  (1) и размеров ( $S_i$ ) области соответствующей ячейки диаграммы Г.Ф. Вороного, вида:

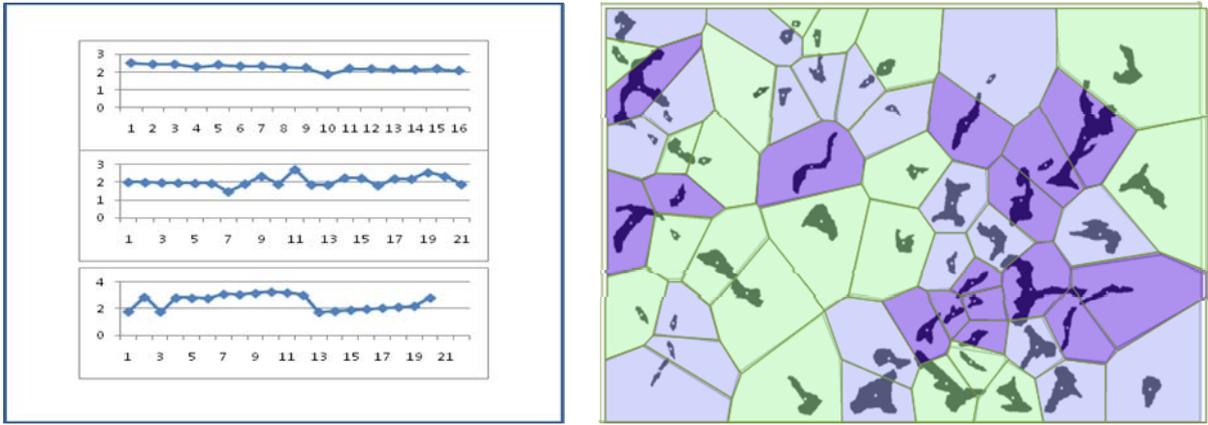
$$k_i = \frac{S_i}{T_i}. \quad (2)$$

На рисунке показаны графики и области компактности  $k_i$ .

Компактность эвтектики относительно вытянутой формы и низкой дезориентировкой представлена на рисунке более темным тоном (отображение верхнего графика).

Для выделения областей компактности применялась методика аналогичная представленной в работах [17–19].

В результате выделенное множество ячеек на изображении (см. рис.) соответствует областям заданной компактности.



**Рисунок. Области компактности эвтектики сплава 2007**

Описание свойств областей представляющих компактность эвтектики выполняется аналогично описанию отдельного сегмента изображения:

1) Модель  $k_{01}$  – вырожденная область компактности сегментов, представлена выражением:

$$k_{01} = \langle v_i, \{k_i\}^1 \cup \{c_4, c_5\}^2 \rangle, \quad (3)$$

где  $\{k_i\}^1$  – характеризует свойство области относительно значения  $\Delta k_i(t)$ . Например, быть: низкой, удовлетворительной, хорошей, высокой компактности относительно фона.

2) Модель  $k_{10}$  – область компактности сегментов представлена выражением:

$$k_{10} = \langle V^{ci}, \{k_i\}^1 \cup \{c_1 - c_3\}^2 \rangle, \quad (4)$$

где  $V^{ci}$  – множество ячеек, составляющих область компактности сегментов.

### Заключение

Состав моделей (3,4) позволяет классифицировать скопление областей на основе признака компактности. Дополнительно измерение скопления объектов может позволить решить ряд задач продиктованных современными требованиями производства. Это, прежде всего, такие задачи как:

1. Определение ориентации скопления класса объектов [15–17].
2. Определение взаимной ориентации или «дезориентировки» различных классов объектов [17].
3. Описания формы и формы границы скопления объектов изображения [1, 2, 19–22].

По предварительным результатам анализа данных полученных в результате экспериментов на тестовых металлографических изображениях деформируемого алюминиевого сплава было отмечено следующее:

- 1) Области с относительно высокой компактностью входят в состав относительно больших по площади областей с меньшим значением признака компактности.
- 2) Области с повышенной компактностью сегментов имеют относительно более вытянутую одно ориентированную форму с изрезанными границами.

Выделение и измерение скопления областей с характерной однородностью позволит автоматизировать решение аналогичного комплекса задач, решаемых сегодня в климатологии, гидрологии, почвоведении на основе анализа данных ДЗЗ, в частности исследовать динамику формы, направления движения, влияние контекста.

## Список литературы

1. Конева Н. А., Тришкина Л. И., Козлов Э. В. Эволюция структуры и зарождение разрушения // Современные вопросы физики и механики материалов. СПб.: СибГУ, 1997. С. 322–332.
2. Конева Н. А. Классификация, эволюция и самоорганизация дислокационных структур в металлах и сплавах // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 6. С. 99–107.
3. Гуляев А. П. Металловедение: 5-е изд., перераб. М.: Металлургия, 1977. 647 с.
4. Лившиц Б. Г. Металлография: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1990. 236 с.
5. Эллиот Р. Управление эвтектическим затвердеванием: пер. с англ. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
6. Чернявский К. С. Способы автоматизированного определения основных характеристик структуры компактных материалов // Заводская лаборатория. 1987. № 4. С. 43–49.
7. Перфильев Д. А. Классификация сегментов металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов // Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева. Вып. 10. Красноярск, 2006. С. 76–78.
8. Перфильев Д. А., Цибульский Г. М. Область концентрации сегментов металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов // Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева. Вып. 6 (13). Красноярск, 2007. С. 30–32.
9. Perfil'ev D. A., Maglinets Yu. A. and Tsibul'skii G. M. Family of Models for Describing One Class of Metallographic Images // International Journal "Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications". 2009. Vol. 19 No. 2. 334–341 pp.
10. Steve Ackerman, Kathleen Strabala, Paul Menzel e.t.c., Discriminating clear-sky from cloud with modis. Algorithm theoretical basis document (Mod35) /NASA/LaRC, Hampton, VA [http://modis.tmos.gsfc.nasa.gov/\\_docs/atbd\\_mod06.pdf](http://modis.tmos.gsfc.nasa.gov/_docs/atbd_mod06.pdf) 2002.
11. R. W. Saunders and K. T. Kriebel, An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data // International Journal of Remote Sensing. 1988. Vol. 9. 123–150 pp.
12. Алгоритм идентификации облачности для сканера AVHRR (ИКИ РАН).
13. Алгоритм оценки параметров облачного покрова (НИЦ «Планета»).
14. Алгоритм оценки процента облачного покрытия сцены в системе СДМЗ АПК (ИКИ РАН).
15. Прэйт У. Цифровая обработка изображений: в 2-х т. М.: Мир, 1982. 790 с.
16. Денисов Д. А. Компьютерные методы анализа видеоинформации: монография / Д. А. Денисов; Краснояр. гос. техн. ун-т. Красноярск, 1993. 192 с.
17. Перфильев Д. А., Дурнев П. В., Токмин А. М. Определение разориентировки областей пластинчатого графита на микроструктурных изображениях серого чугуна // «Заводская лаборатория. Диагностика материалов». 2010. № 1. Т. 76. Изд. М.: ООО «ТЕСТ – ЗЛ». С. 37–40.
18. Перфильев Д. А. Описание формы сегментов металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов // Вестник КГУ № 9. Красноярск: ИЦ КрасГУ, 2006. С. 220–224.
19. Перфильев Д. А. Анализ цифровых изображений : LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG Germany, 2011. 107 с. ISBN 978-3-8433-1442-8
20. Чукин К. С. Структуры данных для представления изображений // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 8. С. 124–129.
21. Фу К. С. Структурные методы в распознавании образов: пер. с англ. М.: Мир, 1977. 320 с.

22. Яншин В. В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. М.: Машиностроение, 1994. 112 с.

УДК 347.85

## МЕТОДЫ ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. А. Громько

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

e-mail: [gromyko58@mail.ru](mailto:gromyko58@mail.ru)

В статье раскрывается необходимость государственного регулирования космической деятельности. В содержании указывается основное направление: обеспечение правовой базы через принятие соответствующих правовых норм и контроля за их исполнением, способствующих эффективному функционированию государства в условиях рынка.

*Ключевые слова:* космическая деятельность, лицензирование, государственное регламентирование, авторское право, дистанционное зондирование, инструменты регулирования.

Конкурентная рыночная экономика может игнорировать важные виды товаров и услуг: космическую деятельность, национальную оборону, программу защиты окружающей среды – "товары, которые могут приносить и приносят удовлетворение потребителю, но не могут быть оценены или проданы посредством рыночной системы" [1]. Удовлетворение потребности в таких товарах должно брать на себя государство. Актуальность государственного регламентирования космических исследований обусловлена проблемами отсутствия в российском государстве института операторов по оказанию космических услуг, нет четкого перечня космических услуг, неразвитого рынка потребителей космической продукции. Одним из видов космических услуг является Дистанционное Зондирование Земли (ДЗЗ). Основным потребителем информации ДЗЗ является военно-промышленный комплекс, ведомства по мониторингу природных ресурсов, геодезии и картографии. Применение снимков из космоса используются в туризме, страховании, банковском деле, операциях с недвижимостью, в интернет услугах и др.

В настоящее время законодательную базу, регламентирующую дистанционное зондирование Земли из космоса (ДЗЗ), нельзя считать ни достаточно полной по охвату правовой проблематики, ни удовлетворительной по качеству [2].

В нашей стране формирование соответствующей законодательной базы началось с принятия Указа Президента России от 24 февраля 1992 г. № 185 «О структуре управления космической деятельностью в Российской Федерации», далее Закон Российской Федерации от 20 августа 1993 г. № 5663-1 «О космической деятельности» был единогласно принят Верховным Советом РСФСР.

Важным этапом развития законодательства в этой области стала регламентация космической деятельности в Конституции Российской Федерации.

Широкое толкование термина «космическая деятельность» создало проблему лицензирования тех работ по использованию данных ДЗЗ, которые ни по логике, ни по здравому рассуждению к лицензируемым работам не относятся. Федеральный закон Российской Федерации от 8 августа 2001 г. № 128-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» устанавливает, что космическая деятельность подлежит лицензированию. В соответствии с этим законом принято Постановление

Правительства Российской Федерации «Об утверждении Положения о лицензировании космической деятельности», в котором говорится:

"2. Лицензирование космической деятельности осуществляется Федеральным космическим агентством (далее – лицензирующий орган).

3. При осуществлении космической деятельности могут выполняться (оказываться) следующие работы (услуги):

<...> е) использование (эксплуатация) космической техники, космических материалов и космических технологий, в том числе:

<...> прием и (или) обработка информации, получаемой с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли..."

4 октября 2011 г. опубликован проект новой редакции «Положения о лицензировании космической деятельности», подготовленный Роскосмосом. В новом проекте активно используются указанные недостатки «Закона о космической деятельности» для внедрения в практику новых ограничений, целью которых объективно является нанесение ущерба Российской Федерации.

Проектом вводится обязательное лицензирование, например:

"проведение исследований и экспериментов с применением космической техники; прием и (или) обработка информации с разрешением не лучше 2 метров (по территории России), получаемой с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли..." [3].

В решении задачи четкого и однозначного понимания термина «космическая деятельность», помимо соображений целесообразности и интересов граждан России, можно опираться на статью 71 Конституции Российской Федерации.

Статья 71. "В ведении Российской Федерации находятся:

и) федеральные энергетические системы, ядерная энергетика, расщепляющиеся материалы; федеральные транспорт, пути сообщения, информация и связь; **деятельность в космосе...**"

С учетом опыта создания и принятия первой редакции закона Российской Федерации «О космической деятельности» И.М. Моисеев рекомендует следующий порядок законотворческой работы в этой сфере:

- 1) сбор предложений по правовым нормам, которые должны быть внесены в действующее законодательство или изъяты из него;
- 2) обработка полученных предложений;
- 3) разработка проекта концепции закона;
- 4) обсуждение концепции закона;
- 5) обработка критики и предложений по концепции закона;
- 6) подготовка и публикация текста законопроекта;
- 7) обработка критики и предложений по проекту закона;
- 8) разработка окончательного варианта проекта закона;
- 9) внесение законопроекта в Государственную Думу и сопровождение его прохождения [4].

Система государственного регулирования дистанционного зондирования включает использование правовых документов, воздействие правовых структур применение административного ресурса для достижения поставленных целей [5]. Опираясь на такое понимание государственного регулирования космической деятельности можно предложить модель, в которой по вертикали перечислены Основные понятия в сфере дистанционного зондирования Земли из космоса, а по горизонтали правовые инструменты и экономические методы воздействия государства на космическую деятельность [в таблице]. Целью моего научного приема – классифицировать полученный массив правовых норм по предметному признаку.

**Модель правовых методов государственного регулирования  
дистанционного зондирования Земли**

Инструменты (методы) воздей- ствия	Правовые основы и структуры					Экономические методы		
	Консти- туция РФ	Г К Р Ф	У К Р Ф	КоА П	Закон, постанов- ление	Налогова- я система	Лицензирование отдельных видов деятельности	Поряд- ок регис- трации
1. Комплекс услуг: Дистанционное зондирование Земли	+	+	+	+	+		+	
2. Предоставление Геопространственной информации	+	+	+	+	+	+	+	
3. Юридический статус хозяйствующих субъектов	+	+	+	+	+			+
4. Использование данных в геодезии, картографии и землеустройстве	+		+	+	+		+	+
5. Состояние элементов суши, океана и атмосферы Земли	+	+	+	+	+		+	
6. Охрана окружающей среды	+		+	+	+		+	
7. Оказание услуг связи	+				+		+	

**Основные направления государственного регулирования:**

1. Дистанционное зондирование Земли из космоса
2. Геопространственная информация
3. Информация как объект регулирования
4. Предоставление юридического статуса хозяйствующим субъектам (организационно-правовые формы)
5. Использование данных в геодезии и картографии, в землеустройстве
6. Информация о состоянии элементов суши, океана и атмосферы Земли.
7. Охрана окружающей среды
8. Оказание услуг связи.

В построенной модели на пересечении некоторых граф и строк проставлены символы "+", указывающие на то, что данное направление государственного регулирования реализуется с помощью соответствующего инструмента. В качестве примера рассмотрим какие инструменты регулирования применяются для воздействия по данному направлению.

**Конституция Российской Федерации**

Ст 71. В ведении Российской Федерации находятся:

и) федеральные энергетические системы, ядерная энергетика, расщепляющиеся материалы; федеральные транспорт, пути сообщения, информация и связь; **деятельность в космосе....**

Ст 9. Земля и другие природные ресурсы используются и охраняются в Российской Федерации как основа жизни и деятельности народов, проживающих на соответствующей территории.

## **Гражданский кодекс Российской Федерации (ГК РФ)**

Часть IV ГК РФ Данные Дистанционного Зондирования Земли продолжают оставаться объектами авторских прав.

п.1 ст. 1231 ГК РФ на территории России действуют исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_148685/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148685/).

### **Налоговый кодекс**

п.1 ст. 309 в Российской Федерации подлежат налогообложению доходы иностранных спутниковых операторов от использования в России прав на объекты интеллектуальной собственности <http://ppt.ru/kodeks.phtml?kodeks=14&paper=309>.

### **Законы Российской Федерации**

Закон Российской Федерации от 9 июля 1993 г. N 5351-I Ст. 7 "Об авторском праве и смежных правах" [http://www.consultant.ru/popular/avtorpravo/65\\_1.html](http://www.consultant.ru/popular/avtorpravo/65_1.html)

Закон Российской Федерации от 20 августа 1993 г. № 5663-1 «О космической деятельности» [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_121906/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121906/)

Закон Российской Федерации от 8 августа 2001 г. № 128-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_103208/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103208/)

Закон Российской Федерации от 27.07.2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_156802/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156802/)

Закон Российской Федерации от 21.07.1993 г. № 5485-1 «О государственной тайне» [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_156018/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156018/)

Закон Российской Федерации от 26.12.1995 г. № 209-ФЗ «О геодезии и картографии» <http://base.garant.ru/10105706/>

Закон Российской Федерации от 19 июля 1998 г. № 113-ФЗ «О гидрометеорологической службе» <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102293161&backlink=1&nd=102054223>

Закон Российской Федерации от 07.07.2003 г. № 126-ФЗ «О связи» <http://www.consultant.ru/popular/communication/>

Закон Российской Федерации от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «О защите окружающей среды» <http://www.consultant.ru/popular/okrsred/>

### **Кодекс об административных правонарушениях**

ст. 14.1 Осуществление предпринимательской деятельности без государственной регистрации или без специального разрешения (лицензии) <http://ppt.ru/kodeks.phtml?kodeks=11&paper=14.1>

### **Уголовный кодекс Российской Федерации**

ст. 146 УК РФ Нарушение авторских и смежных прав <http://ppt.ru/kodeks.phtml?kodeks=20&paper=146>.

### **Список литературы**

1. Макконнел К.Р. Брю С.Л. Экономикс: принципы, проблемы и политика. СПб.: Менеджер, 1994. С. 56.

2. Аш Е.В. Особенности правового регулирования российского рынка ДЗЗ // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2012. № 13.

3. Земля из космоса: законодательство, правовое регулирование и судебная практика / Под общей редакцией А. А. Балагурова. М., 2014. 192 с.

4. Моисеев И.М. Формирование российской законодательной базы дистанционного зондирования земли из космоса. Проблемы и возможные решения // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2011. № 11.

5. Биншток Ф.И. Государственное регулирование предпринимательской деятельности: Учеб. пособие / Под ред. проф. М.Г. Лапусты. М.: ИНФРА-М, 2003. 198с.

6. Федеральный Закон «О космической деятельности» Закон Российской Федерации от 20 августа 1993 г. № 5663-1.

7. Моисеев И.М. Общие проблемы российского космического законодательства [Электронный ресурс] // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. 2009. № 3. Режим доступа: [http://zikj.ru/images/archive/no3/moiseev\\_23.pdf](http://zikj.ru/images/archive/no3/moiseev_23.pdf).

**УДК 528.88**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНА ПУАССОНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

А. С. Плотникова, Д. В. Ершов, П. П. Шуляк  
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН  
e-mail: [alexandra@ifi.rssi.ru](mailto:alexandra@ifi.rssi.ru)

В статье изложен метод оценки вероятности возникновения лесных пожаров с помощью ретроспективного статистического анализа многолетних метео и спутниковых данных о пожарах. Вероятность возникновения пожара определяется по закону Пуассона. В результате получена база данных значений вероятности возникновения пожаров для Иркутской области и ее картографическое представление.

*Ключевые слова:* вероятность возникновения лесного пожара, закон Пуассона, применение спутниковых данных о пожарах.

Иркутская область для России является одним из крупнейших субъектов с точки зрения занимаемой лесом территории и запасов древесины. Как сообщает официальный сайт Иркутской области, лесная площадь занимает 71,8 миллион гектар или 92 % ее территории, при этом земли покрытые лесом составляют 83 % [1]. По данным иркутского Центра защиты леса регион располагает 12 % общероссийских запасов древесины и значительной долей особо ценных хвойных пород – сосны и кедра [2].

Природные пожары, возникающие ежегодно на территории области, приводят к потере прироста древесины и оказывают негативное воздействие на лесной покров. Поэтому для своевременного обнаружения и тушения пожаров на ранних стадиях целесообразно заранее оценить вероятности их возникновения, используя закон Пуассона распределения вероятности дискретной случайной величины.

Для получения количественной оценки вероятности возникновения лесных пожаров был проведен ретроспективный статистический анализ многолетних метео и спутниковых данных о пожарах за семь лет с 2006-го по 2012-й годы. Данными, участвующими в исследовании, располагает Информационная система дистанционного мониторинга (ИСДМ-Рослесхоз) [3]. Из метео данных проанализированы значения классов пожарной опасности (КПО) и среднесуточной температуры [4]. По пожарам использовалась информация о географических координатах и дате обнаружения очагов.

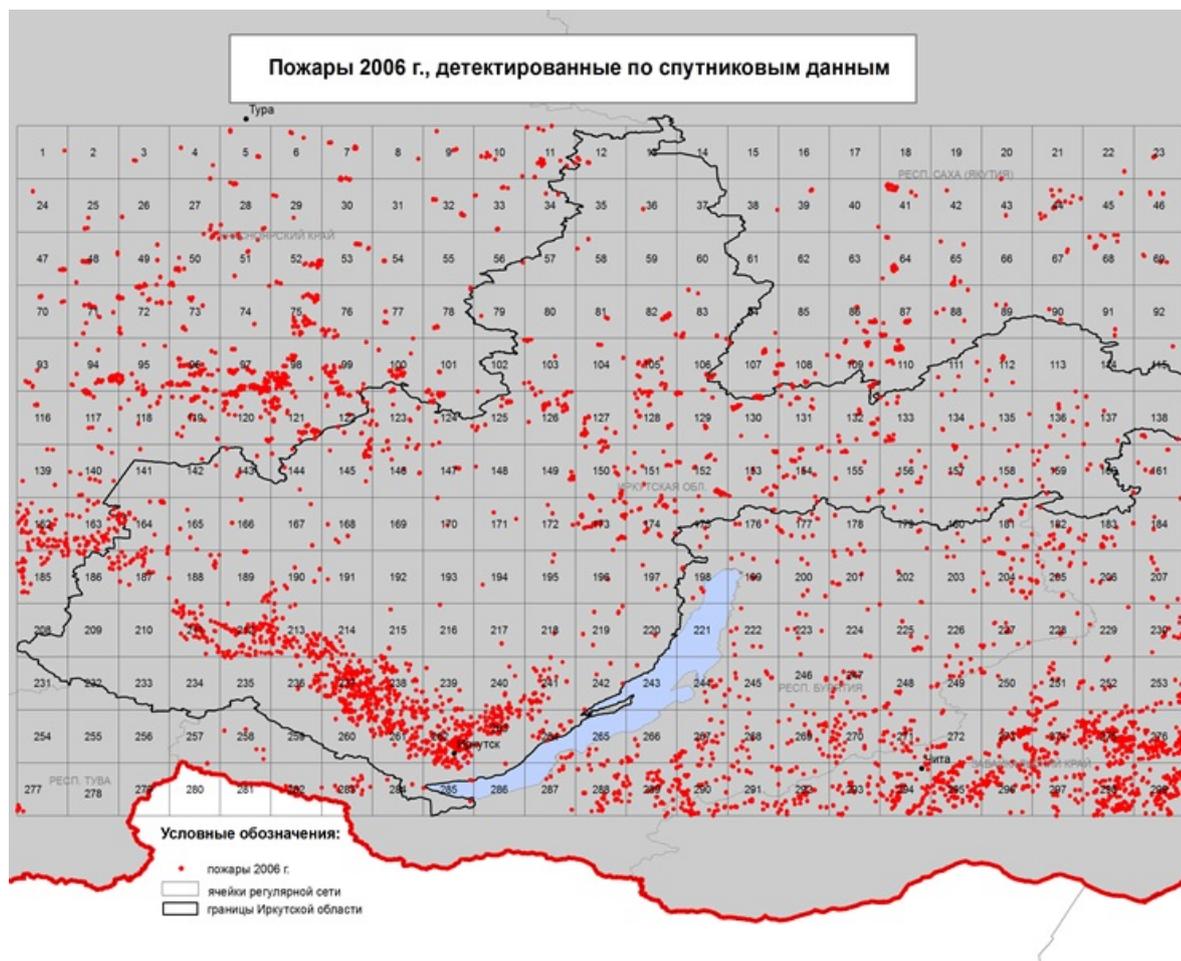
### **Подготовка экспериментальных данных**

На территорию Иркутской области была построена регулярная сеть с размером ячейки  $1^0 \times 1^0$ . На рис. 1 отображена построенная сеть с пожарами 2006-го года, детектированными по спутниковым данным.

Оценка вероятности возникновения пожаров проводится по трем сезонным периодам – весна, лето, осень. При подготовке метео данных для каждой ячейки сети были определены даты начала и конца периодов. Начало весеннего и конец осеннего

периодов определялись устойчивым переходом среднесуточной температуры через отметку +5 градусов Цельсия. Граница между весенним и летним периодами, а также между летним и осенним устанавливалась при переходе через +10 градусов.

Метеоданные в ИСДМ-Рослесхоз поставляются по метеостанциям, поэтому сначала были найдены даты периодов для метеостанций. Далее даты границ периодов с метеостанций пространственно интерполировались и находилось среднее значение для каждой ячейки сети. Ежедневные значения классов пожарной опасности, зафиксированные на метеостанциях, аналогично датам границ периодов интерполировались и находились средние значения КПО на территории ячеек сети.



**Рис. 1. Регулярная градусная сеть на территорию Иркутской области и пожары 2006 г.**

Подготовка данных о пожарах включала проведение пространственной идентификации очагов пожаров относительно ячеек сети. Пожары были разделены на весенние, летние и осенние. Для каждого пожара определен КПО в день обнаружения. Вычислено число дней и пожаров в сезонные периоды того или иного КПО.

**Оценка вероятности возникновения лесных пожаров**

Для определения вероятности возникновения одного и более пожара используется отрицательный биномиальный закон распределения случайной величины или его аппроксимация – закон Пуассона (1).

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m! * e^\lambda} \tag{1}$$

В формуле (1) использованы обозначения:  $P_m$  – вероятность возникновения пожаров,  $\lambda$  – параметр распределения Пуассона,  $m$  – число пожаров в день. Параметр  $\lambda$  находился посредством вычисления среднемноголетнего числа пожаров в день по ячейкам сети за весенний, летний или осенний периоды исследуемых лет. Нахождение среднего числа пожаров в день проводится по всем КПО, следовательно, для каждого класса пожарной опасности находится свое значение вероятности возникновения пожаров. Переменная  $m$  моделируется как прогнозируемое число пожаров в день (от нуля до бесконечности). Таким образом, закон Пуассона определяет вероятность возникновения того или иного числа пожаров в день.

Выбор закона Пуассона обусловлен тем, что задача нахождения вероятности возникновения пожаров удовлетворяет всем условиям его применения: число испытаний велико; вероятность появления события в каждом испытании очень мала; события происходят независимо друг от друга с постоянной интенсивностью в одинаковых промежутках времени (сезонные периоды) или на одинаковых отрезках пространства (ячейки сети). Применительно к задаче определения вероятности пожаров испытанием является день, событием – возникновение пожара [5].

### Результаты

По многолетним данным о пожарах и метеонаблюдениям выполнены расчеты параметра  $\lambda$  и в соответствии с законом Пуассона найдено значение вероятности. В результате получена база данных значений вероятности одного и более пожара по ячейкам сети для всех КПО за период с 2006 по 2012 гг. С целью визуализации полученных значений вероятности проведена пространственная интерполяция (рис. 2).

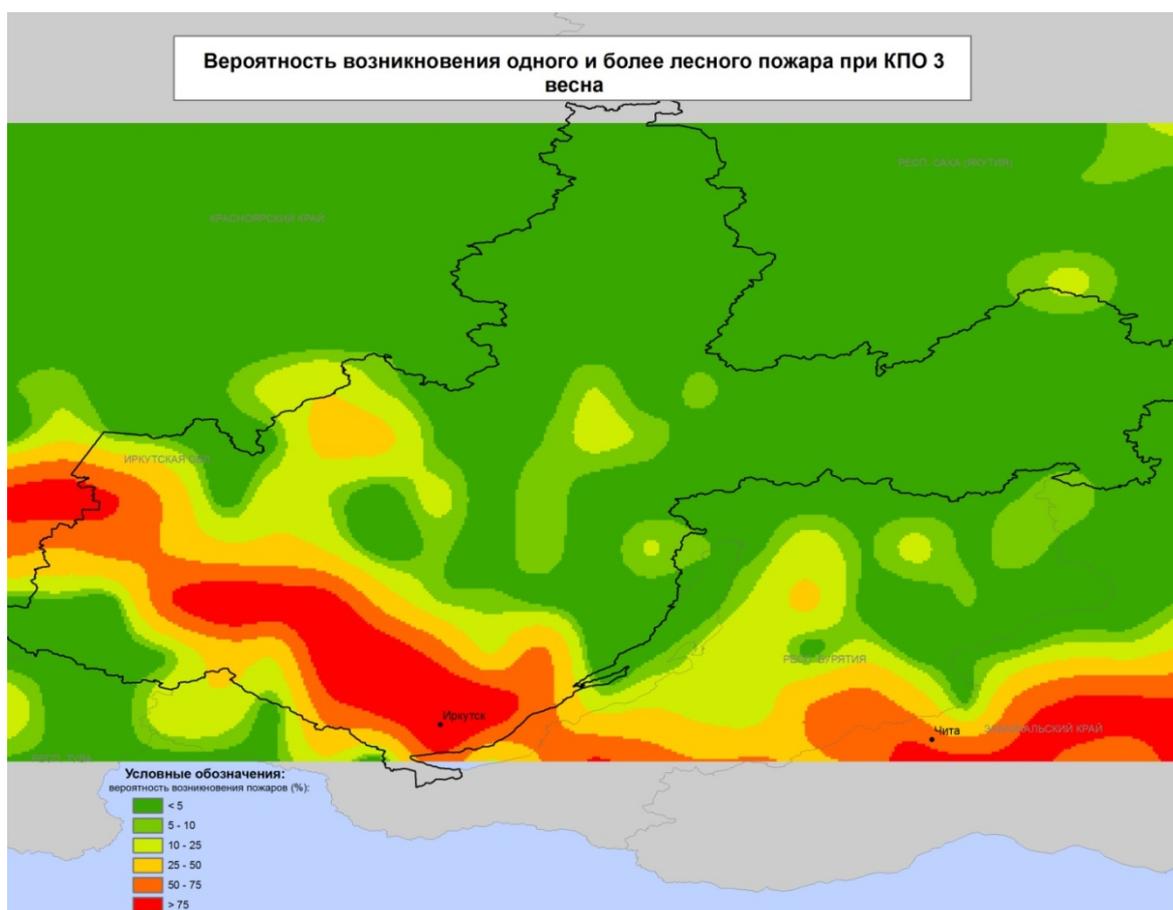


Рис. 2. Карта вероятности возникновения одного и более лесного пожара

### Анализ результатов

Анализ результатов оценки вероятности пожара проводился по пяти интервалам – более нуля и менее 0,1; от 0,1 до 0,25; от 0,25 до 0,5; от 0,5 до 0,75; более 0,75. По исследуемым сезонным периодам была найдена доля каждого интервала вероятностей. Помимо этого, проанализировано, при каких значениях вероятности происходили пожары 2013-го года. Использовались очаги пожаров, детектированные по спутниковым данным. Статистика по весеннему, летнему и осеннему периодам представлена на диаграммах рис. 3. При рассмотрении диаграмм прослеживается преобладание нулевых и низких значений вероятности. Весенний период характеризует незначительная доля пожаров, зафиксированных при низких вероятностях. В летний и осенний периоды такой тенденции на диаграммах не обнаруживается. Однако при нахождении соотношения между числом пожаров и вероятностью их возникновения в весенний и летний периоды наблюдается рост числа пожаров по мере увеличения вероятности (правый график на рис. 3).

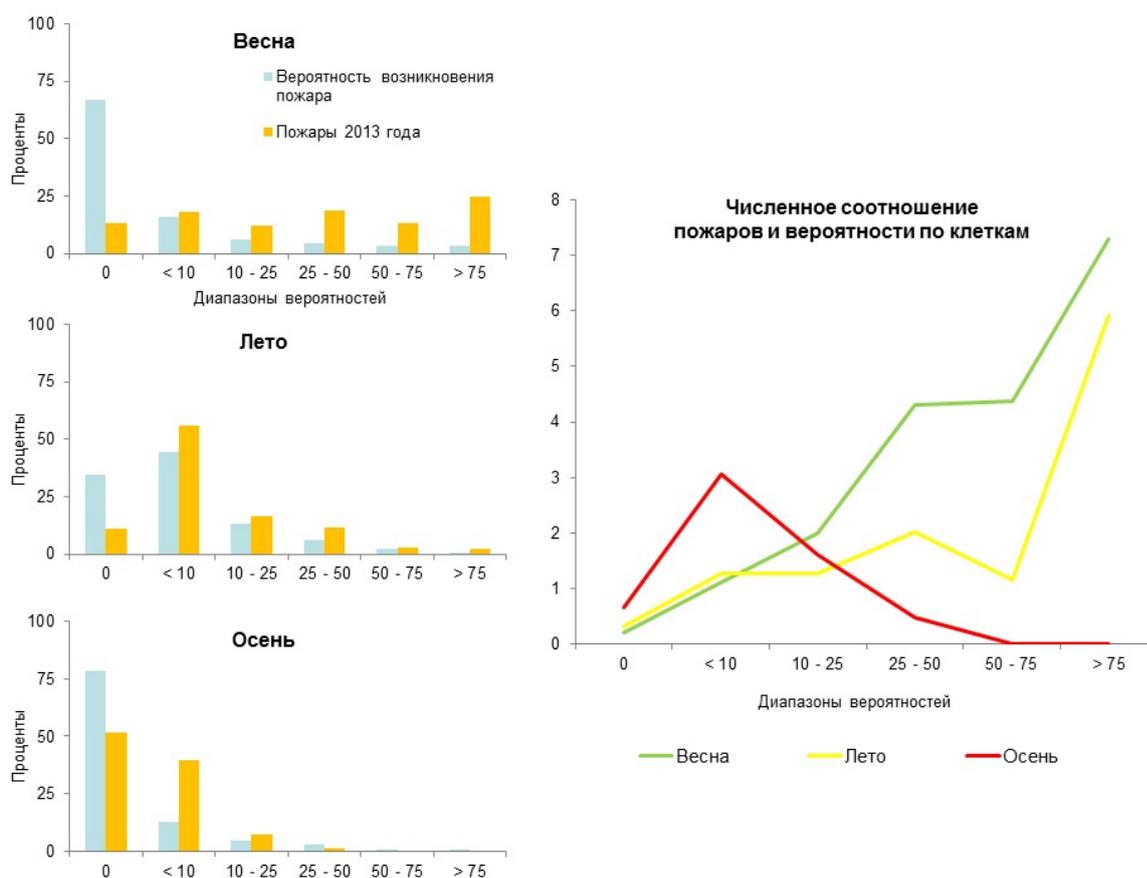


Рис. 3. Диаграммы анализа результатов по периодам

### Заключение

После проведенного исследования и анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы. Метод оценки вероятности возникновения пожаров по закону Пуассона дает в основном низкие значения вероятности ввиду малого числа исследуемых лет (2006–2012 гг.). В весенний и летний периоды, когда в Иркутском регионе наблюдается наибольшая пожарная активность, прослеживается увеличение числа возникновения пожаров по мере роста вероятности. Для оценки вероятности в осенний период требуется увеличение числа исследуемых лет.

## Список литературы

1. Официальный сайт Иркутской области ([http://culture.irkobl.ru/sites/les/forest/lesnoe\\_khozyaystvo/index.php?print=Y](http://culture.irkobl.ru/sites/les/forest/lesnoe_khozyaystvo/index.php?print=Y)).
2. Сайт Центра защиты леса Иркутской области (<http://www.czl38.ru>).
3. Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.
4. Вонский С.Н., Жданко В.А., Корбут В.И., Семенов М.М., Тетюшева Л.В., Загородная Л.С. Определение природной пожарной опасности в лесу. Методические рекомендации. ЛенНИИЛХ. 1975. 39 с.
5. Коровин Г.Н., Покрывайло В.Д., Солодовникова Н.И. Анализ и моделирование статистической структуры поля горимости лесов. ЛенНИИЛХ, 1984.

УДК 004.82, 004.93

## ОНТОЛОГИЯ ЛЕСОВ ЗАПАДНОГО САЯНА С ВКЛЮЧЕНИЕМ ИНФОРМАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е. В. Федотова<sup>(1,2)</sup>, А. Ю. Шукилович<sup>(1)</sup>, Т. А. Янковская<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

<sup>(2)</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

e-mail: [elfed@ksc.krasn.ru](mailto:elfed@ksc.krasn.ru)

Целью данной работы является разработка онтологической модели лесного покрова гор юга Сибири. Модель содержит информацию о типичных выделах, включая таксационные данные (состав насаждений, бонитет, средняя высота деревьев и диаметр ствола) и спектральные портреты основных лесообразующих пород. Представлены характеристики использовавшихся приборов дистанционного зондирования.

*Ключевые слова: онтология леса, Западный Саян, спектральные портреты, дистанционное зондирование.*

Комплексный анализ состояния природно-территориальных комплексов (ПТК) различных территорий проводится для решения задач планирования, оптимизации использования в хозяйственной деятельности их ресурсов и мониторинга процессов развития, а также обеспечения сохранения природных ландшафтов. В горных лесах юга Сибири для этих целей наряду с данными лесоустройства и полевых научных исследований используются космоснимки различного пространственного разрешения. Это позволяет проводить пространственную дифференциацию лесного покрова на разных масштабных уровнях.

Основной характеристикой для разделения лесного покрова с помощью данных дистанционного зондирования (ДЗ) являются спектральные характеристики верхнего полога леса. Поэтому первым шагом при дифференциации лесного покрова обычно является выделение формаций – темнохвойной и светлохвойной, которые наиболее четко разделяются по спектральным характеристикам. К темнохвойной формации относятся леса с преобладанием деревьев темнохвойных пород – пихты, кедра, ели. К светлохвойной формации относятся леса с преобладанием сосны или лиственницы. Темнохвойные леса (пихта и кедр составляют большинство в составе) растут в

горнотаежном высотном поясе, светлохвойные – в низко- - среднегорном поясах. Лиственные леса в горах юга Сибири (они представлены березовыми и осиновыми насаждениями) являются в основном производными, то есть возникшими там, где коренные хвойные леса были повреждены рубками, насекомыми, болезнями или пожарами.

Дальнейшая дифференциация лесного покрова проводится для оценки представительства деревьев разных пород, составляющих насаждения на определенной территории. Показателем в этом случае является доля деревьев каждой породы, оцениваемая с точностью 10 %. Затем можно проводить разделение насаждений по характеристикам условий местопроизрастания, по возрасту, характеристикам растительности, составляющей подлесок и пр. Свои особенности в лесной покров вносят и почвы, и ландшафтные характеристики территории, включая высоту над уровнем моря, крутизну и экспозицию склонов.

Все эти особенности насаждений отражаются в спектральных характеристиках, которые измеряются приборами ДЗ. Спектральные характеристики зависят от таких параметров приборов, как пространственное разрешение и спектральный диапазон.

Как видим, на породном составе лесов сказывается целый комплекс различных по значимости условий. Поэтому для его анализа применяется разнородная информация, для представления которой используются сложные модели представления знаний.

В данной работе представлена онтологическая модель для описания лесного покрова гор юга Сибири.

Термин «онтология» является синонимом представления знаний. Онтология состоит из терминов (понятий), их определений и атрибутов, а также связанных с ними аксиом и правил вывода. Формальная модель онтологии – это упорядоченная тройка конечных множеств

$$O = \langle T, R, F \rangle,$$

где  $T$  – термины предметной области, которую описывает онтология  $O$ ;  $R$  – отношения между терминами заданной предметной области;  $F$  – функции интерпретации, заданные на терминах и/или отношениях онтологии  $O$ .

Онтологии являются новыми методами представления и обработки знаний и запросов. Они способны точно и эффективно описывать семантику данных для некоторой предметной области и решать проблему несовместимости и противоречивости понятий.

Онтологии обладают собственными средствами обработки (логического вывода), соответствующими задачам семантической обработки информации. Так, благодаря онтологиям, при обращении к поисковой системе пользователь будет иметь возможность получать в ответ ресурсы, семантически релевантные запросу. Поэтому онтологии получили широкое распространение в решении проблем представления знаний и инженерии знаний, семантической интеграции информационных ресурсов, информационного поиска и т.д.

Первые модели данных предметной области описывались конструкторами типов таких языков программирования, как Алгол, а также в схемах баз данных. Позднее появились сложные модели данных, историю развития которых описал в своей работе Петер Чен, вместе с тем предложив новую модель данных, называемая моделью "сущность-связь" (Entity-Relationship model), основанную на некоторой важной семантической информации о реальном мире.

ER-модель явилась основой, из которой могут быть порождены три существующие модели данных: сетевой модели, реляционной модели и модели набора сущностей, представляя данные более строго и естественно и одновременно обеспечивая независимость данных от приложений (ER- модель основывается на теории множеств и реляционной теории). С тех пор было предложено множество

расширений ER-схем, чтобы обеспечить более мощные средства выражения семантики данных: механизмы задания иерархии подклассов классов сущностей, некоторых семантических ограничений типа "часть-целое". Ограничения ER-модели и её расширений в том, что они, описывая семантику "сущностей", позволяют интерпретировать данные одним единственным способом.

Можно с уверенностью сказать, что повторное использование знаний в различных контекстах невозможно без наличия механизмов, позволяющих фиксировать различное понимание этих знаний. Идея разработки такого механизма была представлена частично в ANSI/SPARC-архитектуре баз данных.

Эта архитектура включает три уровня:

1. Логический уровень (называемый "концептуальной схемой"), который является промежуточным уровнем и основой данной архитектуры.

2. Внутреннее представление базы данных описывает способ, по которому концептуальная схема может быть реализована в терминах объектов физического уровня: файлов, индексов, хэш-таблиц и т.д.

3. На верхнем уровне концептуальной модели можно определить множественное "внешнее представление". Оно будет состоять из выборок и комбинаций элементов концептуальной схемы и представлять видение схемы для каждого конкретного пользователя этого приложения. Главное ограничение внешнего представления ANSI/SPARC заключается в том, что в логической модели архитектуры ANSI/SPARC должна содержаться вся имеющаяся в базе данных информация, однако новые данные, добавленные в представления верхнего уровня, нельзя перенести на логический (основной) уровень этой архитектуры. Другими словами, нет единого, унифицированного представления для всех представлений контекстов, которое было бы достаточным для любой возможной ситуации, поскольку число различных представлений контекстов практически неограниченно. Не существует также способа понять, применима ли какая-то конкретная часть знаний для другого контекста, и если неприменима, то почему.

В данной работе для разработки онтологии использована платформа Protege – это свободный, открытый редактор онтологий и фреймворк для построения баз знаний. Платформа Protege поддерживает два основных способа моделирования онтологий посредством редакторов Protege - Frames и Protege - OWL. Онтологии, построенные в Protege, могут быть экспортированы во множество форматов, включая RDF (RDF Schema), OWL и XML Schema.

Процесс разработки онтологии обычно начинается с того, что составляется глоссарий терминов (понятий), который в дальнейшем используется для исследования свойств и характеристик представленных в нем терминов. В нашей работе использовано четыре суперкласса. Классами называются обобщенные понятия предметной области. Первый суперкласс «Порода» содержит элементы «деревья» - перечислены основные лесообразующие породы деревьев, произрастающих в горах юга Сибири. Вторым не менее важным суперклассом является «Приборы ДЗЗ», на втором уровне класс содержит подкласс «Спектрорадиометры», собравший в себя спутники ДЗЗ, используемые в работе, такие как Landsat8OLI, Landsat8TIR, LandsatETM+, LandsatMSS, LandsatTM и Spot. В дальнейшем на втором уровне могут быть добавлены другие приборы ДЗ, например, приборы микроволнового или лазерного зондирования. Третьим суперклассом является «Природа». На втором уровне этот суперкласс содержит подкласс «Западный Саян», на основе данной территории и создавалась предлагаемая онтология. Последний суперкласс - это «Спектр». Данный класс служит для описания спектрального портрета деревьев из суперкласса «Порода» спутниками, представленными в суперклассе «Приборы ДЗЗ».

Наиболее глубоко проработан суперкласс «Природа». Предполагается в дальнейшем ввести наряду с «Западным Саяном» и другие подклассы второго уровня. Третий его уровень представлен четырьмя экорегионами:

- Саяно-Прибайкальский горно-таежный экорегион;
- Саянский горный средне-таежный экорегион;
- Саяно-Тывинский горный южно-таежный экорегион;
- Хакасский горный южно-таежный экорегион.

Четвертый уровень содержит девять субэкорегионов:

- Бирюсинский равнинный субэкорегион сосновых и лиственных лесов;
- Тагульский горный субэкорегион темнохвойных лесов;
- Удинский равнинный субэкорегион сосновых и производственных березовых лесов;
- Казырский горный субэкорегион пихтово-кедровых лесов;
- Комайский низкогорный субэкорегион светлохвойных и лиственных лесов;
- Тубийский равнинный субэкорегион светлохвойных и лиственных лесов;
- Усинский горный субэкорегион лиственнично-кедровых лесов;
- Бедий-Белинский горный субэкорегион кедровых лесов и горных тундр;
- Верх-Енисейский равнинный субэкорегион кедрово-лиственничных лесов.

Это соответствует принятому делению территории по климатическим и ландшафтным характеристикам для анализа лесного покрова.

Онтология построена на основе семантики и имеет вид: экземпляры из класса «Деревья» соединены с экземплярами из классов «субэкорегион» посредством связи, или как принято называть её в Protege, бинарного свойства «Произрастает». Также данные экземпляры соединены с экземплярами из класса «Спектр» посредством свойства «Имеет спектральный портрет». Экземпляры из класса «Спектрорадиометры» соединены с экземплярами класса «Спектр» посредством свойства «Создает спектральный портрет».

Таким образом, в онтологической модели имеются экземпляры, представляющие основные лесообразующие породы деревьев лесов юга Сибири: сосна, лиственница, сосна кедровая, пихта, ель, береза, осина. Для каждой из пород представлены усредненные по большому количеству данных дистанционного зондирования спектральные характеристики в оптическом диапазоне электромагнитного спектра. Для экземпляров выделов представлена таксационная информация. На более высоком пространственном уровне эти сведения объединены в ПТК более высоких рангов в соответствии с природным районированием территории.

Развитие онтологической модели предполагает включение новых связей, свойств и функций. Это позволит расширить географию представленных лесов, вводить новые характеристики ландшафтов и растительного покрова.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-07-98005.

### **Список литературы**

1. Christopher Welty. Towards a Semantics for the Web. Padova, Italy.
2. Когаловский М.Р. Абстракции и модели в системах баз данных // СУБД: Издательский дом "Открытые системы". 1998. № 4–5.
3. Смирнов А.В., Пашкин М.П., Шилов Н.Г., Т.В. Левашова. Онтологии в системах искусственного интеллекта: способы построения и организации (ч. 1) // Новости искусственного интеллекта. М.: Изд-во РАИН, 2002. № 2. С. 3–9.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕБ-СИСТЕМ

О. Э. Якубайлик

Институт вычислительного моделирования СО РАН,  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: [oleg@icm.krasn.ru](mailto:oleg@icm.krasn.ru)

В статье обсуждаются проблемы выбора системной архитектуры прикладных геоинформационных веб-систем, достоинства и недостатки различных решений. Рассматриваются технические характеристики, организация интерфейса пользователя, отличительные особенности систем рассматриваемого класса. Представлено содержание, особенности формирования и актуализации информационного картографического обеспечения создаваемых систем.

*Ключевые слова:* геопортал, веб-картография, геопространственные данные, геоданные, веб-ГИС, Интернет-ГИС, каталог пространственных метаданных, картографический веб-сервис, WMS-сервис.

Постановка задачи определяет технические требования к проектируемой прикладной информационной системе. Помимо описания основных задач и функций создаваемой разработки, в техническом задании обычно рассматриваются вопросы выбора системной архитектуры и режима эксплуатации программного обеспечения. Степень определенности может быть разной – в одном случае, например, использование СУБД Oracle является для заказчика обязательным в создаваемой системе, а в другом – может быть поставлена задача выбора оптимальной СУБД, с учетом различных факторов.

Для рассматриваемой задачи создания программного обеспечения картографических веб-приложений – региональных геоинформационных веб-систем – чаще всего используют подход, в рамках которого принятие решения о выборе системной архитектуры – один из этапов разработки. Это связано с тем, что данная предметная область – относительно новая, в ней сейчас нет «однозначных» лидеров в области базового программного обеспечения указанного типа – наоборот, существует ряд конкурирующих технологических решений, которые выглядят привлекательными, достаточными для обеспечения реализуемых задач [1].

Представляется логичным рассматривать проблему выбора технологической платформы для реализации систем указанного типа, т.к. вряд ли найдется одна универсальная программа, удовлетворяющая весь спектр возможных потребностей. На первый взгляд, анализ рынка программного обеспечения подсказывает, что сначала нужно сделать выбор одного из двух альтернативных вариантов – коммерческое программное обеспечение типа семейства приложений ESRI ArcGIS или свободное и бесплатное ПО (FOSS – free & open source software) ГИС – «настольные» ГИС, инструментальные средства для веб-картографии, геопространственные библиотеки для чтения/записи и обработки пространственных данных, и т.д. Каждый из этих вариантов характеризуется функциональной полнотой, при этом имеет свои плюсы и минусы. Коммерческие системы требуют вложений на старте, но многие функции можно сразу использовать, а благодаря технической поддержке сроки внедрения минимальны. Открытые/свободные ГИС на практике сложнее начать использовать, но по эффективности и производительности они не уступают коммерческим, и при наличии квалифицированных специалистов всегда можно расширить их функционал [2].

Оставляя за скобками финансовый, философский и конъюнктурный аспекты выбора, хотелось бы отметить, что сегодня на практике чаще всего нет противопоставления двух рассматриваемых подходов. И причина в том, что сейчас коммерческие и свободные ГИС хорошо дополняют друг друга – благодаря совместимости форматов данных, стандартам информационного обмена, основанным на веб-сервисах, и т.д. Можно, например, выполнять анализ пространственных данных в ESRI ArcGIS, конвертировать их в MapInfo для передачи заказчику, и при этом использовать свободное ПО Mapserver для представления на веб-страницах, а каталог пространственных метаданных формировать средствами GeoNetwork Open Source. При этом для хранения пространственных данных использовать открытую СУБД PostgreSQL с модулем расширения PostGIS, что для подавляющего большинства задач практически не уступает по производительности и функциональным возможностям лидеру коммерческих СУБД Oracle с расширением для работы с пространственными данными Oracle Spatial.

Наиболее популярная в настоящее время концепция построения картографического веб-приложения предполагает создание набора взаимосвязанных веб-сервисами компонент, выполнение которых осуществляется одновременно на компьютере-сервере и компьютере-клиенте (многозвенная архитектура), а также формирование набора пространственных данных, как правило – в формате популярных ГИС или с использованием специализированной геопространственной СУБД. При этом первоначальная подготовка геоданных для веб-приложения осуществляется, как правило, за рамками рассматриваемой веб-системы, для этого сегодня обычно используют стандартные настольные ГИС (MapInfo, ArcGIS, QGIS, и проч.) [3].

Отличительными особенностями региональных геоинформационных веб-систем являются следующие:

- интеграция картографического веб-приложения в систему управления веб-контентом, ее средствами управления доступом пользователей, администрирования и настройки интерфейса, формирования информационных блоков веб-портала;
- совершенствование пользовательского интерфейса: создание элементов управления картой и геоданными в стиле традиционных настольных ГИС – плавающие панели с инструментами-кнопками, интерактивные древовидные раскрывающиеся меню со списками слоев карты, контекстная настройка свойств отображения данных, и т. д.;
- расширенная поддержка информационного обмена геоданными между элементами картографического веб-приложения и сторонними системами на основе открытых технологических стандартов – веб-сервисов;
- оформление наборов используемых геопространственных данных в виде каталогов с соответствующими метаданными, создание самостоятельных программных средств для навигации и поиска геоинформации в этих каталогах.

Опираясь на опыт выполненных разработок, попробуем сформулировать программно-технологические особенности веб-систем рассматриваемого класса с функциональной точки зрения [4] –

- Система должна состоять из клиентской и серверной частей, реализуя тем самым технологию «клиент – сервер». Применение в основе серверной части приложения шаблона проектирования MVC (модель – представление – контроллер) предоставляет широкие возможности для решения поставленных задач. Использование данной архитектуры предполагает разделение данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики на три отдельных компонента. Модификация каждого компонента может осуществляться независимо. Помимо стандартных элементов MVC, ключевыми блоками рассматриваемой системы также являются шаблоны представления страниц и AJAX-обработчики.

