

Восстановление температуры поверхности тундровой почвы на основе поляриметрических данных радиометра AMSR2 спутника GCOM-W1

К. В. Музалевский, З. Ружичка

*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН — обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

В настоящем кратком сообщении предлагается полуэмпирический метод дистанционной оценки температуры поверхности тундровой почвы на основе поляриметрических данных радиометра AMSR2, установленного на спутнике GCOM-W1. С использованием простой модели радиотеплового излучения, полученной на основе закона Кирхгофа в приближении диэлектрически однородного изотермического полупространства, задача сведена к нахождению эффективной температуры и отражательной способности подстилающей поверхности из двух измеренных значений радиояркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризации и частоте 6,9 ГГц. Однозначность обратной задачи была обеспечена за счёт установленной линейной связи между обратными величинами поляризационного индекса и разностью отражательных способностей, измеренных на горизонтальной и вертикальной поляризациях. Калибровка двух параметров этой линейной регрессии была выполнена на двух тестовых участках Северного склона Аляски в течение 7 лет с 2012 по 2018 г. В результате было показано, что восстановленные значения температуры почвы со стандартным отклонением около 3,0 К и коэффициентом корреляции 0,83 соответствуют температурам поверхности почвы, которые были измерены метеостанциями на двух калибровочных и двух дополнительных тестовых участках, расположенных в различных ландшафтных условиях арктической тундры.

Ключевые слова: радиометрия, радиояркостная температура, температура почвы, арктическая тундра

Одобрена к печати: 05.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-293-297

В северных широтах дистанционное измерение температуры почвы с помощью инфракрасных радиометров затрудняется облачностью и атмосферными явлениями (Nachem et al., 2012). Исследования показывают, что значения температуры подстилающей поверхности (Land Surface Temperature — LST), полученные на основе наблюдений радиометра MODIS, в большей степени коррелируют с приповерхностной температурой воздуха, чем с температурой почвы (Nachem et al., 2012). Альтернативный метод измерения температуры почвы связан с использованием микроволновых радиометров (Su et al., 2017). Несмотря на несколько десятилетий продолжающихся исследований, спутниковый информационный продукт, предоставляющий данные о температуре поверхности почвы на основе наблюдения микроволнового излучения, до настоящего времени не создан (https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/data/data_w_product-3.html). В литературе наиболее распространены полуэмпирический (Jones et al., 2007) и эмпирический (Pulliainen et al., 1997) подходы для построения алгоритмов восстановления температуры почвы. В эмпирических подходах температура поверхности почвы представляется в виде линейной комбинации радиояркостных температур, измеренных на вертикальной и горизонтальной поляризациях на различных частотах. Весовые параметры этой линейной комбинации находятся в процессе решения обратной задачи на основе продолжительных временных рядов спутниковых наблюдений радиояркостной температуры и подспутниковых контактных измерений температуры почвы. Для различных типов почвенного и растительного покровов весовые параметры в подобной линейной комбинации разнятся, и до настоящего времени универсальной зависимости получено не было.

Полуэмпирические подходы основаны на физических моделях радиотеплового излучения, параметры которых калибруются для разных временных условий и типов подстилающей поверхности в ходе долговременных спутниковых наблюдений (Jones et al., 2007; Su et al., 2017). В отличие от существующих исследований в данной работе установлена универсальная линейная взаимосвязь между обратными величинами поляризационного индекса и разностью отражательных способностей почвенного покрова на горизонтальной и вертикальной поляризациях, что позволило на основе физической $\tau - \omega$ модели радиотеплового излучения решить обратную задачу о восстановлении температуры тундровой почвы.