- Геопространственные данные системы регистрируются в каталоге ресурсов. Связь веб-приложения с каталогом ресурсов ведётся на основе сервис-ориентиро-

ванной архитектуры, реализованной при помощи протокола SOAP/XML. Создается набор функций, доступный в виде прикладного программного интерфейса (API), предоставляющий возможности поиска ресурсов, их фильтрации, управления, редактирования, копирования, перемещения и т. д.

- Формируется два набора программных интерфейсов: общий (клиентский) интерфейс для пользовательских приложений и расширенный интерфейс (серверный) для приложений, имеющих возможность управления каталогом ресурсов, его объектами и отношениями между объектами.

Информационное обеспечение прикладных региональных геоинформационных веб-систем, создаваемое в соответствии с указанными здесь принципами, состоит из нескольких типов геопространственных и прочих данных, соответствующих средств для их обработки –

- табличные данные, которые хранятся в СУБД – они обеспечивают бизнес-логику системы, ее базовое содержание.

- тематические пространственные данные, связанные с непосредственным содержанием задач и функций прикладной системы. Данные этого типа могут создаваться как в рамках интерфейсов пользователя прикладной системы (на основе веб-браузера или приложения для Windows), так и средствами сторонних приложений – различные программы ГИС/CAD, и т.п.

- картографические подложки – информационные ресурсы вспомогательного характера – карты и мозаики спутниковых снимков, используемые при визуализации тематических пространственных данных системы. Используются как собственные наборы данных, так и сторонние сервисы, предоставляемые компаниями Яндекс, Google, 2ГИС, и др.

- средства для создания и администрирования пространственными метаданными, связанных с ними сервисами визуализации, поиска и фильтрации.

- средства для классификации геопространственных данных – стандартизация системы классификаций обеспечивает возможность множественного использования данных в различных проектах.

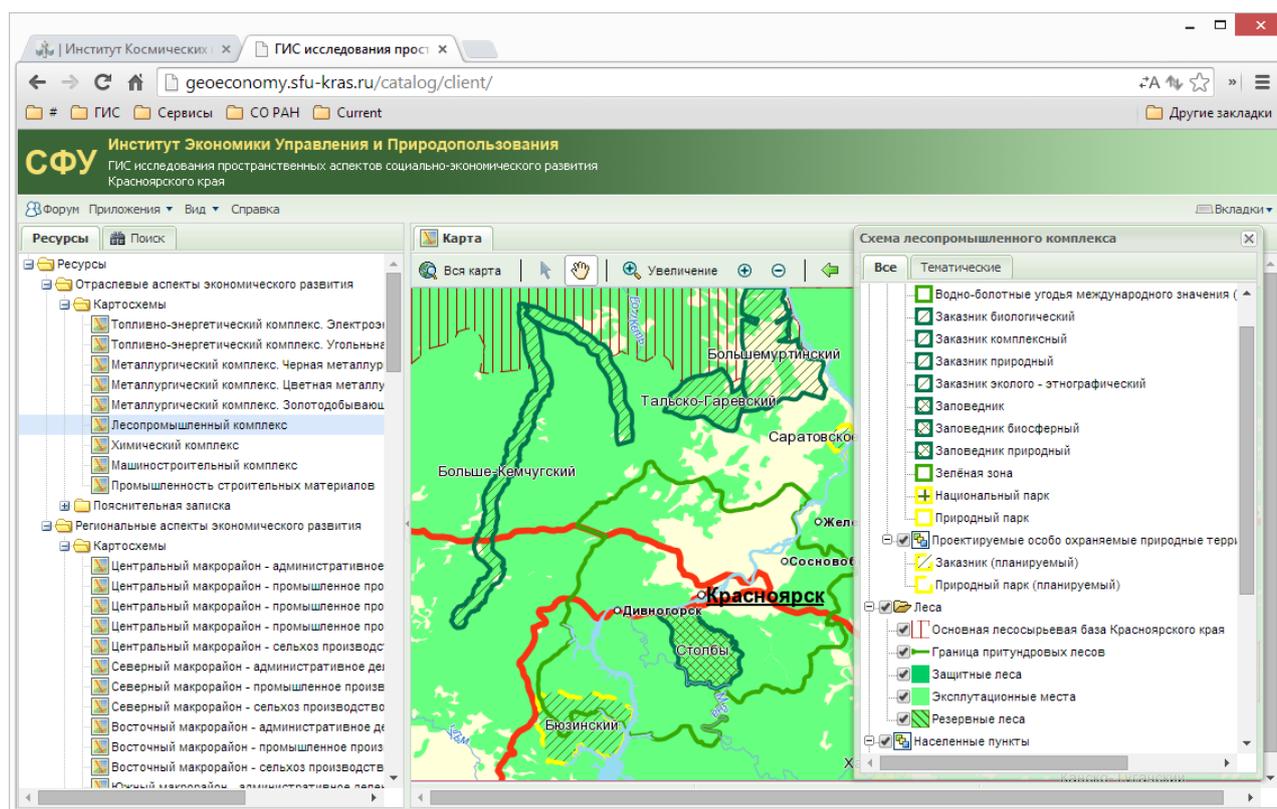
- инструменты для управления веб-публикацией сведений о геопространственных данных – это интерфейсы пользователя для формирования тематических разделов геопортала на основе системы управления веб-контентом.

- инструменты интеграции систем, информационного обмена и программного взаимодействия на основе информационно-аналитических и картографических сервисов геопортала.

Модульная архитектура рассматриваемых систем, использование стандартных веб-сервисов для обмена данными между этими модулями, обеспечивает быструю адаптацию имеющегося программного обеспечения под требования заказчика, тиражирование отдельных компонентов, их взаимодополняемость. В свою очередь, регистрация создаваемых ресурсов – пространственных данных в централизованном каталоге геопортала – обеспечивает возможность их одновременного применения в нескольких разработках. Такой сервис-ориентированный подход, основанный на активном внедрении веб-технологий в прикладные информационные системы, все чаще применяется в настоящее время [5].

В качестве иллюстрации – примером прикладной геоинформационной веб-системы рассматриваемого типа является «ГИС исследования пространственных аспектов социально-экономического развития Красноярского края», поддержку которой осуществляет Институт космических и информационных технологий СФУ (рис. 1). Эта разработка на протяжении ряда лет используется экономистами

университета и администрации края в задачах пространственного анализа экономических данных.



**Рис. 1. Интерфейс прикладной геоинформационной веб-системы**

### Список литературы

1. Кадочников А.А., Попов В.Г., Токарев А.А., Якубайлик О.Э. Формирование геоинформационного Интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов // Журнал СФУ. Серия: Техника и технологии. 2008. Т. 1. № 4. С. 377–386.
2. Матвеев А.Г., Якубайлик О.Э. Разработка веб-приложения для обработки и представления пространственных метаданных геопортала // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2(42). С. 48–54.
3. Якубайлик О. Э. Геоинформационная Интернет-система мониторинга состояния природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли // Вестник СибГАУ. 2010. Т. 1(27). С. 40–45.
4. Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Матвеев А.Г., Пятаев А.С., Токарев А.В. Программно-технологическое обеспечение геопортала ИВМ СО РАН // Информационные системы для научных исследований: Сб. науч. ст. тр. XV Всерос. объединенной конф. «Интернет и современное общество». Санкт-Петербург, 10-12 октября 2012 г. СПб., 2012. С. 143–148.
5. Якубайлик О.Э., Попов В.Г. Технологии для геоинформационных Интернет-систем // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 6. С. 116–126.

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕДНИКОВ И ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В. Г. Коновалов, В. А. Рудаков  
Институт географии РАН  
e-mail: [vladgeo@gmail.com](mailto:vladgeo@gmail.com)

Для использования в программе дистанционного мониторинга параметров оледенения получены линейные связи между высотой линии ELA равновесия процессов аккумуляции и абляции в конце летне-осеннего сезона, индексом площади аккумуляции AAR и составляющими годового баланса массы на ледниках. По данным ДЗЗ оценена динамика моренного покрова на ледниках Памира. Охарактеризованы качество данных и информативность Каталогов ледников. Приведены примеры определения спектрального альbedo поверхности ледников с помощью программных модулей ENVI и данных дистанционного зондирования со спутников ЛАНДСАТ 7 ETM+ и ТЕРРА.

*Ключевые слова:* оледенение, водный баланс, дистанционное зондирование, линия равновесия, морена, альbedo.

### Введение

Информационной основой моделирования и расчетов гидрологического режима оледенения Земли служат в том числе высотно-площадные параметры ледников, а именно: высоты их начала  $Z_b$  и конца  $Z_e$ , средней  $Z_f$  или текущей  $H_f$  высоты снеговой/фирновой границы, верхней границы распространения сплошного моренного покрова  $Z_m$ , площади ледника в целом  $F_{gl}$ , областей аккумуляции  $F_{ac}$ , абляции  $F_{ab}$  и льда под сплошной мореной  $F_m$ . Распределение площади ледника  $F_{gl}$  по высоте  $Z$  над уровнем моря отражает интегральная функция распределения  $F_{gl}(Z)$ , при этом  $F_{gl}(Z_e) = 0$ , а  $F_{gl}(Z_b) = F_{gl}$ . Если известна  $F_{gl}(Z)$ , нетрудно определить среднее значение  $F_{ac} = F_{gl}(Z_b) - F_{gl}(Z_f)$ . Тогда  $F_{ab} = F_{gl}(Z_b) - F_{ac}$ , а  $F_m = F_{gl}(Z_m)$ . Высота  $Z_f$  равна среднему из временного ряда максимальных за календарный/балансовый год значений  $H_f$ , в течение которого высоты  $Z_b$  и  $Z_e$  остаются практически постоянными. Для стационарного состояния оледенения и линейности изменения по высоте процессов аккумуляции и абляции высоту  $Z_f$  можно приравнять  $Z_{med}$  – средней взвешенной высоте между отметками  $Z_b$  и  $Z_e$ .

Все перечисленные высотно-площадные параметры являются объектами мониторинга за состоянием ледников на основе данных аэрофотосъемки, дистанционного зондирования районов оледенения, применения крупномасштабных топографических карт и технологий ГИС. В практике гляциологических наблюдений и расчетов систематически используются две производные от высотных параметров – максимальная высота  $H_f$  в конце периода абляции или  $Z_{max}$  и отношение площади аккумуляции к площади всего ледника, англоязычная аббревиатура AAR (accumulation area relationship). В случаях, когда вкладом наложенного льда в питание ледника можно пренебречь,  $Z_{max}$  служит аналогом высоты линии равновесия годовых объемов аккумуляции и абляции, или ELA (equilibrium line altitude). Таким образом,  $AAR = f(Z_{max}$  или ELA). Оба параметра в интерактивном или полу-автоматическом режиме могут быть получены посредством обработки векторных полигонов ледников, идентифицированных на средне и крупно-масштабных изображениях со спутников. Подробное описание методов определения расширенного набора параметров ледников по результатам векторизации их контуров на дистанционных изображениях со спутников и обработки полученных шейп-файлов средствами ГИС приведено в работе [1].

Высотно-площадные характеристики оледенения Земли, а также ежегодные значения ELA и AAR для ограниченного числа ледников можно найти в справочниках [2–6]. По этим данным выполнен анализ связей между ELA, AAR, годовым балансом массы ледников и его составляющими. Соответствующие выборки включали от 45 до 66 ледников, расположенных в основном на территории Евразии, на высотах  $Z_{med}$  от 520 м до 4253 м над ур. моря. Результаты анализа представлены в табл 1.

**Таблица 1**

**Связи между ELA, AAR, балансом массы ледников  $B_n$  и его составляющими**

Характеристики	Коэффициенты корреляции R парных связей				
	AAR=f( $B_n$ )	ELA =f( $B_n$ )	ELA =f ( $B_s$ )	ELA =f ( $B_w$ )	AAR=f(ELA)
Среднее	0,89	-0,88	-0,69	-0,57	-0,92
Число ледников $N_1$	53	66	45	45	54
$N_2$ ( $R \geq 0.80$ )	47	57	19	9	50
$N_2/N_1$ %	88,7	86,4	42,2	20,0	92,6

Условные обозначения:  $B_n$ ,  $B_w$ ,  $B_s$  – соответственно годовой, зимний и летний балансы массы ледника.  $B_w \sim A_c$ ,  $B_s \sim A_b$ .

Существование тесных и устойчивых пространственных связей  $AAR = f(B_n)$  и  $AAR = f(ELA)$  (см. табл. 1) позволяет, в конечном счете, получить локальные либо региональные оценки баланса массы ледников.

#### Использование ELA для расчета годовой аккумуляции на ледниках

Покажем это на примере зависимости  $ELA=f(B_n)$ , общим аналитическим видом которой является линейное уравнение:

$$ELA=azB_n + bz, \quad (1)$$

где  $az$  и  $bz$  – локальные или региональные эмпирические коэффициенты. Подставив в (1) вместо годового баланса  $B_n$  разность годовых значений аккумуляции  $A_c$  и абляции  $A_b$ , получим

$$ELA=az (A_c - A_b) + bz. \quad (2)$$

Откуда следует, что

$$A_c=(ELA-bz)/az +A_b, \quad (3)$$

т.е. сложные и трудоемкие определения аккумуляции на леднике заменены простыми измерениями или расчетами ELA и абляции. Эксперименты на ледниках Австрии и Норвегии показали [8–9], что для определения ELA вполне пригодны данные спутникового зондирования, что расширяет возможности дистанционного мониторинга режима оледенения. При этом следует учитывать либо пренебрегать влиянием на высоту ELA зоны наложенного льда, которая в конце периода абляции располагается ниже фирновой границы. А годовая абляция легко и довольно точно рассчитывается как функция средней летней температуры воздуха.

Локальные оценки параметров  $az$  и  $bz$  получены по материалам [2–6] достаточно длительных измерений ELA и составляющих годового баланса массы на континентальных ледниках, расположенных в Северном полушарии Земли. Выборка включает 38 ледников, охватывает 1946–2003 годы, минимальное и максимальное значения ELA равны соответственно 470 и 4450 метров над уровнем моря. Средняя длина временных рядов составляет 27 лет. Коэффициент корреляции зависимости  $ELA = f(B_n)$  в среднем для 38 ледников равен  $-0.90$  и изменяется от  $-0.73$  до  $-0.98$ .

### Динамика моренного покрова на ледниках Памира

Влияние моренного покрова на таяние ледников весьма велико. Установлено [10], что при толщине сплошной морены от 1 до 7 мм таяние увеличивается от 1.02 до 1.11 раза, а при толщине 10 см оно уменьшается до 0.42 по сравнению с таянием открытой поверхности ледника. Заморенность отдельных ледников изменяется от ее полного отсутствия до почти полного покрытия всей площади ледника. Толщина моренного покрова на ледниках Памира колеблется от миллиметров до нескольких десятков сантиметров. В 1957 году площадь морены на ледниках Памира составляла 320 км<sup>2</sup>, или 4,8 % от общей площади оледенения региона, а спустя ~ 20 лет она увеличилась до 644 км<sup>2</sup> или 10,7 % [2].

В настоящей работе использованы: снимки ледников Федченко и Бивачного в конце августа 2007 и 2012 годов со станции МКС. Разрешение на местности 3–5 метров. Снимки трансформированы в проекцию WGS и привязаны к топографической карте 1:50 000. Установлено увеличение за 1975–2007 годы общей площади морены на этих ледниках. Относительно площади всего ледника Федченко доля морены равнялась 31,6 % в 2007 году, и 34,3 % в 2012 году. Заморенность ледника Бивачного оставалась практически одинаковой за 2007–2012 годы. Принимая, что толщина моренного покрова на ледниках Федченко и Бивачном в 2007–2012 гг. оставалась постоянной, сток за счет таяния льда под мореной уменьшился только на леднике Федченко.

### Определение спектрального альbedo поверхности ледников

Альbedo  $A_i$  в долях единицы по спутниковым данным представляет собой отношение, измеренных в одной и той же  $i$ -й зоне спектра, значений отраженной радиации от деятельной поверхности  $E_{\uparrow i}$  к радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы  $E_{\downarrow i}$ . В расчетах составляющих  $A_i$  используется методика, изложенная в работе G.Chander и B. Markham [11]. Все необходимые для расчета значения автоматически извлекаются из информационного файла, имеющегося в каждом спутниковом снимке. Пример определения спектрального альbedo поверхности в бассейне ледника Южный Иныльчек (Центральный Тянь-Шань) иллюстрирует рисунок.

Распределение альbedo на рисунке хорошо согласуется с одним из вариантов типичного изменения отражательных свойств деятельной поверхности ледника в направлении от его конца, покрытого сплошной мореной, до верховьев, состоящих из чистого льда, фирна и снега.

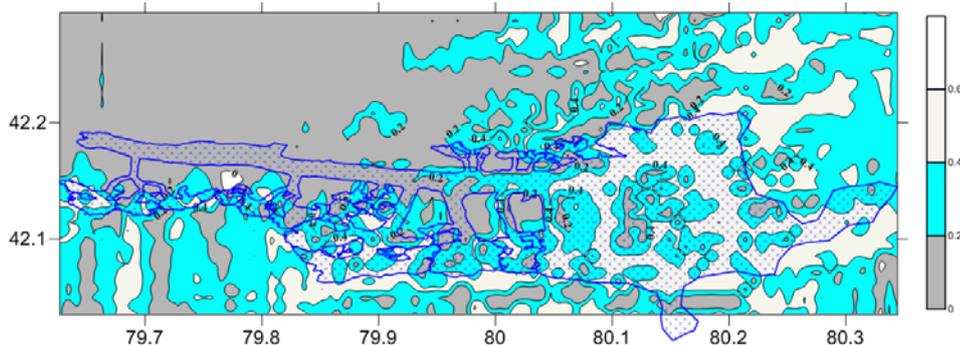


Рисунок. Распределение спектрального альbedo в бассейне ледника Южный Иныльчек по результатам обработки снимка со спутника ЛАНДСАТ ЕТМ+. По оси абсцисс – долгота в град. в.д., по оси ординат – широта, град. с.ш., с правой стороны – шкала альbedo для выделенных изолиний, линия синего цвета – контур ледника

### **Каталоги ледников и гидрологические расчеты**

Каталоги [2, 3] по составу параметров в принципе пригодны для ориентировочных расчетов гидрологического режима оледенения в масштабе речных бассейнов и стока рек с ледниково-снеговым типом питания. Априорно невысокий уровень качества расчетов обусловлен следующими недостатками данных в этих справочниках. 1. Точность определения площади и длины ледников равна соответственно  $0,1 \text{ км}^2$  и  $0,1 \text{ км}$ , а высотных параметров  $0,01 \text{ км}$ . При этом число ледников в [3] с площадью от 0 до  $0,5 \text{ км}^2$ , то есть с заведомо низким качеством информации, равно 60,4 %. 2. Каталог [3] нуждается в обновлении однократных определений параметров ледников, относящихся к диапазону лет от 1900 г. до 2003 г. 3. В почти половине случаев отсутствует временная привязка данных и нет сведений о масштабе и времени издания топографических карт, использованных при определении высотно-площадных характеристик ледников. Временное разрешение гляциологической информации и наличие большого числа пропусков не позволяют в полной мере использовать возможности климатических данных для моделирования и расчета суточного, сезонного и ежегодного гидрологического режима совокупностей ледников в масштабе крупных речных бассейнов.

Начиная с 70-х годов прошлого столетия, для обновления данных в Каталоге [3] постепенно стали использоваться результаты обработки изображений гляциальных областей Земли, полученных со спутников LANDSAT, TERRA, LISS, SPOT. Наибольшее число изображений (96,4 %) получено в 2000–2005 гг. со спутников LANDSAT (сенсор ETM+) и TERRA (сенсор ASTER) в рамках международного проекта GLIMS (Global Land Ice Monitoring from Space). К настоящему времени число ледников, для которых в [12] имеются разновременные изображения равно 43 922, что составляет 26,4 % от общего числа и 34,4 % от площади оледенения Земли. Данные [12] содержат следующие серьезные недостатки и препятствия для использования в прикладных задачах. 1. Неудачна система идентификации ледников, которая несовместима с принятой в каталоге [3]. 2. По сравнению с [3], в [12] дана только общая площадь ледников, которая к тому же включает нунатаки, что приводит к преувеличению чистой площади оледенения. 3. Использование спутниковых изображений с различной разрешающей способностью и частично мелкомасштабных навигационных карт привело к несовместимости качества определений в [12] морфометрических параметров ледников. 4. В случаях цитирования разновременных векторных изображений ледников не указано, к какому моменту принадлежат приведенные в [12] значения площади. 5. В 50 % случаев отсутствуют даты получения спутниковых изображений ледников. 6. Не исследовано влияние заснеженности гляциальных областей в различные годы на качество дешифрирования границы ледников. В целом информативность [12] и соответствие интересам потребителей значительно уступает [3] и нуждается в существенной доработке и совершенствовании. Методика такой обработки и результаты ее применения для ледников в бассейнах рек Центральной и Высокогорной Азии приведены в работах [1, 13].

### **Дистанционный мониторинг пульсаций ледников**

Результаты учащенных определений изменения площади ледников Медвежий и РГО (Русского Географического Общества) на Памире в периоды их пульсаций по данным крупномасштабной аэрофотосъемки, дистанционного мониторинга со спутников ЛАНДСАТ 7 ЕТМ+, ТЕРРА и фотографирования с борта Международной Космической Станции (МКС) представлены в табл. 2. Оцифровка контура концевой части этих ледников была выполнена за ряд лет от заданного заранее реперного профиля, зафиксированного на бортах долины постоянными метками.

Таблица 2

Изменение площади км<sup>2</sup> от реперного профиля до конца ледников

Дата ДЗЗ	Площадь, км <sup>2</sup>	Изменение площади, км <sup>2</sup>	Прирост площади (+) сокращение (-), км <sup>2</sup>
Ледник Медвежий			
09.09.1973	2,084	1,633	
13.09.1988	0,451	0,000	- 1,633
12.05.1989	0,540	0,089	+ 0,089
08.10.1989	1,279	0,829	+ 0,739
26.06.2001	0,667	0,216	- 0,612
10.08.2002	0,689	0,238	+ 0,022
08.09.2009	0,508	0,057	- 0,181
28.09.2011	1,439	0,988	+ 0,931
Ледник РГО			
16.09.2000	1,342	0	
10.08.2002	1,461	0,119	+ 0,119
30.09.2002	1,600	0,257	+ 0,139
08.08.2003	1,794	0,452	+ 0,195
26.09.2004	1,989	0,647	+ 0,195
22.08.2005	1,989	0,647	0,000
31.07.2006	2,139	0,797	+ 0,150
01.07.2007	2,702	1,360	+ 0,563
09.08.2009	2,667	1,325	- 0,035
29.09.2011	2,589	1,247	- 0,079

**Выводы**

Многоспектральные изображения высокогорных территорий, получаемые со спутников ЛАНДСАТ 7 ЕТМ+, ТЕРРА и других в настоящее время служат единственным источником регулярной информации о глобальных и региональных изменениях размеров оледенения. Тематическое дешифрирование этих изображений и обработка результатов с помощью технологий ГИС способно обеспечить приемлемую точность оценок многолетней эволюции оледенения. Рассмотренные в работе возможности и методы определения ELA - линии равновесия объемов аккумуляции и абляции, составляющих годового баланса массы и альбедо служат реальной основой для автоматизированного мониторинга ряда основных параметров оледенения.

**Список литературы**

1. Коновалов В.Г. Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования // Сб. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". 2010. Т. 7. № 2. М.: ИКИ РАН. С. 43–54.
2. Щетинников А.С. Морфология оледенения речных бассейнов Памиро-Алая по состоянию на 1980 год (справочник). САНИГМИ, Ташкент, 1997. 148 с.
3. World Glacier Inventory. WGMS and NSIDC. Boulder CO, U.S.A. 1989, updated 2012. doi: 10.7265/N5/NSIDC-WGI-2012-02. <http://nsidc.org/data/g01130.html>
4. Dyurgerov M.B., Meier M.F. Glaciers and the changing Earth system: A 2004 snapshot // INSTAAR, University of Colorado at Boulder. Boulder, Colorado. Occasional Paper 2005. № 58. 119 p.
5. Fluctuation of glaciers 1959–2012. Paris – Zurich, IAHS (ICSI) – UNESCO, 1967–2013.
6. Glacier Mass Balance Bulletin (MBB). IAHS (ICSI)-UNEP-UNESCO, Zurich. 1991–2011. № 1–11.

7. Heiskanen J., Kajuutti K., Jackson M., Elvehøy H., Pellikka P. Assessment of glaciological parameters using Landsat satellite data in Svartisen, Northern Norway // Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space, Bern, March 11–13, 2002. P. 34–42.

8. Pelikka P., Rees W.G. Remote Sensing of Glaciers // Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers. Taylor & Francis Group, London, UK. 2010. 350 p.

10. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 237 с.

11. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors // Remote sensing of Environment, 113. 2009. Pp. 893–903.

12. Randolph Glaciers Inventory: A Dataset of Global Glacier Outlines. version 3. 7 April 2013. <http://glims.org/RGI/>

13. Коновалов В.Г. Динамика оледенения Центральной Азии по материалам дистанционного зондирования. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. Москва, 2012. Т. 9. № 1. С. 281–288.

**УДК 528.8, 502.64**

## **ДИСТАНЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

А. К. Сагателян, Ш. Г. Асмарян

Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА (ЦЭНИ НАН РА)

e-mail: [ecocentr@sci.am](mailto:ecocentr@sci.am), e-mail: [ashuk@ecocentre.am](mailto:ashuk@ecocentre.am)

Рассматриваются основные направления применения дистанционных технологий в Республики Армения. А также базовые научно-технологические ресурсы для развития в перспективе направлений, которые обеспечат надежную научно-методическую основу для совершенствования и разработки дистанционных методов и создания на этой основе мониторинговой системы.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, состояние окружающей среды, дешифровочные признаки, мониторинговая система.

Технологии дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) в силу своих уникальных особенностей (широкий территориальный охват, оперативность, контроль за отдаленными районами и т. д.) имеют важное значение для контроля и мониторинга в разных сферах социально-экономической деятельности и в работах по оценке антропогенного и техногенного воздействия на окружающую среду [9]. Экосистемы, отраженные на многозональных космических снимках, представляют собой совокупность объектов, отличающихся по цвету и яркости, что позволяет использовать данные дистанционного зондирования (ДЗЗ) для изучения их антропогенной трансформации [10].

В Центре эколого-ноосферных исследований НАН РА применение технологий ДЗЗ в экологических исследованиях началось с 80-ых годов прошлого века и как показывает практика охватывает довольно широкий спектр проблем. На основе сопоставления спутниковых и наземных данных выполнены и ведутся разработки дистанционных методов в направлении:

- оценки и выявления динамики изменения ландшафтов
- аэрокосмического мониторинга экологического состояния растительности (контаминация, запыление),

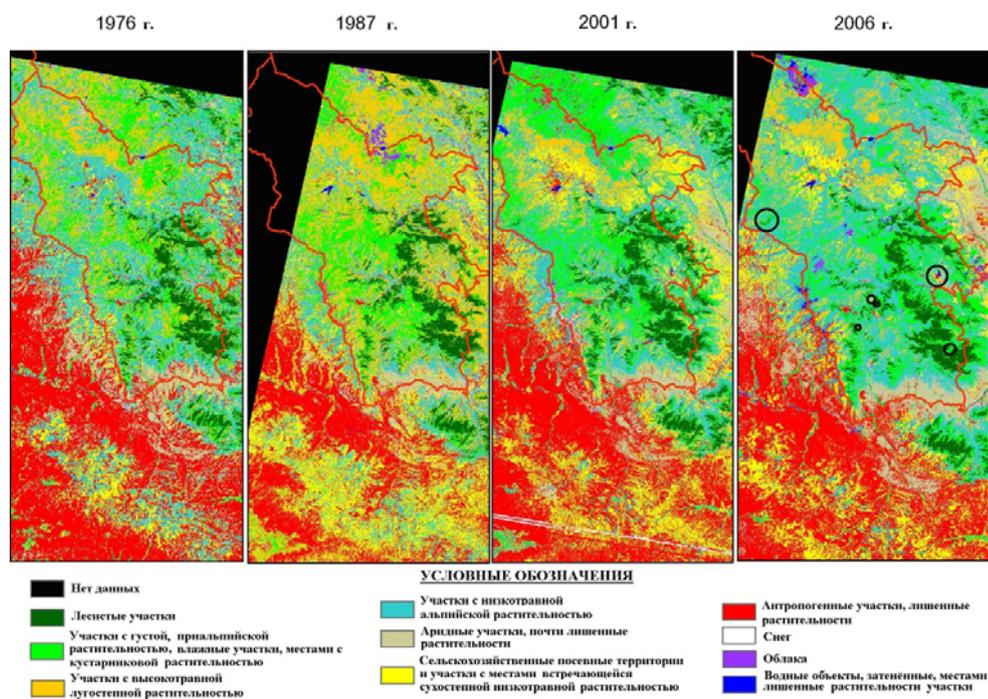
- оценки состояния современного землепользования и рациональности функционального зонирования территорий для решения вопросов территориального планирования

- оценки степени эродированности высокогорных пастбищ,
- оценки продуктивности пастбищ и сенокосов.
- оценка риска отдельных промышленных объектов
- моделирования аварийных ситуаций на ААЭС.

Дистанционные методы оценки динамики изменения ландшафтов основаны на анализе спектральных кривых и вегетационных индексов. В частности вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы, один из самых распространенных и используемых индексов для количественной оценки экосистем [12].

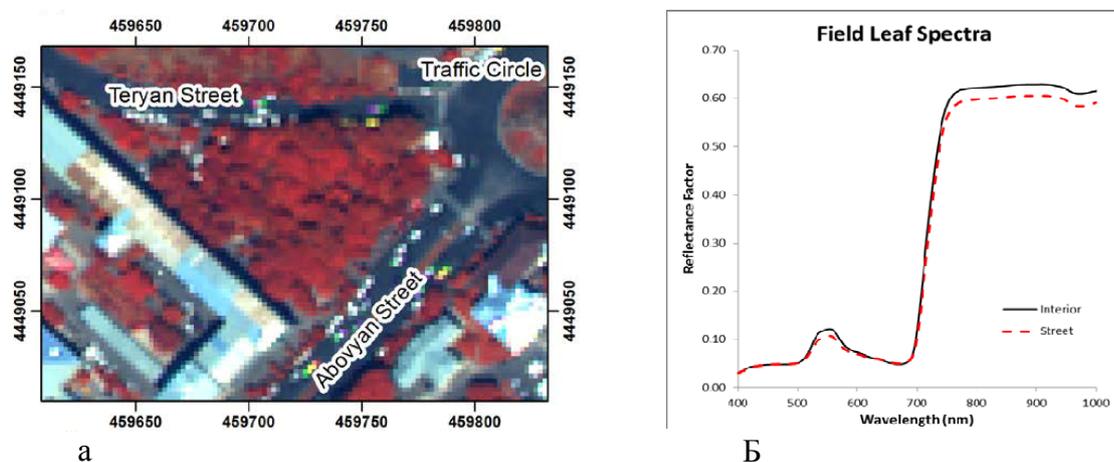
На примере Сюникского марза в южной части Армении методом классификации объектов с обучением (Supervised classification) и с помощью вегетационных индексов выделены классы и проведен анализ спектральных кривых, которые характеризуют отражательную способность объектов в разных зонах спектра и являются одним из важнейших дешифровочных признаков природных и антропогенных объектов [6, 8]. В результате выявлена пространственно-временная динамика изменения ландшафтов в данном регионе за период с 1976–2006 гг. (рис. 1).

В последние годы в аспекте дистанционного зондирования спектральные характеристики растительности изучались многими рабочими группами как в лабораториях, так и на природных полигонах [6, 8–9, 11]. С целью разработки методов дистанционного мониторинга экологического состояния города Еревана, основываясь на результатах биогеохимических исследований, проведена спектрофотометрическая съемка для выявления особенностей спектральной отражательной способности листьев деревьев отдельных видов (ясень обыкновенный, вяз мелколистный). На выбранных модельных территориях исследованы листья деревьев в зонах с различной степенью загрязнения [3].



**Рис. 1. Динамика экосистем территории Сюникского марза по методу классификации с обучением многоспектральных космических снимков**

Сопоставлением данных биогеохимических исследований, со спектральными данными, выраженными на многозональном космическом снимке WorldView2, а также сравнение кривых спектрального отражения листьев деревьев данного вида с суммарным коэффициентом загрязнения ТМ, выявлена обратная корреляционная связь между коэффициентами загрязнения и значениями спектрального отражения в ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра (рис. 2).



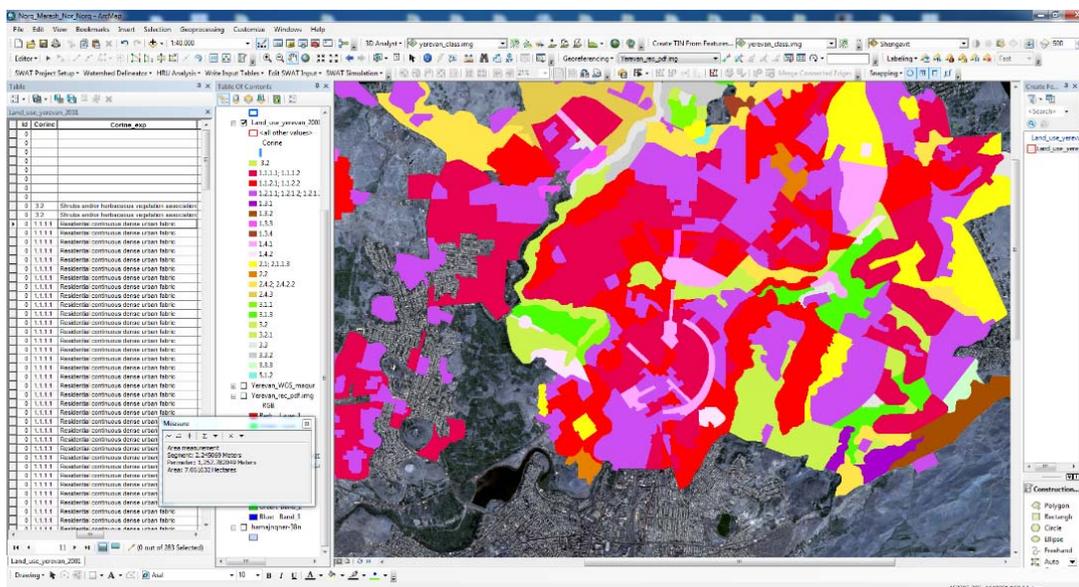
**Рис. 2. а) многозональный космический снимок WorldView2 модельной территории, б) спектральные кривые значений листьев деревьев отражающие разницу спектральных значений в зеленом, красном и инфракрасном диапазонах**

Необходимым условием улучшения городской среды является рациональность её территориальной организации, для определения которой проведено функциональное зонирование – пространственная организация основных видов деятельности – труда, быта, отдыха [1–2, 7]. Функциональное зонирование территории города проводилось путем дешифрирования объектов землепользования по космическим снимкам QuickBird по классификации CORINE (Coordination of Information on the Environment) (рис. 3). Целесообразность применения к номенклатуры землепользования CORINE обусловлена рядом ее свойств, прежде всего, относительной простотой, универсальностью, применимостью к задачам ландшафтоведения и, что немаловажно, возможностью распознавания тех или иных категорий земель по данным дистанционного зондирования [4–5].

Принятые в Армении кадастровые описания не совпадают с классификатором CORINE и вовсе не ориентированы на оценку текущего и динамического состояния земель. Поэтому распознавание соответствующих классов земель по материалам спутниковых съемок является самостоятельной задачей с целым рядом возможных фундаментальных и практических приложений. Функциональное зонирование территории города дало возможность определить степень функциональной нагрузки на морфо-литологическую систему г. Еревана.

Для эффективного контроля и управления высокогорными пастбищами необходима система мониторинга, неотъемлемым компонентом, которой являются ГИС и дистанционные технологии с их мощным программно-аппаратным потенциалом. Неумеренное использование легко достигаемых пастбищ в Армении привело к потере их продуктивности с серьезными экологическими и экономическими последствиями. Кроме того не в полном объеме используется основная часть пашен, которые являются основным источником высококачественного корма. В ЦЭНИ разработана методика

оценки экологического состояния высокогорных пастбищ с применением ГИС и дистанционных технологий, на основе которого выполнена оценка экологического состояния пастбищ для 80 сельских общин. С применением морфологических и морфометрических методов выполнена дифференциация и картографирование пастбищных участков. А оценка их экологического состояния (общая каменность и степень деградации) проводилась в полевых и камеральных условиях с помощью замеров и визуального дешифрирования космических снимков.



**Рис. 3. Дешифрирование объектов землепользования по космическим снимкам QuickBird по номенклатуре CORINE**

Помимо вышеприведенных основных примеров практического применения в ЦЭНИ имеются базовые научно-технологические ресурсы для развития в перспективе следующих направлений:

1. разработка дешифровочных признаков (прямые и косвенные) загрязнения почв тяжелыми металлами;
2. разработка дистанционных методов оценки энергетического потенциала кормовых угодий;
3. дистанционная диагностика болезней растений и распространения вредителей;
4. разработка дистанционных методов прогнозирования засух.

В заключении можно констатировать, что комплексование наземных и космических данных и междисциплинарный подход проэкологических исследований обеспечивают надежную научно-методическую основу для совершенствования дистанционных методов и создания на этой основе мониторинговой системы с целью поддержки решения проблем территориального управления и вопросов устойчивого развития.

### Список литературы

1. Антипова А.В. Карты использования земель: принципы создания и применение в эколого-географических исследованиях // Геодезия и картография. 1998. № 1. С. 14–32.
2. Асмарян Ш. Г. Эколого-геоморфологическая оценка территории г. Еревана. Материалы междунар. молодеж. конф. “Горные территории – экологические проблемы городов”, 29-30 мая 2007. Ереван: Изд-во ЦЭНИ, 2007. С. 96–100.

3. Асмарян Ш.Г., Мурадян В.С., Бужделев В.В. Оценка экологического состояния озелененных территорий города Еревана методом дистанционного зондирования (на примере Кольцевого парка и парка им. Абовяна) // *Агронаука*. 2012. № 11–12. С. 752–755.
4. Гурьянова Л.В. Использование ГИС и данных дистанционного зондирования для мониторинга застроенных территорий // *Вестник Белорусского государственного университета*. Сер. 2. 2008. № 3. С. 107–112.
5. Лурье И.К., Косиков А.Г. Теория и практика цифровой обработки изображений // *Дистанционное зондирование и географические информационные системы*; под ред. А.М. Берлянта. М.: Научный мир, 2003. 168 с.
6. Кронберг П. Дистанционное изучение земли. М.: Мир, 1988. 352 с.
7. Макаров В. З., Новаковский Б. А., Чумаченко А. Н. Эколого-географическое картографирование городов. М., 2002. 194 с.
8. Мищенко Н. В., Трифанова Т. А. Карева М.М. Оценка состояния растительности и почв на основе данных дистанционного зондирования // *Вестн. Москов. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. № 3. 2008. С. 14–19.
9. Николаева Е. А. Индикация техногенного загрязнения компонентов тундровых экосистем по данным цифровой космической съемки // *Изв. А. Н. Серия географическая*. 2000. № 6. С. 89–97.
10. Трифонова Т.А. Мищенко Н. В. Краснощеков А. Н., Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М.: Академический Проект, 2005. 348 с.
11. Euyoung Ch., Freek M., Frank R., Harald W., Woudewijn S., Kyoung – Woond K. Mapping of heavy metal pollution in stream using combined geochemistry, field spectroscopy and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain. J // *Remote sensing of environmental*. 2008. № 112. Pp. 3222–3233.
12. Giannico C. Remote sensing of vegetation in the Calabrian region // *Acta Astronautica*. 2007. № 60. Pp.119–131.

**УДК 528.855**

## **СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРИЁМНОГО КОМПЛЕКСА ПК-3,6 В ЗАПАДНОСИБИРСКОМ ЦЕНТРЕ ДЗЗ РОСКОСМОСА**

А. К. Гончаров<sup>(1)</sup>, О. В. Бекренёв<sup>(1)</sup>, К. Н. Филькин<sup>(1)</sup>, В. В. Мороз<sup>(1)</sup>,  
А. С. Рождественский<sup>(1)</sup>, Ю. В. Пасменко<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы»

<sup>(2)</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнёва»  
e-mail: [didyk@iss-reshetnev.ru](mailto:didyk@iss-reshetnev.ru), [gontcharov@ntsomz.ru](mailto:gontcharov@ntsomz.ru), [bekrenevov@mail.ru](mailto:bekrenevov@mail.ru),  
[filkin@ntsomz.ru](mailto:filkin@ntsomz.ru), [vmoroz@ntsomz.ru](mailto:vmoroz@ntsomz.ru), [vmoroz@ntsomz.ru](mailto:vmoroz@ntsomz.ru)

В статье описывается опыт создания приемного комплекса и возникавшие при этом «тонкие моменты». Кроме того, рассказывается процесс эксплуатации приемного комплекса.

*Ключевые слова:* ДЗЗ, комплекс приёма и регистрации.

В настоящее время остро стоит задача обеспечения региональных центров Российской Федерации данными космического мониторинга. При наличии развитой орбитальной группировки дистанционного зондирования, обеспеченность данными недостаточна. Время, затрачиваемое на цикл приема и передачи данных, не соответствует

критериям оперативности. Одним из путей решения этой проблемы является оптимизация процесса распространения информации за счет создания региональных центров приема и обработки информации дистанционного зондирования Земли, что позволит увеличить количество сеансов приема информации на территории Российской Федерации и сократит временные затраты на получение этих данных конечными потребителями.

В рамках создания единой территориально распределенной информационной системы ЕТРИС ДЗЗ для регионального центра Роскосмоса в городе Железногорск (Красноярского края) разработан и установлен комплекс приема космической информации ПК-3,6 для приема информации ДЗЗ с эксплуатируемых и с перспективных российских КА ДЗЗ. Общий вид антенного комплекса ПК-3,6 под радиопрозрачным укрытием (РПУ) представлен на рис. 1.

Основные характеристики приёмного комплекса ПК-3.6 представлены в таблице.

Комплекс приема космической информации ПК-3,6 работает в автоматическом режиме с возможностью удаленного управления из НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы». Зал приёма и регистрации представлен на рис. 2.

Этот проект призван не только расширить сеть приемных станций, но и отработать технологию развертывания подобных комплексов в минимально возможное время, а также выяснить все так называемые «тонкие моменты» при организации и проведении такого рода работ. Одними из основных проблем, встающих перед разработчиками, при создании такого комплекса могут стать сложности с доставкой оборудования, сохранность самого оборудования при транспортировке. Удаленность центра приема от основных магистральных линий передачи данных влечет за собой целый комплекс работ на месте по организации канала передачи данных от центра приема к потребителю. Слабо развитая информационная инфраструктура порождает дополнительные работы по прокладке кабельных линий для коммутации комплекса прием и обработки и как следствие организацию доукомплектования дополнительными расходными материалами.

Тем не менее, пусконаладочные работы, автономные и комплексные испытания приёмного комплекса ПК-3,6 были проведены на объекте «Пасека» в г. Железногорске в сентябре – октябре 2011 года.



**Рис. 1. Антенный комплекс ПК-3.6 под РПУ**

Таблица

№п/п	Наименование характеристики	ПК-3,6
1	Диаметр антенны, м	3,65
2	Тип ОПУ	Двухугломестное
3	Зона приёма	верхняя полусфера, начиная с 5°, без «мертвой зоны» в зенитной области
4	Рабочий диапазон частот, МГц: • X; • L	• 8025 ÷ 8400; • 1690-1710
5	Поляризация: • X диапазон; • L диапазон	• Правая и левая круговая; • Правая круговая
6	Максимальная скорость приема, Мбит/сек	320
7	Погрешность целенавещения, град	±0,1°
8	Шумовая температура антенны на УМ 5°, К: • X; • L	• 109; • 75
9	Шумовая температура антенны на УМ 90°, К: • X; • L	• 80,8; • 40
10	Автоматическое проведение сеанса работы с КА типа «Ресурс –ДК», Terra, Aqua, NOAA	да
11	Ветровая нагрузка(РПУ), м/с	до 50

В процессе пуско-наладочных работ, автономных и комплексных испытаний, был осуществлен прием информации ДЗЗ с российских КА: «Ресурс-ДК № 1», «Метеор-М» № 1, а также с зарубежных КА – TERRA, AQUA, NOAA. Управление приёмным комплексом осуществлялось как из зала приема на объекте «Пасека», так и из НЦ ОМЗ в режиме удаленного доступа, что способствовало более продуктивной работе.



**Рис. 2. Зал приёма и регистрации на объекте «Пасека» в г. Железногорске**



**Рис. 3. Зал приёма и регистрации НЦ ОМЗ «ОАО «Российские космические системы»**

Согласно Решению Федерального космического агентства, с марта 2012 комплекс находится в эксплуатационном режиме и проводятся сеансы приёма космической информации с КА «Метеор-М» № 1, «Ресурс-ДК» № 1 и КА «Ресурс-П», Канопус-В. Управление приёмным комплексом ПК-3,6 осуществляется операторами из зала приёма и регистрации (рис. 3) НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы», Отрадное.

Эксплуатация приёмного комплекса ПК-3.6 проводится совместно с ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва.

Развитие сети наземных комплексов приема и обработки информации, расположенных в региональных центрах, позволит обеспечить ситуационные центры принятия решений различных органов управления, в оперативном режиме, актуальной и востребованной информацией.

Бесценный опыт, полученный при проектировании комплекса, его производстве, планировании и организации монтажных и пусконаладочных работ, в будущем, позволит значительно сократить материальные и временные издержки на развертывание комплекса, что в свою очередь позволит региональным центрам получать так необходимые им данные в максимально короткие сроки.

**УДК 528.88, 004.45**

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ МОНИТОРИНГА РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДЗЗ (НА ПРИМЕРЕ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)**

А. В. Вицентий, Т. А. Порядин, М. Г. Шишаев

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

e-mail: [alx\\_2003@mail.ru](mailto:alx_2003@mail.ru), [modernguilt@mail.ru](mailto:modernguilt@mail.ru), [shishaev@iimm.ru](mailto:shishaev@iimm.ru)

В работе рассматривается разработка технических средств для реализации системы информационной поддержки радиационного мониторинга региона. Техническая платформа представляет собой веб-ресурс, предоставляющий пользователю картографический интерфейс и возможность использования данных ДЗЗ в рамках разрабатываемых инструментов визуального анализа.

*Ключевые слова:* радиологический мониторинг, ДЗЗ, визуальный анализ, веб-ресурс.

Мониторинг радиологической обстановки является важной частью экологического мониторинга региона, включающего учет и нормирование негативных воздействий различного рода на окружающую среду, а также контроль источников этих воздействий. Созданная в Российской Федерации единая система государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды) включает в себя 15 различных подсистем, среди которых присутствует и подсистема государственного мониторинга радиационной обстановки на территории РФ [1]. Основы экологической политики России закреплены в ряде нормативно-правовых актов, устанавливающих, что экологический мониторинг осуществляется посредством создания и обеспечения функционирования наблюдательных сетей и информационных ресурсов в рамках подсистем единой системы государственного экологического мониторинга, а также создания и эксплуатации государственного фонда данных. Однако проблема состоит в том, что эти сети и ресурсы плохо скоординированы между собой, что существенно затрудняет решение задач подготовки аналитических оценок, прогнозов и выработки управленческих решений на базе имеющихся данных [2]. Кроме того, при реализации системы информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки необходимо обязательно учитывать нормативно-правовые акты региона РФ, для которого разрабатывается такая система [3].

Относительно мониторинга радиологической обстановки в Мурманской области можно сказать, что эта задача является очень актуальной в настоящее время. Связано это, прежде всего с тем, что на сегодняшний день Мурманская область является одним из самых потенциально опасных регионов Российской Федерации с точки зрения ядерной и радиационной безопасности. Здесь находятся Кольская атомная электростанция, атомные ледоколы, военные подводные и надводные корабли с ядерными энергетическими установками, объекты временного хранения отработавшего ядерного топлива, большой пункт временного хранения реакторных отсеков, предприятия по обслуживанию и ремонту атомных судов и другие потенциально опасные объекты. Радиационную обстановку вокруг таких объектов контролируют разные ведомства. Например, за фоном вокруг Кольской атомной электростанции наблюдают как специалисты самой станции, так и Межрегиональное управление № 118 Федерального медико-биологического агентства России [4].

Система контроля радиационной обстановки на объектах использования атомной энергии является неотъемлемой частью производственной инфраструктуры, как на гражданских, так и на военных предприятиях. А разработка систем, методов и средств непрерывного мониторинга радиационной обстановки и доступность данных - это требование времени и необходимость [5]. Важную роль в эффективности функционирования таких систем играет применение современных информационных технологий и использование новых источников данных, примером которых могут быть данные, полученные с помощью дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Актуальность разработки современных систем информационной поддержки радиологического мониторинга, с учетом принципиально новых возможностей на основе спутниковых данных обусловлена потребностью специалистов различных предметных областей в получении оперативной информации о природных и социально-экономических объектах и явлениях с целью анализа причин возникновения и прогнозирования их развития, а также широким внедрением информационных продуктов, полученных на основе данных ДЗЗ и компьютерных методов картографирования и динамического моделирования, позволяющих более адекватно отражать сложные биосоциальноэкономические системы.

Для эффективного использования в практической деятельности, разрабатываемые средства визуального анализа космических снимков (КС) должны быть ориентированы на специалиста в конкретной предметной области. В данной работе в качестве предметной области выбран мониторинг радиологической обстановки по пяти видам измерений: почва, вода, аэрозоли, осадки и пища. Данные измерений заносятся и хранятся в соответствующих базах данных и визуализируются средствами разработанного веб-приложения. Для анализа результатов радиологического мониторинга специалист через веб-интерфейс получает возможность выбрать на интерактивной карте необходимые точки, в которых происходили измерения, и обозначить тот период времени, данные за который его интересуют. Эта информация визуализируется в виде графиков, отображающих значения измерений за выбранный период. Анализируя экстремумы графиков, специалист определяет координаты области на карте, космические снимки которой он хотел бы проанализировать дополнительно, а также примерные даты получения снимков и прочие характеристики.

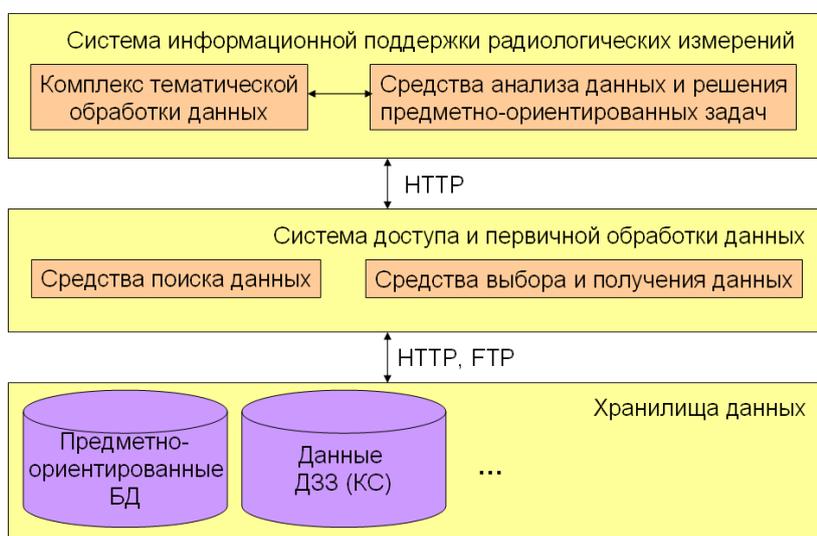
Первичная навигация для выбора необходимых точек забора проб происходит с использованием технологии OpenStreetMap [6]. В качестве основного источника данных ДЗЗ для средств визуального анализа был выбран архив снимков космического аппарата Landsat [7], однако архитектура приложения предполагает возможность подключения и других источников КС исследуемых территорий.

На основе визуального анализа полученных данных дистанционного зондирования, специалист радиологического контроля может сделать предположение о причинах появления экстремума и спрогнозировать дальнейшие изменения показателя.

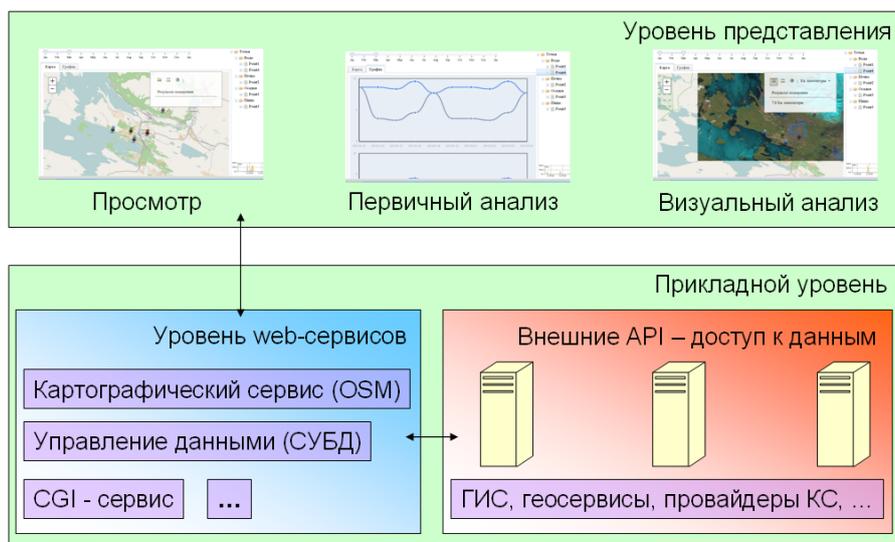
В процессе практической реализации система информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки была разделена на три логических блока (рис. 1), взаимодействие которых организовано посредством протоколов HTTP и FTP.

Комплекс тематической обработки данных и средства анализа данных и решения предметно-ориентированных задач предоставляются специалисту в виде готовых web-сервисов, имеющих интуитивно понятный интерфейс, что обеспечивает более эффективное использование этих средств. Реализация блоков, отвечающих за доступ и первичную обработку данных, а также физическая организация хранения данных скрыты от конечного пользователя.

Архитектурно разрабатываемая система может быть представлена двумя уровнями – уровнем представления, обеспечивающем интерфейс пользователя и прикладным уровнем, реализующим вычислительные сервисы (рис. 2).



**Рис. 1. Основные блоки системы информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки**

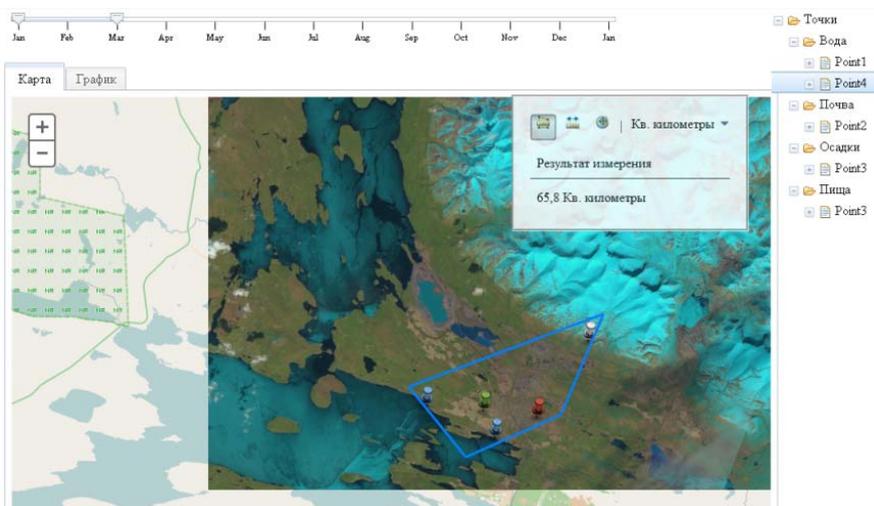


**Рис. 2. Архитектура системы информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки**

Пример интерфейса, отображающего наложение спутникового снимка космического аппарата Landsat 8 представлен на рис. 3. Однако архитектура

приложения предоставляет возможность подключения и других источников космических снимков исследуемых территорий.

Важным отличием разрабатываемого средства визуального анализа от подобных систем является то, что в его структуру заложены функции, направленные на учет особенностей восприятия визуальной информации различными группами пользователей. Предпосылки включения в продукт таких функций связаны с современным пониманием того, что процесс визуального поиска природных объектов и объектов антропогенного происхождения в базах данных и каталогах космических изображений не может игнорировать законы зрительного восприятия. Это значит, что при оценке визуального сходства/несходства объектов должны использоваться принципы функционирования зрительной системы [8]. Таким образом, для повышения эффективности работы пользователя необходимо осуществлять дополнительную предварительную подготовку визуальной информации с учетом перцептивных стереотипов и образного или гештальт-восприятия. Для этих целей предлагается использовать специализированную онтологию пользовательского представления, описывающую визуальные картографические стереотипы для различных категорий пользователей, совместно с формализованными знаниями о предметной области, также выраженными посредством онтологии [9].



**Рис. 3. Пример интерфейса пользователя**

Таким образом, разрабатываемая авторами система информационной поддержки радиологических измерений позволяет специалисту радиологического контроля на основе визуального анализа полученных данных дистанционного зондирования, сделать предположение о причинах повышения уровня радиации и спрогнозировать дальнейшие изменения.

### **Список литературы**

1. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 12.03.2014) "Об охране окружающей среды" // Российская газета. № 6. 12.01.2002.
2. Сюткин В. М. Экологический мониторинг административного региона (концепция, методы, практика на примере Кировской области). Киров: ВГПУ, 1999. 232 с.
3. Информация и предложения Комитета промышленного развития экологии и природопользования Мурманской области // Интернет-конференция по теме «Проблемы регулирования земельных отношений в районах Крайнего Севера и

приравненных к ним местностях» (март - май 2011 года). Режим доступа: <http://www.severcom.ru/kit/abc/id315.html>

4. Межрегиональное управление № 118 Федерального медико-биологического агентства России. – Режим доступа: <http://www.ru118.ru/>

5. В Мурманске обсудили проблему мониторинга радиационной обстановки. – Режим доступа: [http://bellona.ru/articles\\_ru/articles\\_2012/1337334623.04](http://bellona.ru/articles_ru/articles_2012/1337334623.04)

6. Openstreetmap. – Режим доступа: <http://www.openstreetmap.org>

7. Landsat Science. – Режим доступа: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

8. Ковалевская Н.М. Запросы по содержанию – новый шаг в геоинтеллектуальной обработке космической информации / Н.М. Ковалевская, К.А. Боечко, Н.Н. Добрецов, А.Ю. Королюк // Геоматика. 2010. № 3. С. 61–66.

9. Шишаев М.Г. Проблема формирования эффективных картографических интерфейсов информационных систем для задач управления территориями / М.Г. Шишаев, Т.А. Порядин // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. 2013. Вып. 4. С. 69–76.

**УДК 551.51, 528.88**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ АЭРОЗОЛЬНОГО ИНДЕКСА, ВЫЗВАННЫХ КРУПНЫМИ ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ В СИБИРИ**

О. А. Томшин, В. С. Соловьев

ФГБУН «Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера»  
СО РАН

e-mail: [otomshin@ikfia.sbras.ru](mailto:otomshin@ikfia.sbras.ru)

По данным спутниковых наблюдений (ИСЗ EOS Terra, Aqua, Aura) проведены исследования вариаций пространственно-временного распределения аэрозольного индекса, вызванных лесными пожарами в 2012, 2013 гг. на территории азиатской части России.

*Ключевые слова: лесные пожары, аэрозоль, дистанционное зондирование.*

### **Введение**

Лесные пожары (ЛП) являются важным фактором, оказывающим значительное влияние на локальную и региональную экодинамику. Выбросы продуктов горения (смесь различных газов, аэрозольных и сажевых частиц), обусловленные ЛП, оказывают существенное влияние на физические и химические процессы в атмосфере [1, 2]. Помимо прямого поглощения/рассеивания солнечной радиации, аэрозольные частицы способны выступать в качестве ядер конденсации облачности, тем самым оказывая дополнительное влияние на тепловой баланс атмосферы.

Значительная часть ЛП в России приходится на малонаселенные обширные районы Сибири и Дальнего Востока, где основными причинами возникновения ЛП являются грозовая активность и человеческий фактор. Мощные конвективные потоки воздуха, развивающиеся над очагами крупномасштабных ЛП, способны выбрасывать продукты горения на большие высоты, где они могут разноситься ветрами на значительные расстояния. Исследованиям влияния крупномасштабных лесных пожаров на распределение атмосферных аэрозолей, состав атмосферы посвящены публикации [3–5].

В данной работе приведены результаты исследования воздействия крупных лесных пожаров на территории азиатской части России (2012, 2013 гг.) на распределение аэрозольного индекса (АИ).

### **Данные**

В работе использованы данные радиометра MODIS (ИСЗ Terra, Aqua) для детектирования очагов лесных пожаров и оценки площади гарей. Для исследования вариаций аэрозольного индекса использовались данные прибора OMI (ИСЗ Aura). Аэрозольный индекс отражает присутствие в атмосфере поглощающих ультрафиолетовое излучение аэрозолей. К таким аэрозолям относятся, например, пылевые и дымовые аэрозоли. Данные дистанционного зондирования (приборов MODIS и OMI) взяты из открытых ресурсов Центра космических полётов им. Р. Годдарда НАСА [6]. Карта ветров на уровне 850 мбар (~1,5 км) и отклонения значений атмосферного давления на уровне моря от многолетних ( $\Delta$ SLP) взяты из модели «NCEP-реанализ» [7]. Траектории переноса воздушных масс в нижней тропосфере строились по модели «HYSPLIT» [8].

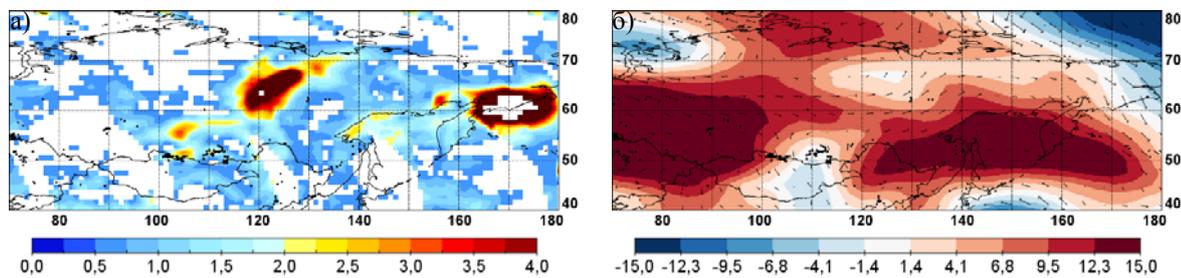
### **Обсуждение**

Основная часть очагов ЛП в 2012, 2013 гг. была зарегистрирована на территориях Западно-Сибирской равнины, Среднесибирского плоскогорья, Забайкальского края и Якутии. Повышенной пожароопасности лесов в рассматриваемые годы способствовали высокие значения температуры воздуха и низкая влажность, сохранявшиеся на протяжении всего пожароопасного сезона. Согласно данным спутниковых наблюдений, общая площадь, пройденная огнём в 2012, 2013 гг. на рассматриваемых территориях, оценивается в ~7 и ~3 млн. га, соответственно, что составляет около половины от общей выгоревшей площади на всей территории РФ за этот период.

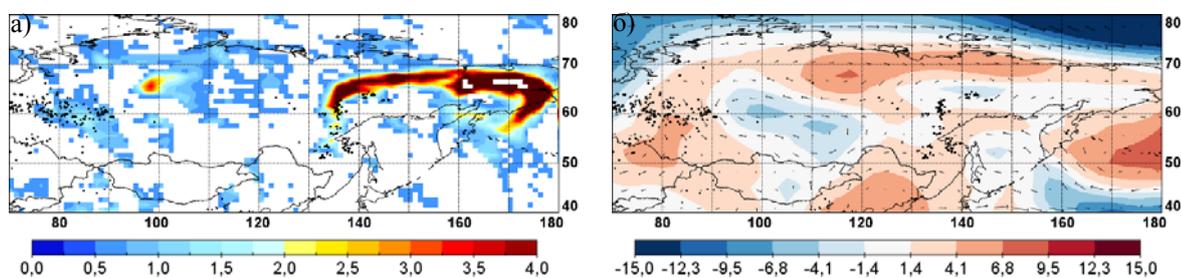
На рис. 1 представлены данные за 10 мая 2012 г.: а) – карта распределения среднесуточных значений аэрозольного индекса, б) – отклонения среднесуточных значений давления на уровне моря от среднестатистических многолетних показателей и ветра на уровне 850 мбар. В нижней части рисунка приведены цветовые шкалы значений АИ и  $\Delta$ SLP; черными точками отмечены очаги ЛП, векторами – поле ветров (диапазон скоростей ветра: 0–15 м/с); по горизонтали отложена долгота, по вертикали – широта. В распределении АИ наблюдаются два крупных аэрозольных «облака»: одно расположилось над Среднесибирским плоскогорьем, другое – над Корякским нагорьем. Как показал анализ модельных траекторий перемещения воздушных масс (траектории на рисунке не показаны), источником возмущений АИ оказались ЛП на территории Забайкальского края (5–9 мая 2012 г.). Очевидно, что сложившаяся конфигурация барических полей и ветров (рис. 1б) сформировали наблюдаемые крупные неоднородности АИ: первое облако АИ – результат аккумуляции в течение нескольких суток дымовых аэрозолей в области застоя (зона пониженного давления и слабых ветров), второе – сформировалось в результате отрыва аэрозольной массы, дрейфующей в восточном направлении, от основного шлейфа. Аэрозольные облака отчётливо прослеживались на значительном удалении от источников в течение нескольких дней после прекращения ЛП.

События 16 июля 2012 г. – лесные пожары на юге Якутии и крупные АИ-неоднородности показаны на рис. 2, а, справа (рис 2, б) представлены распределения  $\Delta$ SLP и поля ветров; обозначения аналогичны рис. 1. Повышенная пожарная активность в данном регионе наблюдалась с 7 по 17 июля 2012 г., при этом поток дымовых аэрозолей устойчиво выносился в северо-восточном направлении в течение всего времени ЛП. Максимальный перенос от очагов пожаров составил несколько

тысяч км, а время жизни аэрозольного облака около 4–5 дней после прекращения ЛП. Перенос дымовых аэрозолей восточнее ~180 град. в.д. в сторону американского материка был заблокирован зоной устойчивого высокого давления, установившейся над северной акваторией Тихого океана.

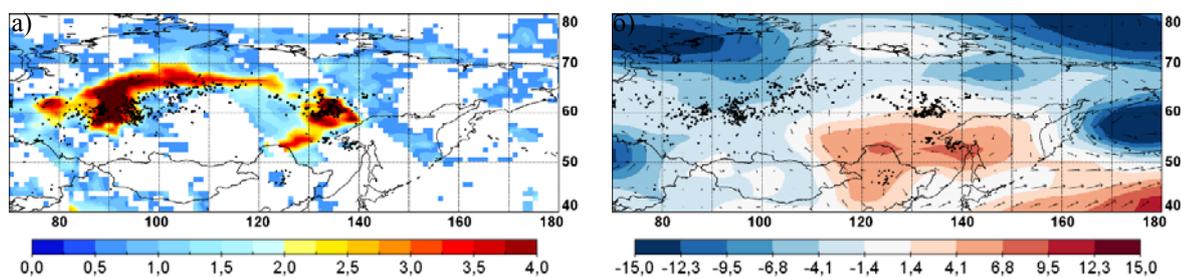


**Рис. 1. Распределение среднесуточных значений АИ (а), ΔSLP (б) и поля ветров на уровне 850 мбар 10.05.12**



**Рис. 2. Распределение среднесуточных значений АИ (а), ΔSLP (б) и поля ветров на уровне 850 мбар 16.07.12**

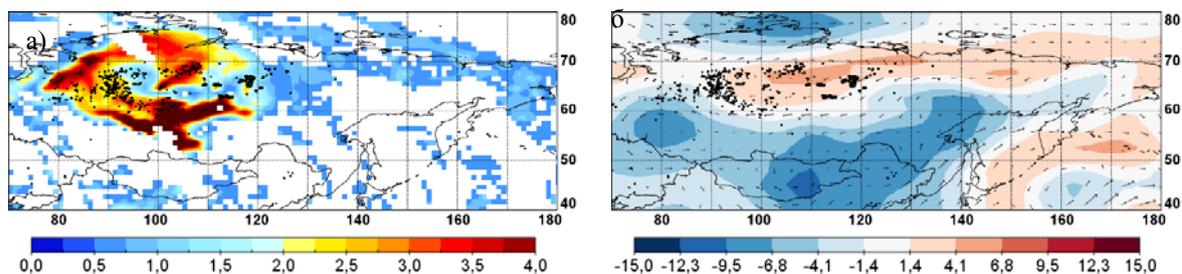
2012 г. отметился большим количеством очагов ЛП на Среднесибирском плоскогорье (с 17 июля по 5 августа) и на территории Якутии (с 26 июля по 5 августа). На рис. 3, а (обозначения аналогичны рис. 1, 2) показано распределение среднесуточных значений АИ на 31 июля 2012 г. Небольшие значения скоростей ветров и конфигурация барических полей сформировали представленное на рис. 3а распределение АИ от Западной Сибири до побережья Охотского моря.



**Рис. 3. Распределение среднесуточных значений АИ (а), ΔSLP (б) и поля ветров на уровне 850 мбар 05.08.13**

На рис. 4, а представлены карта распределения АИ на 5 августа 2013 г. Как и в предыдущем пожароопасном сезоне, большая часть лесных пожаров пришлась на территорию Среднесибирского плоскогорья. Повышенная лесопожарная активность в данном регионе наблюдалась с конца июля до середины августа. Установившийся над Восточной Сибирью антициклон препятствовал переносу дымовых аэрозолей на восток, способствуя их накоплению над Среднесибирским плоскогорьем. Высокие

значения АИ сохранялись в течение всего периода повышенной активности ЛП в регионе, на протяжении двух недель. В данном случае не наблюдался дальний перенос выбросов, большая часть аэрозольного загрязнения находилось вблизи очагов ЛП.



**Рис. 4. Распределение среднесуточных значений АИ (а),  $\Delta$ SLP (б) и поля ветров на уровне 850 мбар 05.08.13**

### Заключение

Как показал анализ лесопожарной обстановки и карт распределения аэрозольного индекса в 2012–2013 гг., основным фактором, определяющим пространственно-временные вариации аэрозольного индекса с апреля по октябрь в Сибири и на Дальнем Востоке, являются крупномасштабные лесные пожары.

При определённых метеорологических условиях (зоны пониженного давления, низкие значения скоростей ветра и т.п.), возможно образование крупных неоднородностей АИ с высокими значениями, которые могут существовать на протяжении от нескольких дней до недели после прекращения ЛП.

Поля аэрозольного загрязнения, образовавшиеся вследствие крупных лесных пожаров, могут переноситься на значительные расстояния от очагов пожаров. Так, в частности, аэрозольные облака, образовавшиеся вследствие ЛП (2012–2013 гг.) на территории юга Сибири и Забайкальского края переносились воздушными течениями через Тихий океан до Северной Америки, сохраняя при этом высокие значения АИ.

### Список литературы

1. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максютов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Доклады академии наук. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
2. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский химический журнал. 2008. Т. LI. № 5. С. 112–119.
3. Соловьев В.С., Будищев А.А. Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 7. С. 626–629.
4. Томшин О.А., Протопопов А.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 145–150.
5. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Королева Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А., Сухинин А.И., Афонин С.В., Белов В.В., Гришин А.М., Соловьев В.С. Спутниковый мониторинг лесов России // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 443–447.
6. Acker J.G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Transactions AGU. 2007. V. 88. № 2. P. 14–17.

7. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. № 77. P. 437–470.

8. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Australian Meteorological Magazine. 1998. V. 47. P. 295–308.

УДК 621-83 : 621.313.323: 528.8

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

С. А. Бронов, Н. А. Никулин, А. В. Марарескул, П. В. Авласко,  
В. А. Поваляев, Д. Д. Мищенко  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: [sapr@mail.ru](mailto:sapr@mail.ru)

Рассмотрены принципы функционирования и построения нового класса электромеханических систем на основе индукторных двигателей двойного питания, позволяющих повысить надёжность и качество регулирования сервисных блоков космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли.

*Ключевые слова:* космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, электромеханическая система, индукторный двигатель двойного питания.

### **Проблематика совершенствования систем космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли**

Все космические аппараты (КА) содержат электромеханические системы (ЭМС), обеспечивающие их нормальное функционирование в автоматическом режиме: системы поворота антенн, системы поворота солнечных батарей, системы позиционирования аппаратуры. К таким системам предъявляются особые требования по точности позиционирования, вращения с малыми скоростями, а также надёжности, так как стоит задача увеличения срока активного существования (САС) КА более 12 лет. В настоящее время для таких ЭМС используются, как правило, синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) или индукторные двигатели (ИД) называемые также синхронными двигателями с электромагнитной редукцией (СДЭР). Наиболее удачным решением является использование ИД, так как при этом можно существенно уменьшить размеры механического редуктора, что увеличивает точность, надёжность и САС КА. Ещё более перспективными являются ИД специальной конструкции, называемые индукторными двигателями двойного питания (ИДДП). Их использование может полностью исключить механический редуктор, обеспечить реализацию любых законов управления, существенно повысить точность и надёжность ЭМС. Но в настоящее время ещё недостаточно развиты способы управления ЭМС с ИДДП, которые существенно отличаются от способов управления обычными двигателями переменного тока.

### **Основные принципы функционирования ЭМС с ИДДП для КА**

Особенностью ИДДП является наличие двух многофазных обмоток на статоре, каждая из которых запитывается электрическим напряжением от собственного

источника. Обмотки включены таким образом, что угловая скорость оказывается равна разности частот питающих напряжений:

$$\omega_r = \frac{\omega_1 - \omega_2}{Z_r},$$

где  $\omega_r$  – угловая частота вала двигателя;  $\omega_1, \omega_2$  – угловые частоты первого и второго питающих напряжений;  $Z_r$  – коэффициент электромагнитной редукции.

Возможность выбора близких частот питающих напряжений позволяет легко обеспечивать сколь угодно малые скорости, вплоть до так называемого синхронного стояния, что очень полезно при реализации различных законов управления, но невозможно обеспечить в других двигателях. Коэффициент электромагнитной редукции (обычно равен 10...100) дополнительно уменьшает угловую скорость, а также увеличивает момент ИДДП. Всё это и позволяет избавиться от механического редуктора – одного из самых ненадёжных устройств КА.

В научно-учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования (НУЛ САПР) СФУ создана экспериментальная установка с двумя экземплярами ИДДП разной мощности для разработки и изучения ЭМС нового типа. Коллективом лаборатории разработаны новые способы управления, обеспечивающие разнообразные функциональные возможности ЭМС с ИДДП в соответствии с требованиями к соответствующим агрегатам КА. В настоящее время готовятся к защите несколько диссертаций, в которых рассматриваются различные аспекты проектирования таких ЭМС.

При создании ЭМС с любыми двигателями выделяют два вида организации ЭМС: способы управления и принципы построения системы управления. Способ управления представляет собой способ воздействия на двигатель с целью регулирования его скорости, угла поворота или момента. У каждого типа двигателей – свой набор возможных способов управления. Применительно к ИДДП выделяют следующие способы управления, характерные также для других двигателей переменного тока: амплитудный (меняются амплитуды питающих напряжений), частотный (меняются частоты питающих напряжений) и фазный (меняются текущие фазовые сдвиги питающих напряжений). Но, поскольку у ИДДП имеются две многофазные обмотки и два многофазных питающих напряжения, то возможно изменение параметров как любого одного напряжения, так и обоих напряжений одновременно. В последнем случае могут меняться как одинаковые параметры (например, частоты обоих напряжений), так и разные (например, частота одного напряжения и амплитуда другого). Таким образом, в обычных двигателях "одинарного" питания имеется 3 базовых способа управления (или 7 комбинаций при совместном изменении нескольких параметров: частота, амплитуда, фаза, частота-амплитуда, фаза-амплитуда, частота-фаза, частота-амплитуда-фаза). В двигателях "двойного" питания существует 6 базовых способов управления (частота, амплитуда, фаза двух питающих напряжений), а также большое число комбинаций с учётом разнообразного сочетания этих изменяемых параметров. Всё это, с одной стороны, делает ИДДП самым функциональным типом двигателей, позволяющим обеспечить любые необходимые режимы работы (по сравнению с обычными двигателями), а с другой стороны существенно затрудняет проектирование ЭМС на его основе ввиду большого разнообразия возможных вариантов технических решений. Но эти "затруднения", на самом деле, предоставляют проектировщику почти неограниченные возможности получения ЭМС любого требуемого типа – как существующих, так и пока не реализованных ввиду ограничений, имеющихся для обычных двигателей. Основная проблема в данном случае в недостаточной изученности всех возможностей нового класса ЭМС.

За рубежом в настоящее время разработки ЭМС с ИДДП не ведутся. Ведущие компании мира (например, Siemens, General Electric и др.) выпускают ИД "одинарного" питания и разрабатывают ЭМС на их основе. Поэтому ведущиеся в СФУ разработки нового класса ЭМС являются оригинальными.

### **Способы управления ИДДП для КА**

Все способы управления ИДДП можно классифицировать по различным критериям:

- 1) по физической сущности изменяемых параметров – частотное, амплитудное и фазное;
- 2) по сочетаемости изменяемых параметров – частотно-амплитудное, частотно-фазное, фазно-амплитудное, частотно-фазно-амплитудное;
- 3) с точки зрения раздельности управления по обмоткам – изменение параметров только одной обмотки или обеих обмоток одновременно;
- 4) по критерию направленности изменения – увеличение или уменьшение изменяемого параметра.

В двигателях "одинарного" питания способ управления однозначно связан с регулируемыми параметрами. Например, угловая скорость двигателя прямо пропорциональна частоте питающего напряжения. Поэтому, чтобы каждому значению требуемой скорости однозначно соответствовало значение частоты питающего напряжения. У двигателя двойного питания возможностей больше: одну и ту же скорость можно обеспечить 6 способами:

- 1) изменять частоту только первого питающего напряжения;
- 2) изменять частоту только второго питающего напряжения;
- 3) увеличивать обе частоты таким образом, чтобы их разность соответствовала требуемой скорости двигателя;
- 4) уменьшать обе частоты таким образом, чтобы их разность соответствовала требуемой скорости двигателя;
- 5) увеличивать частоту первого питающего напряжения и уменьшать частоту второго;
- 6) уменьшать частоту первого питающего напряжения и увеличивать частоту второго.

Также можно изменять амплитуды и фазовый сдвиги обоих питающих напряжений.

При "двойном" питании можно обеспечивать работу двигателя в шаговом режиме, т. е. поворачивать его вал на нужный угол. Обычные двигатели являются двигателями вращательного типа – при подаче на них напряжения они начинают вращаться. Чтобы обеспечить поворот на нужный угол (что характерно для аппаратуры КА), требуется установка специального датчика углового положения и сложная система управления. В ИДДП за счёт его конструкции можно отрабатывать нужные углы поворота более простыми способами – с помощью фазного управления. Но изменение фаз также возможно 6 способами – в зависимости от того, какие фазовые сдвиги меняются.

Для регулирования момента двигателя используется амплитудное управление – оно также может быть реализовано 6 способами.

Таким образом, формально возможно  $6 \times 6 \times 6 = 216$  способов управления. Применительно для каждого устройства можно выбрать несколько. При этом можно решать не только задачу обеспечения функционирования, но также задачу оптимизации – ввиду большого числа дополнительных возможностей одновременного влияния на другие параметры ЭМС: на коэффициент полезного действия, установленную мощность

источника питания и др. Все возможности управления ИДДП нуждается в изучении, чтобы разработчики имели возможность обоснованного выбора способов управления.

### **Принципы построения ЭМС с ИДДП для КА**

Под принципами построения ЭМС понимается её структура с учётом следующих факторов:

- регулируемых координат (системы позиционирования, следящие системы по углу или по скорости, системы стабилизации угла или скорости);
- основной и (возможно) дополнительных целей регулирования (обычно это минимизация – ошибки регулирования, потерь, времени регулирования, колебательности и т. п.);
- ограничений по элементной базе (допустимости или недопустимости датчиков, линейного или нелинейного закона регулирования и др.);
- выбранного способа управления ИДДП и, соответственно ему, источника электропитания;

В настоящее время рассматривается ряд способов управления и возможных для них принципов построения ЭМС, среди которых перспективными представляются способ квазишагового фазного управления, при котором отсутствует необходимость обратной связи по углу поворота, а также способ оптимального частотного управления при одновременном изменении обеих частот питающих напряжений с использованием датчиков обратной связи по углу поворота.

Для этих способов создан комплекс математических моделей ИДДП, включающий различные варианты алгебро-дифференциальных уравнений:

- полная нелинейная модель с системой дифференциальных уравнений в рамках классической теории электрических машин с небольшими модификациями;
- две упрощённые нелинейные модели с допущением о несущественных электромагнитных связях между обмотками;
- упрощённая нелинейная модель с допущением о пренебрежении электромагнитными процессами в обмотках из-за высоких частот обеих питающих напряжений;
- полная линеаризованная модель на основе линеаризации полной нелинейной модели;
- упрощённые линеаризованные модели с пренебрежением электромагнитными процессами в обмотках;
- передаточные функции для всех линеаризованных моделей.

Данный комплекс моделей позволяет исследовать процессы в ИДДП ЭМС на его основе методами моделирования, а также синтезировать в первом приближении законы управления для последующей их реализации в микропроцессорном регуляторе.

### **Заключение**

Разрабатываемые ЭМС с ИДДП могут использоваться в КА для дистанционного зондирования Земли. Для этого разрабатываются не только новые структуры ЭМС и способы управления ИДДП, но также математическое обеспечение для их автоматизированного проектирования. Реализованное в соответствующих модулях программ MathCAD и Matlab, оно трансформируется в методическое обеспечение. В настоящее время ведутся работы по увязке результатов проектирования ЭМС и конструкторского проектирования электродвигателя в различных программах: КОМПАС, SoliaWorks и др. Это упростит последующее внедрение разрабатываемого нового класса ЭМС на предприятиях космической отрасли.

## ПОСТРОЕНИЕ ПОЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ

А. А. Бучнев, В. П. Пяткин

ФГБУН «Институт вычислительной математики и математической геофизики  
СО РАН»

e-mail: [baa@ooi.sssc.ru](mailto:baa@ooi.sssc.ru), e-mail: [vpv@ooi.sssc.ru](mailto:vpv@ooi.sssc.ru)

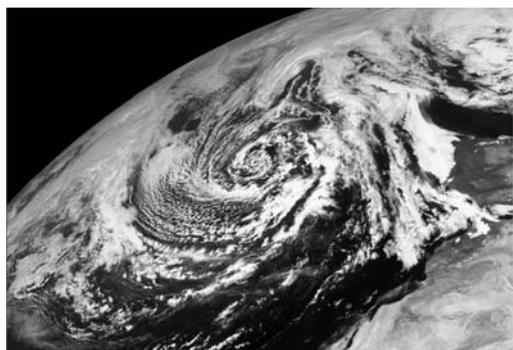
В статье рассматривается технология построения векторных полей пространственных перемещений природных объектов (ледяных полей, водных масс, облачных образований в атмосфере) по **разновременным многоспектральным спутниковым данным**. **Технология основана на** нахождении максимумов коэффициента взаимной корреляции между объектами двух соседних изображений в серии последовательных изображений.

*Ключевые слова.* Взаимная корреляция, эталон, векторное поле, серия разновременных изображений.

Определение пространственных перемещений природных объектов по разновременным спутниковым изображениям основано на нахождении максимумов коэффициента взаимной корреляции между объектами двух соседних изображений в серии последовательных изображений [1, 2]. В [3] аналогичный подход рассматривается в качестве метода распознавания образов, известного как корреляционное сопоставление. Для космических изображений вследствие во многом случайного характера представленных на космических снимках изображений интересующих нас природных объектов невозможно говорить о каком-либо предопределенном словаре образов. Такой словарь образов формируется динамически во время анализа серии изображений, и он является индивидуальным для каждого изображения. Построение словаря основано на подходах, изложенных в [4]. Элементы словаря, называемые объектами-эталоном или просто эталоном, представляют собой квадратную область исходного изображения заданного размера. Они отыскиваются в некоторой окрестности узлов квадратной сетки таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение управляющего параметра – дисперсии либо энтропии. Если при этом окажется, что достигнутое максимальное значение управляющего параметра превышает заданный порог, то соответствующая часть изображения объявляется эталоном. Другими словами, процедура построения объектов-эталон направлена на поиск квадратных областей с максимальной “изменчивостью”. Для таких областей высока вероятность того, что соответствующий объект не будет полностью разрушен при переходе к следующему изображению серии. Кроме того, снижается вероятность учета случайных корреляций для участков изображений с фоновыми распределениями пикселей изображений.

Следующим шагом в определении пространственных перемещений объектов является поиск позиций найденных эталон на следующем изображении. Смещение определяется для каждого из найденных эталон. Поиск новой позиции эталон производится внутри квадратной области, центр которой совпадает с исходной позицией эталон. Новой позицией эталон считается позиция, в которой достигается максимальное значение коэффициента взаимной корреляции. В процессе сканирования области поиска эталон может подвергаться преобразованиям масштабирования и поворота. Среди всех отобранных позиций могут быть отобраны позиции, удовлетворяющие пороговым условиям – минимально допустимое значение коэффициента корреляции и минимально допустимое смещение. Процесс может быть продолжен итеративно для следующих изображений серии: найденные области с

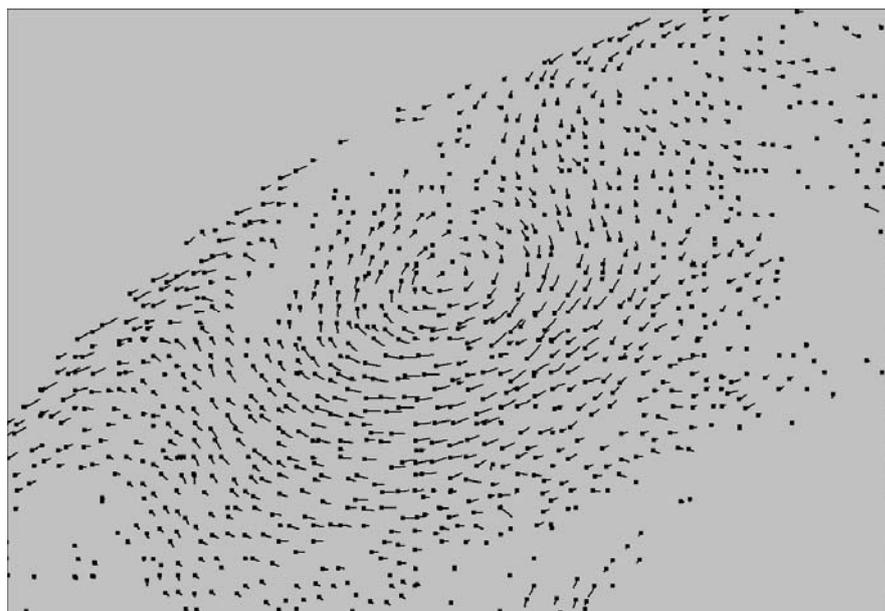
максимальным значением корреляции объявляются эталонами, к ним могут быть добавлены эталоны, полученные с помощью описанной ранее процедуры поиска эталонов, для нового набора эталонов находятся их позиции на следующем изображении и так далее. Описанная процедура построения полей перемещений природных объектов практически без изменений используется для анализа перемещений облачных образований на основе серии последовательных изображений, полученных с геостационарных спутников. Эти изображения получают со сравнительно небольшим временным интервалом, вследствие чего можно ожидать высокой корреляции между соседними изображениями.



a)



b)



c)

### Рисунок

Единственное дополнение – редактирование векторных полей, которое заключается в удалении явно ошибочных векторов (такая ситуация является следствием того, что облака на разных высотах могут иметь разные направления перемещений).

Приведенный рисунок демонстрирует фрагмент полученного векторного поля перемещения облачных образований в атмосфере. Демонстрируется процесс перемещения вихря. Векторное поле построено по пяти последовательным изображениям с ИСЗ МЕТЕОСАТ-8. Приведен первый кадр последовательности изображений (a), последний кадр (b) и соответствующее векторное поле (c).

Однако для водных масс и ледяных полей изображения в серии расположены по времени далеко друг от друга (в частности, изображения ледяных полей являются результатом объединения (построения мозаик) радиолокационных изображений, полученных в течение суток). По этой причине, во избежание получения явно ошибочных корреляций, необходимо в максимально возможной степени ужесточать требования как к построению эталонов, так и к уровню корреляции. В результате полученного количества векторов смещений не хватает для построения векторного поля, характеризующего динамику процесса. В связи с этим для этих природных объектов предложено и реализовано следующее дополнение к технологии построения векторных полей перемещений. На основе позиций найденных эталонов строится триангуляция Делоне, которая вместе с соответствующими координатами новых позиций эталонов на следующем изображении определяет семейство кусочно-аффинных преобразований плоскости. На исходном изображении строится квадратная сетка заданного размера, и к каждому узлу сетки, попадающему внутрь выпуклой оболочки позиций эталонов, применяется аффинное преобразование, определяемое треугольником, в котором находится этот узел. Программные технологии включают в себя функции получения статистических характеристик построенных векторных полей – распределение векторов по направлениям (с задаваемой дискретностью изменения угла) и распределение скоростей векторов.

Описанные программные технологии для определения пространственных перемещений природных объектов по разновременным многоспектральным космическим изображениям созданы в ходе выполнения совместных работ с Научно-исследовательским центром космической гидрометеорологии “Планета” РОСГИДРОМЕТА РФ (г. Москва) в рамках Федеральной целевой программы: “Федеральная космическая программа России на 2006–2015 годы”. Соответствующий программный комплекс внедрён в практику оперативной и научной работы центра. Комплекс активно используется в космическом мониторинге полярных регионов Земли (ледяные поля), Российского сектора Чёрного и Азовского морей (водные массы) и облачных образований в атмосфере.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-07-00068).

#### **Список литературы**

1. Asmus V.V., Buchnev A.A., Pyatkin V.P., Salov G.I. Software System for Satellite Data Processing of Applied Tasks in Remote Sensing of the Earth // Pattern Recognition and Image Analysis. 2009. Vol. 19. N 3. Pp. 372–379.
2. Бучнев А.А., Пяткин В.П. Мониторинг облачных образований по данным геостационарных спутников Земли // Автометрия. 2009. Т. 45. № 5. С. 40–47.
3. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ.; под ред. П.А. Чочиа. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
4. MSG Meteorological Products Extraction Facility. Algorithm Specification Document. Doc. No. EUM/MSG/SPE/022. Issue 2.6. 1 June 2004.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ MODIS

Д. А. Прокопов<sup>(1)</sup>, А. П. Жуков<sup>(2)</sup>, А. А. Лагутин<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»

<sup>(2)</sup>ККУ «УГОЧС и ПБ в Алтайском крае»

e-mail: [prokopov\\_dmitriy@mail.ru](mailto:prokopov_dmitriy@mail.ru), e-mail: [lagutin@theory.asu.ru](mailto:lagutin@theory.asu.ru), [zhukov@theory.asu.ru](mailto:zhukov@theory.asu.ru)

Представлены результаты разработки и верификации технологии построения ожидаемых коэффициентов яркости подстилающей поверхности по данным MODIS. Сделан вывод о возможности использования прогностических данных по коэффициентам спектральной яркости при выявлении пикселей, в которых произошли изменения свойств подстилающей поверхности.

*Ключевые слова:* Западная Сибирь, изменение свойств подстилающей поверхности, коэффициент спектральной яркости, двунаправленный коэффициент отражения, MODIS, Terra, Aqua.

### Введение

Обнаружение изменений свойств подстилающей поверхности (ПП), обусловленных техногенными и природными явлениями, носящими характер чрезвычайной ситуации, при оперативном мониторинге ПП возможно лишь при использовании данных, получаемых наземной станцией региона с космической платформы в режиме реального времени.

Установление зон территории, в которых произошли изменения, осуществляется путем сопоставления ожидаемых на момент съемки коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) поверхности с наблюдаемыми (см., например, [1]). Построение достоверных оценок ожидаемых КСЯ подстилающей поверхности для будущих известных условий съемки по данным предыдущих мониторинговых спутниковых наблюдений территории региона является ключевым элементом для данной задачи.

Целью данной работы является разработка и верификация технологии построения ожидаемых (прогностических) КСЯ подстилающей поверхности по данным спектрорадиометра MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) [2], установленного на платформах Terra [3] и Aqua [4], а так же обсуждение дальнейших шагов по созданию комплекса программ для оперативного обнаружения изменений в ПП.

### Модель двунаправленного коэффициента отражения

Период повторения орбит спутников Terra и Aqua составляет 16 дней. В каждый 16-дневный цикл некоторая зона ПП региона наблюдается MODIS при различных углах освещения и наблюдения. В силу этого, откорректированные на атмосферные эффекты данные MODIS [5] в каждом цикле наблюдений могут быть использованы для восстановления параметров модели двунаправленного коэффициента отражения (ДКО).

Процедура восстановления ДКО базируется на утверждении, что линейная комбинация индикатрисы оптико-геометрической модели и расчетные данные в рамках теории переноса, дополняющие друг друга при описании прохождения квантов солнечного излучения через однородные и неоднородные растительные покровы, позволяют удовлетворительно моделировать ДКО подстилающей поверхности (см. обсуждение этого вопроса в [6, 7]).

В данной работе использовалась модель ДКО операционного алгоритма MODIS [8]. В этой модели ДКО подстилающей поверхности для канала MODIS представляется в виде (1)

$$R_s(\lambda, \theta, \nu, \varphi) = f_1(\lambda)K_{\text{всв}} + f_2(\lambda)K_{\text{тп}}(\theta, \nu, \varphi) + f_3(\lambda)K_{\text{гео}}(\theta); \quad (1)$$

Коэффициенты разложения являются параметрами, которые необходимо определить по результатам спутниковых наблюдений.

### Прогнозирование коэффициентов спектральной яркости по данным MODIS

Вычислительные эксперименты по прогнозированию КСЯ проведены с использованием разработанного программного комплекса. Он позволяет получать КСЯ по модели ДКО на синусоидальной сетке MODIS [9, 10] с пространственным разрешением 0.5, 1 и 5.6 км.

Для верификации разработанного программного комплекса были проведены сравнения результатов его работы с данными MODIS, представленными на сайте [11]. Расчеты проведены для надирного варианта наблюдения на сетке 5.6 км. В итоге, модельные значения КСЯ ( ) практически совпали с измеренными ( ): в семи

спектральных каналах абсолютное значение различий не превышает 0.0001.

Понятно, что в случае отсутствия изменений свойств ПП в рассматриваемом пикселе региона отличие КСЯ, восстановленных по модели ДКО, от измеренных не должно превышать суммарную погрешность модели и MODIS. Для того, чтобы провести процедуру сравнения корректно, из обработки исключаются облачные, теневые и другие пиксели, которые могли бы внести погрешность в результаты сравнения.

Возможность использования восстановленных за 16-дневный период КСЯ для прогнозирования КСЯ следующего 17-го дня проверялась в экспериментах с использованием измерений MODIS 2010–2012 гг. Информация о некоторых экспериментах и полученных в них среднеквадратичных отклонениях для  $R_{\text{мод}}$  –

представлены в таблице.

**Таблица**  
**Среднеквадратичные отклонения разностей прогностических и измеренных КСЯ**

Даты восстановления	с 24.05.12 по 08.06.12	с 12.07.10 по 27.07.10	с 15.04.10 по 30.04.10	с 20.07.11 по 04.08.11	с 18.06.11 по 03.07.11	с 18.06.11 по 03.07.11
Дата наблюдения	09.06.12	28.07.10	01.05.10	05.08.11	04.07.11	04.07.11
Платформа/ Прибор	Terra/ MODIS	Terra/ MODIS	Terra/ MODIS	Terra/ MODIS	Aqua/ MODIS	Terra/ MODIS
Тайл	h23v03	h23v03	h23v03	h22v03	h23v03	h23v03
Канал 1	0.010	0.016	0.048	0.028	0.012	0.012
Канал 2	0.022	0.029	0.040	0.035	0.024	0.024
Канал 3	0.009	0.016	0.052	0.024	0.010	0.012
Канал 4	0.010	0.016	0.050	0.027	0.011	0.012
Канал 5	0.034	0.030	0.049	0.067	0.068	0.022
Канал 6	0.020	0.022	0.029	0.039	—	0.019
Канал 7	0.016	0.017	0.025	0.034	0.018	0.014

Дальнейшие шаги в нашей работе предполагают выявление зависимости КСЯ от изменений на ПП в различных каналах MODIS. Будет произведен попиксельный анализ поврежденных участков ПП. Координаты изменений ПП планируется выявлять визуально на снимках высокого разрешения.

### **Заключение**

В данной статье представлены результаты разработки и верификации технологии построения ожидаемых КСЯ подстилающей поверхности по данным спектрорадиометра MODIS, установленного на платформах Terra и Aqua. Обсуждается алгоритм расчета прогностических КСЯ, основанный на использовании модели ДКО оперативного алгоритма MODIS. Так же оговариваются дальнейшие шаги по созданию комплекса программ для оперативного обнаружения изменений в ПП.

Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о возможности использования прогностических данных по КСЯ при выявлении пикселей, в которых произошли изменения свойств ПП.

### **Список литературы**

1. Roy D. P., Jin Y., Lewis P. E., Justice C. O. Prototyping a global algorithm for systematic fire affected area mapping using MODIS time series data // *Remote Sens. Environ.* 2005. Vol. 97. Pp. 137–162.
2. Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1989. Vol. 27, № 2. Pp. 145–153.
3. Kaufman Y. J., Herring D. D., Ranson K. J., Collatz G. J. Earth Observing System AMI mission to Earth // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998. Vol. 36, № 4. Pp. 1045–1055.
4. Parkinson C. L. Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. Vol. 41, № 2. Pp. 173–183.
5. Vermote E. F., Saleous N. S., Justice C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results // *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 35. Pp. 675–686.
6. Лагутин А. А., Никулин Ю. А., Шмаков И. А. и др. Восстановление характеристик подстилающей поверхности Сибирского региона по данным спектрорадиометра MODIS // *Вычислительные технологии.* 2006. Т. 11. С. 61–71.
7. Roujean J. -L., Leroy M., Deschamps P. Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. Pp. 455–468.
8. Schaaf C. B., Gao F., Strahler A. H. et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS // *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 83. Pp. 135–148.
9. National Aeronautics and Space Administration. MODIS Land [Electronic resource]. URL: [http://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND\\_grid.html](http://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html).
10. Wolfe R. E., Nishihama M., Fleiga A. J. et al. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science // *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 83. Pp. 31–49.
11. National Aeronautics and Space Administration. NASA's Earth Observing System Data and Information System [Electronic resource]. URL: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>.

## ГЕОПОРТАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕГИОНАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

А. А. Донцов, Н. В. Волков, А. А. Лагутин

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»

e-mail: [dontsov@theory.asu.ru](mailto:dontsov@theory.asu.ru), [volkov@theory.asu.ru](mailto:volkov@theory.asu.ru), [lagutin@theory.asu.ru](mailto:lagutin@theory.asu.ru)

Представлены результаты работы по созданию в отделе космического мониторинга АлтГУ геопортальной системы, сопряженной с данными дистанционного зондирования. Обсуждаются особенности архитектуры системы, последовательность обработки и визуализации спутниковых данных.

*Ключевые слова: геопортальные системы, системы дистанционного зондирования Земли, спутниковые приборы, ГИС.*

### **Введение**

Системы дистанционного зондирования Земли позволяют получать оперативную достоверную информацию о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности на значительных по площади территориях. Получаемые с помощью спутниковых приборов большие объемы данных в видимом, ИК- и СВЧ-диапазонах стимулируют разработку современных информационных систем для обработки, хранения и представления данных. Одним из основных этапов проектирования геопортальной системы является разработка технологии организации доступа к хранилищам данных. Эффективные алгоритмы каталогизации позволят привлечь широкий круг пользователей к решению задач оперативного регионального спутникового мониторинга.

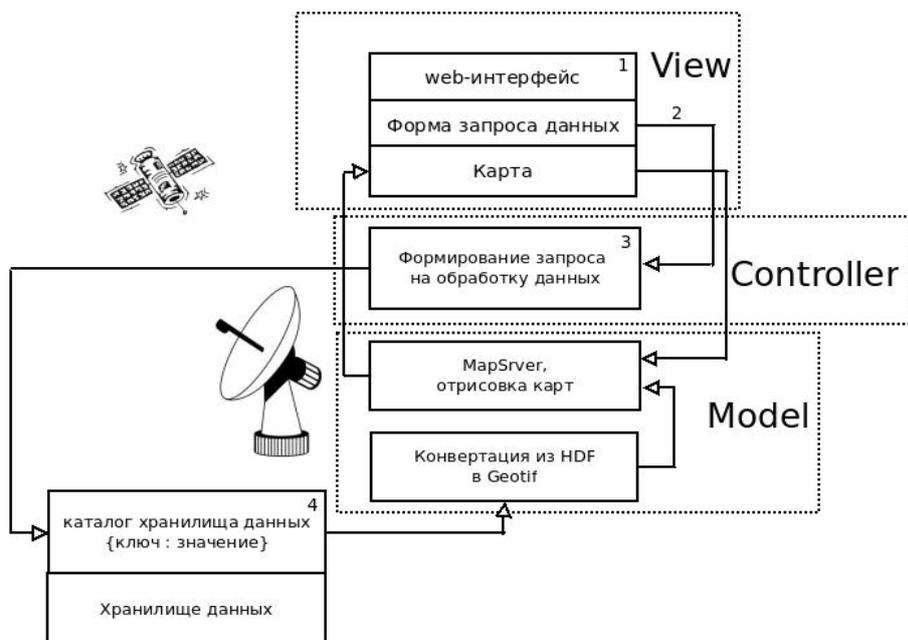
В работе представлены результаты разработки геопортальной системы регионального космического мониторинга, использующей данные, получаемые в режиме реального времени, с приборов MODIS/Terra, MODIS/Aqua, AIRS/AMSU-Aqua, VIIRS/NPP, а также восстановленные по ним геофизические продукты уровня 2 [1]. Предложена обобщенная модель построения хранилища данных большого объема, основанная на использовании не реляционного подхода разработки баз данных, с использованием NoSQL-технологии. Программные модули, реализующие парадигму NoSQL, разработаны и внедрены в действующую геопортальную систему [2,3].

### **Архитектура и принцип работы специализированной ГИС**

Информационной основой геопортальной системы является хранилище HDF-файлов [4] спутниковых данных отдела космического мониторинга АлтГУ. Для построения базовой части системы была выбрана схема проектирования MVC (Model-View-Controller). При этом было организовано разделение системы на модули работы с данными (Model), модули, реализующие пользовательский интерфейс (View), и модули организации логики взаимодействия пользовательского интерфейса с данными (Controller) (см. рисунок). Такой подход позволяет производить модификацию отдельных компонентов, минимально влияя на остальные [2, 3].

Работа геопортала происходит следующим образом. Пользователь, используя web-интерфейс, может посмотреть как готовые карты с данными по региону, так и, заполнив форму запроса данных, получить архивные данные по интересующей его территории. После заполнения пользователем формы запроса, где ему нужно указать с какого спутникового прибора, по какому региону и за какую дату ему нужны данные, формируется запрос, исходя из которого программа менеджер заданий создаёт задачу для обработки и представления информации [3]. Для облегчения доступа к результатам

спутниковых измерений, файлы по наиболее актуальным для определённого времени года данным обрабатываются заранее, и пользователь, минуя процесс запроса, может получить доступ к результатам измерений. Здесь нужно заметить, что пользователь может выбрать регион, который может только частично войти в область измерения спутникового прибора за один проход (в гранулу), другая запрашиваемая часть может войти в следующую или предыдущую гранулу, а также в гранулу другого спутника, имеющего аналогичную измерительную аппаратуру. Для решения задачи объединения гранул на основе библиотеки GDAL [5] разработана утилита для объединения данных из различных HDF-файлов с последующей их конвертацией в формат Geotiff [2].