Яркостная температура Tb_p поверхности почвы, покрытой растительным или снежным покровом, может быть описана на основе $\tau - \omega$ модели в виде уравнения (Jones et al., 2007):

$$Tb_p = (1 - \omega_p)(1 - \gamma_p)T_c + (1 - \omega_p)(1 - \gamma_p)\gamma_p |R_p|^2 T_c + \left(1 - |R_p|^2\right) \gamma_p T_g, \quad (1)$$

где ω_p — альbedo наблюдаемой поверхности; γ_p — пропускная способность растительного или снежного покрова; T_c и T_g — эффективная температура растительного (снежного) покрова и почвы соответственно; R_p — комплексный коэффициент отражения электромагнитной волны от шероховатой границы почвенного покрова; индекс p относится к горизонтальной (H) или вертикальной (V) поляризации. Будем считать, что почву покрывает слой снега или растительности, свойства которых в С-диапазоне частот позволяют положить $\omega_p \approx 0$. Для упрощения задачи будем считать также, что $T_c \approx T_g$. Это допущение наиболее справедливо для утренних часов примерно с 04:00 до 07:00 по местному времени (Basharinov, Shutko, 1975), когда профили температуры подстилающей поверхности наиболее слабо варьируются с глубиной. Тогда уравнение (1) приобретает простой вид:

$$Tb_p = (1 - \Gamma_p)T_g, \quad \Gamma_p = |R_p|^2 \gamma_p^2, \quad (2)$$

здесь Γ_p — отражательная способность почвенного покрова. Далее покажем, что может быть установлена следующая линейная связь между $1/(\Gamma_H - \Gamma_V)$ — обратной величиной разности отражательных способностей почвы, измеренных на горизонтальной и вертикальной поляризациях, и $1/\xi$ — обратной величиной поляризационного индекса $\xi = (Tb_V - Tb_H)/(Tb_V + Tb_H)$:

$$\frac{1}{\Gamma_H - \Gamma_V} = a + b \frac{1}{\xi}, \quad (3)$$

где a и b — параметры, требующие калибровки для различных условий тундрового ландшафта на основе долговременных наблюдений радиояркостной температуры. Калибровка параметров a и b в уравнении (3) проведена на тестовых участках Северного склона Аляски: Франклин Блафс (FB) и Имнавиат (IM) (координаты участков указаны в таблице). Радиояркостная температура измерялась в утренние часы по местному времени на частоте 6,9 ГГц радиометром AMSR2 спутника GCOM-W1 (угол зондирования 55°). Значения Γ_H и Γ_V находились из уравнения (2), в котором величина T_g полагалась равной температуре поверхности почвы, измеренной метеостанциями Франклин Блафс и Имнавиат (http://permafrost.gi.alaska.edu/sites_map). Действительно, найденная таким образом экспериментальная зависимость величины $1/(\Gamma_H - \Gamma_V)$ от $1/\xi$ является линейной (рис. 1). Среднеквадратическое отклонение и квадрат коэффициента корреляции между экспериментальными данными и найденной линейной зависимостью (см. рис. 1) оказались равны 0,999 и 0,24 соответственно. Используя связь (3) можно исключить из уравнения (2) отражательную способность почвенного покрова на вертикальной поляризации Γ_V . В результате обратная задача может быть сведена к нахождению двух параметров Γ_H и Γ_V из двух уравнений (2), записанных для радиояркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях, с использованием соотношения $\Gamma_V = \Gamma_H - 1/(a + b/\xi)$, следующего из выражения (3). Параметры Γ_H и Γ_V были найдены в ходе решения нелинейного уравнения (2) с использованием алгоритма Левенберга — Марквардта. При восстановлении параметров Γ_H и Γ_V использовались временные ряды радиояркостной температуры, полученной радиометром AMSR2 с 3 июля 2012 г. по 1 июня 2018 г. как на двух

калибровочных тестовых участках Франклин Блафс и Имнавиат, так и на двух дополнительных тестовых участках Сагвон Хилл (SG) и Хэппи Вэлли (HV) (координаты участков указаны в *таблице*). Восстановленные значения температуры почвы из радиометрических измерений длительностью 7 лет относительно температуры поверхности почвы по данным метеостанций представлены на *рис. 2*.