**Рисунок. Блок-схема работы геопортальной системы**

При работе с хранилищем геопортальная система запрашивает данные у подсистемы каталогизации, которая реализована следующим образом. Для организации каталогов данных используется система управления базами данных MongoDB, реализующая не реляционную технологию построения баз данных NoSQL. В NoSQL базах, в отличие от реляционных, структура данных строго не регламентирована. В отдельной строке или документе можно добавить произвольное поле без предварительного изменения структуры всей таблицы. Таким образом, если возникает необходимость изменить поля записей в строке, которые описывают какие-либо характеристики файлов спутниковых данных, то достаточно отразить изменение в программном коде. Это позволяет записывать информацию о файлах, полученных с различных спутниковых сенсоров, имеющих разные поля описания, в одну таблицу каталога данных. В процессе инициализации каталога данных используется утилита `gdalinfo` библиотеки GDAL [5], которая позволяет получать подробную информацию о файлах географических данных. На основе этой утилиты с использованием средств языка программирования Python был разработан специальный модуль. Этот модуль на вход получает информацию о файловой системе хранилища спутниковых данных, в частности – таблицу путей к сохраненным файлам. Затем рекурсивно заносит полученную информацию в каталог базы данных. На этапе работы с СУБД MongoDB используется библиотека `PyMongo` языка Python. Коллекция полей, описывающих информацию о HDF-файлах, имеет структуру, подобную приведенной ниже:

```
{ "_id": id записи каталога БД,
  "product": продукт,
  "File": путь к файлу,
```

```
"GRINGPOINTLATITUDE" : широта,  
"GRINGPOINTLONGITUDE" : долгота,  
"RANGEBEGINNINGDATE" : "2012-12-05" }
```

В примере представлена лишь часть полей описания файлов в каталоге. Для хранения данных используется JSON/BSON-подобная схема данных по принципу «ключ-значение» [6]. У каждой коллекции полей описаний есть свой индивидуальный идентификатор — id, который можно устанавливать программно. По умолчанию, СУБД MongoDB генерирует их автоматически.

### **Тестирование системы**

Для проверки работоспособности системы был составлен каталог спутниковых данных, объём которых порядка 10 Тб. Затем, используя web-интерфейс геопортальной системы, были проведены запросы на обработку и визуализацию спутниковых данных. При проведении этих экспериментов были выбраны самые объёмные спутниковые продукты, например, такие как MOD09GA, MOD09 прибора MODIS, для того, чтобы оценить максимальную вычислительную нагрузку и время обработки запроса [2]. Анализ показал, что наиболее ресурсоёмкими процессами является объединение данных из HDF-файлов и конвертация в Geotiff. Эти процессы, в зависимости от запрашиваемого спутникового продукта и региона, занимали по времени от 2–3 секунд до 5 минут на компьютере с двухъядерным процессором тактовой частотой 2,1 ГГц.

### **Заключение**

В работе представлены результаты разработки геопортальной системы регионального космического мониторинга, сопряженной с каталогами данных дистанционного зондирования Земли, разработанных с использованием NoSQL технологии. Разрабатываемая система предназначена для решения широкого круга задач, связанных с оперативным региональным спутниковым мониторингом состояния атмосферы и подстилающей поверхности, с обработкой данных дистанционного зондирования и организацией доступа к результатам спутниковых измерений.

### **Список литературы**

17. Лагутин А. А., Никулин Ю. А., Жуков А. П. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Выч. технол. 2007. Т. 12. С. 67–89.
18. Волков Н. В., Донцов А. А., Лагутин А. А. Разработка геопортальной системы для решения задач регионального космического мониторинга // Известия АлтГУ. 2013. № 1/2 (77). С. 151–156.
19. Донцов А. А., Волков Н. В. Геопортальная система регионального космического мониторинга // Дистанционное зондирование Земли из космоса: алгоритмы, технологии, данные. Материалы молодежной школы-семинара / Под ред. А.А.Лагутина. Барнаул: Азбука, 2013. С. 90–98.
20. HDF — Hierarchical Data Format [Electronic resource]. URL: <http://www.hdfgroup.org>
21. GDAL — Geospatial Data Abstraction Library [Electronic resource]. URL: <http://www.gdal.org>
22. BSON [Electronic resource]. URL: <http://bsonspec.org>

## ГИС-ПРОЕКТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ТЕРРИТОРИИ ЮЖНО-МИНУСИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Е. В. Павлова<sup>(1)</sup>, М. Л. Махрова<sup>(2)</sup>, Г. Ю. Ямских<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>ФГБОУ ВПО «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова»

<sup>(2)</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт экономики, управления и природопользования

e-mail: [eve21@yandex.ru](mailto:eve21@yandex.ru), [marina-mahrova@mail.ru](mailto:marina-mahrova@mail.ru), [yamskikh@mail.ru](mailto:yamskikh@mail.ru)

На территории Южно-Минусинской котловины длительное время идет процесс антропогенного преобразования ландшафта, который требует долговременных наблюдений. В статье раскрыта проблема оперативного мониторинга на территории юга Сибири, и представлен ГИС-проект «Экологического каркаса Южно-Минусинской котловины», построенный с помощью программы ArcGIS 10.1. позволяющий постоянно обновлять и уточнять данные в процессе проектирования и использования.

*Ключевые слова:* Южно-Минусинская котловина, географические информационные системы, мониторинг, экологический каркас, крупноареальные элементы, линейные элементы, точечные элементы, буферные зоны, территории рекультивации и восстановления природы.

В настоящее время процесс антропогенного преобразования ландшафта, носит катастрофический характер. Для наблюдения за динамикой ландшафтов необходим оперативный мониторинг, который важно вести по снимкам среднего и высокого разрешения, получаемых с высокой периодичностью.

Информация о хозяйственной деятельности человека является пространственной, поэтому наиболее эффективным инструментом для организации, анализа и управления такой информацией являются географические информационные системы (ГИС).

Цель нашего исследования является формирование системы управления рационального природопользования для поддержания экологической стабильности на территории исследования по средствам создания гис-проекта «Экологический каркас Южно-Минусинской котловины».

Проектирование экологического каркаса предполагает определенные функции каждого элемента в его структуре, которому соответствует свой режим использования и его правовая форма. Оно должно производиться на основе всех необходимых знаний и достижений в областях сельского, водного, лесного хозяйства и других отраслей природопользования, управления территориями и системного анализа, различных сфер экологии [1].

Вопросами разработки концепции конструирования системы экологического каркаса в разное время занимались многие исследователи, что способствовало формированию большого количества близких по смыслу понятий, из которых можно выделить:

- «природный каркас» (Кавалаяускас П. (1985, 1998), Реймерс Н.Ф. (1990), Сохина Э.Н. (1991), Тишков А.А. (1995), Шестаков А.С. (1995), Шварц Е.А. (1998), Соболев Н.А. (1999)) включающий в себя, совокупностью экологически и функционально взаимосвязанных особо охраняемых природных территорий, способных обеспечить сохранение экологического баланса на конкретной территории;

- «экологический каркас» дополненный природно-антропогенными системами (Владимиров В.В. (1982), Кулешова М.Е. (1999), Елизаров А.В. (1999), Мирзеханова З.Р. (1998), Матис Э.Г. (1991), Алаев Э.Б. (1992), Рунова Т.Г. (1993), Преловский В.И. (1996), Чибилев А.А. (1994), Лысенкова З.В. (1998), Зархина Е.С., Сохина Э.Н. (1989), Сафиуллин Р.Г. (2010)).

В нашей работе под экологическим каркасом мы понимаем совокупность экосистем с индивидуальным режимом природопользования для каждого участка территории, образующих пространственно-организованную инфраструктуру, которая поддерживает экологическую стабильность территории, предотвращая потерю биоразнообразия и деградацию ландшафта [2].

Наиболее интенсивное преобразование природных комплексов и ландшафтов Южно-Минусинской котловины происходит в результате сельскохозяйственной деятельности (начиная с VII до н.э.). Интенсивный выпас скота, выжигание степей под пашню, конструирование ирригационных систем, вырубка лесов – активизировали эрозионные процессы и существенно сократили биоразнообразие долинных природных комплексов. С середины 20 века аграрная отраслевая структура хозяйства изменилась на индустриально-аграрную. Формирование Саянского территориального природного комплекса приводит к: активному освоению минеральных (уголь, железная руда), лесных, водных и других ресурсов территории; притоку населения и развитию добывающей (угольная, горно-рудная) и обрабатывающей (лесная, машиностроение, пищевая и другие) промышленности. Строительство промышленных объектов и рост населенных пунктов сопровождается сокращением сельскохозяйственных угодий, распространению антропогенных и техногенных ландшафтов [3].

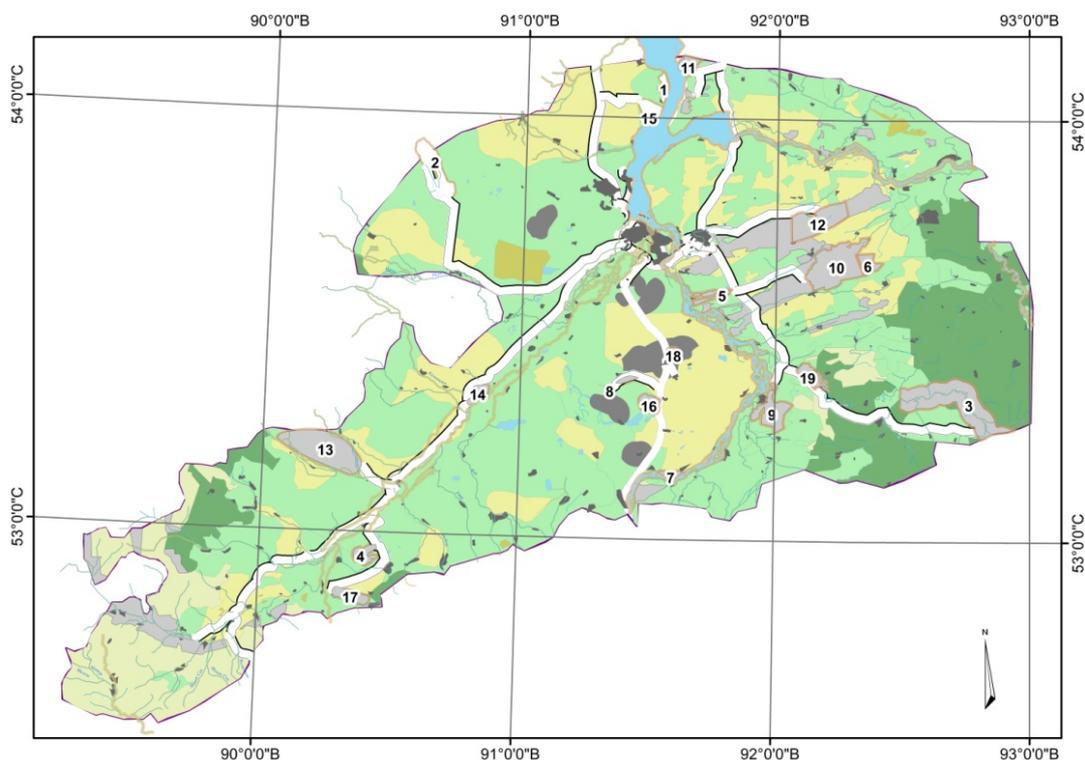
Территорию Южно-Минусинской котловины покрывают спутники: SPOT-5 (Франция), Terra и Landsat (США), IRS (Индия), WorldView-2 (США), GeoEye-1 (США) EROS B (Израиль) и другие, с различным разрешением от 0,5 м и выше. К сожалению, приема, обработки и хранения этих данных на территории исследования не осуществляется. Приобретение дорогостоящих спутниковых снимков через интернет ресурсы затрудняют мониторинговые исследования, для которых они необходимы.

Гис-проект выполнялся на базе платформы ArcGis 10.1 компании ESRI, при построении векторной карты Южно-Минусинской котловины основой послужили растровые общегеографические карты масштаба 1:200000 (1980 г.), и базовые карты облачной инфраструктуры ArcGIS Online, мелкомасштабные проектные планы, крупномасштабные схемы территориального развития районов, картосхемы памятников природы и заказников расположенных в границах Южно-Минусинской котловины, публичная кадастровая карта в виде карт местности масштабов от 1:1 000 000 до 1:100 000, а также полевые исследования. В проекте имеется более 20-ти традиционных векторных картографических слоев (населенные пункты, реки, автодороги, железные дороги и т. п.) и тематические векторные слои – крупноареальные элементы (ядра), линейные (транзитные территории), точечные, буферные территории и территории рекультивации и восстановления. В гис-проекте был выбран базовый масштаб 1:500000.

Ядра экологического каркаса выполняют средозащитно-санитарную роль и являются территориями с жестким режимом использования (федеральный заповедник), и территориям с регламентированным использованием (памятники природы и природные парки). Ядрами экологического каркаса являются два участка государственного природного заповедника «Хакасский» (Камызякская степь с озером Улугколь, Оглахты), четыре памятника природы регионального значения (Лугавский, Кривинский, Бондаревский, Очурский боры), один проектируемый памятник природы оз. Куринка, и другие (рисунок).

Связь между ядрами осуществляют наиболее сложные элементы каркаса – транзитные территории, к ним отнесены: 64 речные долины, один утвержденный и несколько спроектированных миграционных путей для болотно-луговой и водоплавающей дичи, водно-болотные и озерные комплексы, полезащитные лесные насаждения, водоохранные леса, система перелесков среди паши, ЛЭП и другие.

Защиту ядер и транзитных территорий от неблагоприятных внешних воздействий осуществляют буферные территории со щадящим или умеренным режимом природопользования. К буферным территориям относят санитарно-защитные зоны: озер, рек, водохранилища, особо охраняемых территорий и промышленных предприятий и земли лесного фонда [1].



**Условные обозначения:** □ - территории жесткого природопользования; □ - территории регламентированного природопользования, ▨ - буферные зоны, ▩ - защитные леса; территории щадящего природопользования; ▭ - сельскохозяйственные земли, ▭ - земли перспективного сельского хозяйства, ▭ - земли запаса, ▭ - леса расположенные в лесостепи, ▭ - эксплуатационные леса; ▭ - территории интенсивного природопользования; □ - транзитные территории; — реки, — озера.

**Рисунок. Экологический каркас территории Южно-Минусинской котловины, масштаб 1:500000:** 1 – Участок государственного природного заповедника (ГПЗ) «Хакасский» Оглахты, 2 – Участок ГПЗ Камызякская степь с оз. Улугколь, 3 – Заказник Кебежский, 4 – Памятник природы Бондоровский бор, 5 – Памятник природы Кривинский бор, 6 – Памятник природы Лугавский бор, 7 – Памятник природы Очурский бор, 8 – Памятник природы Смирновский бор, 9 – Шушенский Бор участок – 2, река Шушь; Планируемые: 10 – Заказник Лугавский бор, 11 – Заказник Краснотуранский бор, 12 – Заказник Минусинский, 13 – Национальный парк Казановка, 14 – Памятник природы Уйтаг; 15 – Древняя крепость г. Куня, 16 – Заказник Урочище трехозерки, 17 – Памятник природы Большой Монок, 18 – Памятник природы озеро Куринка, 19 – Природный заказник Ойское болото.

Точечные элементы каркаса, сохраняющие отдельные уникальные объекты природы представлены: гидрологическим (река Шушь (уч. № 1, 2), двумя ботаническими памятниками природы (Сныть реликтовая, Сосновый носок), планируемым государственным природным зоологическим заказником («Урочище Трехозерки») и

культурно-историческими объектами (курганы, каменные божества, крепости, писаница и другие).

К территориям рекультивации и восстановления Южно-Минусинской котловины нами отнесены многочисленные участки природных степных ландшафтов, которых практически не осталось вследствие массовых распашек. Одним из путей восстановления степных ландшафтов может быть перевод их в пастбища. Рекультивация территорий многочисленных карьеров будет способствовать рекреационному использованию и последующему включению их в природную систему [4].

Создание полноценного гис-проекта требует сбора огромного объема исходных данных в области архитектуры, кадастра, экономики, статистики, природных ресурсов, инженерной и транспортной инфраструктур и многих других. Программное обеспечение ArcGIS 10.1 позволяет собрать и обработать широкий сектор разносторонней информации. После сбора и обработки данные были распределены по блокам: социально-экономический, природно-экологический, инженерно-инфраструктурный, функционально-планировочный. Анализ полученной информации позволил выделить системы земель с четырьмя режимами природопользования: жестким, регламентированным, щадящим и интенсивным.

Созданный гис-проект выполнен в рамках гранта РФФИ № 12-05-98060 р\_сибири\_a и может быть использован органами управления муниципальных образований Республики Хакасия и юга Красноярского края для обеспечения рационального природопользования и сохранения ландшафтов. Внедрение гис-проекта «Экологический каркас территории Южно-Минусинской котловины» как экономического инструмента управления территориальной системы, будет способствовать сохранению связи между административными районами, в целях экологического равновесия.

#### **Список литературы**

1. Колбовский Е.Ю. Ландшафтное планирование : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 336 с.
2. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Изд-во «Мысль», 1990. 637 с.
3. Павлова Е.В., Махрова М.Л., Ямских Г.Ю. Долина реки Абакан: этапы антропогенеза и типы хозяйствования // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. 2012. № 2. С. 134–138.
4. Гриднев Д.З. Природно-экологический каркас территории – основа принятия градостроительных решений в составе документов территориального планирования муниципальных образований // Территория и планирование. 2011. № 1. С. 96–103.

## WEB-GIS APPLICATION FOR TEMPERATURE AND MOISTURE MONITORING OF THE ARCTIC TUNDRA SOILS BASED ON SMOS DATA

Z. Ruzicka<sup>(1)</sup>, K. V. Muzalevskiy<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

<sup>(2)</sup>Institute of Physics named after academician L. V. Kirenskiy,  
Krasnoyarsk Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
e-mail: [tramtara@seznam.cz](mailto:tramtara@seznam.cz), [rsdkm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdkm@ksc.krasn.ru)

This paper describes the development of our website which is part of the project whose results this paper explores also. The aim of the project is to create a web-GIS application, offering its users quick viewing, processing and spatial and time monitoring of the soil temperature and moisture data, obtained from the ESA's Level-1 Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) data product. Currently the website has limited functionality and will be further developed.

*Keywords: web-GIS, Arctic tundra soil, radiometer, SMOS, soil moisture, soil temperature.*

### Introduction

Recently, our group [1], [2], has developed methods to obtain temperature and moisture readings of Arctic tundra topsoil from the SMOS satellite's radiometric data. To date, the SMOS data have not been used by the scientific community to measure soil temperatures in the Arctic tundra, because the soil moisture readings were retrieved with substantial errors [2] for the tundra area. Due to the sparse network of the meteorological stations in the Arctic region, the creation of global soil moisture and temperature maps for the Arctic tundra is challenging. To this end, the development of a geographic information system that provides web publishing and data visualization on the internet began. The main objective of developing the web-GIS application is to monitor, analyze and build an interactive processing of spatial and temporal data for soil temperature and moisture in the Arctic tundra, obtained from the SMOS data and developed methods in [1], [2]. This article describes the structure of the web-GIS application and the technology used in its creation.

### SMOS Data and Formats

The SMOS mission has been designed to observe soil moisture with an accuracy of 4% over the Earth's landmasses. The SMOS mission is based on a sun-synchronous orbit (dusk-dawn 6 am/6 pm) with a mean altitude of 758 km and an inclination of 98.44°. SMOS has a 3-day sub-cycle. The SMOS carries the 2-D interferometric radiometer MIRAS (1.4 GHz), which measures brightness temperature at vertical and horizontal polarizations over the Earth's surface (average resolution is of 43 km by 43 km) in the range of viewing angles from 0° to 65°.

SMOS Level-1C (L1) full polarization brightness temperature product and Level-2 (L2) soil moisture data products have been used. Both L1 and L2 SMOS data products are distributed by two files – binary data block file (.dbl) and header file (.hdr). The description of binary data block file (.dbl) and header file (.hdr) is contained in the technical specifications [3].

### Web-GIS Site Architecture

The whole system is divided into two main parts. The first part deals with how the data is obtained and manages the storage process. The second part is the web application that interacts with the user and provides the requested data. For the area of interest, the L1 SMOS files occupied about 250 MB of hard-disk per day, while the L2 SMOS data occupied about 15 MB of a hard-disk per day. To get time series data of a particular point the approach of using binary files is not efficient as it is necessary to pass through all files. Binary files are not

designed to quickly look for the particular information we need. For this purpose, database management systems have been developed. If the database is well designed the information is received in tens of milliseconds. In our project an open source object-relational database management system PostgreSQL was chosen. As we work with information where the location of the point of interest is important, the PostgreSQL's extension PostGIS was chosen, too. PostGIS extends PostgreSQL to support spatial data. In using database and setting indices for the data we did not save hard-disk space, but we significantly sped up the access to data. On the basis of binary SMOS data file specifications [3], we have developed the SMOSDataExtractor program, which converts SMOS .dbl files into .csv format with a specific area of interest. These converted files can be then inserted using the standard PostgreSQL command COPY. Both L1 and L2 SMOS data are imported into the database following this approach. The diagram of how the SMOS data is stored in the database is shown on Fig. 1. The geometry of the SMOS points is stored in a separate table. The L1 SMOS records contain data on brightness temperatures, the incidence angles at which data was received, the polarization on which the data was received, pixel radiometric accuracy, the time-stamp of receiving and geographical information concerning the place this data relates to (grid point id and coordinates). The L2 SMOS records contain data retrieved from L1 such as soil moisture, optical thickness, dielectric constant, etc.

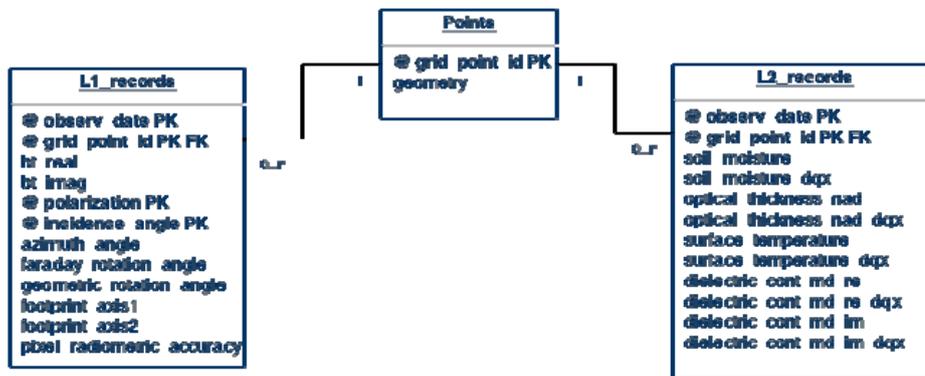
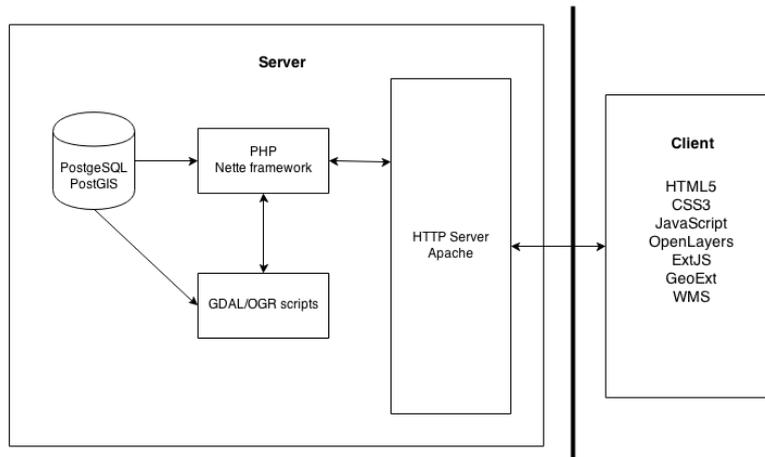


Figure 1. Diagram of SMOS Data Stored in Database

Data from meteorological stations was also added into the database. For that we used scripts written in MATLAB. This database has a similar structure to the L1/L2 SMOS database, as spatial information on the stations is stored in separate a table from the records.

As we want to offer the end-user an application which is independent of operating system and easy to reach, we have decided to set it up as a web application because web browsers are available on almost all computers with access to the internet. The web server architecture is shown in Fig. 2. The web application is served by the Apache HTTP Server. HTML pages are generated on the server side by PHP scripting language using PHP Nette Framework. According to a user query the PHP scripts get data from the PostgreSQL database. Data is transferred to the client in (Geo)JSON format. The GDAL/OGR library is used to interpolate point-data from the database into the interpolated grid and then to convert them into GeoJSON files which are transferred back to the client. On the client side standard technologies like HTML, CSS and JavaScript are used. Among these, special JavaScript libraries OpenLayers, ExtJS and GeoExt are used to handle the map on the web site.



**Figure 2. Application Architecture**



**Figure 3. Web Application Generated Soil Moisture Data**

The map part of the web application is shown on Fig. 3. The interactive map contains three layers – meteorological stations, L1, and L2 SMOS layers. To generate L1 SMOS layers we have to set the date, time, incidence angle and polarization that we are interested in. The closest record for a given date, time and polarization is found for every point and the final value of brightness temperature is interpolated. After generating the new L1 SMOS layers will appear on the map. The first layer presents the original L1 SMOS data as a point-data. The second layer is polygon generated by interpolation from values from the first layer. The application has the option to set a range of dates to generate time series data. On the bottom of the map, a slider will appear. Thanks to the slider we can easily change the date we are interested in. L2 SMOS layers are generated in a similar way. After we set the date and time, we can generate L2 SMOS layers with the soil moisture value. The generated layers are available to be downloaded in ShapeFile and GeoTIFF formats.

By clicking on the point, a pop-up window appears. In this window, we can get to the graph section. For L1 SMOS point-data, the graph shows a changing of brightness temperature, depending on the incidence angle (for the given day). For L2 SMOS point-data, the change in the soil moisture for the day is shown. Graphs can be exported in PNG image or

in text file (.csv format). For L1 SMOS data the brightness temperature depends on incidence angle is shown.

### **Conclusion**

In this paper we have described the structure of the web GIS application, that is designed for monitoring, analyzing and building interactive processing of spatial and temporal data of soil temperatures and moisture for the Arctic tundra. Currently the site has a limited functionality, but it will continue to be developed. Up to now, we have used a light-weight approach, where a final map is rendered in a web browser using JavaScript libraries. The approach when map server (such as GeoServer or Mapserver) is used will be considered. Using a map server with caching mechanisms like TileCache could decrease the rendering process and amount of data sent to the client. In the future the system should be easy to use, further developed and operating system independent.

Работа выполнена в рамках проекта Президиума РАН «Разработка научных основ космического мониторинга влажности и температуры в деятельном слое почвенного покрова арктической тундры».

### **References**

1. Muzalevskiy K.V., Mironov V.L. Measurement of the temperature profile of the active topsoil of the Arctic tundra based on MIRAS radiometer spacecraft SMOS // *Izvestiya vuz. Fizika*. 2013. Vol. 56. № 10/3. Pp. 88–90.
2. Muzalevskiy K.V., Mironov V.L. Measuring soil moisture in the melt of Arctic tundra topsoil using MIRAS radiometer of the SMOS // *Izvestiya vuz. Fizika*. 2013. Vol. 56. № 10/3. Pp. 85–87.
3. Product and Auxiliary Data Products Specifications: [on line]. site: [http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS\\_blog/wp-content/uploads/DOCS/SO-TN-IDR-GS-0005\\_L1\\_Spec\\_v5.7\\_2009-04-02.pdf](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/wp-content/uploads/DOCS/SO-TN-IDR-GS-0005_L1_Spec_v5.7_2009-04-02.pdf)

**УДК 528.85**

## **ТЕКСТУРА НА РАДАРНЫХ СНИМКАХ ДЗЗ: ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМКИ**

Н. В. Родионова

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал)

e-mail: [rnv@ire.rssi.ru](mailto:rnv@ire.rssi.ru)

Рассмотрено влияние параметров радарной съемки (поляризации и длины волны) и фильтрации спеклов на текстуру поверхности на радиолокационных изображениях (РЛИ). Вычислены статистики второго порядка (фрактальная размерность и текстурные признаки Харалика) объектов на РЛИ, полученных радаром SIR/C-X SAR, в зависимости от поляризации (VV, HH, HV и VH) и длины волны (С- и L- диапазоны) до и после фильтрации спеклов.

*Ключевые слова:* радиолокационное изображение, поляризация и длина волны, фильтрация спеклов, текстурные признаки, фрактальная размерность, однофакторный дисперсионный анализ

### **Введение**

Одним из важнейших источников пространственной количественной информации на изображении является текстура. Текстура – это локальная пространственная

структура на изображении или пространственное распределение тонов (уровней яркости в диапазоне от черного до белого) на изображении. Текстуриная информация используется при сегментации, классификации и интерпретации изображений, и с ростом пространственного разрешения данных ДЗЗ ее роль возрастает. Однако применение текстурной информации связано со значительными сложностями при попытке получить надежную интерпретацию изображений. На текстуру объектов на РЛИ влияют как внешние параметры съемки (радиометрическое и пространственное разрешение, спеклы, поляризация и длина волны радара), так и внутренние параметры алгоритмов вычисления, наиболее важным из которых является размер ядра текстуры, т. е. размер окна вычисления. Много работ посвящено рассмотрению этих вопросов [1–3 и др.]. Но ряд проблем требует дальнейшего изучения, в частности, вопрос о влиянии поляризации и длины волны сенсора на текстурные характеристики объектов на РЛИ.

В данной работе для формирования локальных характеристик текстуры были использованы ее статистические свойства, описываемые статистиками второго порядка Харалика [4], и свойства, описываемые методом на базе моделей фрактальной размерностью (ФР). Фрактальная размерность поверхности, являясь одним из измерений текстуры, служит мерой шероховатости.

В ряде работ приводятся данные о значениях ФР поверхности на РЛИ с разными поляризациями [5, 6]. Так в работе [6] сделан вывод о том, что ФР поверхностей на РЛИ с согласованной поляризацией (HH и VV) приблизительно равны и значительно отличаются от ФР тех же поверхностей на РЛИ с кросс поляризацией (HV и VH), которые в свою очередь показывают близкие результаты. Для текстурных признаков Харалика влияние поляризации, наряду с влиянием других внешних и внутренних параметров, рассмотрено в работе [3], где отмечено существенное влияние на значения ТП объектов на РЛИ фильтрации спеклов, значительно превосходящее влияние поляризации и длины волны (рассматривались два диапазона длин волн С- и L-).

Цель данной работы – вычислить значения текстурных признаков и фрактальную размерность некоторых природных объектов на РЛИ, используя данные РСА с полной поляризацией, и провести детальный анализ возможного влияния поляризации и длины волны на текстуру объектов на РЛИ с учетом влияния фильтрации спеклов.

### **Исходные данные**

В статье исходными являются SIR-C/X-SAR SLC (single look complex-однолучевые комплексные) данные матрицы рассеяния для района Московской области, полученные 1994/10/11, и данные для южной части озера Байкал, полученные 1994/10/09. Исходные данные представляют собой один файл для каждой сцены, соответственно, для длин волн L- и С-диапазонов. На каждый пиксел отводится 10 байт при 4-х каналах поляризации (HH, VV, VH, HV). В файле изменение по строкам соответствует изменению по азимуту, а каждая строка состоит из отсчетов по дальности. В данном формате (SLC) не вводился масштабный фактор. Распаковка данных осуществлялась на основании описания [7].

### **Влияние поляризации и длины волны на значение фрактальной размерности поверхности на РЛИ**

Анализ текстуры на базе фрактальной размерности (ФР) был введен в работе [8]. Большинство природных объектов имеют дробную ФР. Фрактальная размерность поверхности, являясь одним из измерений текстуры, служит мерой шероховатости, и интуитивно, чем больше ФР, тем более шероховатой является текстура поверхности.

В данной работе вычисление ФР поверхности на РЛИ осуществлялось с помощью свободно распространяемого пакета обработки изображений Fiji. Алгоритм назван “box counting”, полное описание его можно найти в [9]. Вычисление ФР поверхности

осуществлялось в окне [28\*28] пикселей по 20 точкам (окнам), где определялось среднее значение ФР для массива леса Лосиный остров на РЛИ Московской области и для водной поверхности на РЛИ озера Байкал, в случае двух длин волн и четырех поляризаций, до и после фильтрации спеклов.

Для проверки гипотезы о влиянии поляризации и длины волны на средние значения ФР природных объектов был проведен однофакторный дисперсионный анализ значений выборок, и вычислена вероятность случайности различий (Р – значение) с помощью программы – надстройки Excel “Пакет анализа”. Предварительно для всех выборок показано, что гипотеза о нормальности не отклоняется.

Вероятность случайности различий в средних значениях ФР определялась по 8 выборкам (4 поляризации и две длины волны) для каждого объекта на РЛИ до фильтрации и 8 выборкам после фильтрации спеклов, и результаты приведены в табл. 1, из которой следует статистически недостоверные различия в средних значениях выборок для ФР объектов ‘лес’ и ‘вода’ до фильтрации спеклов на РЛИ ( $p > 0.05$ ), и в то же время – статистически достоверные различия в средних значениях выборок в зависимости от поляризации для ФР после фильтрации спеклов ( $p < 0.05$ ).

**Таблица 1**

**Вероятность случайности различий  $p$  для значений фрактальной размерности объектов ‘лес’ и ‘вода’ на РЛИ**

Фрактальная размерность	Объект	лес	вода
Р – значение	до фильтрации спеклов	0.82	0.62
	после фильтрации спеклов	$6.1 \times 10^{-6}$	0.044

В табл. 2 приведены Р - значения для пар выборок значений ФР объектов ‘лес’ и ‘вода’ на фильтрованных РЛИ. Статистически достоверными различия средних значений пары выборок будут тогда, когда Р - значения равны 0.05 и меньше. Для пар выборок согласованных поляризаций VV-НН и кросс – поляризаций HV-VH подтверждается нулевая гипотеза о том, что наблюдаемые различия случайны. В то время, как для пар выборок VV-VH, VV-HV, НН-HV, НН-VH в С –диапазоне и НН-HV, НН-VH в L-диапазоне для объекта ‘лес’, и VV-HV в С-диапазоне для объекта ‘вода’ наблюдаются неслучайные различия в средних значениях между парами выборок.

**Таблица 2**

**Вероятность случайности различий  $p$  для пар выборок значений фрактальной размерности объектов ‘лес’ и ‘вода’ на РЛИ**

Объект	Длина волны	VV-НН	HV-VH	VV-VH	VV-HV	НН-HV	НН-VH
‘лес’	L	0.1	0.78	0.089	0.15	0.0027	0.0012
	C	0.84	0.57	0.001	0.0003	0.0006	0.0021
‘вода’	L	0.98	0.12	0.072	0.53	0.48	0.056
	C	0.21	0.055	0.46	0.02	0.16	0.53

Для средних значений фрактальной размерности природных объектов ‘лес’ и ‘вода’ не выявлено статистически достоверных различий, связанных с изменением длины волны радара.

**Влияние поляризации и длины волны на значения текстурных признаков поверхности на РЛИ**

Значения текстурных признаков (ТП) (контраст, обратный момент и энтропия) вычислялись в окне [28x28] пикселей по 20 точкам (окнам) для массива леса Лосиный остров, объекта ‘город’ на РЛИ Московской области, и для водной поверхности на РЛИ озера Байкал. Полученные значения для каждого объекта усреднялись, и строились

графики зависимости средних значений от поляризации (HH, VV, VH, HV) для двух длин волн (L- и C-диапазоны).

Результаты проведенного одномерного дисперсионного анализа для выборок значений текстурных признаков объектов 'город', 'лес' и 'вода' на РЛИ до фильтрации и после фильтрации спеклов показаны в табл. 3.

**Таблица 3**

**Вероятность случайности различий р значений текстурных признаков объектов 'город', 'вода' и 'лес' на РЛИ**

	Текстурный признак	контраст	обратный момент	энтропия
Р - значение ('город')	до фильтрации	$1,3 \times 10^{-12}$	$4,6 \times 10^{-17}$	0
	после фильтрации	$3,9 \times 10^{-17}$	$2,8 \times 10^{-6}$	0
Р - значение ('вода')	до фильтрации	$2,5 \times 10^{-11}$	$3,3 \times 10^{-10}$	$9,5 \times 10^{-17}$
	после фильтрации	0	0	0
Р - значение ('лес')	до фильтрации	0.22	0.09	0.27
	после фильтрации	0.16	0.3	0.086

Данные, приведенные в табл. 3, свидетельствует о статистически достоверных разностях в средних значениях выборок для значений ТП контраст, обратный момент и энтропия объектов 'город' и 'вода' в зависимости от поляризации волны как до, так и после фильтрации спеклов. Особняком выглядят результаты дисперсионного анализа для объекта 'лес', свидетельствующие о статистически недостоверных различиях в средних значениях выборок для текстурных признаков при изменении поляризации волны как до, так и после фильтрации спеклов. Возможно, это связано с деполяризацией сигнала на поверхностях, покрытых растительностью, из-за многократных переотражений падающего луча от листьев, стеблей, ветвей.

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что для объектов 'лес' и 'город' нет статистически достоверных различий в средних значениях статистик второго порядка Харалика при изменении длины волны радара. Исключением является комбинация пар выборок C\_VV-L\_VV для объекта 'город' после фильтрации спеклов, для которой показаны статистически достоверные разности в средних значениях ТП.

Для объекта 'вода' нулевая гипотеза подтверждена для пар выборок ТП с согласованными поляризациями C\_VV-L\_VV и C\_HH-L\_HH после фильтрации спеклов. В остальных случаях есть статистически достоверные различия в средних значениях ТП, вызванные изменением длины волны.

**Заключение**

Проведенный дисперсионный анализ выборок данных фрактальной размерности не выявил влияние поляризации на значения ФР природных объектов 'лес' и 'вода' до фильтрации спеклов на РЛИ, тогда как после фильтрации спеклов нулевая гипотеза была отвергнута, что свидетельствует о статистически достоверных разностях в средних значениях некоторых пар выборок для ФР объектов 'лес' и 'вода' в зависимости от поляризации. Для пар выборок согласованных поляризаций VV-HH и кросс – поляризаций HV-VH подтверждается нулевая гипотеза о том, что наблюдаемые различия случайны как до, так и после фильтрации спеклов. Подтверждена также нулевая гипотеза об отсутствии влияния длины волны радара на средние значения ФР объектов 'лес' и 'вода'. Для средних значений выборок ТП контраст, обратный момент и энтропия объектов 'город' и 'вода' выявлены статистически достоверные разности в зависимости от поляризации волны как до, так и после фильтрации спеклов, причем для пары согласованных поляризаций VV-HH и пары кросс – поляризаций HV-VH для объекта 'вода' и для пары поляризаций HV-VH – для объекта 'город' нет статистически достоверных различий в средних значениях. Для объекта 'город' не выявлено

статистически достоверных различий в средних значениях ТП при изменении длины волны, за исключением комбинации выборок C\_VV-L\_VV после фильтрации спеклов. Для объекта 'лес' результаты свидетельствуют о статистически недостоверных различиях в средних значениях выборок для текстурных признаков при изменении поляризации и длины волны как до, так и после фильтрации спеклов.

#### **Список литературы**

1. Ulaby F.T., Kouyate F, Brisco B, Lee Williams T.H. Textural information in SAR images // IEEE Trans. Geos. Rem. Sens. 1986. Vol. GE-24. № 2. P. 235–245.
2. Ferro, C.J., Warner T. A. Scale and Texture in Digital Image Classification // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2002. Vol.68. № 1. P. 51–63.
3. Родионова Н.В. Использование текстурной информации при интерпретации спутниковых снимков ДЗЗ // Материалы пятого Белорусского космического конгресса 25–27 окт. 2011 г., Минск. Т. 2. С. 12-16. Минск, ОИПИ НАН Беларуси.
4. Haralick, R. M., K. S. Shanmugam, I. Dinstein. Textural features for image classification // IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern. 1973. Vol. 3. № 6. P. 610–621.
5. Singh D., Pant T. Application of fractal dimension on PALSAR data // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly 2010.
6. Di Martino G., Iodice A., Riccio D., Ruello G., Zinno I. The effects of polarization on fractal dimension maps estimated from SAR data // Proc. of PolInSAR 2013. 28 January-1 February 2013. ESA-ESRIN. Frascati (IT). Program@Abstract Book. 147 p. P. 123–124.
7. Chapman B. SIR-C/AIRSAR data conversion guide // JPL, Cal. Inst. Techn., Pasadena, Ca., 1994.
8. Pentland A.P. Fractal based description of natural scenes // IEEE Trans. PAMI. 1984. 6. P. 661–674.
9. Smith T.G., Lange G.D. & Marks W.B. Fractal methods and results in Cellular Morphology // J. Neurosci. Methods. 1996. 69. P. 1123–1126.

**УДК 630.58.02, 528.8**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ВЫДЕЛОВ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ**

М. А. Корец

ФГБУН «Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН»

e-mail: [mik@ksc.krasn.ru](mailto:mik@ksc.krasn.ru)

Объектно-ориентированный метод сегментации был применен для контурного дешифрирования лесоустroительных выделов на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) и данных космической съемки RAPIDEYE. В качестве тестовых объектов для отработки методики были использованы территории заповедников «Кузнецкий Алатау» и «Саяно-Шушенский». Предложенный подход позволяет снизить трудозатраты и субъективизм таксатора, одновременно сохранив традиционные критерии контурного дешифрирования лесоинвентаризационных выделов.

*Ключевые слова:* лесоустroительный выдел, сегментация, ЦМР, RAPIDEYE.

## Введение

В соответствии с инструкцией проведения лесоустройства [1], лесотаксационный выдел является базовым элементом лесоустройства и определяется, как относительно однородный участок леса по породному составу и лесорастительным условиям, включая преобладающую крутизну и экспозицию склона [2, 3]. Традиционно картографирование выделов осуществлялось методом ручного контурного дешифрирования спектрально-аэрофотосъемки. Характеристики выдела присваивались инженером-таксатором по материалам полевых обследований. Очевидно, что такой ручной подход достаточно трудоемок и субъективен. Широкая доступность в последнее время космической съемки высокого пространственного и спектрального разрешений, цифровых моделей рельефа и программного обеспечения для их тематической обработки позволяет реализовать автоматизированную объектно-ориентированную методику контурного дешифрирования и тактирования выделов.

## Исходные данные

Разработка и тестирование предлагаемой методики осуществлялось в процессе работ, выполняемых по первому разряду лесоустройства [1] для территорий заповедников «Кузнецкий Алатау» и «Саяно-Шушенский», расположенных в горных районах Центральной и Южной Сибири. Обработка данных осуществлялась с использованием программных пакетов Trimble eCognition 8 [4] и ESRI ArcGIS 10 [5].

Для оценки однородности лесорастительных условий по топографическим характеристикам была использована растровая цифровая модель рельефа (ЦМР) местности ASTER GDEM2 [6] с пространственным разрешением 20 м в пикселе.

Картографирование лесотаксационных характеристик осуществлялось на основе мультиспектральной спутниковой съемки RAPIDEYE [7] с пространственным разрешением 5 м в пикселе. Спутниковые сцены для тестовых районов с датами съемки за август 2013 прошли стандартную для уровня 3A (5 спектральных каналов, Ortho Products) радиометрическую и геометрическую коррекцию, включая ортонормирование с точностью привязки до 10 м.

В качестве дополнительной информации использовались бумажные карты предыдущего лесоустройства с границами лесотаксационных выделов и кварталов, а также материалы полевых работ 2013 г.

## Методы и результаты

На основе используемой ЦМР были рассчитаны дополнительные растровые слои крутизны и экспозиции склонов ( $a^\circ$ ), а также двухслойное изображение (рис. 1а):  $\text{Sin}(a)$ ,  $\text{Cos}(a)$ , где  $a$  – величина угла экспозиции пикселя, измеряемая в градусах относительно направления на север. Изображение ( $\text{Sin}(a)$ ,  $\text{Cos}(a)$ ) было подвергнуто автоматической сегментации (Segmentation Multiresolution [4]) с параметром масштабной детализации, обеспечивающим средний размер однородного сегмента (выдела) около 4 га (рис. 1а). Вес текстурного критерия при сегментации в данном случае был минимальным. Аналогичным образом было сегментировано пятиканальное спутниковое изображение RAPIDEYE (рис. 1б) с использованием как спектральных, так и текстурных признаков с весами 0.7 и 0.3 соответственно. Результирующие полигональные слои относительно однородных выделов на основе ЦМР и RAPIDEYE были пересечены друг с другом, а также с кварталными полигонами, оцифрованными с планшетов прежнего лесоустройства. Полученные комбинированные выделы были автоматически сглажены (Smooth Polygon [5]) и генерализованы (Eliminate [5]), путем слияния мелких полигонов (менее 4 га) с использованием правила сохранения границ полигонов с приоритетом, возрастающим в следующем порядке: границы по спутниковой съемке, границы по ЦМР, границы квартальной сети.

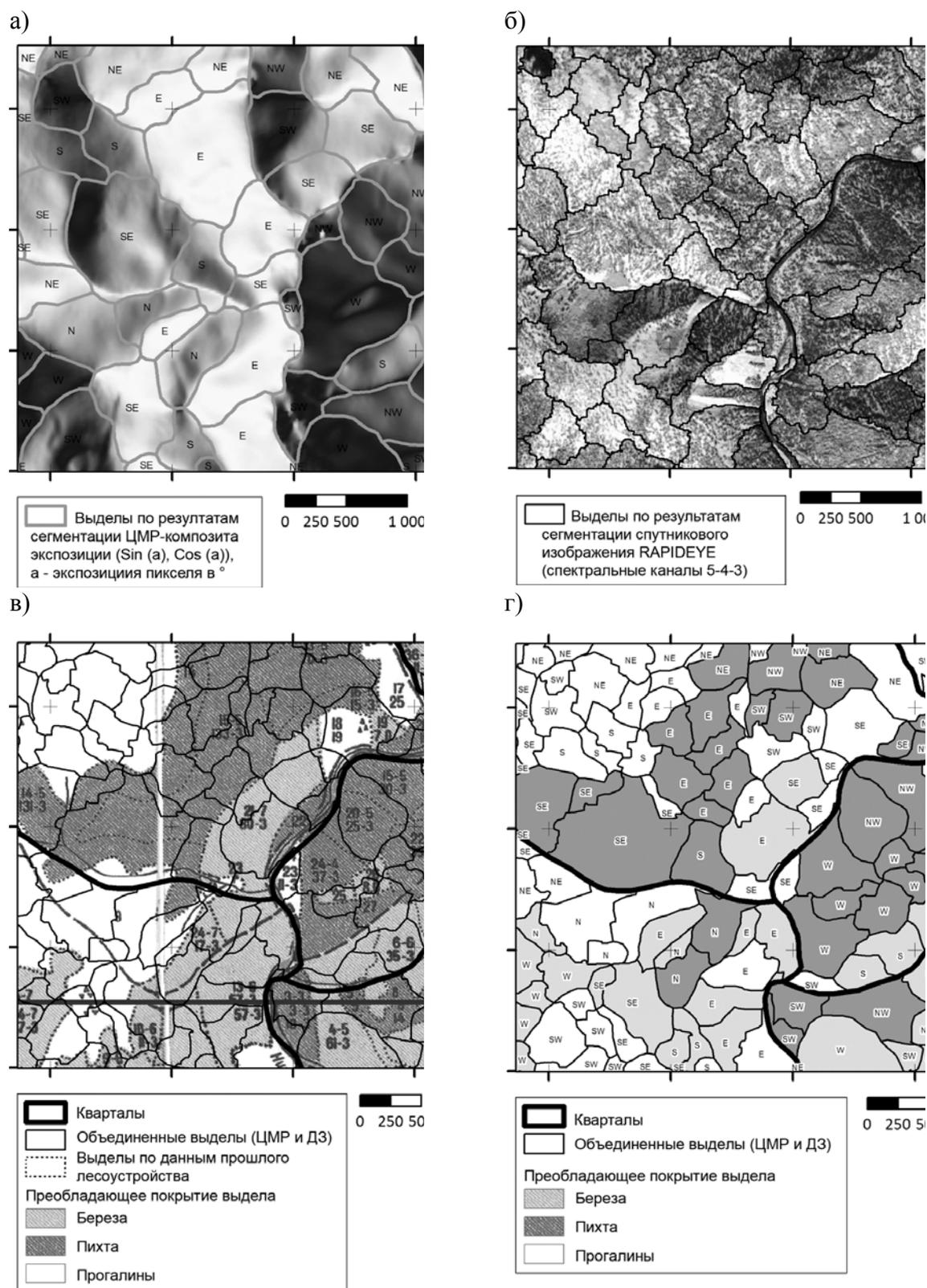


Рис. 1. Этапы автоматизированного дешифрирования лесотаксационных выделов: а) сегментация двухслойного раstra (*Sin* и *Cos* угла экспозиции пикселя) на основе ЦМР (ASTER GDEM2, разрешение 20 м); б) сегментация 5-тиканального спутникового изображения (RAPIDEYE, 23.08.2013, разрешение 5 м); в) объединение выделов на основе ЦМР и ДЗ с картами предыдущего лесоустройства (отсканированные планшеты масштаба 1:25000); г) результат компьютерной классификации выделов. Обозначения преобладающих экспозиций выделов по румбам: N – северная, S – южная, E – восточная, W – западная

Для полученных полигонов были вычислены и заполнены атрибуты средних значений высоты, уклона и преобладающей экспозиция по румбам. Редактирование и заполнение таксационных характеристик полученных выделов осуществлялось экспертом-таксатором на основе визуальной интерпретации расчетных ЦМР-характеристик выделов, космической съемки RAPIDEYE, полевых данных и материалов предыдущего лесоустройства (рис. 1в).

Дополнительно для двух тестовых участков, используя метод управляемой классификации (Minimum Distance [4]) выделов по расчетным признакам ЦМР ( $Sin(a)$ ,  $Cos(a)$ ) и RAPIDEYE (5 спектральных каналов), полученным выделам были автоматически присвоен класс из набора тестовых типов поверхности (береза, пихта, прогалины) (рис. 1г). Используя те же исходные данные, экспертом-таксатором было проведено контурное дешифрирование и таксация тестовых участков по традиционной визуальной методике.

Сравнительный анализ результатов компьютерной и экспертной классификации, выполненный для 250 выделов двух тестовых участков Кузнецкого Алатау в виде таблицы межклассового соответствия (таблица), показал удовлетворительное соответствие автоматического и ручного подходов.

В результате экспериментальных работ была принята методика окончательного формирования таксационных выделов на основе комбинации автоматического и экспертного подходов. За контурную основу принимались выделы, автоматически полученные по топографическим и спектральным признакам. Атрибуты выделов частично заполнялись расчетными характеристиками по ЦМР (высота, уклон, экспозиция) и космической съемке (предварительный класс земной поверхности). Остальные таксационные характеристики присваиваются таксатором по традиционной схеме, опираясь на данные расчетных характеристик, предыдущего лесоустройства и полевой таксации.

**Таблица**

**Сравнительный анализ результатов компьютерной и экспертной классификации (взаимное распределение площадей классов в %)**

Класс		Компьютерная классификация			Итого, %
		Береза	Пихта	Прогалины	
Экспертная классификация	Береза	<b>68</b>	8	24	100
	Пихта	11	<b>76</b>	13	100
	Прогалины	14	12	<b>74</b>	100

Примечание. Жирным шрифтом выделены максимальные значения по строке.

### Заключение

Предлагаемый автоматизированный подход по сравнению с традиционным позволяет более чем в два раза повысить производительность работ при контурном дешифрировании лесотаксационных выделов, снизить влияние субъективного фактора при формировании геометрии и характеристик выделов.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке международного проекта ZAPAS (FP7-SPACE-2010-1-263271), проекта Министерства Образования и Науки РФ (14.B25.31.0031) и грантов РФФИ (14-05-00420, 13-05-98053).

## Список литературы

1. Инструкция по проведению лесоустройства в лесном фонде России; под ред. Минаева Л.Ю. Ч. 1. Организация лесоустройства. № 6. М.: Воениздат, 1995. 274 с.
2. Ryzhkova V., Danilova I., Korets M., A GIS-based mapping and estimation the current forest landscape state and dynamics // Journal of landscape ecology. 2011. Vol: 4/ № 1. P. 42–55.
3. Ryzhkova V., Danilova I. GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation // BOSQUE 33(3). 2012. Pp. 293-297. DOI: 10.4067/S0717-92002012000300006.
4. User Guide «eCognition Developer 8.9» / Trimble Germany GmbH, Arnulfstrasse 126, D-80636 Munich, Germany, 2013.
5. Руководство пользователя «ArcGIS 10.2» / ESRI, 380 New York Street, Redlands, CA 92373-8100, USA, 2013.
6. URL1: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
7. URL2: <http://blackbridge.com/rapideye/products/ortho.htm>

УДК 528.082

## СИСТЕМА СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. П. Шевырногов<sup>(1)</sup>, А. В. Яковлев<sup>(2)</sup>, В. В. Попов<sup>(2)</sup>, М. В. Валов<sup>(2)</sup>, А. А. Ларько<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Институт биофизики СО РАН

<sup>(2)</sup>Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы»

им. академика М. Ф. Решетнёва

e-mail: [ap\\_42@mail.ru](mailto:ap_42@mail.ru)

Предлагается система спутникового мониторинга территории Красноярского края. Основной особенностью предлагаемой системы является реализация ее на трех уровнях: космическом, маловысотном и наземном. На каждом из уровней предполагается использование информационно совместимой спектрофотометрической аппаратуры для дальнейшей комплексной интерпретации. Предполагается разработка наземной системы управления, сбора, обработки и распространения информации

*Ключевые слова: комплекс мониторинга, малый космический аппарат, беспилотный летательный аппарат, видеогиперспектрометр, дистанционное зондирование земли, сельское хозяйство, лесное хозяйство, внутренние водоемы, ледовая обстановка, чрезвычайные ситуации, почвы, пожары, наводнения, использование земель, прогнозы, экология, биологическая продуктивность, антропогенное воздействие.*

Территория Красноярского края характеризуется несколькими основными факторами:

- большой площадью
- малой плотностью населения
- большим количеством природных ресурсов
- сложностью быстрого контроля динамики негативных природных и антропогенных факторов

Высокий потенциал, имеющийся в Красноярском крае для развития различных областей хозяйственной деятельности человека, требует применения соответствующих технологий для контроля процессов, проходящих на этой территории.

Главной особенностью таких технологий является соответствие применяемых подходов размерам территории и скоростям идущих на ней процессов.

В настоящее время к таким технологиям можно отнести космические методы дистанционного зондирования Земли и современные информационные технологии.

К космическим методам можно отнести:

- создание эффективных космических аппаратов, пригодных для регистрации пассивного и активного излучения поверхности Земли в различных диапазонах электромагнитного спектра
- систему сбора космической информации, передачу ее на наземные центры приема
- систему хранения и передачи тематически обработанной информации потребителям различных хозяйственных субъектов (сельское, лесное хозяйство, МЧС, экологические службы и т.д.)

Основным направлением развития информационных технологий является развитие методов интерпретации радиометрической информации в параметры, пригодные для конечных пользователей.

В настоящее время имеется некоторое количество разработок систем дистанционного зондирования для различных территорий. Некоторые из них имеют узконаправленные тематические рамки, например лесопожарное направление. Некоторые, в основном привязаны к территориальным особенностям контролируемых объектов, например системы, разработанные китайскими коллегами. Некоторые из систем являются достаточно универсальными, например, основанные на использовании аппаратуры, подобной MODIS, и в силу своей универсальности не всегда учитывают территориальные особенности.

Исходя из этих особенностей, можно считать весьма актуальной задачей созданием системы космического мониторинга, учитывающей особенности Красноярского края и способной выдавать экспрессные своевременные данные для различных потребителей, находящихся на этой территории. Такого типа данные могут использоваться администрацией края для применения управленческих решений, системами МЧС, находящимися в Красноярском крае для быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации, оценки состояния сельскохозяйственной, лесной растительности и т.д.

Чем же характеризуется территория Красноярского края?

Во первых, крайне разнообразные природные условия, связанные с широтными особенностями. Это степные районы на границе с Хакасией, бореальные леса, лесотундра и тундра, шельфовая зона на северной границе края, водные объекты различного типа, глубоководные водохранилища, крупные и мелкие озера и т.д.

Для каждого из этих типов объектов должны применяться специфические методы интерпретации. Таким образом, очевидно, что для учета территориальных особенностей и оперативного доступа к прикладной информации актуальной является разработка системы космического мониторинга, адаптированной на особенности объекта.

Такой системой может быть система, основанная на использовании малых спутников, разрабатываемых в ИСС им. М.Ф. Решетнева. В качестве полезной нагрузки может быть многоканальный сканер в видимой области спектра и сканер, работающий в ИК диапазоне.

Проблемы, существующих систем космического мониторинга:

- ограниченность системного подхода в рамках сбора, обработки и распределения получаемой данных мониторинга;
- ограниченность доступных оперативных космических систем и беспилотных аэрокосмических систем (БАС) для обзорного наблюдения, позволяющих

предоставлять информацию нужного качества по заданному региону с высокой точностью и оперативностью;

- ограниченность доступных космических инструментов, инструментов БАС, специализированных наземных центра и отработанных технологий для обработки гиперспектральных изображений, позволяющих получать высокоинформативные данные дистанционного зондирования Земли;

- ограниченность получения снимков высокого разрешения, их зависимость от высоты съемки и погодных условий;

- ограниченность оперативности и детальности съёмки, которая требуется в определённых условиях получения информации;

- в основном, неприемлемая оперативность получения информации ДЗЗ и периодичность обзора требуемых районов территории РФ;

- на данный момент сроки активного существования многих используемых отечественных КА ДЗЗ исчерпаны или будут исчерпаны в течении года;

- отсутствие возможности наблюдения требуемых районов территории РФ в режиме реального времени с высоким и средним пространственным разрешением;

- технологическая зависимость потребителя (например, органы МЧС) от поставщика услуг (представителя иностранного оператора на территории РФ).

### **Особенности предлагаемой трехуровневой системы**

Особенностью предлагаемой системы космического мониторинга является получение данных о состоянии земной поверхности одновременно тремя способами. Это использование информации с малого космического аппарата дистанционного зондирования (МКА ДЗЗ) (8).

Проведение детальной съемки необходимых областей земной поверхности с использованием беспилотного летательного аппарат. Использование наземного комплекса сбора информации (НКСИ). Это позволит получать данные:

- высокого пространственного и спектрального разрешения;
- без искажений, вызванных атмосферой Земли;
- в любой момент времени с возможностью проведения повторной съемки;
- о спектральных характеристиках наземных объектов.

В результате, будет разработана трёхсегментная (многоуровневая) система мониторинга (МКА, БПЛА, НКСИ)[1-3].

Будут отработаны технологии получения высокоинформативных данных с помощью видеогиперспектрометра (30 каналов), панхроматического канала (1) и ИК-спектрометра (1 канал), размещенного на малом космическом аппарате и беспилотном летательном аппарате.

Работающая на различных сегментах аппаратура, позволит проводить съёмку различных участков Земли на разных высотах, проводить калибровку, обрабатывать полученные данные. Такой подход обеспечивает с одной стороны большой охват территорий с помощью верхнего спутникового сегмента (МКА), а с другой стороны возможность детального изучения выявленных отклонений и особо важных объектов с помощью сегментов нижнего уровня (БПЛА, КСИ). Появляется возможность использования не только режима мониторинга, но и отслеживания предполагаемых изменений природной среды, тестирование результатов прогнозирования и др.

Пространственное разрешение современных оптико-электронных систем коммерческих КА достигает от 100 до 0,5 м, в зависимости от высоты и сложности бортовой аппаратуры.

Разрешения снимков, полученные с БПЛА, могут измеряться в сантиметрах, преимуществом является использование их в любых погодных условиях (в том числе и под облаками), а также при изменении местности при точечной застройке в населенных

пунктах, изменении местности, требующем оперативного анализа и принятия решений (сезонные изменения местности, например затапливаемые территории разливом рек).

Для первичной и тематической обработки получаемых данных будут использованы научные результаты и наработки Института биофизики СО РАН и других организаций, такие как:

- Исследование внутренних водоемов [4, 5].
- Мониторинг землепользования [6, 7].
- Изучение динамики лесов [8].
- Прогнозирование урожайности [9].
- Классификация типов растительности.

На основе комплексного использования материалов, получаемых с различных уровней съёмки, будет создана общая технология обработки полученных данных. Следствием такого подхода является повышение качества получаемой информации, расширение спектра ее использования для практического применения.

Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемая трехуровневая система позволит получать высокоточную информацию об объектах земной поверхности в режиме реального времени, которую не позволяют получать известные сегодня системы дистанционного зондирования Земли Российской Федерации.

### Список литературы

1. Попов, В.В. Сибирская научно-образовательная программа разработки, создания и использования серии микро спутников») / В.В. Попов, А.В. Яковлев, М.В. Валов // Европейское космическое агентство. 4 Симпозиум «Малые космические аппараты и системы»: Материалы конф. г. Портороз, Словения. 2012.

2. Попов, В.В. Опыт ОАО «ИСС» в области создания МКА микро класса / В.В. Попов, М.В. Валов // Междунар. выставка информационных технологий, телекоммуникаций, IT-решений и услуг СеВIT.2013.

3. Патент № 87566 Российская Федерация, МКПО<sup>10</sup> 12-07, Аппарат космический / В.В. Попов, А.В. Яковлев, М.В. Валов; заявитель и патентообладатель – Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» – заявка № 2012502842; заявл. 13.08.12; опубл. 16.01.14 – 3 с.

4. Chernetsky M., Shevyrnogov A., Shevnina S., Vysotskaya G., Sidko A. Investigations of the Krasnoyarsk Reservoir waters based on the multispectral satellite data // Adv. in Space Research. 2009. V. 43. P. 206–213.

5. Gitelson I.I., Abrosov N.S., Gladyshev M.I., Degermendgi A.G., Sid'koF.Ya., Gold V.M., Gold Z.G., Shevyrnogov A.P. Yenisei: Problems of the Largest Siberian River // Mitt.Geol.-Paleont.Inst., Univ.Gamburg, SCOPE/UNEP Sonderband, Hamburg, 1985. Heft 66, S. 331–340.

6. PugachevaI.Yu., Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P. A study of backscattered spectra dynamics of agricultural crops during growth period on the territory of the KrasnoyarskiiKrai // Adv. in Space Research. 2010. Vol. 45. P. 1224–1230.

7. Письман Т.И., Пугачева И.Ю., Жукова Е.Ю., Шевырнов А.П. Математическая модель сезонной динамики агрофитоценозов с учетом наземных и спутниковых измерений // Доклады академии наук. 2009. Т. 428, № 6. С. 841–844.

8. Chernetskiy M., Pasko I., Shevyrnogov A., Slyusar N., Khodyayev A. A study of forest vegetation dynamics in the south of the KrasnoyarskiiKrai in spring // Adv. SpaceRes. 2011.

9. Письман Т.И., Ботвич И.Ю., Сидько А.Ф. Оценка влияния уровня культуры земледелия (фактора засорения) на урожайность сельскохозяйственных культур на основе наземных исследований и дистанционного зондирования земли из космоса // Вестник КрасГАУ. 2012. № 7. С. 65–69.

9. Ботвич И.Ю., Сидько А.Ф., Письман Т.И., Шевырногов А.П. Изучение хлорофилльного фотосинтетического потенциала посевов сельскохозяйственных культур Юга Красноярского края и республики Хакасия спутниковыми методами // Исследование Земли из космоса. 2012. № 5. С. 43–52.

**УДК 528.8**

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПОСТРОЕНИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЗЗ**

Ю.А.Маглинец, Г.М. Цибульский  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: [YMaglinets@sfu-kras.ru](mailto:YMaglinets@sfu-kras.ru), [GTsybulsky@sfu-kras.ru](mailto:GTsybulsky@sfu-kras.ru)

В статье обсуждаются вопросы построения региональной многоцелевой системы дистанционного мониторинга Земли. Сформулирован набор факторов, влияющих на создание и функционирование систем этого класса, рассмотрены основные функциональные блоки

*Ключевые слова:* региональные системы ДЗЗ, мониторинг, геопространственный объект, инфраструктура пространственных данных, региональное управление.

### **Введение**

Актуальность создания региональных систем ДЗЗ определяется наличием задач управления территориями на региональном, муниципальном уровне и на уровне отдельных хозяйствующих субъектов. Следует отметить, что в последние годы в практике формирования и реализации ДЦП по использованию результатов космической деятельности в ряде субъектов Российской Федерации достигнут определенный прогресс. Если судить по открытым источникам, большинство проектов в области решения региональных задач дистанционного зондирования связаны с мониторингом земель сельскохозяйственного назначения. Среди других задач ДЗЗ регионального характера выделяют мониторинг лесных пожаров, картирование паводковой обстановки, прогнозирование заторов льда на реках, обнаружение и мониторинг нефтяных загрязнений, прогноз урожайности сельскохозяйственных культур, георазведку, обнаружение и картирование вырубок леса, экологический контроль и др. Тем не менее, единого, устоявшегося мнения о том, что должна из себя представлять региональная система дистанционного зондирования (РСДЗЗ), не сложилось.

Судя по публикациям, работы в рассматриваемой области в основном сводятся к построению информационно-поисковых систем, в то время, как задачи регионального управления требуют организации не просто навигаторов в море информации, а полноценных систем, поддерживающих весь цикл принятия решений от постановки задачи управления геопространственным объектом (ГПО) до организации в полном объеме всего комплекса мероприятий по мониторингу и управлению. В докладе предпринята попытка осмысления понятия РСДЗЗ и формирования требований к системам такого рода.

### **Факторы, влияющие на построение РСДЗЗ**

Рассмотрим систему факторов, определяющих построение и функционирование РСДЗЗ.

1. *РСДЗЗ, как управляющая система.* Основной задачей РСДЗЗ является управление территориально распределенными объектами, включая мониторинг состояния, прогнозирование и планирование их развития. Следовательно, система должна обладать моделью поведения объекта, позволяющей, в режиме реального времени (с дискретизацией, отвечающей темпам его изменения), определять, является ли текущее состояние объекта допустимым промежуточным состоянием на пути достижения целевого состояния и в случае необходимости, обеспечить принятие соответствующих корректирующих решений.

2. *Разнородность и распределенность исходных данных.* Говоря о космоснимках, как основном виде исходных данных, следует отметить тенденции постоянного улучшения качественных и количественных характеристик международной космической группировки, включая и ее российский сегмент. Помимо космосъемки, для небольших территорий не утратили своей значимости авиационные методы дистанционного зондирования, растет интерес к использованию БПЛА. На пике внимания исследователей находятся всепогодные источники космоданных на основе радиолокационных датчиков.

Необходимым фактором для построения РСДЗЗ является наличие базовой картографической основы и ее производных, где также, благодаря усилиям Росреестра, наметилась некоторая положительная динамика.

Третьим источником информации является тематическая информация, как геопривязанная, так и без геопривязки, в том числе получаемая наземными методами, имеющаяся в базах данных профильных министерств и ведомств, научных организаций.

В общем случае при построении РСДЗЗ следует говорить о сверхбольших объемах слабо структурированных и зачастую несогласованных меж собою данных.

3. *Многоцелевой характер системы.* Определяется наличием различных уровней принятия решений и, как следствие, пользователей разного типа, преследующих различные системы целей. Таким образом, РСДЗЗ – решающая система, обеспечивающая для своих пользователей интерфейсы постановки задач.

4. *Интеллектуальный характер системы.* Сложность и разнообразие решаемых задач обуславливают способность системы к адаптации и самоорганизации. С учетом последнего должно осуществляться взаимодействие и с постановщиком задач, поскольку он является элементом контура управления (элементом решающей системы). В отношении него система должна быть активной. Это касается источников экспертного знания системы, то, поскольку в их функционирование не входит управление объектом, их (экспертов) нельзя вовлечь в решение задач системы в реальном масштабе времени.

5. *Региональные факторы и особенности наблюдаемых объектов.* Среди факторов, влияющих на выбор методов и средств решения задач ДЗЗ, следует отметить географическое расположение региона, его пространственную протяженность и особенности рельефа, а также размеры наблюдаемых объектов и степень их изменчивости во времени.

6. *Взаимодействие региональных и федеральных систем.* В первую очередь следует отметить общемировую тенденцию к построению РСДЗЗ, как элементов ИПД соответствующего уровня. В РФ работы в этом направлении далеко не закончены, однако очевидно, что всякая вновь создаваемая РСДЗЗ должна обеспечить способы взаимодействия с существующей ИПД.

### **Функциональные подсистемы РДЗЗ**

Исходя из перечисленных выше факторов, сформулируем основные группы функций (функциональные подсистемы), которые должна обеспечивать РСДЗЗ.

1. Подсистема поставки исходных данных из внешней среды.
2. Подсистема преобразования исходной информации к виду, удобному для манипулирования.
3. Подсистема взаимодействия с конечным пользователем.
4. Подсистема, обеспечивающая внутреннее представление информации (база данных, база знаний).
5. Подсистема управления ГПО.
6. Подсистема управления программно-аппаратным комплексом.

*Подсистема поставки исходных данных.* В современных условиях акценты смещаются от использования собственных станций по приему «сырых» космоснимков к получению уже очищенной информации из различных источников, вплоть до получения готовых ответов на запросы пользователя из внешних источников. Таким образом, наряду с блоками управления сеансами связи со спутниками и т.п., в подсистеме должны присутствовать средства взаимодействия с внешними базами данных в самом широком смысле, построенные на основе использования стандартизованных протоколов и спецификаций, а также средства управления заказами на предоставление данных, по аналогии с отработанной в бизнесе информационной логистикой снабжения.

*Подсистема преобразования исходной информации.* Включает как средства предварительной обработки изображений и преобразования форматов, так и средства тематической интерпретации изображений, что вызывает необходимость, с одной стороны, вовлечения в процесс функционирования подсистемы экспертов по тематической интерпретации, с другой – к необходимости использования техник экспертных систем: извлечения и формализации знаний.

*Подсистема взаимодействия с конечным пользователем.* Должна обладать свойством адаптивности, подстройки под требования пользователей с учетом рассмотренного выше многообразия видов пользователей и их запросов. Предполагает различные типы интерфейсов, включая возможности отображения векторных геоинформационных слоёв, растровых сцен, атрибутивной информации в тех сочетаниях, которые оптимальны в данный момент для данного пользователя.

*Подсистема, внутреннего представления информации.* Базируется на комбинации технологий реляционных СУБД, геоинформационных систем, хранилищ данных, баз знаний. Хорошей основой для непротиворечивого представления информации является онтологический подход, позволяющий согласовывать семантику ГПО, комбинации растровых, векторных и атрибутивных данных, формируя структуру корректного информационного запроса пользователя.

*Подсистема управления ГПО.* Включает средства представления ГПО, как объекта мониторинга, настройки контрольных параметров, темпов актуализации, требований к исходным данным. Содержит собственно блок мониторинга, отвечающий за своевременное поступление информации, ее анализ, принятие управляющих решений и доведение их до соответствующих пользователей.

*Подсистема управления программно-аппаратным комплексом.* Позволяет решать задачи планирования, запуска на выполнение и контроля работы компонент программного обеспечения комплекса, автоматизированного сбора и анализа параметров состояния и характеристик работы инфраструктуры, выявления и локализации сбоев в работе информационной системы, накопления информации о параметрах состояния и характеристиках работы инфраструктуры и предоставления накопленной исторической информации для создания отчетов.

## **Заключение**

В работе рассмотрены современные тенденции построения многоцелевых региональных систем дистанционного зондирования Земли. Сформулирована система факторов, влияющих на построение систем такого рода. Основной задачей РДЗЗ является управление территориально распределенными объектами. Это определяет требования к исходным данным и параметрам актуализации информации. Также, важно отметить, что каждая РДЗЗ – это не автономная система, а система, находящаяся в условиях взаимодействия со множеством других систем различного масштаба, определяющих структуру формируемой в Российской Федерации ИПД.

Сформулированы требования к функциональному составу подсистем типовой РДЗЗ. Что касается опыта построения такого рода систем – в настоящее время отдельные элементы функциональности из числа сформулированных выше реализованы в пилотном варианте в рамках выполнения проектов по организации подсистем РДЗЗ Красноярского края и Хакасии на базе центра приема и обработки спутниковой информации ИКИТ СФУ в рамках решения прикладных задач, связанных с сельскохозяйственным мониторингом и мониторингом динамики развития растительных сообществ [1-3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-07-98005.

## **Список литературы**

1. Программно-технологическая инфраструктура представления и обработки геопространственной информации муниципального района. Маглинец Ю.А., Мальцев Е.А., Брежнев Р.В., Соснин А.С., Цибульский Г.М., Шатрова К.В. //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 316-323.
2. Р.В. Брежнев, Ю.А. Маглинец, Е.А. Мальцев, С.Е. Перфильев, А.Ю. Сидоров, Г.М. Цибульский, А.С. Шокол. Программно-технологическая инфраструктура информационной поддержки решения задач территориального управления // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 3. С. 340-352.
3. Multipurpose geoinformation management system of Yenisei meridian territories. Maglinets, Y.A., Mal'tsev, E.A., Tsybul'skii, G.M. 2012. Pattern Recognition and Image Analysis 22 (2) , pp. 318-322.

**УДК 621.396.967**

## **МОДЕЛЬ ЛИДАРА ДЛЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЗОНДИРОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

**В.А. Хабаров, Е.А. Вейсов, С.Н. Титовский, Д.В. Попов  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»**

Рассмотрены два основных метода дистанционного лазерного зондирования. Приведено решение лидарного уравнения для определения концентрации углеводородов в атмосфере методом дифференциального поглощения относительно мощности излучения на двух близких длинах волн. Изложены основные принципы функционирования аппаратуры бортовой системы, приведена структурная схема измерителя.

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, лазер, лидар, углеводород, бортовая система, космический аппарат.*

Среди известных методов дистанционного зондирования земной поверхности, направленных на поиск и обнаружение залежей нефти и природного газа, одним из наиболее перспективных следует считать аэрокосмические исследования, основанные на использовании технологий радиолокационного и лазерного зондирования. Тенденции развития перспективных направлений геофизических исследований земной поверхности определяют новые требования к точности и оперативности информации необходимой для локализации предполагаемых мест залежей нефти и газа. Здесь, наиболее перспективным в технологическом плане и наименее затратным в экономическом, следует считать обнаружение поверхностных утечек природного газа методом дистанционного лидарного зондирования приземного слоя.

Применение данного метода для геофизических исследований позволит выявлять устойчивые области с повышенным содержанием взвешенных веществ в атмосфере, т.е. фиксировать локальные выходы природного газа, наблюдать пространственную динамику поверхностных утечек в реальном масштабе времени, осуществлять топологическую привязку предполагаемых месторождений к местности и др.

Теория и практика лидарного зондирования довольно широко распространена. [1,7]. Лазерно-локационные методы в сочетании с методами цифровой аэрофотосъемки в течение последних лет активно применяются для решения топографических задач, в том числе и в нашей стране. Можно сказать, что они уже имеют свою определенную экологическую нишу, например, маршрутная съемка линий электропередачи или нефте- и газопроводов. Однако в известных работах практически отсутствуют результаты, полученные в области поиска нефтегазовых месторождений. Согласно доступным источникам, на сегодняшний день не существует готовых методик лидарного космического зондирования, локализации и топологической привязки к местности предполагаемых месторождений с достаточно высокой точностью. Одной из проблем, встающих на данном пути, является проблема адекватного математического представления трассы лидара, позволяющей выявлять малые концентрации природного газа не только в верхних слоях атмосферы, но и в приземном слое. Не менее важной задачей является разработка интегрированного бортового комплекса позволяющего осуществлять мониторинг земной поверхности с одновременной картографической привязкой. Установленный на базе космического аппарата такой комплекс может выявлять наиболее вероятные места выхода природного газа на поверхность земли, что позволило бы с достаточно высокой точностью осуществлять разработку наиболее перспективных поисковых мероприятий в исследуемых районах.

Таким образом, актуальным является разработка математического аппарата и соответствующих ему аппаратуры, методик и алгоритмов дистанционного зондирования атмосферы для обнаружения поверхностных утечек природного газа и картографической привязки, с целью выявления и адекватного геофизического представления предполагаемых месторождений.

Проведенные исследования в предметной области позволили выявить одно из наиболее популярных, по мнению авторов, представление лидарного уравнения [1,2]:

$$P_{\lambda}(R) = P_0 \eta \left( \frac{c\tau}{2} \right) A(R) \frac{\beta_{\lambda}(R)}{R^2} \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha_{\lambda}(x) dx \right] , \quad (1)$$

где  $P_{\lambda}$  – мощность рассеянного излучения, полученная за время  $t = 2R/c$ ;  $R$  – расстояние до рассеивающего объема;  $c$  – скорость света;  $\tau$  – длительность лазерного импульса;  $P_0$  – мощность лазера;  $\eta$  – эффективность приемника (калибровочная

константа);  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения;  $\beta_\lambda$  – объемный коэффициент обратного рассеяния атмосферы;  $A$  – эффективная площадь приемника;  $\alpha_\lambda$  – объемный коэффициент ослабления (экстинкции) атмосферы.

Коэффициент  $\alpha_\lambda$  можно представить в виде суммы членов описывающих молекулярное –  $\alpha_\lambda^{mol}$  и аэрозольное –  $\alpha_\lambda^{aer}$  ослабление. Следует отметить, что коэффициент молекулярного ослабления включает в себя поглощение за счет исследуемого газа  $N_g \sigma_g$ , где  $N_g$  – концентрация исследуемого газа, а  $\sigma_g$  – его сечение поглощения. Коэффициент  $\beta_\lambda$  также можно представить в виде суммы членов определяющих молекулярное –  $\beta_\lambda^{mol}$  и аэрозольное –  $\beta_\lambda^{aer}$  рассеяние.

Коэффициенты молекулярного рассеяния  $\beta_\lambda^{mol}$  и ослабления  $\alpha_\lambda^{mol}$  можно рассчитать с хорошей точностью на основе теории рассеяния Рэлея [3], либо с использованием конкретной модели атмосферы [4]. Для корректной оценки пропускания лазерного излучения атмосферой необходимо иметь информацию о физических и оптических моделях атмосферы.

Согласно известным источникам, наиболее полной и удобной для решения задач дистанционного зондирования представляется физическая модель атмосферы, разработанная в Институте оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН. В ней, кроме профилей температуры, давления, концентрации  $H_2O$  и  $O_3$  для различных климатических зон, содержится информация о высотном распределении  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ , а также сведения об их стандартных отклонениях для различных высот.

При количественной оценке пропускания атмосферы для лазерных источников необходимо иметь данные о коэффициентах аэрозольного ослабления, молекулярного рассеяния и резонансного молекулярного поглощения.

Теория молекулярного рассеяния света Рэлея дает следующее выражение для объемного коэффициента обратного молекулярного рассеяния (в  $см^{-1} \cdot ср^{-1}$ ) в газах:

$$\beta_\lambda^{mol} = \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \frac{6 + 3\Delta}{6 - 7\Delta}$$

где  $N$  – концентрация молекул;  $n$  – показатель преломления среды;  $\Delta$  – степень деполаризации рассеянного излучения. Для смеси атмосферных газов на высотах до 100 км формула описывающая, объемный коэффициент обратного рассеяния, будет иметь вид:

$$\beta_\lambda^{mol} = 5.45 \cdot 10^{-28} N \left( \frac{550}{\lambda} \right)^4$$

Где  $\lambda$  берется в нанометрах.

При рассмотрении однократного молекулярного рассеяния параметр  $\Delta$  связывается с анизотропией поляризуемости молекул, и в случае изотропных центров рассеяния, например, таких как одноатомные газы, типа аргон, он равен нулю (для воздуха  $\Delta = 0,035$ , а для азота  $\Delta = 0,036$ ).

Необходимо отметить, что при молекулярном рассеянии происходит некоторое расширение спектра излучения (вследствие эффекта Доплера) по сравнению со спектром излучения источника. Однако в целом в условиях земной атмосферы это расширение относительно мало.

Коэффициенты аэрозольных рассеяния  $\beta_\lambda^{aer}$  и ослабления  $\alpha_\lambda^{aer}$  можно определить либо теоретически, на основе теории аэрозольного рассеяния (теория Ми) [3], либо экспериментально (из лидарных сигналов), на основе алгоритмов решения лидарного уравнения, которые подробно рассмотрены в [8].

Согласно теории рассеяния электромагнитных волн аэрозольными частицами в приближении диэлектрических сфер (теория Ми) можно получить выражения для объемных коэффициентов рассеяния и ослабления при заданной длине волны:

$$\alpha^{aer}(n', \lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{ext}(\rho, n', \lambda) f(r) dr$$

$$\beta^{aer}(n', \lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{scat}(\rho, n', \lambda) f(r) dr$$

где  $r$  – радиус частицы;  $f(r)$  – функции распределения аэрозольных частиц по размерам;  $n'$  – комплексный показатель преломления диэлектрической сферы;  $Q_{ext}$  и  $Q_{scat}$  – коэффициенты эффективности рассеяния и ослабления;  $\rho = 2\pi r / \lambda$  – относительный размер частиц. В [5] аэрозольное ослабление описывается эмпирическим выражением:

$$\alpha^{aer} = \frac{3.912}{R_m} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^q$$

где  $R_m$  – метеорологическая дальность видимости на  $\lambda = 0,55$  мкм, коэффициент

$q$  задается следующим образом:

$$q = \begin{cases} 0.585(R_m)^{1/3} & \text{при } R_m \leq 6 \text{ км} \\ 1.3 & \text{при } 6 \text{ км} \leq R_m \leq 50 \text{ км} \\ 1.6 & \text{при } R_m \geq 50 \text{ км} \end{cases}$$

При разработке бортового комплекса лидара следует учитывать, что параметр  $A(R)$  в уравнении (1) определяется только характеристиками приемника и передатчика [6]. Наиболее сильно он зависит от пространственного распределения мощности в лазерном пучке и степени перекрытия лазерного пучка и поля зрения телескопа. Это фактор учитывает также влияние тени вторичного зеркала телескопа, оптические aberrации, неоднородность поверхности детектора и эффективную площадь телескопа. Эффективная площадь приемника  $A(R)$  задается выражением:

$$A(R) = \frac{A_0}{\pi W^2(R)} \int_{r=0}^{r_{\max}} \int_{\psi=0}^{2\pi} \xi(R, r, \psi) F(R, r, \psi) r dr d\psi = A_0 \xi(R)$$

где  $F(R, r, \psi)$  – функция пространственного распределения интенсивности лазерного излучения;  $\xi(R, r, \psi)$  – геометрический вероятностный коэффициент;  $\psi$  – азимутальный угол;  $W^2(R)$  – размер лазерного пятна на расстоянии  $R$ ;  $A_0$  – площадь входной апертуры телескопа;  $\xi(R)$  – функция геометрического фактора (ФГФ) лидара, которая учитывает степень перехвата отраженного от мишени лазерного пучка.

Иногда ФГФ лидара называют функцией виньетирования из-за перекрытия приемной и передающей оптической апертуры. Последнее определение отражает роль пространственных фильтров в уменьшении динамического диапазона лидара. Величину ФГФ можно либо точно рассчитать для его разных конфигураций, либо определить экспериментально.

В основу разрабатываемого бортового комплекса заложен принцип дифференциального поглощения (ДП), который основан на явлении резонансного поглощения лазерного излучения внутри контура линии поглощения исследуемого газа. Концентрация газа вычисляется при использовании сигналов на двух близких частотах, одна из которых находится внутри линии поглощения, а другая – вне нее.

Используя лидарное уравнение (1) для упругого рассеяния на длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ , из отношений мощностей отраженных сигналов  $P_{on}$  и  $P_{off}$  на двух длинах волн получаем следующее выражение для концентрации исследуемых молекул:

$$N(R) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{\partial}{\partial R} \left[ \ln \frac{P_{on}(R)}{P_{off}(R)} \right] + \frac{1}{\Delta\sigma} \frac{\partial}{\partial R} \left[ \ln \frac{\beta_{on}(R)}{\beta_{off}(R)} \right] - \frac{\alpha_{on}(R) - \alpha_{off}(R)}{\Delta\sigma} \quad (2)$$

где  $\beta_{on}$  и  $\beta_{off}$  – коэффициенты обратного рассеяния атмосферы на длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ ;  $\alpha_{on}$  и  $\alpha_{off}$  – коэффициенты ослабления атмосферы на длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ ;

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}) = \sigma_{on} - \sigma_{off}$$

– сечение ДП (дифференциального поглощения);  $\sigma(\lambda_{on})$  и  $\sigma(\lambda_{off})$  – эффективные сечения поглощения на двух длинах волн. В случае приземной трассы зондирования  $\sigma(\nu)$  для линии с центральной частотой  $\nu_0$  хорошо описывается Лоренцевским контуром [1,2]:

$$\sigma_L(\nu) = \frac{S}{\pi} \frac{\gamma_L}{\gamma_L^2 + (\nu - \nu_0)^2}$$

Где  $S$  и  $\gamma_L$  – интенсивность и полуширина линии поглощения соответственно, которые для колебательно-вращательных линий при давлении  $p$  и температуре  $T$  имеют следующий вид:

$$\gamma_L(T, p) = \gamma_L^0 \left( \frac{T_0}{T} \right)^l \frac{p}{p_0}$$

$$S(T) = S_0 \left( \frac{T_0}{T} \right)^m \exp \left[ -E^n \frac{hc}{kT} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Где  $\gamma_L^0$  и  $S_0$  – Лоренцевские полуширина и интенсивность при температуре  $T_0$  и давлении  $p_0$ ;  $E^n$  – энергия нижнего колебательно-вращательного состояния;  $h$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $m$  и  $l$  – параметры температурной зависимости полуширины и интенсивности соответственно.

Параметр  $l$  для различных газов может изменяться от 0,5 до 1, параметр  $m=1$  для линейных молекул и 1,5 для нелинейных.

Формула (2) показывает возможность восстановления непрерывного профиля  $N(R)$  при непрерывной записи лидарных сигналов. Однако на практике, лидарные сигналы будут регистрироваться приемной аппаратурой в виде дискретного цифрового массива данных, получаемых через равные промежутки времени  $\Delta t$ , что соответствует пространственному разрешению  $\Delta R = c\Delta t/2$ . Тогда из (1,2) для сигналов, принятых от атмосферных объектов, удаленных по трассе зондирования на расстояние  $R$  и  $R + \Delta R$ , следует выражение для средней концентрации исследуемого газа в указанном интервале расстояний:

$$\bar{N} = -\frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[ \frac{P_{on}(R + \Delta R) P_{off}(R)}{P_{off}(R + \Delta R) P_{on}(R)} \right] - \frac{\alpha_{on}^{mol} - \alpha_{off}^{mol}}{\Delta\sigma} + B_s + E_a$$

$$B_s = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[ \frac{\beta_{on}(R + \Delta R) \beta_{off}(R)}{\beta_{off}(R + \Delta R) \beta_{on}(R)} \right]$$

$$E_a = -\frac{\alpha_{on}^{aer} - \alpha_{off}^{aer}}{\Delta\sigma}$$

При калибровке приемо-передающей аппаратуры комплекса, длины волн выбираются таким образом, чтобы коэффициенты обратного рассеяния и ослабления атмосферы не зависели от длины волны. Поэтому спектральный интервал между двумя длинами волн должен быть так мал, чтобы можно было пренебречь слагаемыми  $B_s$  и  $E_a$ . Тогда выражение для концентрации упрощается:

$$\bar{N} = -\frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[ \frac{P_{on}(R + \Delta R)P_{off}(R)}{P_{off}(R + \Delta R)P_{on}(R)} \right] \quad (3)$$

На основании вышеизложенного и предварительных экспериментов в проблемной области, следует отметить, что полученное уравнение (3), достаточно адекватно описывает зависимость средней концентрации искомого газа от мощности отраженного излучения на двух длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ . При этом  $\lambda_{on}$  находится внутри линии поглощения искомого газа, а  $\lambda_{off}$  – вне ее, рисунок 1.

Для оценки чувствительности разрабатываемой аппаратуры - предельно допустимых значений концентраций атмосферного газа  $N_{min}$ , которые могут быть обнаружены с минимальной погрешностью измерений оптических сигналов удобно воспользоваться формулой предложенной в [3]:

$$N_{min}(R) = \frac{1}{\Delta\sigma\Delta R} \frac{2}{SNR(R)} \quad (4)$$

где  $SNR$  – отношение сигнал/шум на расстоянии  $R$  от лидара.

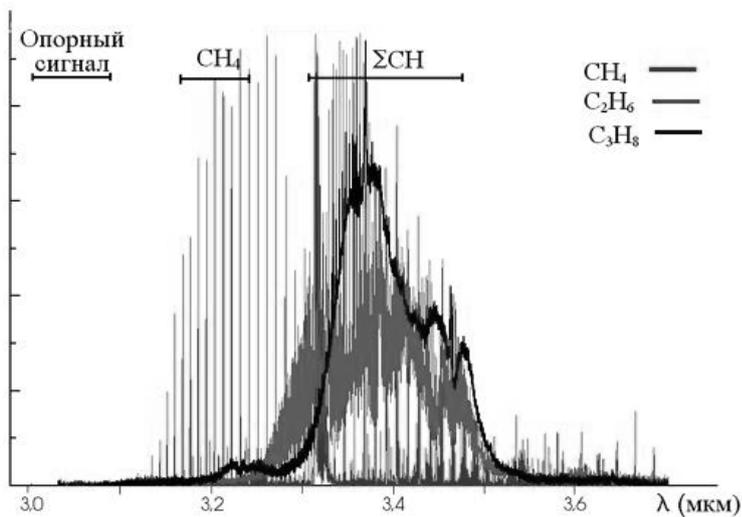
Для повышения чувствительности при заданном пространственном разрешении  $\Delta R$  следует выбирать наиболее интенсивные линии поглощения исследуемого газа с максимальным сечением ДП  $\Delta\sigma$ . Как показали результаты предварительных исследований, это приемлемо только для метода ДП на коротких трассах. Для лидарного метода на трассах большой протяженности ДП ситуация иная, поскольку лидарные сигналы, как правило, существенно изменяются вдоль трассы зондирования, а следовательно, вдоль нее и изменяется чувствительность лидара. В этом случае выбор наиболее интенсивных линий поглощения газа может привести к снижению чувствительности в объеме, удаленном на расстояние  $R$  от лидара.

При исследовании опытных образцов аппаратуры было выяснено, что при больших отношениях сигнал/шум концентрация  $N_{min}$  ограничивается систематической погрешностью лидара, которая может составлять от 10 до 20%, что подтверждается анализом выражения (4).

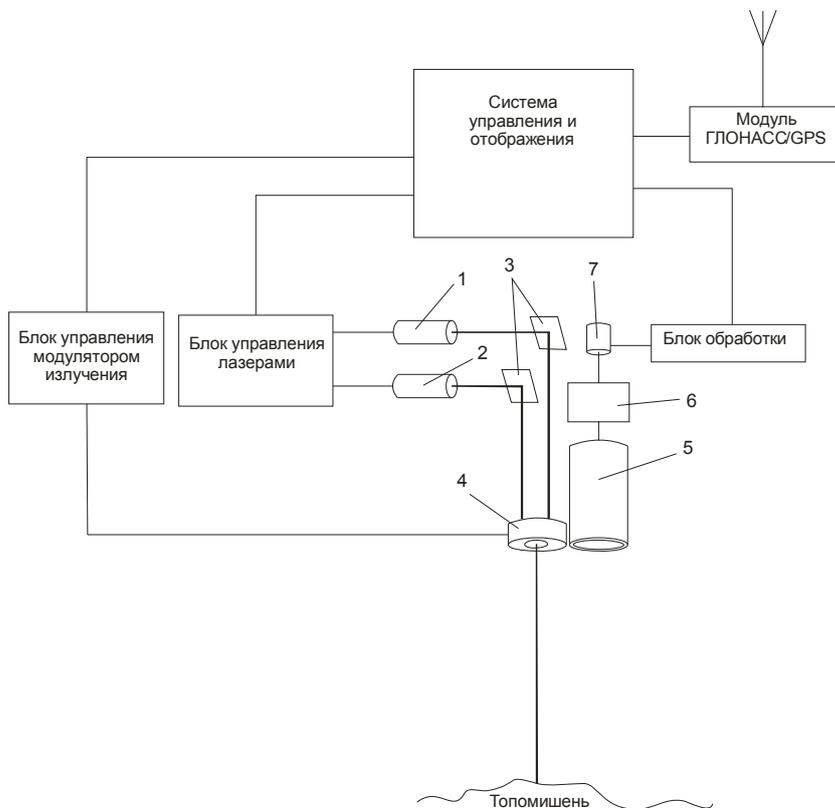
Тем не менее, полученное решение позволяет определять концентрацию искомого газа вдоль трассы зондирования в т.ч. и углеводородов.

При конфигурировании аппаратуры лидара длины опорной и зондирующей волн следует выбирать таким образом, чтобы одна из них находилась внутри линии спектра поглощения, а другая вне ее. Кроме того, интервал между ними должен быть как можно меньше, чтобы коэффициенты отражения, поглощения и рассеяния на других атмосферных газах были равны.

Учитывая тот факт, что чувствительность метода ДП в значительной степени зависит от ширины линии зондирующего лазерного излучения (с ее увеличением чувствительность метода снижается), следует выбирать линию поглощения, для которой отношение  $\Delta\sigma/\Delta\lambda$  максимально, где  $\Delta\lambda = \lambda_{on} - \lambda_{off}$ .



**Рис.1. Спектры определяемых углеводородов и выбранные для измерения их концентраций спектральные интервалы**



**Рис. 2. Общая структура лидара: 1,2 – лазеры, 3 – поворотные зеркала, 4 – модулятор лазерного излучения, 5 – приемный телескоп, 6 – спектроанализатор, 7 – приемный фотозэлемент**

В целях практической реализации трассы лидара был разработан экспериментальный вариант бортового комплекса для обнаружения поверхностных утечек метана. В том числе разработаны схемы оптической части лидара, электронные модули управления лазером и система обработки данных и предварительной топологической привязки [9]. На рис. 2 приведена общая структура лидара.

Принцип функционирования разрабатываемого комплекса для поиска выходов метана основан на методе дифференциального поглощения. Посылаемые по одному и тому же пути чередующиеся импульсы лазерного излучения имеют близкие значения длин волн  $\lambda_1=3,3922$  мкм и  $\lambda_2=3,3912$  мкм, причем  $\lambda_1$  на порядок сильнее, нежели  $\lambda_2$

поглощается метаном. Из-за близости длин волн посылаемых импульсов, коэффициенты рассеивания на молекулах атмосферных газов и аэрозолях, а так же коэффициенты отражения для них одинаковы, таким образом, сравнение двух сигналов после регистрации собранного приемным объективом излучения дает меру интегрального содержания метана вдоль оптического пути. В качестве источника излучения в передающем блоке используются два лазерных генератора, имеющие длины волн генерации  $\lambda_1=3,3922$  мкм и  $\lambda_2=3,3912$  мкм, с выходными мощностями  $P_1=10$ Вт и  $P_2=5$ Вт соответственно. Затем излучение поступает на формирующую оптическую систему передающего блока. Формирующая оптическая система осуществляет модуляцию излучения таким образом, что на выходе образуется последовательность чередующихся квазипрямоугольных импульсов по двум длинам волн и отличающихся по амплитуде. Частота модуляции (переключения) составляет 3400 Гц. Промоделированное излучение направляется оптической системой на отражающий объект. Часть отраженного излучения улавливается приемным объективом и фокусируется на фоторезисторе (матрице). При этом возникает переменный электрический сигнал, величина которого пропорциональна разности мощностей принятых импульсов излучения с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Сигнал с приемной матрицы усиливается при помощи усилителя опорного канала и поступает в микропроцессорный блок для обработки и синхронизации работы приемопередающего тракта.

Основные характеристики прохождения в атмосфере и отражение для излучения с близкими длинами волн одинаковы. Поэтому при сравнительно малом содержании метана на пути лазерных лучей сигнал с фотоприемника будет представлять собой последовательность чередующихся импульсов разной амплитуды, аналогичную последовательности посылаемых импульсов. Излучение лазера с большой мощностью и длиной волны  $\lambda_1=3,3922$  мкм ослабляется метаном на порядок сильнее и при значительной концентрации метана на фотоприемнике будет так же последовательность чередующихся импульсов разной амплитуды, но находящаяся в противофазе к последовательности посылаемых импульсов. Момент изменения фазы принимаемого сигнала на  $180^\circ$  характеризует некоторое пороговое содержание метана.

Таким образом, предложен метод определения выходов природного газа, основанный на дистанционном лидарном зондировании приземного слоя, с дальнейшей локализацией и топологической привязкой к местности предполагаемых месторождений, что позволит проводить исследования и поиск полезных ископаемых в труднодоступных местах.

Предложенная математическая модель лидара, предназначенного для определения концентрации углеводородов, позволяет построить, с использованием современных оптических средств и средств вычислительной техники, устройство высокого быстродействия и точности.

Разрабатываемый бортовой комплекс может применяться для дистанционного зондирования с целью получения данных о концентрации предельных углеводородов (метан, этан, бутан, пропан) в околосреднем слое. Что, в свою очередь, позволит значительно сократить время и затраты на обнаружение новых нефтегазовых месторождений.

Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы" (код проекта 14.578.21.0021)

### Список литературы

1. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992, 231 с.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987, 189 с.
3. Van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. New York: Dover Publications, 1981, 470 p.
4. Зуев В.Е. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 256 с.
5. Хинклин Э.Д. Лазерный контроль атмосферы. М.: Мир, 1979, 416 с.
6. Метод бездисперсионного абсорбционного измерения концентрации метана на основе аппаратной методики измерителя с открытым оптическим каналом. / О.В. Непомнящий, С.Ф. Тэн, В.А. Хабаров // Информационно измерительные и управляющие системы №2 т.9. – М.: ЗАО Издательство «Радиотехника», 2011, – С.3-7
7. Kovalev V.A., Eichinger W.E. Elastic Lidar: Theory, Practice and Analysis Methods. New York, JWS Inc., 2004.
8. Математическое и аппаратное обеспечение комплекса геофизических исследований для дистанционного, авиационного зондирования земной поверхности./ О.В. Непомнящий, С.Ф. Тэн, В.А. Хабаров // Авиакосмическое приборостроение № 10.– М.: Научтехиздат, 2011, – С. 38-43
9. Создание помехозащищенных навигационных приемников, способных измерять пространственную ориентацию объектов / В.Н. Тяпкин, Ю.Л. Фатеев, Д.Д. Дмитриев, Е.Н. Гарин, В.Н. Ратушняк // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – № 5. С. 61–65.

УДК 528.854.2

## АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ШИАРЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

К.В. Симонов, Л. Кадена

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

ФГБУН «Институт вычислительного моделирования СО РАН»

e-mail: [simonovkv@icm.krasn.ru](mailto:simonovkv@icm.krasn.ru), [ecuadorx@gmail.com](mailto:ecuadorx@gmail.com)

В работе предлагается модификация метода геометрического анализа визуальных данных за счет обеспечения выбора эффективных алгоритмов шиарлет-преобразования, что позволяет повысить точность выделения линейных структур и визуальное качество изображений изучаемых объектов и их контуров.

*Ключевые слова: геометрический анализ визуальных данных, шиарлет-преобразование изображений*

### Введение

Работа посвящена проблеме повышения качества обработки и интерпретации визуальных данных путем разработки новых алгоритмических средств решения задач геометрического анализа изображений, основанных на вейвлет- и шиарлет-преобразованиях. Шиарлет-преобразование является новым методом многомерного анализа данных наблюдений. Этот метод отличается возможностью определения анизотропной составляющей в анализируемых данных, что может быть применимым для решения задач обработки изображений.

Идея шиарлет-преобразования опирается на хорошо разработанную теорию вейвлет-анализа и является её естественным расширением. Так, параметрами шиарлет-

преобразования являются не только смещение и коэффициент масштабирования, но и сдвиг (shear). Исследования по шиарлет-анализу в последние годы отмечены в работах Д. Лабате и Г. Кутинек (Labate D., Kutyniok G., 2006-2014). Шиарлет-преобразование применимо для анализа сложных изображений и учитывает масштаб, пространство и направление. Шиарлет-преобразование позволяет работать с криволинейными сингулярностями, учитывать анизотропные свойства исследуемой среды.

Целью работы является повышение качества обработки и интерпретации визуальных данных путем модификации алгоритмического обеспечения решения задач геометрического анализа изображений. Поставленная цель определила необходимость решения следующих задач: провести анализ методов и алгоритмов геометрического анализа визуальных данных, основанных на вейвлет- и шиарлет-преобразованиях; модифицировать метод геометрического анализа изображений применительно к решению основных задач геомониторинга; выполнить экспериментальные исследования разработанного алгоритмического обеспечения.

### 1. Вычислительная методика

Исходя из существующих в современной научной литературе теоретических и методических представлений [1-2], предлагается модификация метода геометрического анализа визуальных данных, позволяющую решать широкий класс задач обработки сложных изображений геомониторинга на основе шиарлет-преобразования. При этом на основе исследуемых четырех алгоритмов шиарлет-преобразования решаются следующие задачи геомониторинга: разделение точек и кривых на изображениях; выделение контура на изображениях; фильтрация и шумоподавление.

Предлагается вычислительная методика решения указанных задач, которая состоит из следующих этапов:

- подготовительный этап, когда исходное изображение форматируется под расчетный шаблон и намечается последовательность расчетных процедур для оптимального решения поставленной задачи;

- запуск и настройка алгоритмического обеспечения шиарлет-преобразования, выбор конкретного алгоритма в зависимости от поставленной задачи и от условий яркости и контрастности изображений;

- загрузка и обработка исходных изображений для различных расчетных условий в зависимости от поставленной задачи;

- анализ получаемых расчетных изображений в результате шиарлет-преобразования, контрастирование изображения на основе применения алгоритмов *A*, *B*, *C* и *D*, которые определяются следующим образом: *A* – алгоритм FFST (Hauser, 2013); *B* – алгоритм Shearlet toolbox (Easley, Labate, 2013); *C* – алгоритм Shearlab (Kutyniok, Lim, 2011); *D* – алгоритм TGVSHCS (Jing, 2013), который является аналогом алгоритма *A*.

В качестве количественного параметра оценки эффективности исследуемых алгоритмов выбрано среднее время работы алгоритмов. Для сравнения расчеты проводились на изображениях различных размерностей. Показано что с помощью алгоритма *C* расчеты выполняются быстрее, чем на основе алгоритма *A* на изображениях больших размерностей, в то время как алгоритм *A* имеет незначительное преимущество по времени выполнения на изображениях небольшого размера.

С применением указанных алгоритмов анализировались изображения для ряда смежных областей (снимки распространения пожара, медицинская томография и геодинамика). Проводились исследования указанных типов снимков для различных условий яркости и контрастности. При исследовании возможностей шумоподавления выполнялись оценки для шума Гаусса.

## 2. Задача геометрического разделения визуальных данных

В соответствии с проведенным исследованием указанных алгоритмов шиарлет-преобразования предлагается для решения задачи геометрического разделения визуальных данных применять алгоритм *C*. Исходное изображение представлено на рис. 1 (а), результаты разделения приведены: на рис. 1 (б) – точки; на рис. 1 (в) – линии и кривые. Повышение точности разделения оценивается на 5–12% по сравнению с применением кервлетов.

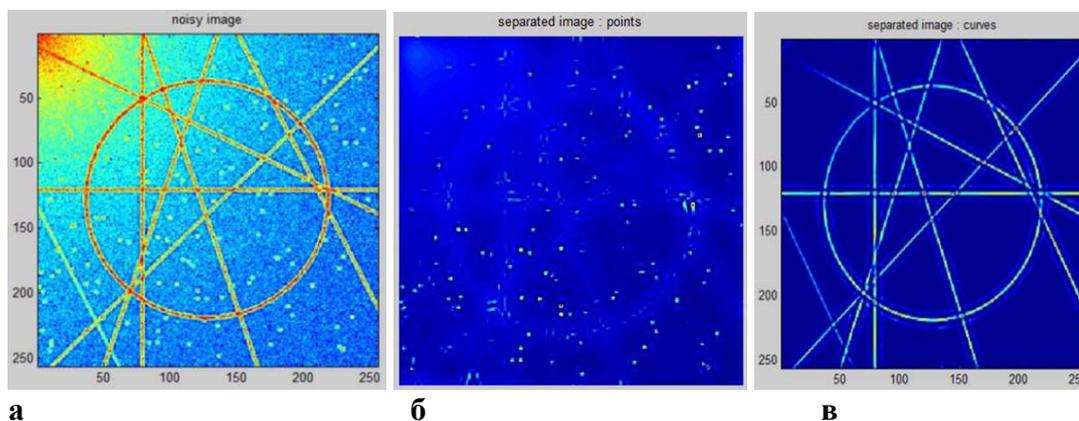


Рис. 1. Геометрическое разделение исходного изображения: а) – исходное изображение: точки и кривые с шумом; б) – разделение точек; в) – разделение линий и кривых

## 2. Задача выделения контура объектов на изображении

Исследование алгоритма *FFST* (*A*) выявило, что контуры объектов можно получить как сумму коэффициентов шиарлет-преобразования фиксированного значения параметра для последнего масштаба и всевозможных значений параметра сдвига. В связи с этим предлагается использовать эту особенность при решении задачи. Результаты решения с помощью модифицированного алгоритма *FFST* показаны на рис. 2. Приведены также результаты соответствующих расчетов для других наборов изображений и сравнение с фильтрами Собела (Sobel) и Превитта (Prewitt). Модифицированный алгоритм сравним по точности с классическими алгоритмами Собела и Превитта.

## 3. Задачи фильтрации и шумоподавления

В рамках разработанной вычислительной методики выполнен сравнительный анализ алгоритмов дискретного шиарлет-преобразования для решения задач фильтрации визуальных данных и шумоподавления на изображениях. Выполнено исследование алгоритма *A*, на рис. 3 приведены результаты решения задачи выделения линейных особенностей для данных геомониторинга.

Для решения шумоподавления выполнено исследование алгоритмов *B*, *C* и *D* для снимков из различных предметных областей (распространение пожара, медицинская томография; геоэкология и геодинамика). Исследовались особенности работы алгоритмов *B*, *C* и *D* для различных условий яркости и контрастности изображений, проводились оценки для шума Гаусса. Проведен анализ алгоритмов *B* и *C* с использованием метрики *PSNR* и оценки визуального восприятия качества для различных изображений. Сравнение алгоритмов *B* и *C* (метрика *PSNR*) при решении задачи шумоподавления для различных типов изображений представлено на рис. 4.

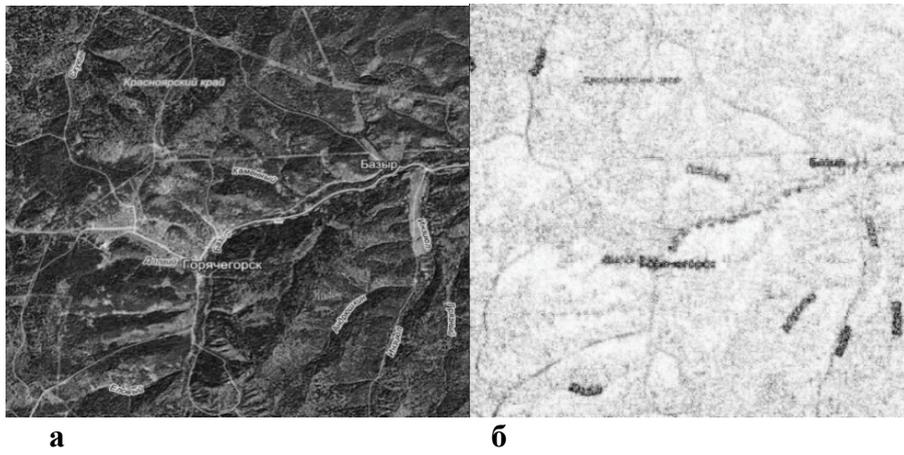


Рис. 2. Выделение контура объектов на изображения данных геомониторинга: а) – исходное изображение данных экологического мониторинга; б) – результат анализа: выделение контура объектов (инвертированное изображение)

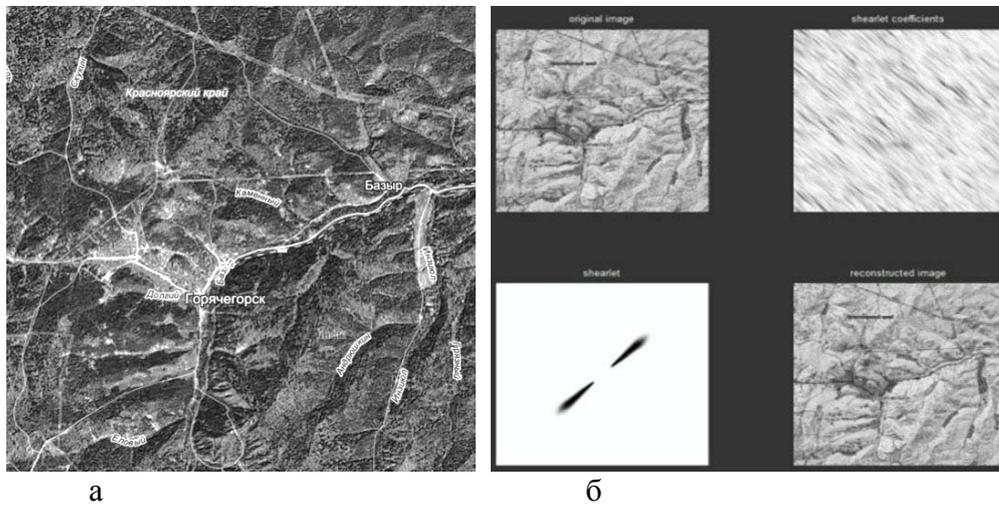


Рис. 3. Результаты решения задачи выделения линейных особенностей (сингулярности) на основе алгоритма *A*: а) – исходное изображение; б) – обработка изображения (инвертированное изображение), где 1 – исходное изображение; 2 – шварлет-коэффициенты; 3 – мгновенный шварлет; 4 – восстановленное изображение

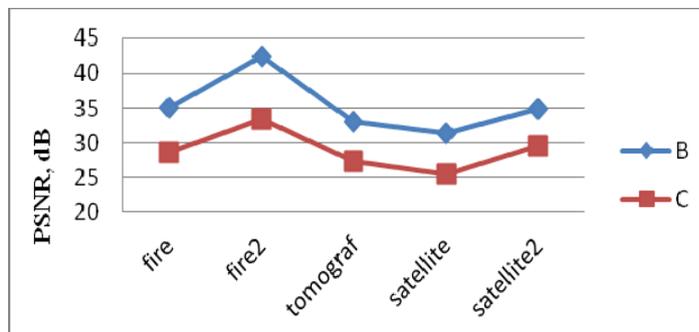


Рис. 4. Сравнение алгоритмов *B* и *C* в задаче шумоподавления для различных изображений

Как видно графиков, действие алгоритма *B* эффективнее по сравнению с алгоритмом *C* для всех наборов изображений (на 22–26 %) в тоже время показано, что алгоритм *C* превосходит алгоритм *B* по быстродействию 1.7–2.6 раза в зависимости от размера изображения.

### **Заключение**

Модифицирован метод геометрического анализа визуальных данных геомониторинга, основанный на шиарлет- и вейвлет-преобразованиях, повышающий точность выделения линейных структур и визуальное качество изображений изучаемых объектов путем выбора соответствующего алгоритма шиарлет-преобразования в зависимости от решаемой задачи

Рекомендуется применение модифицированного алгоритма *A* – для выделения контура объектов на изображении, модифицированный алгоритм сравним по точности с классическими алгоритмами Собела и Превитта; алгоритма *B* – для решения задач шумоподавления изображения (повышение качество шумоподавления на 22-26 % по сравнению с алгоритмом *C*); алгоритма *C* – для решения задач шумоподавления и разделения изображений (повышение точности на 5-12 % по сравнению с применением кервлетов). Алгоритм *B* уступает алгоритму *C* в быстродействии при решении задачи шумоподавления, поэтому для крупных снимков (картография и пожары) возможно применение алгоритма *C*.

### **Список литературы**

1. Кириллова С.В., Симонов К.В., Кадена Л. Алгоритм дискретного шиарлет-преобразования // Труды Пятой международной конференции «Системный анализ и информационные технологии». Т. 2. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. – С. 356-361.
2. Simonov K.V. Kirillova S.V., Cadena L. Fast shearlet transform algorithms // Abstracts of Lecturers and Young Scientists Second China-Russia Conference «Numerical Algebra with Applications». – Rostov-on-Don: Southern Federal University Publishing, 2013. – С. 122-123.

**УДК 528.854.2**

## **СОЗДАНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

С.Г. Мышляков

Компания «Совзонд»

e-mail: [myshliakov@sovzond.ru](mailto:myshliakov@sovzond.ru)

Продемонстрирован опыт реализации многофункциональной системы космического мониторинга окружающей среды регионального уровня на примере Воронежской области. Система разработана компанией «Совзонд» по заказу Департамента связи и массовых коммуникаций Воронежской области. Рассмотрены методы и принципы, положенные в основу системы, показаны сферы ее применения для решения задач экологической тематики.

*Дистанционное зондирование Земли, космические снимки, экологический мониторинг, геоинформационная система, Воронежская область, недропользование, свалки, среда обитания животных, водные ресурсы.*

## **Введение**

Последние годы в Российской Федерации отмечается повышение интереса со стороны органов государственной власти и местного самоуправления ко внедрению космических технологий. На федеральном и региональном уровнях принят ряд законодательных актов, касающихся использования спутниковой системы ГЛОНАСС и результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития регионов и Российской Федерации в целом. Компания «Совзонд» активно и успешно сотрудничает со многими субъектами Российской Федерации в части разработки отраслевых геоинформационных систем.

В Воронежской области правительством утверждена долгосрочная областная целевая программа «Использование спутниковых навигационных технологий и других результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития Воронежской области на 2013 - 2015 годы». В рамках данной программы компанией «Совзонд» был заключен договор на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке информационной системы «Мониторинг территории Воронежской области, состояния окружающей среды региона» (далее Система). Целью создания Системы является обеспечение органов государственной власти, информирование органов местного самоуправления, юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, граждан актуальной информацией о состоянии окружающей среды.

### **Состав и структура Системы**

Система включает в себя 4 отраслевые подсистемы:

1. Подсистема мониторинга инфраструктуры эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых (гранит, никель, огнеупорные глины, писчий мел и др.);
2. Подсистема мониторинга мест размещения отходов производства и потребления Воронежской области;
3. Подсистема мониторинга среды обитания объектов животного мира, в том числе среды обитания охотничьих ресурсов;
4. Подсистема мониторинга водных объектов и гидротехнических сооружений.

Указанные подсистемы обеспечивают получение тематической информации в виде обработанных космических снимков, векторных слоев ГИС, аналитических функций. При условии постоянного наполнения Системы оперативными данными ДЗЗ будут обеспечены регулярные наблюдения за территорией Воронежской области, процессами и явлениями, на ней происходящими, состоянием и динамикой окружающей среды, в том числе отдельных ее компонентов и экосистем.

В структурном отношении Система состоит из следующих элементов:

1. *Автоматизированное рабочее место (АРМ) администратора.*
2. *База геоданных.*
3. *ГИС-сервер.*
4. *Картографическое веб-приложение.*

Основным источником информации для системы являются космические снимки. Для выполнения работ были использованы снимки, полученные различных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

1. Данные сверхвысокого разрешения со спутников *WorldView-2* и *Pleiades* (снимки на территории крупных городов и их окрестностей: Воронеж, Нововоронеж, Борисоглебск, Лиски, Россошь);
2. Данные высокого разрешения с группировки спутников *RapidEye*;
3. Данные среднего разрешения со спутников *DMC*, *Landsat 5*, *8* (многократное перекрытие всей территории Воронежской области за 2010 – 2013 гг);

Помимо космических снимков для выполнения работы были привлечены следующие источники информации:

- данные геопортала Воронежской области;
- данные Open Street Map (OSM);
- цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM;
- публичная кадастровая карта Росреестра;
- данные общедоступных интернет-геосервисов (Google, Yandex, Wikimapia и др.);
- данные ресурса Global Forest Change 2000 – 2012 (Университет Мэрилэнда).

В качестве программного обеспечения для обработки снимков был использован программный комплекс *ENVI 5.0*. Для выполнения ГИС-анализа и подготовки пространственных данных к веб-публикации был использован программный комплекс *ArcGIS for Desktop 10.1*. В качестве СУБД для хранения геоданных был использован *SQL Server 2008 R2*. Для публикации геоданных в веб-среде и создания картографических сервисов использовался *ArcGIS for Server Enterprise Standard 10.2*.

### **Обработка космических снимков и получение тематических карт**

Обработка космических снимков и ГИС-анализ - важнейшие этапы информационного наполнения Системы. Для каждой отраслевой подсистемы были разработаны свои технологические приемы обработки данных ДЗЗ и получения на их базе тематических цифровых карт.

*Дешифрирование месторождений полезных ископаемых и сопутствующей инфраструктуры.* В основе технологии лежит визуальный анализ снимков сверхвысокого разрешения (WorldView-2, Pleiades, а также RapidEye) и идентификация объектов на основе набора дешифровочных признаков (тон, цвет, форма, текстура). В результате дешифрирования были выявлены объекты недропользования, зафиксированы имеющие место негативные экзогенные процессы, такие как эрозия, обвалы, суффозия, подсчитана площадь карьеров по добыче полезных ископаемых открытым способом. Одной из задач данной подсистемы является идентификация несанкционированных карьеров по добыче песчано-гравийного материала, распространенных на территориях, прилегающих к трассе М4 «Дон».

*Обнаружение мест складирования отходов и несанкционированных свалок.* Технология обнаружения свалок, как легальных, так и несанкционированных основана на визуальном дешифрировании снимков сверхвысокого разрешения. По набору дешифровочных признаков были выделены участки складирования отходов, подсчитана их площадь.

*Дешифрирование и геоинформационное картографирование среды обитания объектов животного мира.* Элементами среды обитания объектов животного мира, подлежащими картографированию являются описанные по определенным правилам ландшафты и земельные угодья. Задача использования космических снимков состоит в том, чтобы с максимальной достоверностью выявить расположение, определить структуру и подсчитать площадь категорий и классов элементов среды обитания охотничьих ресурсов. К таковым категориям и классам относятся: леса (хвойные и лиственные), молодняки и кустарники, болота, лугово-степные комплексы, сельскохозяйственные угодья, внутренние водные объекты, пойменные комплексы, преобразованные и поврежденные участки (гари) и территории, непригодные для ведения охотничьего хозяйства. Данные о расположении категорий и классов среды обитания являются основой для бонитировки охотничьих угодий и иных мероприятий охотустройства. Учитывая состав целевых классов для дешифрирования, кроме охотустроительных задач полученные данные могут быть использованы и для других целей, таких как охрана природы, территориальное планирование и т.д.

В ходе выполнения работ была разработана технология автоматизированного дешифрирования среды обитания животных по разновременным снимкам Landsat 5 и Landsat 8, объединенным в мультिवременные мультиспектральные композиты. Для дешифрирования ландшафтов и земельных угодий, составляющих элементы среды обитания животных, было применено последовательное иерархическое дешифрирование, заключающееся в последовательном отделении и маскировании целевых классов. Для каждого целевого класса применяется свой набор дешифровочных признаков и методов: анализ значений спектральной яркости пикселей, классификации по методам Isodata, спектрального угла, параллелепипеда и с использованием дерева принятия решений, морфометрический анализ ЦМР, генерализация растровых и векторных покрытий.

В результате выполнения данного этапа на всю территорию Воронежской области была создана карта среды обитания объектов животного мира 1:50 000.

*Технологии дистанционного мониторинга водных объектов и гидротехнических сооружений.* Для отраслевой подсистемы мониторинга водных ресурсов был получен набор тематических карт, всесторонне отображающих водные объекты области и результаты антропогенного воздействия на водные объекты.

Тематический слой водных объектов (рек, озёр, водохранилищ, прудов) был получен по разновременным снимкам Landsat и RapidEye. Для автоматизированного выделения водных объектов были использованы нормализованные разностные индексы с применением зелёного, ближнего ИК и коротковолнового ИК каналов. Для территории Воронежского водохранилища, крупнейшего гидротехнического сооружения области, были созданы карты мутности воды и содержания хлорофилла в воде (в относительных величинах). Карты были построены в автоматизированном режиме для различных дат за 2011 – 2013 годы и очень информативно отображают сезонную динамику экологического состояния водоема. В будущем при наличии данных натурных измерений возможно построение карт абсолютных значений мутности и содержания хлорофилла. По снимкам сверхвысокого разрешения на территории крупных населенных пунктов были выявлены основные объекты, являющиеся источниками загрязнения воды, а также места производства работ на водных объектах. В режиме визуального дешифрирования было проанализировано состояние сооружений инженерной защиты и берегоукреплений, а также выделены участки наиболее интенсивного проявления абразии. На основе морфометрического анализа ЦМР SRTM были построены карты локальных водосборов на территории Воронежской области, а также смоделированы зоны затопления паводковыми водами (менее 1 м, от 1 до 3 м, от 3 до 5 м, от 5 до 7 м).

### **Заключение**

Главным результатом выполнения работ является действующая система космического мониторинга окружающей среды Воронежской области, развернутая на серверах заказчика. В результате выполнения работ систематизированы дешифровочные признаки для визуального и автоматизированного дешифрирования объектов экологического мониторинга, включенных в состав Системы, созданы и апробированы технологии, позволяющие выполнять тематическую обработку данных ДЗЗ и ГИС-анализ в целях мониторинга компонентов окружающей среды, происходящих процессов и явлений.

Главным условием успешного функционирования Системы является оперативное наполнение данными ДЗЗ. При отсутствии оперативной поставки снимков Система может потерять своё основное назначение – служить экраном для мониторинга окружающей среды, а будет лишь статичным срезом состояния окружающей среды на определенный момент времени. Кроме того, для того чтобы созданная система стала

эффективным инструментом мониторинга окружающей среды, необходима интеграция с существующими информационными системами регионального и федерального уровней. Интеграция должна обеспечить поступление данных не только из космоса, но и из других источников наблюдений, в первую очередь наземных (гидрометеорологические данные, результаты почвенно-агрохимического мониторинга, данные по содержанию загрязняющих веществ в водоемах, данные мониторинга пожароопасной ситуации, и т.д.)

### **Список литературы**

1. Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке информационной системы Мониторинга территории Воронежской области, состояния окружающей среды региона (Отчет о НИР) / ООО «Компания Совзонд»; рук. темы С.Г. Мышляков. М., 2013. 122 с.

**УДК 004.031.2**

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДЗЗ ПРИ ПОИСКАХ И ОЦЕНКЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ**

Н.В. Вилор, М.А. Вилор  
Институт геохимии СО РАН  
Иркутский государственный университет

Результаты, представленные в работе, получены по данным тепловой космической съемки, ТКС (Горный и др., 1993). Этот эффективный метод из комплекса методов ДЗЗ применяется с целью изучения распределения интенсивности собственного уходящего инфракрасного, ИК излучения поверхности Земли в Байкальской рифтовой зоне, БРЗ для оценки эндогенного теплового потока и выявления геотермальных ресурсов, ГР. Совместно с ТКС использованы наземные геохимические и геофизические исследования. Актуальность поисков и оценки ГР обусловлена тем обстоятельством, что в южной части Восточной Сибири быстро развивается техносфера, взаимодействующая с поверхностью верхней коры и извлекающая ее ресурсы. Активно, расширенно эксплуатируются запасы твердых, горючих энергетических полезных ископаемых, пресных и минеральных подземных вод. Но в связи с необходимостью альтернативных источников энергии в особо охраняемой Центральной экологической зоне Байкальской природной территории, ЦЭЗ БПТ рассматриваются неограниченные запасы геотермальной энергии, ГЭ – термальной, тепловой энергии верхней коры в технически доступной части, а также геотермальные ресурсы как важнейшее полезное ископаемое. Их рассчитываемые и прогнозируемые запасы выявляются и станут доступными для рентабельного использования в ближайшем будущем. Геотермальные ресурсы соответствуют количеству тепла, содержащемуся на определенном интервале глубины в верхней части земной коры с внешним температурным пределом, определяемым среднегодовой температурой поверхности данной территории. Глубина нижнего предела, ограниченная технологическими возможностями, не превосходит 3÷5 км.

С применением ТКС (Горный и др. 1993) в работах (Вилор и др., 2001, 2002, 2009) установлено пространственное совмещение и генетическая связь ареалов уходящего поверхностного ИК излучения с сейсмоактивными разломами различной кинематики. Уходящий поверхностный ИК поток БРЗ измеряется на мультитременной усредненной карте изображений из архива Центра космического мониторинга ИСЗФ СО РАН и ВСНИИГиМС г. Иркутск по сценам, переданным искусственными спутниками, ИС серий NOAA и TERRA (EOS) от радиометров AVHRR и MODIS при

съемках во второй половине ночи от начала сентября по март. Детальные измерения проведены по региональным разломам, ограничивающим впадины БРЗ и на краевом шве Сибирской платформы, по сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ . Усредненный приразломный ИК поток достигает  $55 \text{ мВт/м}^2$ . ср. мкм в диапазоне 10 мкм.. Измеряемый уходящий поверхностный яркостный поток ИК излучения связан через геометрический фактор  $G$  с рассчитываемым поверхностным тепловым потоком, ПТП по уравнению Планка (Госсорг, 1988). Выходы разломов трассируются непрерывными максимумами величин уходящего ИК потока, измеряемого спутниками указанных серий и наибольшим уровнем яркости отраженного радиолокационного сигнала (по измерениям ENVISAT, съемок 2004-2005 г и ALOS PALSAR съемок 2010-2012 г). Максимальные значения яркостной, радиационной температуры  $T$ , вычисляемой из измеренного яркостного потока  $L$  по стандартным программам, имеют непосредственную пространственную связь с выходами зон разломов, контролирующих размещение месторождений горячих минеральных вод.

В районах со сложной геоструктурой выявлены основные свойства уходящего поверхностного ИК излучения региональных разломов, сейсмической активности которых обычно сопутствует повышенный тепловой поток (Вилор и др. 2008<sub>2</sub>):

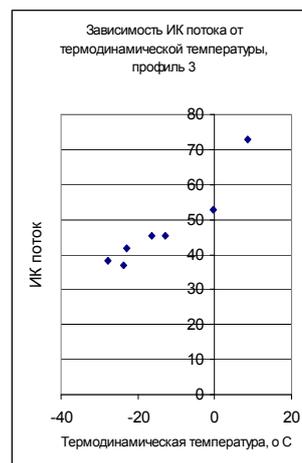
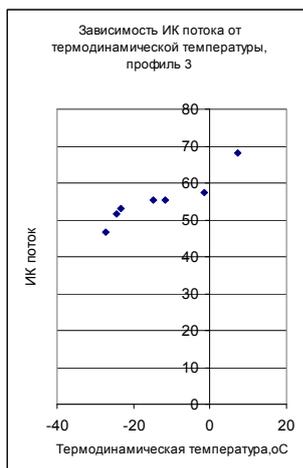
- уходящее ИК излучение с повышенной интенсивностью и контрастностью располагается на поверхности сейсмически активных современных разломов и определенных литологических комплексов,
- поверхностные формы аномального уходящего ИК излучения наблюдаются в виде линейной, линейно-контурной, полосовидной и ареальной разновидностей,
- ИК излучение первых 2-х разновидностей локализовано на приразломных тектогенных склонах независимо от их экспозиции относительно дневной солнечной радиации,
- проекция излучающей поверхности сужается с увеличением крутизны склонов, до средней ширины - 4-6 км, у двух последних разновидностей она расширяется до 35 км,
- линейная и линейно-контурная разновидности уходящего излучения характеризуются узкими максимумами интенсивности, у полосовидной и ареальной они более широкие с градиентами в краевых частях,
- излучение наиболее контрастно в ночное время осеннего и зимнего сезонов; на заснеженной поверхности все локальные объекты отчетливо выделяются повышенным уровнем собственной ИК эмиссии,

На величину интенсивности ИК потока, уходящего от сейсмоактивных разломов БРЗ и измеряемой сенсорами ИС, влияет годовой ход термодинамической температуры поверхности. Изменения временных градиентов ИК излучения образуют минимум в октябре-ноябре. Их наименьшая величина характеризует постоянное для каждого разлома значение уходящего поверхностного ИК потока, независимое от термодинамической температуры подспутниковой территории. Эта константа соответствует квазистационарному ИК потоку –  $L_{\text{const}}$ . Квазистационарные потоки разломов, выделяемые по минимуму среднемесячных градиентов - приращений уходящего ИК потока, являются характеристиками их собственного ИК излучения. Общая величина уходящего потока суммируется из его значений в диапазоне 8 и 10 мкм (таблица 1). На ступенчатых графиках зависимости  $L$  от термодинамической температуры на изученных разломах (рисунок) образование ступени связано со сравнительно кратковременной экспозицией собственно квазистационарного поверхностного потока

**Таблица 1**

**Квазистационарные поверхностные уходящие ИК потоки (мВт/ м<sup>2</sup> срд.мкм) крупных региональных разломов БРЗ**

Разлом	В диапазоне 10 мкм	Суммарный (10 мкм + 8 мкм)
Тункинский	55.811	103.027 ± 2.22
Приморский	60.803	112.242 ± 3.492
Баргузинский	46.298	85.466 ± 1.235
Краевой шов платформы	55.831	103.064 ± 0.947



**Рисунок. Зависимость среднего поверхностного ИК потока от термодинамической температуры территории на крупных разломах: А – Тункинском, Б – Баргузинском, X – средняя термодинамическая температура, °С, Y – ИК поток**

Уходящий поток, измеряемый орбитальными радиометрами,  $L_{det}$ , таким образом, состоит из основной константы –  $L_{const}$  и приращений  $\Delta L$ , зависящих от термодинамической температуры подспутниковой территории в момент пролета ИС, т.е.  $L_{det} = L_{const} + \Delta L$ , и эти приращения могут быть как положительными, так и отрицательными:

$$\Delta L = L_{det} - L_{const} ,$$

что дает концептуальную схему формирования квазистационарного поверхностного ИК потока разломов. Физическая природа  $\Delta L$  определяется тепловыми свойствами излучающего слоя и подстилающего субстрата

Особенности латеральной изменчивости ИК потока по протяженности разломов оценены способом определения их максимумов через 1 минуту географической широты или долготы в зависимости от направления по простиранию тектонических нарушений. Спектральный анализ выявленной периодичности интенсивности ИК излучения проведен с целью получения колебательных характеристик процесса методом математического моделирования в программе «Спектр» (Вилор и др., 2008<sub>1</sub>, 2009). Неоднородности распределения уходящего поверхностного ИК потока наиболее заметны по амплитудам колебаний величины потока, объединяясь в три группы:

1. единичные крупные глубокие минимумы;
2. высокочастотные с амплитудой не более 0.5-1.5 мВт/ м<sup>2</sup>.срд.мкм;
3. низкочастотные региональные с длиной волны от 64 до 300 километров с амплитудой до 2 – 3.8 мВт/м<sup>2</sup>.срд.мкм и более.

Вариации первой группы сопряжены с пересечением разломов крупными речными долинами или плотно сближенными менее значительными водотоками. Вторая группа коррелирует с локальными неоднородностями рельефообразующих форм и погрешностями измерений, а третья - с региональными изменениями геологоструктурной ситуации. Выделенные низкочастотные длинноволновые геометрические колебательные компоненты яркостного потока имеют структурную приуроченность, связанную с изменчивостью геологической среды в которой размещаются разломы. Это, прежде всего, вариации региональной проницаемости – трещиноватости в пределах зон приразломного разрушения. Наблюдаемые вариации интенсивности уходящего ИК излучения по простиранию разломов различаются амплитудой и геометрической протяженностью. При математическом исследовании выделяются низкочастотные колебания с длиной геометрической волны 94.231 км при амплитуде около 2.2 мВт/м<sup>2</sup>стр.мкм, для аналитического представления которых достаточно полинома 4-й степени. Полная мощность уходящего поверхностного потока ИК излучения соответствует мощности его низкочастотной компоненты, которая превосходит с коэффициентом от  $1.23 \times 10^3$  до  $1.49 \times 10^5$  мощность высокочастотной компоненты. В целом же общая рассчитываемая мощность, интегрированная на всю учтенную длину разломов для спектрального ИК диапазона 8-10 мкм достигает 318 Вт/м<sup>2</sup>стр.мкм у Верхне-Ангарского разлома и 1577 Вт/м<sup>2</sup>стр.мкм - на краевом шве Сибирской платформы. Расположение экстремумов контролирует длинноволновую геометрическую компоненту интенсивность ИК потока. Значимая связь мощности уходящего поверхностного ИК излучения с деформационными параметрами зон разломов отражает, как и проведенные наземные измерения термодинамической температуры поверхности, влияние теплового потока верхней коры.

Гипотетические, рассчитанные запасы ГЭ, содержащейся в приповерхностных частях верхней коры БРЗ количественно значительно уступают тепловой эмиссии сейсмоактивных региональных разломов (таблица 2), ее предполагаемым запасам.

**Таблица 2**

**Тепловой потенциал приразломных аномалий ИК излучения на крупных региональных сейсмоактивных разломах БРЗ**

Разлом	Размеры аномалий ИК излучения			Глубинный поток, мВт/м <sup>2</sup> , по Лысак, 2002*	Мощность поверхностного потока, Вт	Интегральное теплосодержание по площади ИК-ано-маний, ГДж·10 <sup>6</sup>
	длина, км	ширина, км	площадь, км <sup>2</sup>			
Тункинский	130	5 – 7	780	60 / 146	0.8	19.678 / 624
Баргузинский	200	4	800	80 / 120	0.6	15.137 / 488
Приморский	200	2 -5	700	50 / 60	0.8	17.66 / 560
Краевой шов	400	5 -15	4000	40 /55	0.7	88.3 / 2800
Южно-Байкальский	170	3 - 5	595	70	0.4	7.505 / 238

В БРЗ региональные аномалии поверхностного уходящего ИК излучения с протяженностью в сотни километров пространственно ассоциированы с крупными геотермальными месторождениями, геотермальными полями, ГП. На них термальные источники редко имеют один сосредоточенный выход и чаще представлены

многочисленными разветвлениями-дериватами. ГП локализованы на пересечениях основных вмещающих разломов с поперечными нарушениями. Такое структурное положение ГП обуславливает локализацию термальных вод в объемных коллекторах – геотермальных резервуарах. Располагаясь в зависимости от положения трещинно – порового блока во вмещающих породах, они проявляются на поверхности термальными источниками и находятся в ареалах ИК тепловых аномалий. Соединение выходов региональных Южно-Тункинского, Главного Саянского и Южно-Байкальского разломов на южной окраине собственно Байкальского рифта экспонировано протяженной Тункино-Байкальской аномалией ИК излучения, установленной средствами ДЗЗ (Вилор, Минько, 2001, 2002). В пространстве аномального уходящего поверхностного ИК излучения располагаются все известные ГП Тункинской впадины БРЗ.

На основе картирования указанной региональной аномалии уходящего ИК излучения и комплекса наземных геохимических и геофизических исследований на южной границе Мурынско-Выдринской депрессии – наземной части южной впадины оз. Байкал выявлены прямые поисковые признаки скрытого ГП или геотермального резервуара для обеспечения запасов геотермальных ресурсов, остро дефицитных в южном Прибайкалье Иркутской области.

Изученная часть депрессии структурно соответствует пересечению Южно-Байкальского разлома и Снежинского сброса с возникновением тектонической зоны, в которой размещен подземный геотермальный резервуар. По данным наземных геофизических измерений с сетью профилей на 3-х смежных профилях обнаружен резервуар с объемом, составляющим  $175 \cdot 65 \cdot 75 \text{ м}^3$  и следующими рассчитанными геотермальными ресурсами:

- объем,  $\text{м}^3$ , 853125
- оценочные запасы воды при открытой пористости 10 %,  $\text{м}^3$ , 85313
- ожидаемая температура воды по аналогии с термальными водами Усть-Селенгинского артезианского бассейна (Бадминов и др., 2012),  $t \text{ } ^\circ\text{C}$ , 25
- возможный дебит (Голубев, 2007),  $D$ , л/с, 100
- теплосодержание, тепловой потенциал геотермального резервуара  $Q_{рез} = M \cdot C_{pw} \cdot \Delta t$ ,  $600.558 \cdot 10^4$
- $M$ - масса, кг,  $C_{pw}$ - удельная теплоемкость, воды, кДж/ кг·град,  $\Delta t$  – разность температур,  $^\circ\text{C}$ , ГДж
- тепловая мощность,  $N = D \cdot C_{pw} \cdot \Delta t$ , МВт 7.039
- гидрохимический тип вод по аналогии с водами Усть-Селенгинского артезианского бассейна гидрокарбонатно-натриевые (Бадминов и др., 2012). азотные,

Данные ТКС, структура активной тектонической зоны, локальные повышения концентраций подвижных рудных элементов и результаты определений геофизических свойств горных пород дают положительную перспективу для поисков геотермальных резервуаров в ЦЭЗ БПТ. Предполагаемая глубина залегания термальных вод не превышает 300-450 м. Прогнозные запасы рассчитанных геотермальных ресурсов достаточны для использования их в целях бальнеологии и теплоснабжения.

### Список литературы

1. Бадминов П.С., Мироманов А.В., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Тарасов И.А., Степаненко А.В. Перспективы поисков термальных вод в Усть - Селенгинском артезианском бассейне // Подземная гидросфера. Иркутск. Изд-во «ООО Географ». 2012. С. 285-288.
2. Вилор Н.В., Минько Н.П. Инфракрасное излучение Саяно-Байкальской горной области и Байкальской рифтовой зоны по данным спутникового мониторинга. // Доклады РАН. 2001. т.379. №5. С. 666-669.
3. Вилор Н.В., Минько Н.П. Спутниковый мониторинг инфракрасного излучения геолого-структурных элементов Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны. // Исследование Земли из космоса. 2002. №4. с. 55-61
4. Вилор Н.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю. Динамика уходящего инфракрасного излучения элементов геологической структуры земной поверхности по данным съемки со спутников NOAA и TERRA // Исследование Земли из космоса. 2009. № 3. с.3-15
5. Вилор Н.В., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю., Удилов Т.В. Программа для ЭВМ. Обработка данных космомониторинга элементов земной поверхности «Спектр». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613332 от 15.07.2008<sub>1</sub>
6. Вилор Н.В., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю. Методы тематического спутникового мониторинга: уходящее поверхностное инфракрасное излучение Земли как экологический фактор// Инженерная экология. 2008<sub>2</sub>. №4. с.32-50.
7. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академич. изд-во «Гео». 2007. 224 с.
8. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра. 1993. 128 с.
9. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир. 1988. 399 с.

УДК 528.8.04, 528.88

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА «ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ВСПАШКА» ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ СПУНИКОВЫХ ДАННЫХ

Е.А. Мальцев, Ю.А. Маглинец  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: mtorrero@mail.ru, YMaglinets@sfu-kras.ru

В работе описывается информационная модель объекта “противопожарная вспашка” и её использование в автоматизированной методике обнаружения данных объектов по спутниковым изображениям ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения.

*Ключевые слова:* противопожарная вспашка, ДЗЗ, автоматизация обработки космоснимков, вспашка.

### Введение

Задача контроля над пожароопасной ситуацией в районах осуществления сельскохозяйственной деятельности в условиях ландшафов Западной Сибири возникает

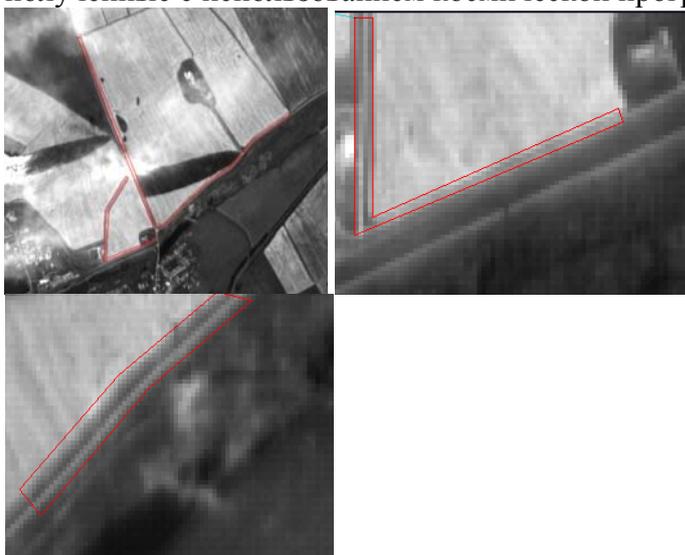
при решении вопросов организации эффективного природопользования, экологического мониторинга, предотвращения чрезвычайных ситуаций. Одним из методов снижения рисков возгорания в пожароопасный период является осуществление противопожарной вспашки. На данный момент в Красноярском крае контроль над выполнением мероприятий по опаживанию полей производится путем организации наземных наблюдений, что, с учетом существенной протяженности сельхозугодий для данного региона (около 1252,9 тыс.Га.), связано со значительными временными и материальными затратами. В работе дана формализация понятия «Противопожарная вспашка», как объекта, наблюдаемого на космоснимках с целью построения алгоритмов и методик автоматизированного детектирования объектов данного типа. Прикладная значимость исследования определяется необходимостью повышения эффективности решения задачи контроля соблюдения правил противопожарной безопасности, что, в свою очередь, позволит достичь экономии использования бюджетных средств за счет расширения возможностей применения спутниковых данных ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения.

### **Описание проблемной области**

Согласно [1], во время уборки урожая вспашка полей должна производиться в местах их прилегания к лесным и торфяным массивам, автомобильным и железным дорогам. Ширина вспашки должна составлять от 4~8 метров. Также, между строениями и лесными массивами должны создаваться на весенне-летний пожароопасный период защитные противопожарные полосы, устраиваемые с помощью бульдозеров, плугов и других почвообрабатывающих орудий.

На снимках дистанционного зондирования Земли полученных с космических аппаратов среднего и высокого пространственного разрешения, вспашка имеет линейную геометрическую форму. При этом протяженность вспашки может варьироваться в зависимости от площади опажанного сельскохозяйственного поля и целесообразности проведения работ по вспашке.

На рис. 1 (а, б, в) представлены изображения противопожарной вспашки полученные с использованием космической программы (КП) SPOT.



**Рис. 1. Снимки территорий Шарыповского района Красноярского края, полученные с космического аппарата ДЗЗ Spot в 2012 г.**

Таким образом, объектами противопожарной вспашки на цифровых снимках ДЗЗ будем считать объекты открытой почвы с линейной геометрической структурой и определенными пространственными признаками (места прилегания сельскохозяйственных полей к лесным и торфяным массивам, авто и железным дорогам).

К особенностям решаемой задачи отнесем следующее: ширина вспашки должна составлять от 4~8 метров [1], длина вспашки существенно больше её ширины (линейная геометрическая структура объектов); ограниченность мониторинга во времени. 1-2 месяца – сезон сбора урожая [1]; существенная протяженность сельхозугодий, (по Красноярскому краю – 1252,9 тыс.Га. [2]; спектральные характеристики целевых объектов имеют значения, близкие к спектральным характеристикам открытой почвы.

### **Информационная модель объекта «противопожарная вспашка».**

Для разработки методики классификации объектов противопожарной вспашки необходимо определить пространство признаков, описывающих данный объект.

**Топологические признаки:** исследуемый объект является многосвязным.

**Метрические признаки** [3].

$$\text{Толщина } T=4\pi(NS/NP^2) \rightarrow 0 \quad (1)$$

,где NS – площадь объекта, NP – периметр объекта.

$$\text{Размер } L \gg T \quad (2)$$

,где L – длина объекта, T – Толщина объекта.

### **Спектральные признаки**

Для открытой почвы значение NDVI должно лежать в интервале: 0,025-0,1 [4,5], соответственно выражение для этого признака будет следующим:

$$0,025 \leq NDVI \leq 0,1 \quad (3)$$

**Пространственные признаки.** Анализу подлежат участки территорий, определяемые взаиморасположением сельскохозяйственных полей и прилегающих к ним заранее классифицированных объектов: лесные массивы; автомобильные дороги; железные дороги; ЛЭП.

Определим множества объектов: S1 – множество объектов типа “лесной массив”, S2 – множество объектов типа “автомобильная дорога”, S3 – множество объектов типа “железная дорога”, S4 – множество объектов типа “ЛЭП”, B – множество объектов типа “сельскохозяйственное поле”. Определим множество A, как объединение множеств:

$$A = S1 \cup S2 \cup S3 \cup S4 \quad (4)$$

Определим топологические отношения между объектами используя модель Эгенхофера, имеющая название «9-пересечений» [6]: O1 - “не пересекаться”, O2 - “соприкоснуться”. Так же кроме топологических отношений необходимо определить метрическое отношение: O3 - “иметь расстояние между границами объектов не более L”.

Следующее соотношение (5) (описанное на базе формализма, предложенного в [7]) образует множество локализованных участков территорий K3 подлежащих противопожарной вспашке, и будет записано в виде:

$$K3 = K1 \cup K2, \quad (5)$$

где K1=  $\langle \{a_i, b_j\}, \{O1, O3\} \rangle$  - класс, непересекающихся сегментов, расстояние которых не более L; K2 =  $\langle \{a_i, b_j\}, \{O2\} \rangle$  - класс, состоящий из пары соприкасающихся сегментов  $a_i \in A, b_j \in B$ .

## Выводы

Впервые разработана информационная модель объекта «противопожарная вспашка» («ППВ»). На отдельном космоснимке ППВ проявляется в общем случае, как множество сегментов  $S_i$  с линейной геометрической структурой, обладающих совокупностью определенных выше отношений. Модель ППВ можно записать так:

$$M = \langle \{S_i\}, \{R_k\} \rangle \quad (6)$$

где  $\{S_i\}$  - множество наблюдаемых на космоснимке сегментов, интерпретируемых, как ППВ,

$\{R_k\}$  - множество унарных отношений мощностью, равной 4:

R1 ( $S_i$ ) - ограничение на значения признака "толщина" вида (1)

R2 ( $S_i$ ) - ограничение на значения признака "длина" вида (2)

R3 ( $S_i$ ) - ограничение на значения признака NDVI вида (3)

R4 ( $S_i$ ) - ограничение на взаиморасположение сегмента ППВ и сопредельных сегментов вида (5)

Данная модель разработана для применения в автоматизированной методике обнаружения объектов противопожарной вспашки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-07-98005.

## Список литературы

1. Приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 18 июня 2003 г. № 313 ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ПРАВИЛ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (ППБ 01-03)
2. Статистический бюллетень №4-23, на 2011 год по данным Красноярскстат.
3. Денисов Д.А. Компьютерные методы анализа видеoinформации: монография. Изд-во Краснояр.гос. ун-та, 1993. 192 с.
4. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы// ТЕХНОСФЕРА. Москва, 2008. С.305.
5. Веб-сайт: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>
6. Egenhofer M.J., Herring J., Categorizing Binary Topological Relationships between Regions, Lines and Points in Geographic Databases // University of Maine, Department of Survey Engineering, 1992.
7. Цибульский Г.М., Маглинец Ю.А. О семиотическом подходе к построению экспертных систем. /Математическое обеспечение и архитектура ЭВМ. Материалы научно-технической конференции "Проблемы техники и технологий XXI века" Красноярск, 1994. с. 195-202.

УДК 528.88

## МОНИТОРИНГ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Л.А. Сладких<sup>(2)</sup>, Е.Н. Кулик<sup>(1)</sup>, Е.Ю. Сахарова<sup>(1,2)</sup>

<sup>(1)</sup> ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия»

<sup>(2)</sup> Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»

e-mail: [sla@rcpod.siberia.net](mailto:sla@rcpod.siberia.net), [e.n.kulik@ssga.ru](mailto:e.n.kulik@ssga.ru), [elena.saharova27@gmail.com](mailto:elena.saharova27@gmail.com)

Современное развитие средств спутникового наблюдения позволяет эффективно использовать данные дистанционного зондирования Земли в различных областях человеческой

жизнедеятельности, с том числе и в сфере сельского хозяйства. В статье представлена технология спутникового мониторинга состояния посевов зерновых культур, используемая в Сибирском центре ФГБУ "НИЦ "Планета".

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, мониторинг растительности, вегетационный индекс.

ФГБУ "НИЦ "Планета" осуществляет оперативное управление и научно-методическое руководство наземным комплексом приёма и обработки спутниковой информации гидрометеорологической службы. ФГБУ "НИЦ "Планета" включает в себя три региональных центра: Европейский центр (г. Москва), Сибирский центр (г. Новосибирск) и Дальневосточный центр (г. Хабаровск). Сибирский центр ФГБУ "НИЦ "Планета" обеспечивает спутниковыми данными и результатами её тематической обработки оперативно-прогностические подразделения Росгидромета, органы государственного управления, службы Федеральных министерств и ведомств, институты Сибирского отделения Российской академии наук. В оперативном режиме выполняется наблюдение за территорией от Урала до Забайкалья [1, 2].

В ходе обработки спутниковых данных подготавливаются различные виды оперативной продукции (например, метеорологическая информация), а также осуществляются наблюдения за различными объектами и явлениями, такими как: ледовый и снежный покровы, сельскохозяйственные посевы, паводковая и пожароопасная обстановки, ареалы загрязнений вокруг промышленных городов. Применение спутниковых данных обеспечивает получение оперативной и достоверной информации, позволяя тем самым решать различные задачи в области сельского хозяйства. Совместное использование спутниковых измерений характеристик растительного покрова, метеорологических данных, статистических данных об урожайности и космических изображений позволило создать технологию оперативного мониторинга состояния посевов на юге Западной Сибири. Данная технология включает в себя два взаимосвязанных вида работ: прогнозирование урожайности яровой пшеницы и оценка состояния посевов зерновых культур по трём градациям, принятым в агрометеорологии (хорошее, удовлетворительное, плохое состояние посевов). Исследования выполняются на территории Новосибирской, Кемеровской, Омской областей и Алтайского края. Прогноз урожайности яровой пшеницы рассчитывается в СЦ ФГБУ "НИЦ "Планета" для Новосибирской области, начиная с 2005 года, а в 2014 году впервые выполнялся расчет урожайности и для Алтайского края. Работы по оценке состояния посевов зерновых культур ведутся для всех исследуемых областей. Результатом данных работ служат карты оценки состояния посевов юга Западной Сибири, которые позволяют в течение всего вегетационного периода оперативно получать показатели оценки с процентным соотношением каждой из трех градаций.

Благодаря устойчивому функционированию спутниковых систем (таких как Terra, Landsat) возможно использовать не только оперативную информацию, но и большой ряд архивных данных. В режиме оперативной работы для охвата больших территорий используется информация с американского спутника Terra (спектрорадиометр MODIS), которая обеспечивает ежедневную повторяемость. Также в работе активно используется информация с космических аппаратов Landsat.[3] При обработке спутниковых данных используются такие программные продукты как: ArcGIS, ENVI, SDIM и др. Выполнение работ было бы невозможно без использования накопленной архивной базы измерений вегетационного индекса на полях тестовых хозяйств, базы метеоданных и данных о фактической урожайности.

Для осуществления комплекса работ ежегодно необходимо выбирать тестовые хозяйства, в которых будут выполняться измерения. Для этих хозяйств в программном комплексе ArcGIS по информации с КА Landsat создаются векторные схемы

внутрихозяйственного землеустройства. На данных схемах отображаются следующие элементы: поля, населённые пункты, дороги, водоёмы, колки. Внутри сельскохозяйственных полей наносятся реперные точки, каждой из которой присваивается свой уникальный номер. Эти точки вносятся в общую базу данных и используются в дальнейшем для автоматических измерений значения вегетационного индекса. Полученные значения используются при расчетах прогностической урожайности и при выполнении оценки состояния посевов.

Для расчётов прогностической урожайности используется программный комплекс SDIM (System of Databases and Imitating Modeling), реализующий американскую модель биопродуктивности EPIC (автор Dr. Williams). Адаптация модели к агроклиматическим условиям нашего региона выполнялась Югорским НИИ информационных технологий в 2005 году на основе использования метеоданных и данных о фактической урожайности культур за 20 лет [4]. Предварительный прогноз урожайности яровой пшеницы рассчитывается в конце июня, окончательный – 20 июля, в период с 15 по 20 августа дается корректировка прогноза.

Основным параметром для расчета прогноза урожайности в программном комплексе SDIM служит индекс вегетации (NDVI), рассчитываемый по снимкам. Дополнительно в программный комплекс вводятся климатические характеристики: максимальная и минимальная температуры воздуха, суммарные суточные осадки, относительная влажность воздуха, средняя скорость ветра, суммарная солнечная радиация. Для каждого поля в программу вводятся даты сева и предварительные даты уборки урожая, которые также влияют на конечный результат. По перечисленным выше агроклиматическим параметрам создана база данных, полученных на 32 метеостанциях Новосибирской области за период с 1985 года по текущий год. Статистические данные позволяют определять год-аналог по климатическим параметрам и, исходя из этого, корректировать окончательный прогноз [5]. Оценкой качества выполненной работы служит оправдываемость прогноза, которая рассчитывается после получения данных о фактической урожайности.

В 2014 году в Новосибирской области расчет урожайности яровой пшеницы проводился на 413 полях в 36 хозяйствах. Ежегодно перед началом выполнения мониторинга сельскохозяйственных культур необходимо связаться с районной администрацией сельского хозяйства и получить рекомендации от главного агронома района о возможности выполнения наблюдений в том или ином хозяйстве. После получения схемы размещения культур на текущий сезон от каждого конкретного хозяйства, с момента появления первых всходов и до окончания вегетационного периода выполняется мониторинг полей данных хозяйств. Для выполнения расчетов необходимо минимум три измерения значения индекса вегетации. По окончании сезона выполняется расчет прогностической урожайности яровой пшеницы в каждом хозяйстве. Полученные результаты передаются руководителям районных администраций Новосибирской области и руководителям хозяйств. Помимо этого, подготавливается сводная таблица с рассчитанными значениями урожайности по всем районам области. Данные передаются в отдел агрометеорологических прогнозов ФГБУ "Западно Сибирского УГМС" и используются при составлении сведений баланса зерна по России.

Прогноз урожайности 2014 г. в Новосибирской области в южных районах составил от 4 до 8 центнеров с гектара. Значительно выше урожайность в восточной зоне (Тогучинский, Колыванский, Искитимский и Маслянинский районы). Среднее значение урожайности по хозяйствам Новосибирской области составило 13 центнеров с гектара. Очень низкие температуры в мае сдерживали ход посевных работ на полях Новосибирской области, в некоторых хозяйствах посевная закончилась только 10 июня. Холодная погода мая и первой декады июня задержала рост и развитие

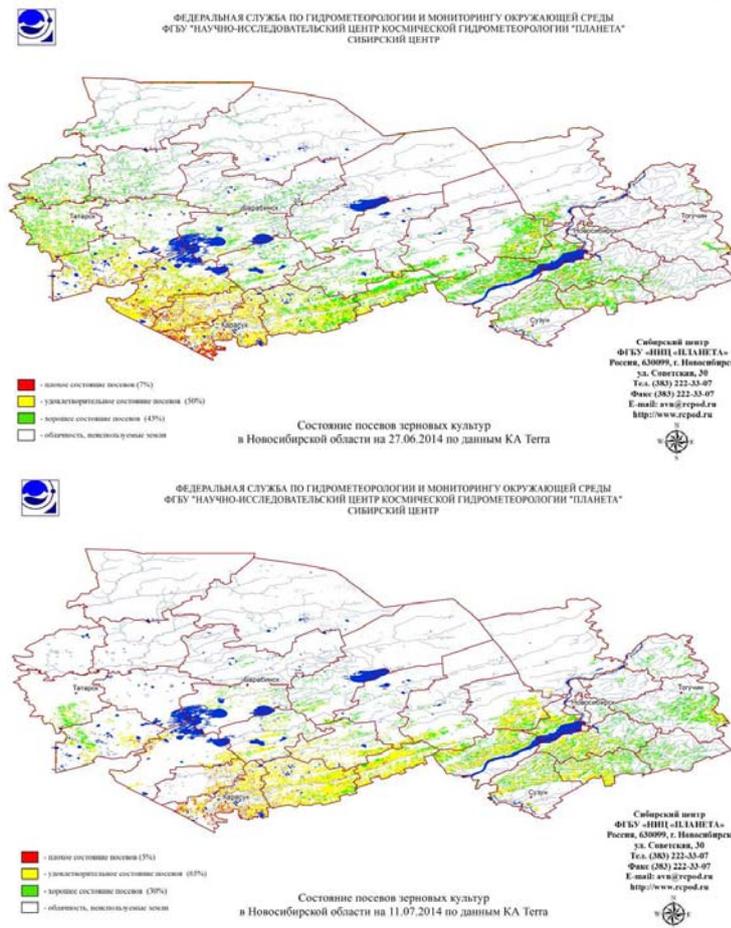
сельскохозяйственных культур. Установление с 14 июня жаркой погоды и недостаточное увлажнение почвы также не способствовало нормальному развитию посевов.



**Рис. 1. Ход значений индекса вегетации**

В 2012 и 2013 годах также не были благоприятными погодные условия (условия сильной засухи в один год и неблагоприятные условия уборки урожая в другом году), что отразилось в низкой урожайности в эти годы. За последние четыре года погодные условия в 2011 году являлись наиболее оптимальными для нормального развития посевов, что нашло отражение в ходе значений индекса вегетации (рис. 1).

Расчету прогноза урожайности предшествовала работа по оценке состояния посевов. За вегетационный период было подготовлено 5 карт оценки, на которых отражена динамика изменения состояния посевов и влияние засухи (рис. 2).



**Рис. 2. Карты оценки состояния посевов зерновых культур, Новосибирская область, 27.06.2014 г. и 11.07.2014 г.**

Применение спутниковых данных позволяет выполнять наблюдения за состоянием сельскохозяйственных культур на обширных территориях, используя достоверную, оперативную, высокопериодичную информацию. Эти данные позволяют облегчить процесс наземного сбора данных и повысить достоверность оценки посевов.

#### Список литературы

1. НИЦ "Планета" : [сайт]. URL: <http://planet.iitp.ru/index1.html>
2. Сибирский центр "НИЦ "ПЛАНЕТА" : [сайт]. URL: <http://www.rcpod.ru/index.html>
3. Кулик Е.Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня, завтра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. научн. конгр., 10-20 апреля 2012г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2012. С. 134-139.
4. Брыксин В.М. Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – Изд-во НГУ, 2007. – Том 5, вып. 1. – С. 20-26.
5. Сахарова Е.Ю., Сладких Л.А., Захватов М.Г. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2014. С. 67-72.

УДК 551.510.34, 551.501.71

### AN EXPERIENCE OF MULYI-YEAR VALIDATION OF ATMOSPHERIC NO<sub>2</sub> MEASUREMENTS WITH THE OMI INSTRUMENT ONBOARD THE EOS-AURA SATELLITE

A.N. Gruzdev, A.S. Elokhov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences

e-mail: [a.n.gruzdev@mail.ru](mailto:a.n.gruzdev@mail.ru), [elokhov@mail.ru](mailto:elokhov@mail.ru)

We present the results of comparison between Ozone Monitoring Instrument (OMI) data of NO<sub>2</sub> measurements onboard the NASA EOS-Aura satellite since 2004 and correlative ground-based twilight spectrometric NO<sub>2</sub> measurements at Zvenigorod station in Russia. The results are presented for the new versions of the OMI NO<sub>2</sub> retrieval algorithm.

*Key words: atmosphere, satellite measurements, ground-based measurements, validation, nitrogen dioxide, Ozone Monitoring Instrument*

#### 1. Introduction

One key requirement for data of satellite monitoring of the Earth's environment is their validation. Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), together with other nitrogen oxides, plays a key role in stratospheric and tropospheric chemistry and has significant impacts on human health. Stratospheric NO<sub>2</sub> is mainly of natural origin. In the lower troposphere, anthropogenic sources of nitrogen oxides are of great importance. An ability to separate stratospheric and tropospheric NO<sub>2</sub> is a challenging problem for remote measurements of NO<sub>2</sub>.

OMI NO<sub>2</sub> measurements have unprecedented precision and spatial resolution compared to those of previous satellite instruments [1]. The correspondence between stratospheric NO<sub>2</sub> columns derived from OMI and ground-based (GB) measurements continuously improved in terms of correlation and mean differences [2–4]. However the high correlation was mainly due to the stratospheric NO<sub>2</sub> annual cycle [4].

Recently, a new algorithm of retrieval of stratospheric and tropospheric NO<sub>2</sub> from OMI measurements was proposed [5]. The up-to-date overpass file with OMI stratospheric and tropospheric NO<sub>2</sub> columns over Zvenigorod station is available at the NASA site ([http://avdc.gsfc.nasa.gov/download\\_2.php?site=666843934&id=13&go=download&path=&file=aura\\_omi\\_l2ovp\\_omno2\\_v03\\_zvenigorod.txt](http://avdc.gsfc.nasa.gov/download_2.php?site=666843934&id=13&go=download&path=&file=aura_omi_l2ovp_omno2_v03_zvenigorod.txt)). The objective of this work is the validation of the improved versions of the OMI NO<sub>2</sub> products using NO<sub>2</sub> observations at Zvenigorod.

## 2. Ground-based and OMI NO<sub>2</sub> measurements

The OMI measures the scattered UV and visible solar radiation with horizontal resolution of 13×24 km<sup>2</sup> in nadir direction [1]. A slant NO<sub>2</sub> column content is determined directly from measurements. A vertical NO<sub>2</sub> column content is estimated by division of the slant NO<sub>2</sub> columns by a NO<sub>2</sub> air mass factor that depends on a number of parameters including geometry of observations, surface albedo and shape of vertical profile of NO<sub>2</sub>. The profile shape and air mass factor change substantially in presence of boundary layer pollution.

Zvenigorod Research Station is located in a rural area 50 km west to Moscow. It is a part of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Changes (NDACC). Observations of NO<sub>2</sub> are done in visible spectral range by zenith viewing spectrometer during morning and evening twilight. NO<sub>2</sub> contents in slant atmospheric column are calculated as a function of the solar zenith angle and a vertical NO<sub>2</sub> distribution is retrieved as a solution of an inverse problem. Summation of NO<sub>2</sub> contents in appropriate layers gives NO<sub>2</sub> contents in tropospheric (0–10 km), stratospheric (10–50 km), and total (0–50 km) columns. The method is described in detail in [2–3].

To be compared, data of satellite and ground-based NO<sub>2</sub> measurements should be put to the same time since NO<sub>2</sub> has a diurnal variation. Accordingly, the data of observations at Zvenigorod were interpolated in time to moments of OMI measurements during satellite overpasses. The method of interpolation is described in [2–3].

## 3. Results of comparison and their discussion

Figure 1 shows the stratospheric and tropospheric NO<sub>2</sub> column contents over Zvenigorod derived from GB and OMI measurements. Generally, the OMI stratospheric NO<sub>2</sub> columns are superimposed on the NO<sub>2</sub> contents derived from GB measurements (Fig. 1a). The correlation coefficient is 0.96. However the NO<sub>2</sub> difference has a distinctive annual cycle (Fig. 2a). During the most part of a year, stratospheric NO<sub>2</sub> columns suggested by OMI observations are in general larger than those derived from GB measurements. The difference is maximum in March when stratospheric NO<sub>2</sub> undergoes significant seasonal increase.

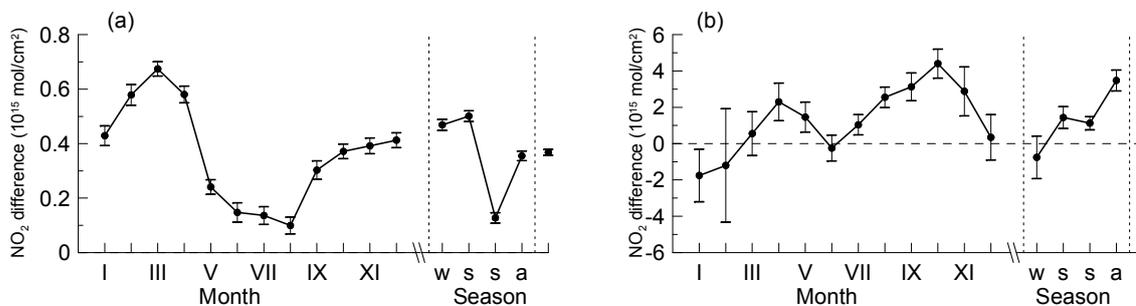


Fig. 2. Mean difference between OMI and ground-based (a) stratospheric and (b) tropospheric NO<sub>2</sub> column contents as function of month (left to the left vertical dotted line), season (between the vertical dotted lines), and for a whole year (right to the right dotted line). Vertical segments are the 95% confidence intervals.

The generally weak correlation between the OMI and GB data of tropospheric NO<sub>2</sub> columns (Fig. 1b) of about 0.4 is due in part to inhomogeneity of the NO<sub>2</sub> concentration field in polluted area and to a typically significant temporal variability of pollution NO<sub>2</sub>, which diverges data measured at different time [2–3]. The difference between the tropospheric NO<sub>2</sub> columns (Fig. 2b) is typically larger than the difference between the stratospheric columns.

The use of the new OMI retrieval algorithm has resulted in an increase of the monthly correlation coefficients between the OMI and GB data of stratospheric NO<sub>2</sub> contents (Fig. 3a) compared to the case of the old OMI algorithm [4], although the correlation is still not as good as we would like. The maximum correlation coefficients of about 0.8 are obtained for March and October when quick seasonal changes occur in stratospheric NO<sub>2</sub>. At least a part of these values is associated with the NO<sub>2</sub> seasonal cycle. The new OMI NO<sub>2</sub> retrieval algorithm has also resulted in a somewhat general improvement of the correlation between OMI and GB data of tropospheric NO<sub>2</sub> columns (Fig. 3b).

The OMI-GB difference between the stratospheric NO<sub>2</sub> column contents is largest in clear-sky conditions (Fig. 4a). This effect accounts likely for the maximum discrepancy between the stratospheric NO<sub>2</sub> columns in March in Fig. 2a due to a significant portion of cloudless days associated with typical anticyclonic weather in March. The new OMI retrieval algorithm has also resulted in an essential improvement of the correspondence between the tropospheric NO<sub>2</sub> columns at the most of values of cloud cover (Fig. 4b).

It is important to know if the satellite information can be used for studying of single

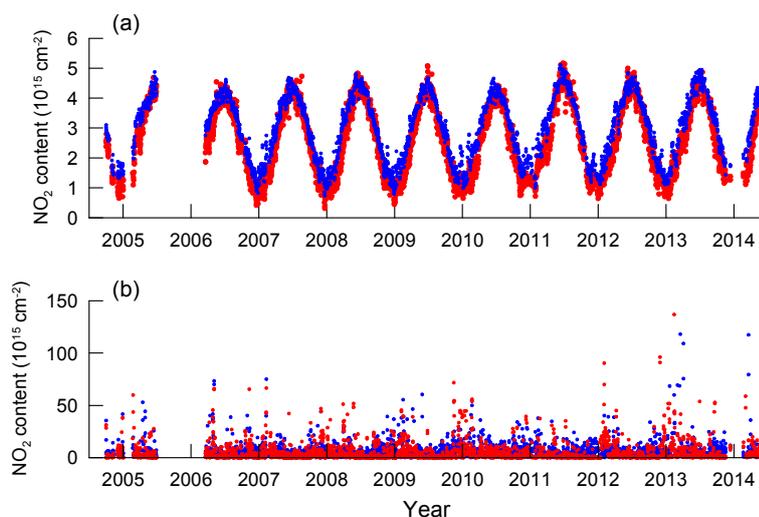


Fig. 1. (a) Stratospheric and (b) tropospheric NO<sub>2</sub> column contents over Zvenigorod derived from ground-based (red) and OMI (blue) measurement.

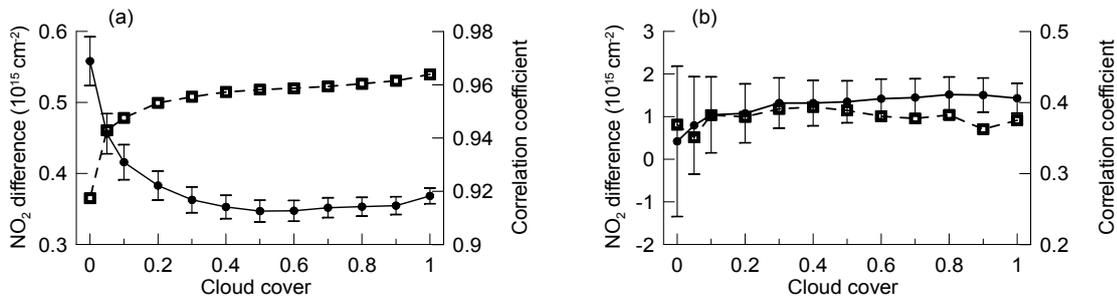


Fig. 4. Mean difference (dots) and the coefficient of correlation (squares) between (a) stratospheric and (b) tropospheric NO<sub>2</sub> column content derived from OMI and ground based measurements, as function of cloud fraction. Vertical segments correspond to 95% significance intervals.

events, e.g. anomalies. For example, the data of GB measurements exhibit significant negative NO<sub>2</sub> anomalies in the end of March 2010 and the end of March 2011 and a positive anomaly in the beginning of February 2010, which are accompanied by anomalies of the same signs in total ozone and stratospheric temperature [6]. The negative anomalies were due to stratospheric transport from the Arctic while the positive anomaly was caused by the sudden winter stratospheric warming. The NO<sub>2</sub> changes suggested by the OMI data underestimate significantly the NO<sub>2</sub> anomalies derived from GB observations.

#### 4. Conclusions

Application of the new stratospheric and tropospheric NO<sub>2</sub> retrieval algorithm to OMI NO<sub>2</sub> measurements have resulted in essential improvement of some quantitative characteristics of correspondence of OMI NO<sub>2</sub> data with the data of GB NO<sub>2</sub> measurements at Zvenigorod Research Station. In particular, the monthly correlation coefficients between the stratospheric NO<sub>2</sub> column contents derived from OMI and GB measurements have increased up to values of about 0.6. The correlation between the tropospheric NO<sub>2</sub> column contents has also improved. However there is a systematic difference between the stratospheric NO<sub>2</sub> column contents which increases in clear sky conditions.

Further comprehensive comparison of the OMI NO<sub>2</sub> data with high-quality data of independent NO<sub>2</sub> measurements are needed to understand and attribute the observed discrepancies. The data of OMI NO<sub>2</sub> measurements over polluted regions should be used with caution in studying of such fine problems as long term trends and short-term variability.

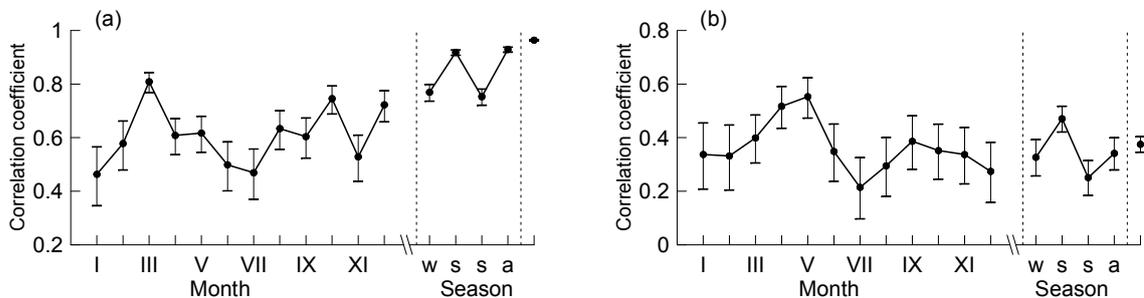


Fig. 3. Correlation coefficient between OMI and ground-based (a) stratospheric and (b) tropospheric NO<sub>2</sub> column contents as function of month (left to the left vertical dotted line), season (between the vertical dotted lines), and for a whole year (right to the right dotted line). Vertical segments are the 95% confidence intervals.

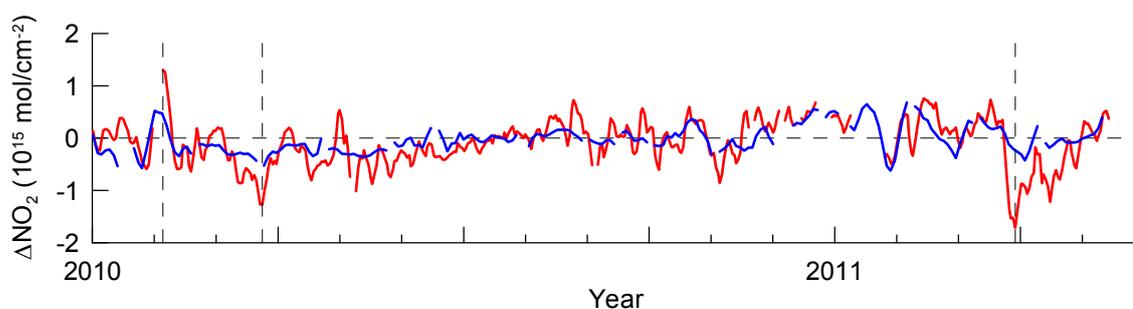


Fig. 5. Deviation of stratospheric NO<sub>2</sub> column contents over Zvenigorod derived from ground-based (red) and OMI (blue) measurements in 2010–2011 from corresponding mean annual cycles. Vertical dashed lines denote anomalies discussed in the text.

## References

1. Celarier E.A., Brinksma E.J., Gleason J.F. et al. Validation of Ozone Monitoring Instrument nitrogen dioxide columns. // *Journal of Geophysical Research* 2008. V. 113. D15S15, doi: 10.1029/2007JD008908.
2. Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Validating NO<sub>2</sub> measurements in the vertical atmospheric column with the OMI instrument aboard the EOS-Aura satellite against ground-based measurements at the Zvenigorod Research Station // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009. V. 45. № 4. P. 477–488.
3. Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Validation of Ozone Monitoring Instrument NO<sub>2</sub> measurements using ground based NO<sub>2</sub> measurements at Zvenigorod, Russia // *International Journal of Remote Sensing*. 2010. V. 31. № 2. P. 497–511.
4. Gruzdev A.N., Elokhov A.S. New results of validation of OMI NO<sub>2</sub> measurements using data of measurements at Zvenigorod Scientific Station // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2013. № 1. P. 16–27 (In Russian).
5. Bucsele E.J., Krotkov N.A., Celarier E.A. et al. A new stratospheric and tropospheric NO<sub>2</sub> retrieval algorithm for nadir-viewing satellite instruments: applications to OMI // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013. V. 6. № 10. P. 2607–2626.
6. Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Negative anomaly of the stratospheric NO<sub>2</sub> content over Zvenigorod at the end of March and beginning of April 2011 // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 448. Part 1. P. 126–130.

УДК 528.8, 630\*5

## ОЦЕНКА ПРИРОСТА ДРЕВЕСИНЫ В «УГЛЕРОДНОМ ЛЕСУ» ПО ДЗЗ

В.Л. Гавриков, В.Б. Кашкин, Р.Г. Хлебопрос  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Международный научный центр исследований экстремальных состояний  
организма КНЦ СО РАН

e-mail: [vgavrikov@sfu-kras.ru](mailto:vgavrikov@sfu-kras.ru), [rtcvbk@rambler.ru](mailto:rtcvbk@rambler.ru), [inna.kizhner@gmail.com](mailto:inna.kizhner@gmail.com)

Излагается методика дистанционного измерения интенсивности роста лесного насаждения для целей учета скорости поглощения атмосферного углерода в рамках программ стабилизации углеродного цикла. Входными параметрами являются средняя высота, среднеквадратичный диаметр, густота насаждения, на основе которых рассчитывается оценочная суммарная боковая поверхность насаждения. Обнаружена сильная линейная корреляция этого показателя со средним приростом древесины.

*Ключевые слова: углеродный лес, прирост древесины, дистанционная оценка, радиолокационное зондирование, Киотский протокол.*

Через атмосферу Земли идет существенная часть глобального углеродного цикла, являющегося одним из центральных элементов жизнеобеспечения планеты. Особенная роль углерода состоит в том, что он, с одной стороны – основной конструктивный элемент живых тканей, а с другой – источник наиболее важного по влиянию на климат парникового газа [1]. Поэтому охрана и поддержание углеродного цикла – одна из наиболее важных задач человеческой цивилизации.

Киотский протокол был посвящен необходимости уменьшения эмиссий углерода в промышленности участвующих стран, также он вводил норму, согласно которой поглощение углекислоты экосистемами той или иной страны засчитывается ей в сокращение эмиссий. Лесные объекты, которые могут выполнить данную функцию, получили название «киотские леса» (в русскоязычной литературе существует аналогичный термин – «углеродный лес» [2, 3]).

Теме «киотских лесов» посвящено значительное количество работ, в центре внимания которых стоит вопрос о стоимости единицы эмиссии углекислоты. Вместе с тем, наряду с этим вопросом необходимо решить проблему учета того, насколько интенсивно некоторый конкретный лес поглощает углекислоту, так как от этого будет зависеть уровень экономической поддержки данного проекта лесовыращивания в рамках национальной программы секвестра атмосферного углерода.

Один из подходов, позволяющий совместить широкое покрытие измерениями слабонаселенных территорий с приемлемым уровнем подробности описания роста древостоев, может быть сформулирован на основе методов дистанционного зондирования, а также соответствующей модели древостоя.

Способы оценки некоторых из необходимых параметров были разработаны еще в 80-х годах XX века. Так, А.Н. Борисов с соавт. [4, 5] применили метод двумерной фильтрации крупномасштабных аэрофотоснимков, который позволил выделять кроны отдельных деревьев. Таким образом, в автоматическом режиме возможно обрабатывать оптические изображения полого крон с определением: 1) количества крон (т.е. деревьев верхнего полого) и 2) размеров крон. Размеры крон, в свою очередь, через корреляционные связи крон деревьев с диаметрами их стволов дает возможность оценочно вычислять средние показатели толщины стволов.

В случае параметра высоты насаждения при дистанционном зондировании речь идет об оценке некоторой эффективной толщины лесного покрова, которая определяется по разнице отражения радиоволн от верхних частей деревьев и от почвы. В определенном смысле такая эффективная высота древостоя является также результатом некоторого усреднения, реализованного в физическом процессе испускания и отражения радиоволн.

В основе геометрической модели древостоя, проанализированной в работе [6] лежат именно три параметра, оценка которых возможна средствами ДЗЗ: средний диаметр, средняя высота древостоя, а также количество стволов на единице площади (густота). Это – параметры, которые могут служить основой для расчетов оценок наличного запаса древесины, а измеряемые в динамике – для расчетов прироста древесины, т.е. скорости депонирования углерода.

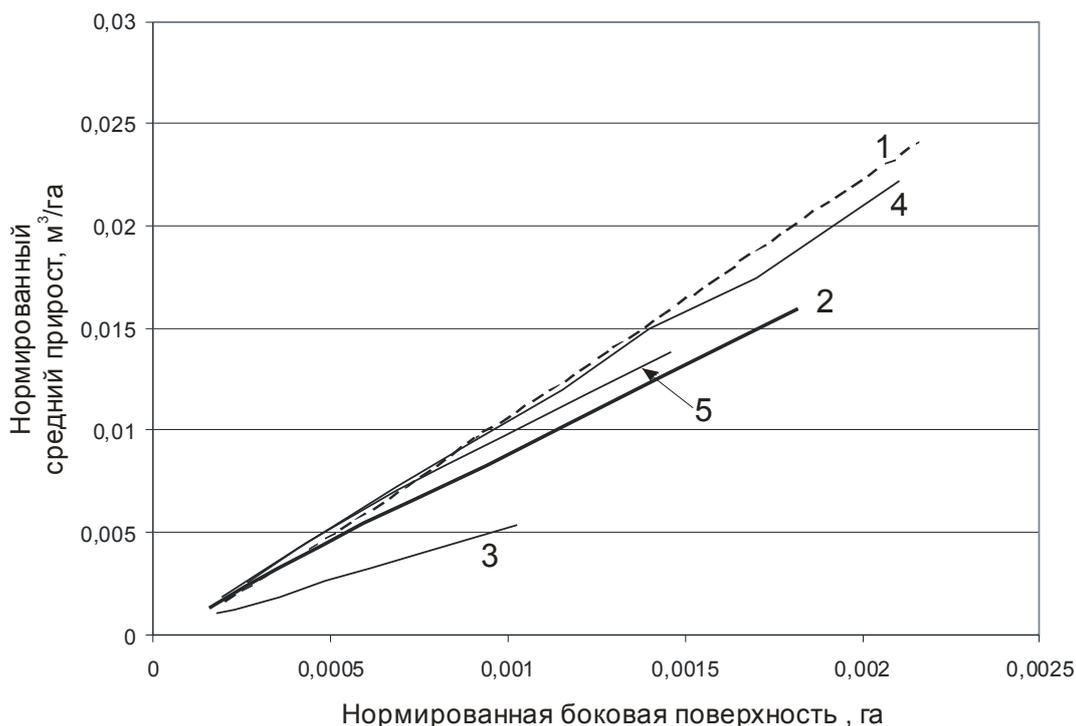
Основной методической проблемой при дистанционной оценке прироста, как упоминалось выше, является переход от статических морфологических показателей насаждения к его динамическим показателям.

Ключевой переменной модели и определяющим фундаментальным показателем структуры и функционирования популяции деревьев является суммарная боковая поверхность стволов. Значение этого показателя состоит в том, что он является

естественным морфологическим коррелятом биологической основы роста лесной системы – суммарной живой биомассы клеток вторичной меристемы.

В начале 2000-х годов были опубликованы результаты экспериментов с ростом культур дугласии, проведенных в различных районах США [7, 8, 9, 10]. Среди опубликованных результатов всегда приводились данные по ходу роста на контрольных площадях, свободных от лесохозяйственного вмешательства. Это позволяет использовать данные по контрольным площадям для оценки самопроизвольной динамики одновозрастного древостоя. Для каждого периода измерений в данных (помимо других стандартных показателей) приводятся: средний диаметр на высоте груди, среднеквадратический диаметр, средняя высота (100 максимальных высот), количество живых стволов на единице площади, возраст насаждения, а также показатель среднего прироста по объему. На основе этих показателей можно рассчитать оценочную суммарную боковую поверхность, пользуясь формулой  $\hat{S} = N \cdot H \cdot D / 2$ , где D – среднеквадратический диаметр, H – средняя высота, N - густота в соответствующем возрасте.

Сопоставление оценочной суммарной боковой поверхности живых стволов с приростом дает представление о связи этих показателей (рисунок). Для того чтобы нивелировать влияние динамики численности древостоев, рассчитанные показатели приведены в нормированном виде – на единицу живого дерева. Как следует из рисунка, нормированная боковая поверхность насаждения линейно и тесно связана с его средним приростом по объему.



**Рисунок. Связь между нормированной боковой поверхностью стволов в насаждениях дугласии и нормированным средним приростом в этих насаждениях. Графики построены на основе расчетов, произведенных по данным, опубликованным в работах [7, 8, 9, 10]. Цифрами 1–5 обозначены различные индивидуальные насаждения**

Таким образом, на основе статических данных, получаемых методами ДЗЗ, возможно сделать автоматизированную оперативную оценку ростового потенциала насаждения. Исходными данными являются: средняя высота, среднеквадратический диаметр и число деревьев (густота). Для оценки среднего прироста необходим также некоторый объем калибровочных работ. Это связано с тем, что зависимости, подобные приведенным на рисунке, будут несколько отличаться для насаждений разных условий произрастания (бонитетов). Наиболее вероятным источником данных для описанных оценок являются развиваемые в настоящее время многими авторами методы радиолокационного зондирования.

### Список литературы

1. Мелешко В.П. и др. Изменения климата. – Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008. М.: Росгидромет. Т. 1. 228 с.
2. Проблема общенаучного звучания. Обсуждение доклада. Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 1. С. 25–29.
3. Гавриков В.Л., Хлебопрос Р.Г. Феноменологическая модель управления «углеродным лесом» // Лесоведение. 2013. № 5. С. 29–35.
4. Борисов А.Н., Кашкин В.Б., Хлебопрос, Р.Г. Метод определения среднего диаметра крон деревьев по аэрофотоизображениям леса. // Аэрокосмические и наземные исследования динамики природных процессов Сибири, Иркутск: Ин-т геогр. СО АН СССР, 1984. С.132–147.
5. Борисов А.Н., Кашкин В.Б., Хлебопрос Р.Г. Модельный подход при автоматизированной обработке изображений в задачах изучения морфологии древостоев. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, Т. 9, Л.: Гидрометеиздат, 1986, С. 201–209.
6. Gavrikov V.L. A simple theory to link bole surface area, stem density and average tree dimensions in a forest stand. *European Journal of Forest Research*, 2014, doi 10.1007/s10342-014-0824-4.
7. Marshall D. D. Levels-of-growing-stock cooperative study in Douglas-fir: report no. 15-Hoskins: 1963-1998 / D. D. Marshall, R. O. Curtis. – United States Department of Agriculture, Forest Service, 2001.–80 pp.
8. Curtis R. O. Levels-of-growing-stock Cooperative Study in Douglas-fir: Report No. 18-Rocky Brook, 1963-2006 / R. O. Curtis, D. D. Marshall et al.– US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2009.– 91 pp.
9. Curtis R. O. Levels-of-growing-stock Cooperative Study in Douglas-fir: Report No. 19–the Iron Creek Study, 1966-2006 / R. O. Curtis, D. D. Marshall et al.– United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2009.– 78 pp.
10. King J. E. Levels-of-growing-stock Cooperative Study in Douglas-fir: Report No. 17–the Skykomish Study, 1961-93; the Clemons Study, 1963-94 / J. E. King, D. D. Marshall, J. F. Bell.– Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service, 2002.– 120 pp.

## АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЦЕЛЕВОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОБЪЕКТА ПО ДАННЫМ ДЗЗ

Р.В. Брежнев

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Институт космических и информационных технологий

e-mail: [brejnev.ruslan@gmail.com](mailto:brejnev.ruslan@gmail.com)

В статье описана система мониторинга целевого пространственного объекта, способная в автономном режиме актуализировать свойства пространственного объекта по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и ориентированная на конечного пользователя. Описаны структура и состав системы, а так же модель целевого пространственного объекта класса земель сельскохозяйственного назначения (ЗСХН), лежащая в основе рассматриваемой системы.

*Ключевые слова:* пространственный объект, автономная система мониторинга, дистанционное зондирование Земли, мультиагентный коллектив, агент, онтология, самоактивизация.

Целью проектирования и разработки автономной системы мониторинга целевого пространственного объекта по данным ДЗЗ является предоставление результатов мониторинга конечным пользователям – заказчикам решения задач мониторинга со стороны органов власти и промышленности, которые не обладают компетентными знаниями в методах ДЗЗ, специфике обработки, анализа, поиска, представления данных и применении геоинформационных технологий, а так же снижение роли экспертов в области перечисленных компетенций.

Основной задачей системы является сформировать описание пространственного объекта путем отслеживания его заданных свойств и в случае критического изменения значений этих свойств информировать конечного пользователя о фактических изменениях объекта с целью принятия решения, а так же выделить этот объект на изображении (создать слой) и актуализировать модель пространственного объекта.

Прежде чем приступить к рассмотрению системы дадим несколько определений. Так под **мониторингом** пространственного объекта понимается процесс измерения заданных параметров наблюдаемого объекта на заданном промежутке времени для оценки состояния объекта и своевременного принятия управляющего решения в случае значительного отклонения измеряемых параметров от заданной нормы. При этом **пространственным объектом** является цифровая модель объекта подстилающей поверхности Земли, содержащая его набор унарных и бинарных свойств, отождествляющих цифровую модель объекта с реальным объектом подстилающей поверхности Земли.

В условиях сформулированной задачи и ориентированности на конечного пользователя к разрабатываемой системе предъявляется ряд требований: самоактивизация, автономность и обучаемость.

**Самоактивизация.** Система способна самостоятельно активизироваться по мере поступления на ее вход актуальных пространственных данных.

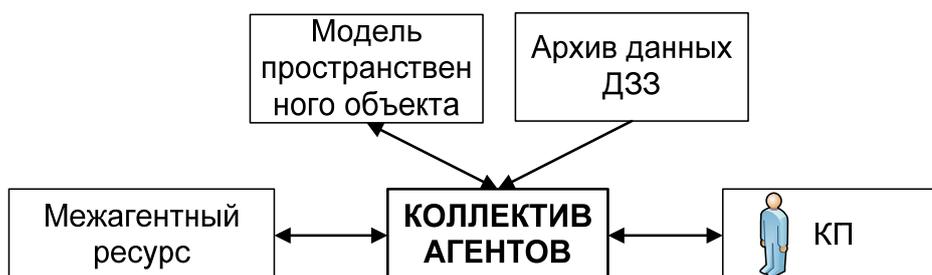
**Автономность.** Система должна выполнять действия по обработке и анализу пространственных данных и актуализации свойств модели пространственного объекта без участия эксперта и конечного пользователя. Стоит отметить, что роль эксперта окончательно исключить нельзя, особенно на этапе сегментации изображения, поэтому для каждого конкретного наблюдаемого пространственного объекта эксперт создает эталонную модель этого объекта, а так же ряд правил выборки при сегментации

изображения, содержащего объект. Задавая, таким образом, набор входных данных, эксперт участвует в обучении системы.

**Обучаемость.** Получив на вход эталонную модель пространственного объекта и правила выборки для сегментации, система, исходя из своей внутренней структуры, приспосабливается к новым условиям поиска актуальных пространственных данных и, следовательно, к выполнению своей основной задачи.

Реализовать подобную систему позволяет совместное применение онтологического и мультиагентного подходов, хорошо зарекомендовавших себя в решении сложных задач, разновидностью которых является мониторинг пространственного объекта. Такая система позволяет представить пространственный объект в виде автономного самоактивизирующегося агентного коллектива, базой знаний которого является цифровая модель объекта, представленная в виде онтологии.

Коллектив агентов характеризуется своей средой функционирования, рис. 1.



**Рис. 1. Состав среды коллектива агентов**

В состав среды входят такие основные компоненты, как архив данных ДЗЗ, межагентный ресурс, модель пространственного объекта, конечный пользователь и непосредственно сам коллектив агентов.

Архив данных ДЗЗ служит источником поиска актуальных изображений, содержащих целевой объект мониторинга. В качестве такого источника служит архив Региональной системы ДЗЗ Красноярского края [1, 2].

Межагентный ресурс – это знания о методах и инструментах, используемых в процессе работы коллектива или совокупности коллективов агентов, которые могут использовать агенты в процессе анализа пространственного объекта. Сюда относятся общие для всех агентов методы обработки данных, программные модули и компоненты, ответственные за поиск изображений, поиск объекта, анализ признаков, распознавание сообщений, передаваемых между агентами и пользователем и т.д. Каждый агент коллектива оперирует только теми инструментами, которые необходимы на его уровне решения задачи. Межагентный ресурс во многом определяет функциональность агентов и может быть дополнен или изменен разработчиком. При отсутствии доступа к межагентному ресурсу агент не способен к какому-либо анализу пространственных объектов, а, следовательно, не способен решить поставленную задачу. Таким образом, к межагентному ресурсу относятся следующие элементы: компонент поиска изображения с целевым объектом, подсистема предобработки, компонент получения региона интереса, компонент сегментации изображения, подсистема анализа признаков, рисунок 2.

Модель пространственного объекта является ядром системы и физически представлена в виде онтологической базы данных. Модель интегрирует аналитическую, растровую и картографическую модели пространственного объекта [3]. В качестве примера для тестовых испытаний системы был взят площадной объект. К объектам такого типа хорошо подходят ЗСХН.

Модель площадного или любого другого пространственного объекта рассматривается в двух аспектах: феноменологическом и структурном. Феноменологическая модель выглядит следующим образом:

$$M_{\text{феномен.}} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle,$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  унарные свойства объекта. К таким свойствам относятся: координаты, площадь рассчитанная, площадь введенная, периметр, кадастр, культура, хозяйство, право пользования и прочие.

Структурно такой пространственный объект включает множество унарных и бинарных отношений к реальным окружающим объектам и абстрактным объектам. Структурная модель пространственного объекта выглядит следующим образом:

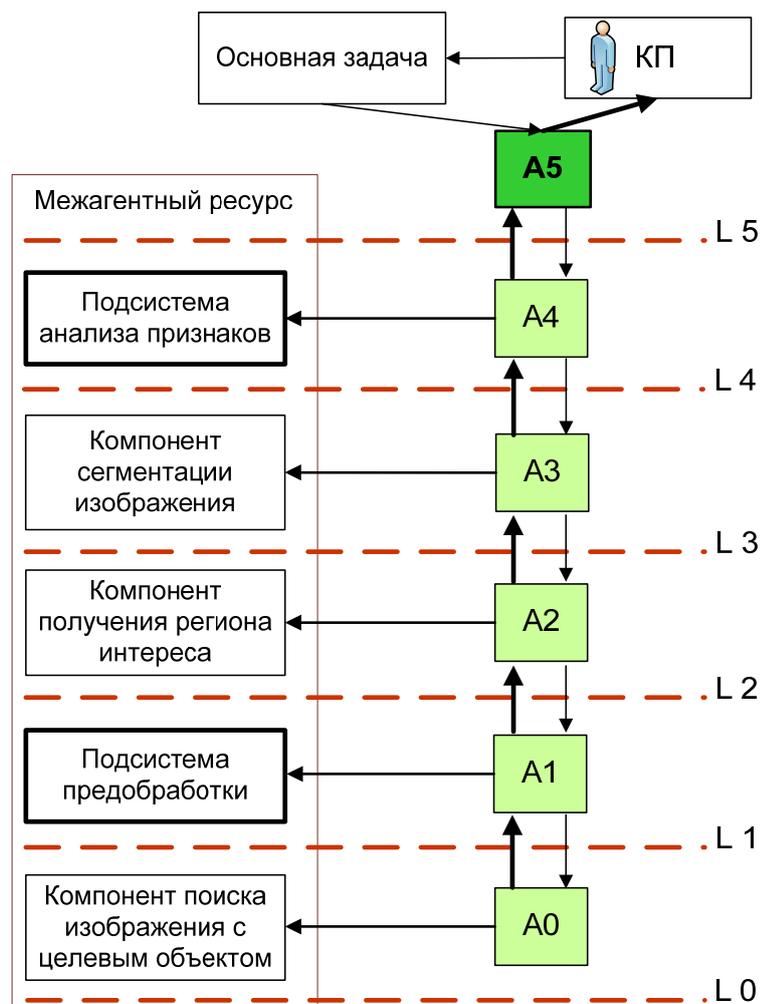
$$M_{\text{структ.}} = \langle M_{\text{опарн.}}, (R_{AD} \cup R_K \cup R_{SI}) \rangle,$$

где  $R_{AD}, R_K, R_{SI}$  – множество бинарных свойств аналитической, картографической и растровой моделей соответственно.  $M_{\text{опарн.}}$  – множество позиционных и непозиционных характеристик объекта. В частности, к бинарным свойствам объекта относятся: “имеет название”, “относится к”, “расположен в регионе”, “граничит”, “является частью” и т.д.

Говоря об актуализации модели площадного пространственного объекта, подразумевается два взятых для эксперимента свойства: площадь рассчитанная и периметр.

Конечный пользователь формулирует для коллектива агентов основную задачу и оценивает качество ее решения.

Коллектив агентов представляет собой иерархическую структуру [4], которая разделена на шесть основных уровней (L0–L5), где L0 – самый низкий уровень, а L5 – самый высокий, рисунок 2. Каждый из уровней представлен своим агентом или совокупностью агентов, это означает, что на каждом из уровней решается некоторая подзадача или совокупность схожих подзадач. Так же агент каждого уровня проводит уточнение основной задачи, а по сути, формулирует очередной этап ее решения.



**Рис. 2. Иерархия коллектива агентов**

Уровень L0 представлен агентом A0, осуществляющим поиск и выборку изображения, содержащего целевой пространственный объект.

Уровень L1 представлен агентом A1, который осуществляет некоторые элементы предобработки изображения, в частности, осуществляет географическую привязку изображения и приведение его к требуемой комбинации каналов для последующей визуализации.

Уровень L2 представлен агентом A2, осуществляющим получение фрагмента изображения (региона интереса), содержащего заданный пространственный объект. Вырезка фрагмента осуществляется по координатам двух угловых точек прямоугольника, описывающего заданный объект.

Уровень L3 представлен агентом A3, который выполняет сегментацию изображения.

Уровень L4 представлен агентом A4, выполняющим расчет заданных свойств объекта.

Уровень L5 представлен агентом-субординатором. Агент-субординатор принимает основную задачу от конечного пользователя и побуждает остальных агентов коллектива к уточнению и декомпозиции основной задачи. Это происходит путем преобразования задачи от абстрактного к конкретному на каждом уровне иерархии коллектива.

Затем управление вновь переходит на уровень L5 к агенту-субординатору, который, получив обновленные параметры объекта, может сгенерировать обращение к конечному пользователю в случае, если значения данных параметров имеют значительное отклонение заданной нормы, и для конечного пользователя это является сигналом к принятию соответствующих решений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-07-98005.

#### **Список использованных источников**

1. Брежнев Р.В., Маглинец Ю.А., Мальцев Е.А., Перфилов С.Е., Сидоров А.Ю., Цибульский Г.М., Шокол А.С. Программно-технологическая инфраструктура информационной поддержки решения задач территориального управления // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 3. С. 340-352.
2. Брежнев Р.В., Маглинец Ю.А., Мальцев Е.А., Перфилов С.Е., Сидоров А.Ю., Цибульский Г.М., Шокол А.С. Программно-технологическая инфраструктура информационной поддержки решения задач территориального управления // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 3. С. 340-352.
3. Брежнев Р.В. Онтологическая модель представления геопространственных данных как основа информационно-поисковой среды пространственных объектов // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы IV Международной научно-технической конференции (г. Железногорск, 7 декабря 2012 г.) / Под ред. В.А. Углева. - Железногорск: Железногорский филиал СФУ, 2012. 166 с. 154-157 с.
4. R.V. Brezhnev, E.A. Maltsev, Ontological system of geospatial object monitoring // The 11<sup>th</sup> International Conference «PATTERN RECOGNITION and IMAGE ANALYSIS: NEW INFORMATION TECHNOLOGIES» PRIA-11-2013, Vol. II, 395-397 p.

**УДК 528.8.04, 528.88**

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА**

К.В. Шатрова, Ю.А.Маглинец  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: [KShatrova@sfu-kras.ru](mailto:KShatrova@sfu-kras.ru), [YMaglinets@sfu-kras.ru](mailto:YMaglinets@sfu-kras.ru)

В работе описывается представление пространственных данных для организации области поиска оптимального маршрута. Модель основана на смешанном подходе, где представление данных основано на растровой структуре, а хранение данных в базе знаний в векторном представлении.

*Ключевые слова: ГИС, модели представления пространственных данных, растровые и векторные данные, оптимальный маршрут.*

#### **Введение**

Задача поиска оптимального, либо квазиоптимального маршрута используется в целом ряде практических приложений. В настоящей работе рассматриваются

приложения данной задачи к оцениванию транспортной доступности земель сельскохозяйственного назначения. Рассмотрим факторы, влияющие на качество конечного результата решения указанной задачи при моделировании области поиска. Это:

- точность описания пространственных объектов, определяемая пространственным и спектральным разрешением исходных данных;
- размерность области поиска, количественно выраженная в количестве определенных для исследуемой территории пространственных объектов;
- наличие (отсутствие) интеграции данных из различных источников об исследуемой территории: топографические карты, спутниковые снимки, данные полевых исследований и другие;
- возможность проведения визуального анализа как подтверждение результата поиска маршрута и качества моделирования области поиска;
- сложность модели представления исследуемой территории, выразимая в количестве разнотипных объектов, описываемых весовыми коэффициентами проходимости для каждого шага поиска пути.

Для представления и использования пространственных данных, как правило, используются сочетание растровых и векторных структур данных. Так для сжатия данных предпочтительнее использовать векторный способ представления данных, а для алгоритмического и визуального анализа – растровый способ.

В отличие от растровых структур, которые описывают объекты непосредственно, векторная модель содержит информацию только о границах объектов. Представление пространственной информации в векторном формате требует меньше объема памяти, чем в растровом. Векторный формат хорошо подходит для представления пространственных объектов сколь угодно сложной формы.

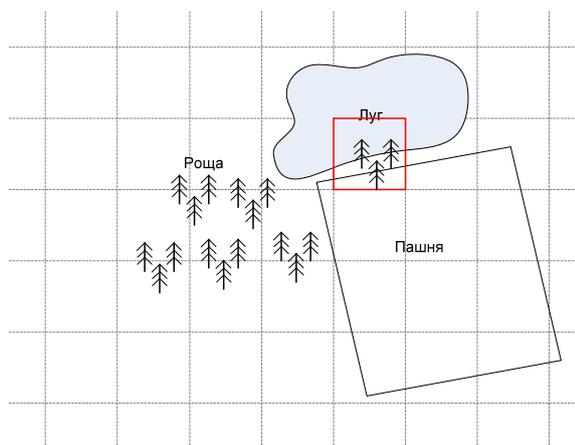
Растровая структура данных предполагает представление данных в виде двухмерной сетки, каждая ячейка которой содержит только одно значение, характеризующее объект, соответствующий ячейке раstra на местности. В качестве такой характеристики может быть код объекта (лес, луг и т.д.), высота или оптическая плотность.

Представление данных в матричном виде удобно не только с точки зрения визуального анализа, но и для последующего использования известных алгоритмов поиска на графах. В качестве характеристики элемента матрицы в этом случае будет величина, определяющая стоимость передвижения для соответствующего этой ячейки типа поверхности на местности.

#### **Построение области поиска**

Создавая объединенное тематическое покрытие матрицы для формирования области поиска, необходимо учитывать ситуации, когда в одну из элементов матрицы могут "попадать" различные типы пространственных объектов, рис. 1.

Анализ литературы [1, 2] показал, что в этом случае, как правило, используется выбор пространственного объекта, который занимает большую часть в границах элемента матрицы. При расчете стоимости передвижения атрибутивная информация по другим пространственным объектам, входящим в границу элемента матрицы, не учитывается. В отдельные классы так же выделяются пространственные объекты, относящиеся к абсолютным барьерам, передвижение по которым невозможно, и объекты дорожной сети, ускоряющие движение.



**Рис. 1. Определение типа поверхности для определенной ячейки матрицы**

В рамках разрабатываемой модели предлагается иной подход к классифицированию объектов пространственных данных, которые условно можно разделить на описанные ниже три класса.

Класс "барьер" – к данному классу могут относиться водные объекты, горные склоны, овраги, и другие типы непреодолимой поверхности.

Сопоставим объекту класса «барьер» вида  $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  атрибут средней скорости передвижения  $v(\mathbf{B})$  по данному типу поверхности.

Данный тип фрикционных поверхностей предполагает, что движение по нему невозможно или крайне затруднительно, поэтому ячейки матрицы, промаркированные типом "барьер", алгоритм поиска должен обходить, условие 1.

$$v(\mathbf{B}) = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}, v \rightarrow 0 \quad (1)$$

В этом случае верно условие, что атрибут  $v$  является бесконечно малой величиной, стремящейся к 0. Так как стоимость перемещения условного транспортного средства для выбранной ячейки матрицы  $g(v)$  вычисляется как  $g(v) = d/v$ , где  $d$  - ширина ячейки или длина ребра, а  $v$  - средняя скорость перемещения, то при  $v \rightarrow 0$  стоимость перемещения равна  $g(v) = +\infty$ .

Класс "доминирующий" – к данному классу могут относиться объекты дорожной сети. Для ячеек матрицы, промаркированных типом "доминирующий", значение атрибута со средней скоростью перемещения должно быть максимальным в сравнении с другими классами, условие 2.

$$v(\mathbf{D}) = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}, v \gg \max(v(\mathbf{B}), v(\mathbf{K})) \quad (2)$$

Так для каждого объекта класса "доминирующий" ( $\mathbf{D}$ ) существует атрибут средней скорости передвижения ( $v$ ) условного транспортного средства по данному типу поверхности. В этом случае верно условие, что атрибут  $v$  является максимальной величиной в сравнении с атрибутами средней скорости передвижения ( $v$ ) классов "барьеров" и "комбинированных".

Класс "комбинированный" – к данному классу могут относиться все остальные типы поверхностей, например пашни, поля, сенокосы, лесные массивы и другие, условие 3.

$$v(\mathbf{K}) = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}, \mathbf{K} \notin (\mathbf{B} \cup \mathbf{D}) \quad (3)$$

Данный класс применяется, если в границы рассматриваемой ячейки матрицы могут входить несколько пространственных объектов, не относящихся к барьерам и к классу доминирующих объектов.

Так для каждого объекта класса "комбинированный" вычисляется комбинированная скорость передвижения ( $v_{\text{ком}}$ ) условного транспортного средства для всех типов поверхностей, попадающий в границы, пропорционально степени вхождения каждого типа в ячейку матрицы, условие 4.

$$v_{\text{ком}} = (v_1 * x_1 / 100 + \dots + v_n * x_n / 100) / N \quad (4)$$

Где  $v_n$  – равен скорости передвижения по n-му типу поверхности,  $n \in N = [1, 2, \dots, n]$ , входящему в границы ячейки матрицы, а  $x_n$  – процент вхождения данного типа местности в границы ячейки.

### Результат

Предложенный подход к разделению пространственных объектов на три класса при моделировании области поиска позволяет:

- выделить типы поверхности, движение по которым считается приоритетным и позволяет использовать существующую транспортную инфраструктуру;
- исключить из рассмотрения типы местности, движение по которым невозможно;
- использовать в расчетах при построении маршрута всю доступную атрибутивную информацию о пространственных объектах для повышения точности расчетов.

Комбинирование растровых и векторных подходов к представлению пространственной информации при моделировании области поиска позволяет использовать основные преимущества каждого подхода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-07-98005.

### Список литературы

1. Jönsson Markus F. An optimal pathfinder for vehicles in real-world digital terrain maps. // The Royal Institute of Science, School of Engineering Physics, Stockholm, Sweden, 1997.
2. М.А. Басараб, А.Б. Домрачева, В.М. Купляков. Алгоритмы решения задачи быстрого поиска пути на географических картах. - МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия, 2013.

## НИЗКОУРОВНЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ, ОСНОВАННАЯ НА ВЕКТОРИЗАЦИИ, В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОФОРЕТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

С.В. Черников, Д.А. Кузьмин, А.В. Кушнарченко  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
Институт космических и информационных технологий  
e-mail: [s.v.chernikov.mail@gmail.com](mailto:s.v.chernikov.mail@gmail.com), [dm.kuzmin@gmail.com](mailto:dm.kuzmin@gmail.com),  
[avkushmarenko@gmail.com](mailto:avkushmarenko@gmail.com)

В статье обсуждаются вопросы использования векторных инструкций процессора. Показан подход к оптимизации на основе низкоуровневой векторизации обеспечивающий значительный прирост производительности алгоритма. Продемонстрирована эффективность на примере решения конкретной математической задачи по нахождению ближайших точек пересечения прямой и сферы в рамках физического моделирования фотофоретического взаимодействия.

*Ключевые слова:* НРС, высокопроизводительные вычисления, распараллеливание, векторизация, ускорение, низкоуровневая оптимизация, фотофорез, динамика аэрозоля.

В настоящее время рост вычислительных мощностей достигается за счет увеличения сложности систем, в особенности архитектуры, и для программирования таких систем требуется высокая квалификация. Основная сложность в том, что все без исключения современные вычислительные устройства являются параллельными. А когда речь идет об области высокопроизводительных вычислительных системах, то мы говорим не о 2-3 вычислительных ядрах, а о крупном кластере, имеющем сотни процессоров по 8-16 ядер на процессор, это без учета широко распространенных на сегодняшний день графических сопроцессорах, таких как NVidia Tesla[1] или AMD FireStream[2] или Intel Xeon Phi[3]. Чаще всего к процессу распараллеливания относят распараллеливание на уровне отдельных исполнительных устройств. Если мы имеем дело с MPI системами, то мы ориентируемся на схему MIMD по классификации Флина[4]. Но часто программисты забывают про эффективность использования каждого процессора в вычислительной системе — в теории производительность можно увеличить в несколько раз в зависимости от точности вычислений. Любой современный процессор поддерживает встроенные *векторные операции*, например, для x86 это MMX, SSE, AVX наборы регистров и инструкций[5].

Как следует из названия *векторизация* — вид распараллеливания программы, при котором однопоточные приложения, выполняющие одну операцию в каждый момент времени, модифицируются для выполнения нескольких однотипных операций одновременно[6]. Рассмотрим типичный вид векторного регистра SSE, расширенного до AVX — современные процессора используют один и те же регистры для разных наборов инструкций, т.е. SSE оперирует с младшей частью векторного регистра[5].

Векторизация является более частным случаем SLP (Superword Level Parallelism), который, в свою очередь является подвидом (ILP) Instruction Level Parallelism.

В большинстве статей по данной тематике векторизация [6,7,8] рассматривается как способ оптимизации генерируемого компилятором кода, а так же вопросы построения графов зависимостей и отображения вычислительной модели на машинный код, приемы, используемые в компиляторах для оптимизации при помощи векторных инструкций, сравнительные тесты для программ, собранных с использованием

векторизации и без нее для процессора Motorola MPC7400 с набором инструкций AltiVec.

В работе рассматривается векторизация на основе технологий SSE и AVX разработанных компанией Intel и поддерживаемых в процессорах AMD.

### **Моделирование фотофореза для аэрозольных кластеров**

Изучение аэрозольных систем является очень важным направлением, поскольку хорошо известно, что аэрозоли играют существенную роль в общем балансе явлений, влияющих на такие процессы, происходящие в атмосфере, как перенос солнечного и теплового излучения, облакообразования, фотохимию озона.

Одним из важнейших явлений, которые происходят с участием аэрозоля, является процесс его коагуляции, когда в результате броуновского движения, действия внешних сил, изначально отдельные мелкие частицы сталкиваются и в результате процессов адгезии образуют более крупные образования – агломераты или аэрозольные кластеры.

Явление фотофореза возникает в результате поглощения частицами электромагнитного излучения (солнечного света, лазерного излучения, ИК источников и др.), которое приводит к неравномерному разогреву поверхности частицы и, как следствие, к нескомпенсированности импульса, передаваемого молекулами окружающего газа, поскольку после соударения с поверхностью частицы, молекулы покидают её с большей скоростью там, где поверхность разогрета сильнее ( $\Delta T$  фотофорез).

Также сила может возникнуть из-за неравномерности распределения по поверхности частицы параметра, определяющего результат аккомодации энергии молекулы – коэффициента аккомодации  $\alpha$ , трактуемого в рамках зеркально-диффузионной модели, предложенной ещё Максвеллом. По смыслу коэффициент аккомодации – есть вероятность того, что молекула, упавшая на поверхность частицы, примет температуру этой поверхности и отразится от нее диффузионно. Соответственно  $1-\alpha$  - есть вероятность зеркального отражения молекулы, при котором она не меняет свой температуры.

С целью изучения явления фотофореза, движения аэрозольных частиц и кластеров под действием фотофоретической силы, а также влияния фотофореза на процессы, протекающие в аэрозольных системах, и была разработана модель.

Одной из основных проблем является то, что моделирование очень сильно усложняется аэрозольных кластеров имеющих объем близкий к реальным системам. До сих пор не существует какой-либо приемлемой оценки потоков молекулярного тепла и переноса импульса в случае, когда система состоит из множества частиц с различными параметрами [10,11,12].

### **Векторная реализация**

Основная часть алгоритма связана с решением квадратных уравнений в рамках моделирования фотофоретического движения [10,11,12]. Алгоритм включает в себя генерацию случайных векторов в трехмерном пространстве и поиск их пересечений с большим числом сферических частиц. Задана точка и вектор исходящий из этой точки, заданные как  $\vec{a} \equiv (a_x, a_y, a_z)$ ,  $\vec{v} \equiv (v_x, v_y, v_z)$ , где  $a$  — начальная точка,  $v$  — вектор направления. Каждая сферическая частица описана как  $s = \{\vec{c} \equiv (c_x, c_y, c_z), r\}$ , где  $c$  — центр сферы,  $r$  — радиус. Необходимо найти ближайшую к точке  $a$  сферическую частицу из массива  $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , где  $n$  — число частиц, которая пересекается с вектором  $v$ .

Составим систему уравнений

$$\begin{cases} p_x = v_x t + a_x \\ p_y = v_y t + a_y \\ p_z = v_z t + a_z \\ (p_x - c_x)^2 + (p_y - c_y)^2 + (p_z - c_z)^2 - r^2 = 0 \end{cases}$$

где  $p$  — точка пересечения,  $t$  — параметр в параметрическом уравнении прямой

Параметр  $t$  как раз определяет расстояние от точки  $a$  до соответствующей частицы, таким образом конечная задача состоит в решении системы уравнений для каждой частицы из массива  $S$  и определении минимального  $t$ , где  $t > 0$ .

Выполнив соответствующие подстановки система приводится к простому квадратному уравнению

$$At^2 + Bt + C = 0$$

Таким образом задача сводится к решению  $n$  квадратных уравнений и нахождению наименьшего среди существующих решений.

Возьмем за  $T$  — время выполнения последовательного алгоритма для решения одной частицы как сумму  $T_1$  — времени вычисления коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и дискриминанта, и  $T_2$  — времени вычисления собственно корней уравнения  $t_1$  и  $t_2$ . Стоит учитывать, что существует вероятность того, что корни не будут лежать в действительной области, т. е. дискриминант будет меньше 0, в этом случае время  $T_2$  не должно учитываться. Запишем окончательный вариант формулы расчета времени,

$$T = T_1 + P T_2$$

где  $P$  — вероятность того что пересечение существует. Для систем с большим количеством сферических частиц, где число частиц более 200 вероятность  $P \approx 0,1$ , а  $T_2 \approx T_1$ , таким образом имеем  $T \approx 1,1 T_1$ .

### Распараллеливание

Теперь оценим теоретическое ускорение, получаемое при помощи векторизации всего алгоритма,

$$T_{\text{век}} = \frac{T}{Vlen} = \frac{1,1 T_1}{Vlen}$$

где  $Vlen$  — длина векторного регистра (например в SSE для чисел одинарной точности она равна 4). На практике же векторные инструкции не позволяют выполнять отдельные ветки условий для каждого компонента, поэтому оценим наилучший случай

$$T_{\text{век}} = \frac{T_1 + T_2}{Vlen} = \frac{2 T_1}{Vlen}$$

Т.к. алгоритм требует двойной точности, то для современных векторных инструкций SSE и AVX,  $Vlen$  равно 2 и 4, соответственно. Таким образом, используя частичную векторизацию той части алгоритма, которая связана с вычислением дискриминанта получим для инструкций SSE сокращение времени выполнения  $T_{\text{SSE}} = 0,5 T_1 + 0,1 T_1 = 0,6 T_1$ .

Что касается выбора реализации, то учитывая невозможность автоматической векторизации существует 2 варианта:

- Реализация при помощи интринсиков
- Реализация ассемблерными вставками

Интринсики — функции для получения доступа к определенным возможностям процессорной архитектуры. В данном случае это дополнительный расширенный набор для работы с векторами.

Независимо от того, выравнена память по размеру вектора, для векторизации необходимо заранее копировать операнды в выделенную область памяти. Сгенерированный генератором ассемблерный код достаточно сложен и содержит много накладных пересылок, приведем пример кода интринсика возводящего  $b$  в квадрат, т. к. все эксперименты выполнялись на платформе Unix при помощи компилятора GCC, традиционным является GNU Assembler (GAS) с синтаксисом AT&T.

Минусом использования интринсиков является недостаточная оптимизация кода компилятором. Опираясь на приведенный выше листинг можно сказать, что сгенерированный код избыточно работает со стеком, когда многие операции можно выполнять напрямую на регистрах. Более целесообразна реализация при помощи ассемблерных вставок, где этот же можно реализовать так

### Результаты

Реализация при помощи интринсиков не только не привела к ускорению, но даже замедлила алгоритм. Самым эффективным оказалась реализация с использованием ассемблерных вставок, в этом случае время получилось близко к теоретическому. Таким образом удалось увеличить производительность расчета корней уравнения в 1,5 раза, учитывая то, что 90% времени работы алгоритма для сажевых кластеров большого размера занимает поиск пересечений, то общая производительность повысилась на 30% с использованием SSE инструкций, для инструкций AVX это около 50%.

### Выводы

Использование низкоуровневой векторизации позволяет ускорить вычисления без увеличения числа вычислительных ресурсов только за счет повышения эффективности использования процессора.

Основной проблемой является сложность анализа кода на предмет выделения участков критичных к производительности. Тем не менее подход использования ассемблерных вставок для небольших участков кода, имеющих высокую частоту использования, является эффективным в случае если компилятор не способен сгенерировать векторный код, а использование интринсик-функций не дает прироста в быстродействии. Данный подход позволяет при незначительном усложнении программного кода получить высокую эффективность.

В результате решения задачи поиска пересечения прямой и сферы в рамках моделирования фотофоретического взаимодействия с применением низкоуровневой векторизации получен прирост быстродействия алгоритма в 1,5 раза по сравнению с последовательной реализацией.

### Список источников

- 1.Официальная страница AMD FireStream  
<http://developer.amd.com/community/blog/tag/amd-firestream/>
- 2.Официальная страница NVIDIA Tesla <http://www.nvidia.com/object/tesla-supercomputing-solutions.html>
- 3.Официальная страница Intel Xeon Phi  
<http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/xeon/xeon-phi-detail.html>
- 4.Gebali, Fayez. Algorithms and parallel computing. Hoboken, New Jersey.: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 365 с.

5. Официальная документация Intel <http://software.intel.com/en-us/intel-software-technical-documentation>
6. Larsen, S.; Amarasinghe, S. (2000). *Exploiting superword level parallelism with multimedia instruction sets*. "Proceedings of the ACM SIGPLAN conference on Programming language design and implementation". *ACM SIGPLAN Notices* **35** (5): 145–156
7. Shin, J.; Hall, M. W.; Chame, J. (2005). "Superword-Level Parallelism in the Presence of Control Flow". *Proceedings of the international symposium on Code generation and optimization*. pp. 165–175. doi:[10.1109/CGO.2005.33](https://doi.org/10.1109/CGO.2005.33). ISBN 0-7695-2298-X.
8. Shin, J. (2007). "Introducing Control Flow into Vectorized Code". *Proceedings of the 16th International Conference on Parallel Architecture and Compilation Techniques*. pp. 280–291. doi:[10.1109/PACT.2007.41](https://doi.org/10.1109/PACT.2007.41).
9. <http://gcc.gnu.org/projects/tree-ssa/vectorization.html>
10. Cheremisin, A., Granitskii, L., Myasnikov, V., Vetchinkin, N. Improved aerosol scattering in the upper atmosphere, according to data of ultraviolet observations from space, with instrumental smoothing taken into account. *Proc. SPIE*, 2000. - V. 4341. - P. 383-389.
11. Cheremisin, A.A., Granitskii, L.V., Myasnikov, V.M., and Vetchinkin, N.V., Investigation into a trace effect of the Space Shuttle launch on the optical characteristics, ozone and aerosol of the upper atmosphere by the method of tangent sensing from a board of the astrophysical space station Astron in the ultraviolet region. *Atmos. Oceanic Opt.*, 1997. - 10(12), - P. 891-895.
12. Cheremisin, A.A., Granitskii, L.V., Myasnikov, V.M., Vetchinkin, N.V., Slabko, V.V. Remote sensing of vertical distribution of aerosol and ozone in the upper atmosphere from a board of the astrophysical space station Astron in the ultraviolet region. *Atmos. Oceanic Opt.*, 1977. - 10(12), - P. 885-890.

## УДК 53

### АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ CO<sub>2</sub> МЕТОДОМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

М.Ю. Катаев, А.К. Лукьянов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
e-mail: [kataev.m@sibmail.com](mailto:kataev.m@sibmail.com)

В статье приводится описание алгоритма решения обратной задачи (восстановление общего содержания CO<sub>2</sub>) обработки реальных данных спутникового прибора (Фурье-спектрометра среднего разрешения) GOSAT методом эмпирических ортогональных функций.

*Ключевые слова:* спутниковые данные, метод эмпирических ортогональных функций.

Традиционно для решения обратных задач атмосферной оптики применяются параметрические подходы, когда измеренный сигнал (см. (1)) сравнивается с моделью физического процесса:

$$y_{obs} = f(p, b) + \xi \quad (1)$$

где  $f(p, b)$  – соответствующая модель физического процесса (уравнение переноса излучения в атмосфере),  $p$  – искомый параметр (в нашем случае общее содержание CO<sub>2</sub>),  $b$  – мешающие параметры (например, водяного пара и аэрозоля оптические толщи),  $\xi$  – ошибки измерения,  $y_{obs}$  – полученные измерения.

Решение относительно искомого параметра ищется из выражения невязки:

$$\Delta(p) = \|y_{obs\ i} - f_i(p)\|_{S_y}^2 + \alpha \|p - p_a\|_{S_p}^2 + \beta \|p\|_T^2 \quad (2)$$

где  $p_a$  – априорная оценка искомого параметра,  $S_y$  – матрица ковариации случайной ошибки измерений,  $\alpha, \beta$  – параметры,  $S_p$  – матрица ковариации ошибок априорной информации и  $T$  – матрица сглаживания Тихонова-Туоми.

Решение уравнения (2) [1-6], без учета типично находится методом итераций:

$$p^{i+1} = p^i + A^{-1}(K^T S_y^{-1}(y_{obs\ i} - f(p^i)) + S_p^{-1}(p^i - p_a) - Tp^i) \quad (3)$$

здесь  $K$  – матрица Якобиан, содержащая частные производные, а матрица  $A$  равна:  $A = K^T S_y^{-1} K + S_p^{-1} + T$ .

Как видно из (3) найденное решение зависит от многих составляющих, которые определяют физическую модель, знание априорной информации и различного рода погрешности. Эти составляющие определяют точность решения. Сложностью решения (3) является тот аспект, что в случае сильных изменений сигнала по величине, изменения вектора  $b$ , решение может также сильно меняться, а также, при больших размерностях (сотни или тысячи точек) измеряемого сигнала, время решения (3) сильно возрастает. Эти обстоятельства побудили нас исследовать возможности другого подхода, который относится к классу непараметрических, а именно метод эмпирических ортогональных функций.

Для непараметрических подходов характерно сравнение измеренных сигналов  $Y$  и решения (общего содержания  $CO_2$ ). Важным преимуществом непараметрических подходов является то, что при их использовании не нужно использовать модель переноса излучения. Использование лишь статистических или иных характеристик взаимосвязи измеренных сигналов и общего содержания  $CO_2$  позволяют построить алгоритм решения обратной задачи.

Принцип метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) широко представлен в литературе, в основном для анализа рядов наблюдений, сжатия информации, выявления закономерностей проявления физических процессов во времени и пространстве [7-11]. При решении обратных задач, этот подход практически не используется.

Метод эмпирических ортогональных функций основан на методе главных компонент (МГК), сутью которого является представление измерений в ортонормированном пространстве векторов матрицы ковариации измерений. К преимуществам метода стоит отнести возможность учета большого объема априорной информации. Недостатками метода является большая зависимость от качества и объема предоставленной априорной информации для обучения.

Алгоритм решения обратной задачи восстановления общего содержания  $CO_2$  на основе ЭОФ связан с набором типичных математических операций:

1. вычисление ковариационной функции  $R$

$$R = \Delta Y (\Delta Y)^T, \quad \Delta Y = (Y - \langle Y \rangle), \quad (4)$$

где  $Y$  – измеренный (или модельный) сигнал из  $N$  точек.

2. Разложение в ряд по собственным векторам и значениям

$$R = U \Lambda U^T, \quad (5)$$

здесь  $U$  – матрица собственных векторов и  $\Lambda$  – собственные значения.

3. На основе элементов (4) и (5) можно построить эмпирические ортогональные функции (ЭОФ)

$$E = U \Delta Y. \quad (6)$$

4. Определение искомого параметра. В предположении линейной зависимости искомой величины, от измеренных сигналов, можно получить выражение:

$$P = \langle P \rangle + AE, \quad (7)$$

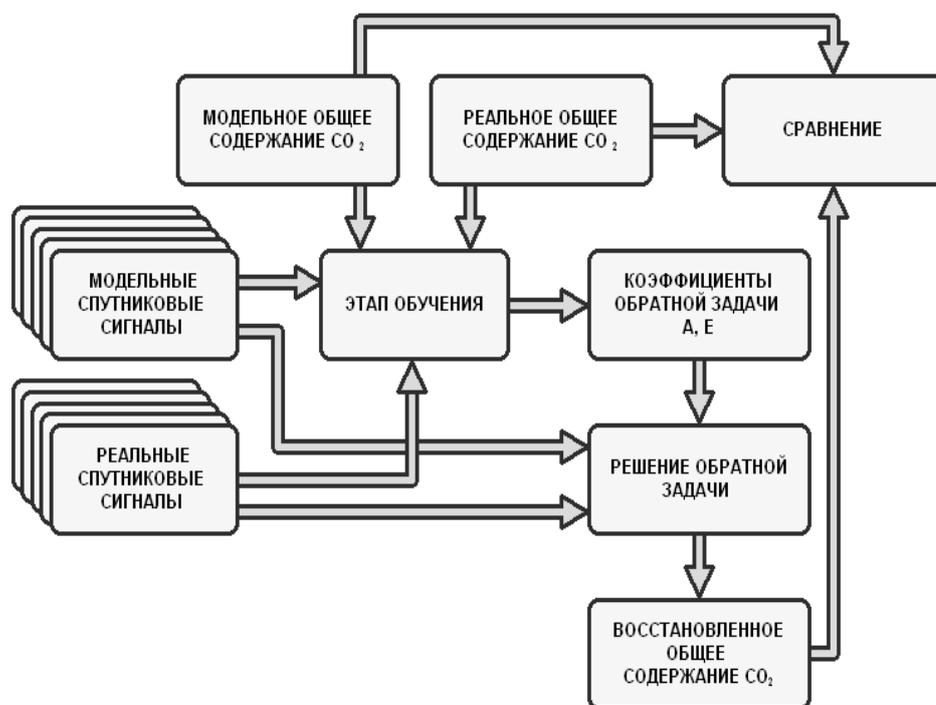
где вектор  $A$  является искомым.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (7) позволяет найти коэффициенты  $A$  и тем самым, построить алгоритм для обработки данных измерений, который мы назвали базовым.

Нами была выполнена модификация данного подхода за счет добавления априорной информации в ковариационную матрицу (4). Известно, что при спутниковом зондировании атмосферы необходимо знать положение Солнца относительно пятна наблюдения. Область атмосферы над пятном наблюдения зависит от рельефа и типов поверхности, содержания аэрозольной составляющей и распределения влажности воздуха. Учет этих компонент в матрице измерений  $Y$  позволил нам избежать смещения решения и получить более точное решение. Все выполняемые нами действия, связанные с решением обратной задачи были воплощены в программный комплекс.

Особенностью непараметрических подходов решения обратных задач является разделение на два этапа: 1) обучение и 2) обработка. На этапе обучения нами были использованы разнообразные наборы данных (модельные и реальные). Модельные спутниковые сигналы рассчитываются нами на основе программы, написанной нами [12]. Программа позволяет рассчитывать спутниковый сигнал для любой точки поверхности Земли и времени в течение года (это время циклов изменения концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и других атмосферных газов). Далее, выбиралась точка на поверхности земли, для которой проводились расчеты спутниковых сигналов для нескольких лет, с шагом 6 часов (1460 сигналов в год и каждый сигнал 8000 спектральных точек в диапазоне второго канала). Часть сигналов из общей выборки формирует обучающую выборку (60%), другая часть тестовую (40%), согласно правилу, представленному в [13]. Соотношение между обучающей и тестовой выборкой может быть изменено, в зависимости от точности обучения на первом шаге. Если заданная точность 0.1 % не достигнута, обучающая выборка увеличивается и так далее, пока не будет достигнута заданная точность. Есть ограничение на соотношение между обучающей и тестовой выборкой, которое выражается в условии, что тестовая выборка не может быть менее 10% от общей. Реальные сигналы для общей выборки, для того же времени и географической точки, уровня L1B, нами были получены на сайте [[www.gosat.nies.go.jp](http://www.gosat.nies.go.jp)].

Для расчета спутниковых сигналов нами использовалась модельная информация об общем содержании  $\text{CO}_2$  в атмосфере, а также реальные данные GOSAT, уровня L2, полученные при обработке измеренных значений. Сигналы и данные общего содержания являются основой для обучения, при котором формируются коэффициенты обратной задачи  $A$  и  $E$  (см. рис.1).



**Рис. 1** Блок-схема программного комплекса

Таким образом, процесс обучения связан с расчетами по формулам (4-7), а процесс обработки в использовании формулы (7), где матрица  $E$  связана с измеренным сигналом. После того, как обработаны сигналы и получены значения общего содержания  $\text{CO}_2$ , эти значения сравниваются с известными значениями, которые были известны априори при получении модельных сигналов, или получены для того же времени, географического места независимым прибором.

Точность восстановления зависит от количества собственных векторов корреляционной матрицы, которые были взяты для нахождения коэффициентов модели.

Нами разработан алгоритм решения обратной задачи методом эмпирических ортогональных функций и программа, которая позволяет тестировать данный алгоритм для модельных и реальных спутниковых данных.

### Список литературы

1. Dufour, E. Breon, F. Spaceborne estimate of atmospheric  $\text{CO}_2$  column by use of the differential absorption method: error analysis, *Appl. Opt.*, 42, 3595–3609, 2003.
2. Zhiming K., Marglois J., Toon G., Crisp, D., Yuk Y. Spaceborne measurements of atmospheric  $\text{CO}_2$  by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study *Geophysical research letters* 29,15, 11.1-11.4, 2002.
3. Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Reuter, M., Notholt, J., Macatangay, R., Warneke, T. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite - Part 1: Carbon dioxide, *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, 8. – p. 3827–3853
4. Park, J.H. Atmospheric  $\text{CO}_2$  monitoring from space, *Appl. Opt.*, 1997, 36. – p. 2701–2712
5. B. Connor, B., H. Boesch, G. Toon, B. Sen, C. Miller, D. Crisp Orbiting Carbon Observatory: Inverse method and prospective error analysis, *J. Geophys. Res.*, 2008, 113. – p. 20903-20919, 2008.

6. Boesch, H., Baker, D., Connor, B. J., Crisp, D., Miller, C. Global Characterization of CO<sub>2</sub> Column Retrievals from Shortwave-Infrared Satellite Observations of the Orbiting Carbon Observatory-2 Mission, *Remote Sens.*, 2011, 23. – p. 270–304
7. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций. *Известия АН СССР, сер.геофиз.*, 1960, № 3 – с. 432-439.
8. Естественные составляющие метеорологических полей / А.В. Мещерская, Л.В.Руховец, М.И.Юдин, Н.И.Яковлева. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – С.199.
9. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. *Прикладная статистика: Исследование зависимостей*. Под редакцией С.А.Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985, 487 с.
10. Фортус, М. И. Эмпирические ортогональные функции случайного временного ряда, заданного на конечном отрезке / М. И. Фортус // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2002. - Т. 38, № 1. – С. 64-7
11. Чувашина И.Е. Применение аппарата разложения в двойные ряды по э. о. ф. координат и времени для исследования временной структуры полей средних суточных температур. -*Труды ГГО*, 1976, Вып. 367, с.81-86.
12. М.Ю. Kataev, А.К. Lukianov Information-processing software for satellite signal modeling in global scale // *International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems (ENVIROMIS-2010)*, 5–11 July 2010, Tomsk, Russia. Tomsk: 2010
13. Хайкин, С. *Нейронные сети: полный курс* / С. Хайкин. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.

УДК 53

## **ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СПУТНИКОВЫХ СИГНАЛОВ ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРА СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

М.Ю. Катаев, А.К. Лукьянов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
e-mail: kataev.m@sibmail.com

В статье приводится описание параллельного алгоритма решения прямой задачи атмосферной оптики. Расчёт спутникового сигнала прибора GOSAT.

*Ключевые слова:* спутниковые данные, отражённое солнечное излучение.

Прямая задача расчета спутникового сигнала связана с решением уравнения переноса солнечного излучения в атмосфере Земли. Нами используется известная в мире модель, которая модифицирована путём учета параметров модели для произвольного времени и пространственных координат. В этом случае, пропускание атмосферы становится шестимерным. Использование априорной информации о поверхности земли и атмосфере позволяет получить максимально приближенный к реальному модельный сигнал.

В сигнале GOSAT можно выделить две основные составляющие: свет, отраженный от поверхности, и свет, рассеянный в атмосфере (рис. 1). Остальными составляющими можно пренебречь, в силу их малого влияния [5].

Таким образом, регистрируемый спутниковый сигнал будет равен сумме двух составляющих  $I_1(\lambda)$  и  $I_2(\lambda)$  [3], где:

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \rho(\lambda, x, y) R_{surf}(x, y) T(\lambda, \varphi, x, y, h, t) \quad (1)$$

$$I_2(\lambda) = I_0(\lambda) \frac{1}{\mu_{sun}} \int_{H_0}^H (\alpha_{mol}(\lambda, x, y, h, t) F_{mol}(\gamma) + \psi_{aer} \alpha_{aer}(\lambda, x, y, h, t) F_{aer}(\gamma)) T(\lambda, \varphi, x, y, h) dh$$

$$\cos(\varphi) = -\mu_{sun} \mu_{sat} - [(1 - \mu_{sun})(1 - \mu_{sat})]^{1/2} \cos(\varphi) \quad (2)$$

(3)

где  $I_0(\lambda)$  – излучение Солнца вне атмосферы Земли;  $\rho(\lambda, x, y)$  – коэффициент отражения поверхности;  $T(\lambda, \varphi, x, y, h, t)$  – пропускание атмосферы;  $\varphi$  – зенитный угол склонения Солнца;  $\lambda$  – длина волны;  $x, y$  – координаты точки;

Пропускание атмосферы находится по выражению:

$$T(\lambda, \varphi, x, y, h, t) = \exp(-m(\varphi)\tau(\lambda, x, y, h, t))$$

(4)

где  $m(\varphi) = \frac{1}{\cos(\varphi)} + 1$ ;  $\tau(\lambda, x, y, h, t)$  – оптическая толщина атмосферы, которая находится из соотношения:

$$\tau(\lambda, x, y, h, t) = \int_{H_0}^H (\alpha_{gas}(\lambda, x, y, h, t) + \alpha_{aer}(\lambda, x, y, h, t) + \alpha_{mol}(\lambda, x, y, h, t)) dh$$

(5)

где  $\alpha_{gas}(\lambda, x, y, h, t)$  – ослабление излучения газами;  $\alpha_{aer}(\lambda, x, y, h, t)$  – ослабление излучения аэрозолями.

Ослабление излучения газами находится по выражению:

$$\alpha_{gas}(\lambda, x, y, h, t) = \sum_{j=1}^N K_j(\lambda, h) p_j(x, y, h, t) \quad (6)$$

где  $K_j(\lambda, h)$  – коэффициент поглощения газами  $j=1, \dots, N$ ;  $p_j(x, y, h, t)$  – профиль концентрации  $j$ -го газа на заданной высоте.

Учет влияния рельефа происходит за счет расчета угла наклона и угла поворота пятна обзора.

$$R_{surf}(x, y) = \frac{1}{\cos \varphi \cdot \cos \theta_p(x, y) + \sin \varphi \cdot \sin \theta_p(x, y) \cdot \cos \phi_0(x, y)} \text{ из [4],}$$

(7)

где  $\varphi$  – зенитный угол склонения солнца,  $\theta_p(x, y)$  – угол наклона выбранного участка поверхности,  $\phi_0(x, y)$  – угол поворота выбранного участка поверхности.

Основной вклад в принимаемый спутниковым прибором сигнал вносит отражение солнечного излучения от поверхности. Этот сигнал формируется в зависимости от рельефа, типов поверхности и спектрального коэффициента отражения. Нами для учета рельефа используется база SRTM. На основе этой информации рассчитывается угол наклона и поворота площадки пятна обзора относительно направления на север. В каждом пятне обзора присутствуют разнообразные типы поверхности (вода, земля, лес) с разными площадями. Каждый тип поверхности обладает уникальным спектром отражения. Учет типов поверхности осуществляется с использованием баз CLC и JPL (ASTER).

Другим параметром, определяющим спутниковый сигнал, является сама атмосфера. Атмосфера Земли состоит из молекул газов и частиц аэрозоля. Эти

компоненты определяют прохождение солнечного излучения через атмосферу. Содержание этих компонент в атмосфере весьма изменчиво как по времени, так и пространству. Типично в существующих комплексах программ используются значительно усреднённые по времени и пространству модели параметров атмосферы. Нами же используются априорные данные максимально приближенные к реальности. Учёт аэрозоля по глобальной базе SPRINTARS, а газового состава по базам NCEP и ESMWF. Газы атмосферы обладают уникальными коэффициентами поглощения, которые также изменчивы по времени и пространству. Расчет коэффициентов поглощения ведется на основе базы HITRAN-2008

Спутниковый сигнал зависит не только от состояния атмосферы и поверхности, но и от характеристик измерительного прибора. Нами для приближения модельного сигнала к реальному используется учет аппаратных функций канала (канал 2) и аппаратная функции прибора, определяющей спектральное разрешение (0.1 см<sup>-1</sup>).

Сложность решения прямой задачи определяется большим объёмом априорных данных (несколько десятков Гигабайт) в различных форматах записи, которые необходимо интерполировать на единую пространственно-временную сетку, определяемую в программе. Ввиду того, что изменение содержания УГ в атмосфере имеет годовой цикл, возникает необходимость расчёта спутникового сигнала за этот же период, для понимания роли различных параметров в формировании сигнала и отработки элементов решения обратной задачи. В этом случае требует около 10<sup>13</sup> вычислений. Для типичных PC компьютеров, для времени расчета одной точки 10<sup>-5</sup> сек, суммарное время может занять около 3 лет. Это обстоятельство вынуждает нас применять особые подходы к расчету прямой задачи и выбор в качестве вычислителя кластера ГУСУР.

Для ускорения расчетов на вычислительном кластере нами применяется параллельные вычисления. Нами проведена работа по распараллеливанию основных частей программы. Для этих целей, нами разработана специальная архитектура программы. Для каждого узла ВК формируется набор данных и вычислительных задач (см. рис. 1 и 2).

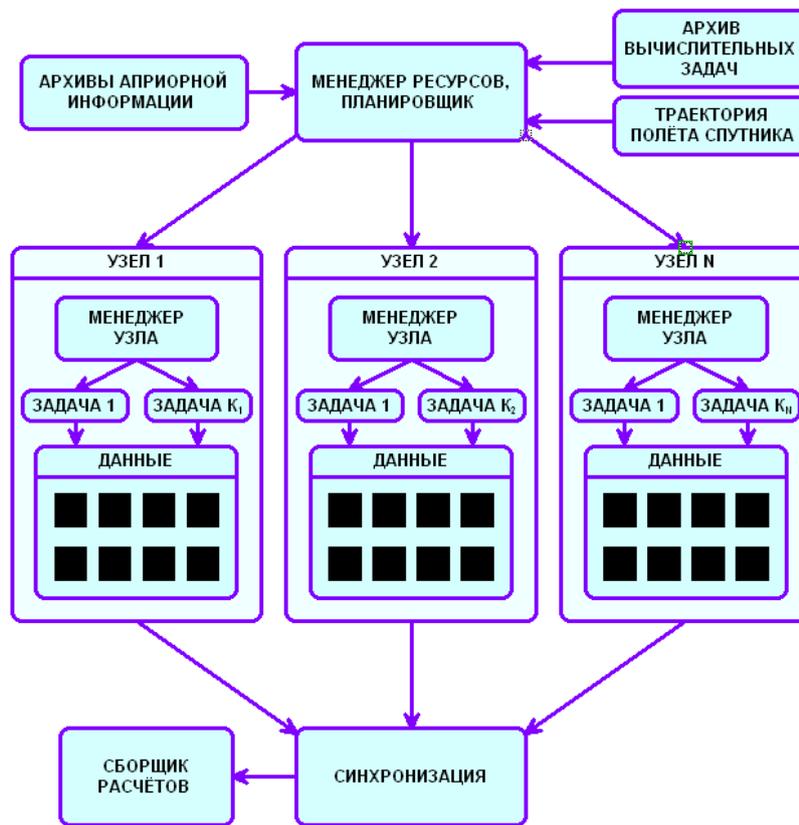
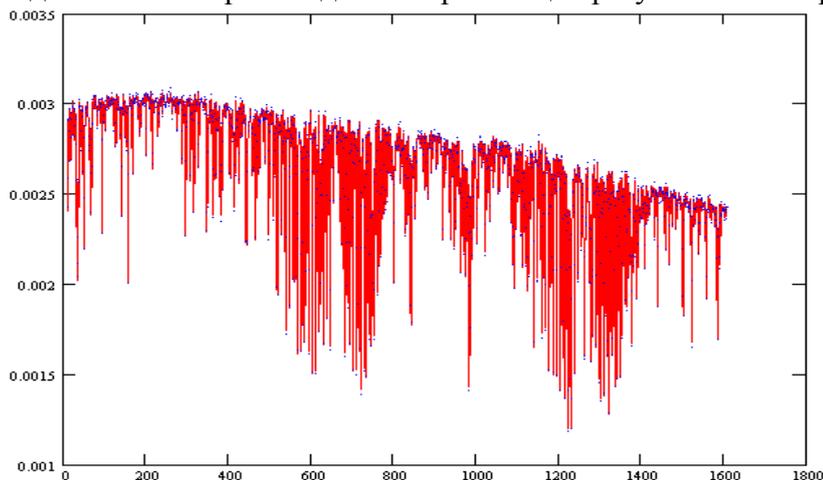


Рис. 1. Структура параллельной программы расчета спутникового сигнала на вычислительном кластере



Рис.2. Содержание архива вычислительных задач расчета спутникового сигнала

В дальнейшем происходит синхронизация результата и сборка решения.



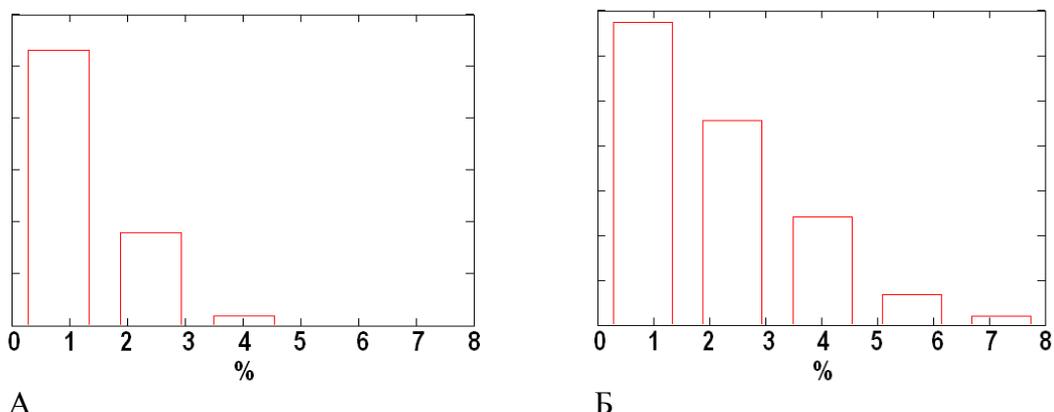
**Рис. 3. Сравнение рассчитанного спутникового сигнала с реальным**

Особенностью нашей программы является разделение распараллеливание как по данным, так и по задачам. При распараллеливании данных спектр сигнала разбивается на участки, где каждый участок рассчитывается на своём блоке узлов кластера. При распараллеливании задач на каждом узле рассчитываются определённые задачи. Таким образом достигается максимальная загруженность узлов кластера при минимальной пересылке данных между узлами.

После того, как все вычислительные задачи окончены, происходит сборка сигнала из отдельных частей. Такой подход позволяет проводить расчет не только для конкретно заданных параметров задачи, но и для их изменения в заданном диапазоне. Например, одновременно происходит расчет сигнала в зависимости от изменения входных параметров (зенитного угла Солнца, содержания УГ и рельефа).

Кроме того, параллельные технологии используются и в считывании информации из баз данных.

Рассчитанный таким образом сигнал позволяет достаточно точно моделировать реально возникающие ситуации при измерениях (см. рис.3). Сравнение модельного спутникового сигнала с реальным сигналом GOSAT показало, что отличие их не превышает 2-3% при угле склонения Солнца 10 градусов и 5-6 % при угле склонения Солнца 60 градусов (см. рис.4). Этой точности достаточно для анализа сигнала и отработки методики решения обратной задачи.



**Рис. 4. Сравнение отклонений рассчитанного и реального спутниковых сигналов для угла склонения Солнца 10 градусов (А) и 60 градусов (Б).**

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	3
Возможности и опыт использования спутникового сервиса ВЕГА при организации регионального дистанционного мониторинга <i>Лулян Е. А., Барталев С. А., Толпи В. А., Крашенинникова Ю. С., Оксюкевич А. Ю.</i>	3
Разработка и создание авиакосмических систем и технологий в дистанционном зондировании Земли <i>Беляев Б. И.</i>	7
Атмосферная коррекция спутниковых изображений земной поверхности. Итоги, проблемы, перспективы <i>Белов В. В.</i>	11
Программные технологии в космическом мониторинге ледяного покрова Арктики <i>Асмус В. В., Кровотынце, В. А., Пяткин В. П.</i>	15
Мониторинг процессов переноса взвешенных в атмосфере частиц по данным дистанционных и локальных измерений в Беларуси и сопредельных регионах <i>Иванов А. П., Чайковский А. П., Зега Э. П., Кацев И. Л., Кабашиников В. П., Денисов С. В., Осипенко М. М., Прихач А. С., Слесарь А. С.</i>	19
Возможности оператора российских средств ДЗЗ по обеспечению государственных потребителей материалами космической съемки <i>Селин В. А., Емельянов Ю. В., Федоркова А. А. Король Ф. П.</i>	23
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	28
Проблемы гиперспектрального авиационного мониторинга почвенно-растительного покрова <i>Дмитриев Е. В., Козодеров В. В.</i>	28
Применение данных дистанционного зондирования для оценки экологического состояния природных объектов в угледобывающем регионе в зимние периоды времени <i>Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Быков А. А., Андреева Н. В.</i>	32
Определение деформаций земной поверхности в сейсмоопасных районах Кузбасса по данным COSMO-SkyMed и ALOS PALSAR <i>Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Миков Л. С.</i>	35
Применение данных TerraSAR-X для обнаружения просадок земной поверхности самотлорского месторождения <i>Филатов А. В., Евтюшкин А. В., Васильев Ю. В., Погодин П. В.</i>	40
Изучение острова тепла города Апатиты (Мурманская область) по полевым и космическим данным <i>Константинов П. И., Грищенко М. Ю., Варенцов М. И.</i>	44
Анализ изменений Z-компоненты геомагнитного поля IGRF в геоцентрической системе координат в период 1980–2005 гг. <i>Кочнев В. А.</i>	48
Особенности сезонных вариаций индекса растительности NDVI в зоне вечной мерзлоты <i>Варламова Е. В., Соловьев В. С.</i>	52
Исследование вариаций метана на арктическом побережье (ст. Тикси) по данным наземных и спутниковых наблюдений <i>Стародубцев В. С., Соловьев В. С.</i>	56
Многолетние наблюдения за айсбергопродуцирующими ледниками Новой Земли с использованием спутниковых данных <i>Бычкова И. А., Платонова Е. В.</i>	60
Исследование степени увлажненности территории Западной Сибири аэрокосмическими и геоботаническими методами <i>Дмитриев В. В., Свириденко Б. Ф., Финиченко Е. Н.</i>	64
Моделирование излучательных характеристик почвы с использованием данных о микрорельефе <i>Дмитриев А. В., Дмитриев В. В., Яценко А. С.</i>	68
Определение и мониторинг тропосферной задержки сигналов ГЛОНАСС/GPS по данным ДЗЗ за 2013 г. <i>Клыков А. О., Какин В. Б.</i>	73
Алгоритм анализа породной, возрастной структуры лесов Хакасии по данным ДЗ <i>Федотова Е. В., Командирова А. В.</i>	76
Использование данных ДЗ в анализе динамики восстановления лесов в районе интенсивной заготовки древесины <i>Феотова Е. В., Стаброва Е. А.</i>	80
Климатогенная солифлюкция в лиственничниках Эвенкии <i>Шушпанов А. С., Харук В. И.</i>	84
	88

Анализ изменений водной массы в Средней Сибири в начале XXI века по данным дистанционного зондирования GRACE <i>Им С. Т.</i>	92
Использование спутниковых данных для изучения пространственно-временной изменчивости характеристик водных экосистем <i>Картушинский А. В.</i>	96
Использование данных космического мониторинга в работе органов ЧС Казахстана <i>Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н., Бралинова Ж. А.</i>	100
Определение временных тепловых аномалий поверхности Земли по данным дистанционного зондирования MODIS. Предварительные результаты <i>Воронина П. В., Мамаи Е. А.</i>	103
Особенности распределения айсбергов вблизи выводных ледников Новой Земли <i>Михальцева С. В.</i>	107
Программно-технологическое обеспечение систем мониторинга состояния окружающей среды <i>Кадочников А. А.</i>	111
Анализ динамики Балгазынского бора по спутниковым данным Landsat <i>Куулар Х. Б.</i>	116
Анализ выбросов диоксида серы по данным инструмента OMI (спутник AURA) для Норильской промышленной зоны за 2004–2013 гг. <i>Зуев Д. В., Кашкин В. Б.</i>	120
Геоинформационная система мониторинга экологического состояния территории по данным прибора MODIS <i>Катаев М. Ю., Бекеров А. А.</i>	124
Результаты мониторинга экологического состояния природной среды территории Западной Сибири по данным прибора MODIS <i>Катаев М. Ю., Бекеров А. А.</i>	127
Результаты обработки реальных данных измерений спутниковым прибором GOSAT для подспутниковых станций TCCON. Восстановление общего содержания CO <sub>2</sub> <i>Катаев М. Ю., Лукьянов А. К.</i>	131
Вычисление n-мерного быстрого преобразования Фурье по аналогу алгоритма Кули-Тьюки <i>Носков М. В., Тутатчиков В. С.</i>	135
Применение двумерного аналога алгоритма Кули-Тьюки к обработке космоснимков на основе данных дистанционного зондирования Земли <i>Тутатчиков В. С., Кольцова И. В., Киселев О. И.</i>	139
Дешифрирование проявлений вулканической активности по тепловым космическим снимкам с ресурсных спутников на примере Курильских островов <i>Грищенко М. Ю., Жарков Р. В., Устюхина А. В.</i>	143
Оценка качества визуализации изображений со скрытой текстовой информацией <i>Орешкина Е. И.</i>	146
Устранение размытия объектов на изображении при движении видеокамеры <i>Буряченко В. В.</i>	150
Методы автоматизированной классификации морского льда в Арктике по спутниковым радиолокационным данным <i>Захваткина Н. Ю., Бычкова И. А., Волков В. А.</i>	154
Повышение эффективности обнаружения изменений в территории застройки по спутниковым изображениям за счет применения структурных признаков <i>Потатуркин А. О., Борзов С. М.</i>	158
Алгоритм формирования визуальных слов <i>Проскурин А. В.</i>	162
Модели совмещения лазерных точек при моделировании ландшафтных сцен <i>Ткачева А. А.</i>	166
Методы обработки информации с большими ошибками в динамических задачах оценивания <i>Рогалев А. Н., Рогалев А. А.</i>	170
Мониторинг лесных экосистем с использованием инновационных технологий дистанционного зондирования <i>Данилин И. М.</i>	174
Магнитометрические методы зондирования глубинного строения земной коры <i>Цветков Ю. П., Брехов О. М.</i>	178

Анализ данных GCOM-W1 и NDVI (MODIS) для территории юга Западной Сибири и Северного Казахстана <i>Яценко А. С.</i>	
Метод измерения рельефа и пространственной вариации влажности поверхности почвы на основе бистатистической локации сигналами ГЛОНАСС и GPS <i>Мионов В. Л., Музалевский К. В.</i>	183
Метод измерения температурной зависимости диэлектрической проницаемости поверхностного слоя почвы на полуострове Ямал с использованием спутниковых данных радиометра MIRAS SMOS <i>Мионов В. Л., Музалевский К. В.</i>	186
Спектральные характеристики почв агроландшафтов Брянской области <i>Зверева А. Ю., Лобанов Г. В.</i>	189
Алгоритм поиска временных интервалов геохимических аномалий на основе продуктов Terra/Modis <i>Старченко Е. А., Романов А. А.</i>	193
Оценка эффективности нейросетевого подхода при исследовании сукцессионных процессов <i>Рубанов К. А., Романов А. А.</i>	196
Преобразование Гильберта-Хуанга двумерных изображений и использование его для выделения текстурных признаков <i>Нежевенко Е. С., Феоктистов А. С.</i>	200
Тематическое картографирование лесных экосистем на региональном и федеральном уровне <i>Гаврилюк Е. А., Ершов Д. В.</i>	204
Метод снижения размерности пространства признаков при классификации гиперспектральных изображений <i>Пестунов И. А., Мельников П. В.</i>	208
Метод построения ансамбля сеточных иерархических алгоритмов кластеризации для сегментации спутниковых изображений <i>Пестунов И. А., Рылов С. А.</i>	215
Крупномасштабное картографирование структуры степной растительности и выявление сообществ с редкими и уникальными видами растений на территории Южной Сибири с использованием снимков высокого разрешения <i>Ермаков Н. Б., Пестунов И. А., Полякова М. А., Дубровская О. А., Рылов С. А., Синявский Ю. Н.</i>	224
Измерение компактности скопления объектов на цифровом металлографическом изображении <i>Сизова Т. Н., Перфильев Д. А.</i>	229
Методы правового регулирования дистанционного зондирования Земли <i>Громыко В. А.</i>	233
Использование закона Пуассона для оценки вероятности возникновения лесных пожаров на территории Иркутской области <i>Плотникова А. С., Ершов Д. В., Шуляк П. П.</i>	237
Онтология лесов Западного Саяна с включением информации дистанционного зондирования <i>Федотова Е. В., Шуклович А. Ю., Янковская Т. А.</i>	241
Формирование информационного обеспечения региональных геоинформационных веб-систем <i>Якубайлик О. Э.</i>	245
Возможности использования данных ДЗЗ для мониторинга ледников и гляциологических расчетов <i>Коновалов В. Г., Рудаков В. А.</i>	249
Дистанционные технологии – практика применения и перспективы <i>Сагателян А. К., Асмарян Ш. Г.</i>	254
Создание и эксплуатация приёмного комплекса ПК-3,6 в Западносибирском центре ДЗЗ Роскосмоса <i>Гончаров А. К., Бекренёв О. В., Филькин К. Н., Мороз В. В., Рождественский А. С., Пасменко Ю. В.</i>	258
Разработка системы информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки с использованием данных ДЗЗ (на примере Мурманской области) <i>Вицентий А. В., Порядин Т. А., Шишаев М. Г.</i>	262
Исследование пространственно-временных вариаций аэрозольного индекса, вызванных крупными лесными пожарами в Сибири <i>Томишин О. А., Соловьев В. С.</i>	267
Перспективные электромеханические системы космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли <i>Бронов С. А., Никулин Н. А., Марарескул А. В., Авласко П. В., Поваляев В. А., Миценко Д. Д.</i>	270
	274

Построение полей перемещений природных объектов по данным космических спутников <i>Бучнев А. А., Пяткин В. П.</i>	
Технология прогнозирования коэффициентов спектральной яркости подстилающей поверхности по данным MODIS <i>Прокопов Д. А., Жуков А. П., Лагутин А. А.</i>	277
Геопортальная система регионального космического мониторинга <i>Донцов А. А., Волков Н. В., Лагутин А. А.</i>	280
ГИС-проект экологического каркаса территории Южно-Минусинской котловины <i>Павлова Е. В., Махрова М. Л., Ямских Г. Ю.</i>	283
Web-GIS application for temperature and moisture monitoring of the arctic tundra soils based on SMOS data <i>Ruzicka Z., Muzalevskiy K. V.</i>	287
Текстура на радарных снимках ДЗЗ: влияние параметров съемки <i>Родионова Н. В.</i>	290
Использование объектно-ориентированного подхода для автоматизированного дешифрирования лесотаксационных выделов по материалам космической съемки и цифровой модели рельефа местности <i>Корец М. А.</i>	294
Система спутникового мониторинга территории Красноярского края на основе использования малых космических аппаратов <i>Шевырногов А. П., Яковлев А. В., Попов В. В., Валов М. В., Ларько А. А.</i>	298
Современные тенденции в построении региональных систем ДЗЗ <i>Маглинец Ю.А., Цибульский Г.М.</i>	302
Модель лидара для бортовой системы зондирования углеводородов малого космического аппарата <i>Хабаров В.А., Вейсов Е.А., Титовский С.Н., Попов Д.В.</i>	305
Анализ изображений на основе ШИарлет-преобразования <i>Симонов К.В., Кадена Л.</i>	313
Создание региональных информационных систем мониторинга окружающей среды на основе данных дистанционного зондирования Земли <i>Мышляков С. Г.</i>	317
Применение методов ДЗЗ при поисках и оценке геотермальных ресурсов байкальской рифтовой зоны <i>Вилор Н.В., Вилор М.А.</i>	321
Разработка информационной модели объекта «противопожарная вспашка» для автоматизированной обработки спутниковых данных <i>Мальцев Е.А., Маглинец Ю.А.</i>	326
Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений <i>Сладких Л.А., Кулик Е.Н., Сахарова Е.Ю.</i>	329
An Experience of Mulyi-Year Validation of Atmospheric No2 Measurements with the Omi Instrument Onboard the Eos-Aura Satellite <i>Gruzdev A.N., Elokhov A.S.</i>	333
Оценка прироста древесины в «углеродном лесу» по ДЗЗ <i>Гавриков В.Л., Кашкин В.Б., Хлебопрос Р.Г.</i>	337
Автономная система мониторинга целевого пространственного объекта по данным ДЗЗ <i>Брежнев Р.В.</i>	341
Представление пространственных данных для организации области поиска оптимального маршрута <i>Шатрова К.В., Маглинец Ю.А.</i>	345
Низкоуровневая оптимизация, основанная на векторизации, в задаче моделирования фотофоретического взаимодействия <i>Черников С.В., Кузьмин Д.А., Кушнаренко А.В.</i>	349
Алгоритм обработки спутниковых данных определения общего содержания CO <sub>2</sub> методом эмпирических ортогональных функций <i>Катаев М.Ю., Лукьянов А.К.</i>	353
Параллельный алгоритм расчета спутниковых сигналов Фурье спектрометра среднего разрешения в ближней ИК области спектра <i>Катаев М.Ю., Лукьянов А.К.</i>	357

Научное издание (экспресс)

Подготовлено к публикации ИЦ БИК СФУ  
Компьютерная верстка: *Т. М. Бовкун, А.В. Машукова, К.В. Шатрова*

Подписано в печать 01.09.2014. Печать плоская. Формат 60x84/8.  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 45,75. Тираж 150 экз. Заказ 2378

Издательский центр Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
Тел/факс (391) 206-21-49. Е-mail: [rio.bik@mail.ru](mailto:rio.bik@mail.ru) <http://rio.sfu-kras.ru>  
Адрес редакции:  
660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 28, ИКиИТ СФУ

Отпечатано Полиграфическим центром Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел/факс (391) 206-26-49