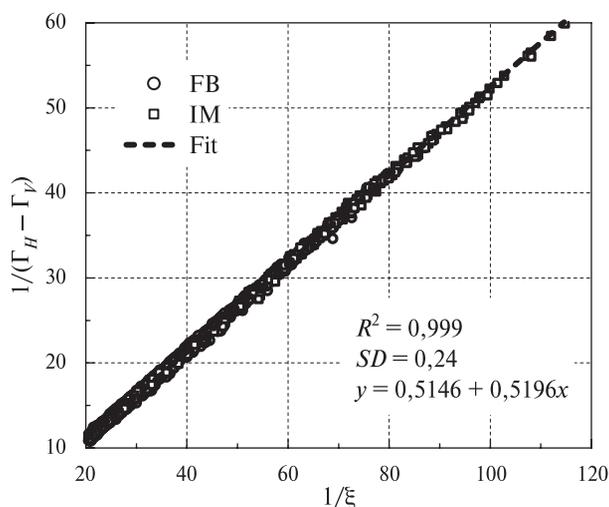


Рис. 1. Обратная разница отражательной способности горизонтальной и вертикальной поляризаций (обозначена как y в выражении линейной регрессии) по отношению к обратному отношению поляризационного индекса (обозначено как x в выражении линейной регрессии), измеренных с помощью AMSR2 на испытательных участках Франклин Блафс и Имнавиат ($a = 0,5164$, $b = 0,5196$, см. формулу (3))

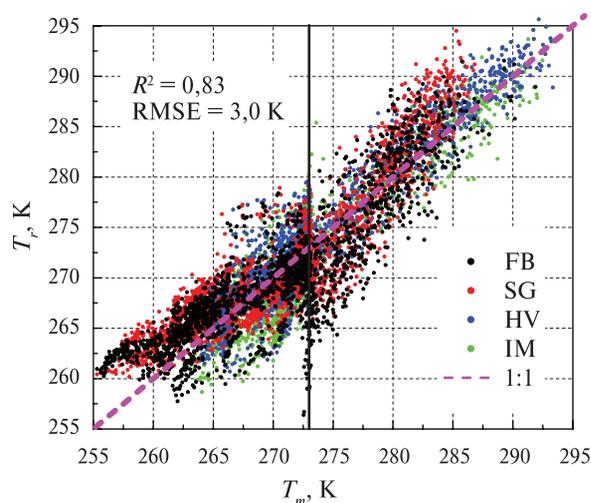


Рис. 2. Корреляция между восстановленными и измеренными значениями температуры почвы на тестовых участках

Как видно на *рис. 2*, предложенный метод калибровки (3) позволяет восстановить значения температуры почвы (со среднеквадратическим отклонением 3,0 К и квадратом коэффициента корреляции 0,83) относительно температуры поверхности почвы, измеренной метеостанциями не только на тестовых участках Франклин Блафс и Имнавиат, на которых была выполнена калибровка для выражения (3), но и на двух дополнительных тестовых участках Сагвон Хилл и Хэппи Вэлли, на которых калибровка не проводилась. Отметим, что все тестовые участки расположены в различных ландшафтных условиях и относятся к типичной арктической тундре, тундре и лесотундре. Детальное описание ландшафтных условий тестовых участков сведены в *таблицу*.

Характеристика тестовых участков

Метеостанция	Долгота	Широта	Классы GlobeCover 2009 (Bontemps et al., 2011)
Франклин Блафс (FB)	148,7208° з. д.	69,6741° с. ш.	a) 63,9 %, b) 33,5 %, c) 0,3 %, d) 1,1%, e) 0,8%
Сагвон Хилл (SG)	148,6739° з. д.	69,4330° с. ш.	a) 75,3 %, f) 13,6 %, b) 9,8 %
Хэппи Вэлли (HV)	148,8483° з. д.	69,1466° с. ш.	a) 53,5 %, f) 39,4 %, g) 5,5 %
Имнавиат (IM)	149,3523° з. д.	68,6397° с. ш.	e) 44,5 %, a) 36,2 %, f) 8,1 %, g) 7,1 %, d) 3,8 %

Примечание: а) редкая растительность (<15 %); б) луга или лесистая растительность (>15 %) на регулярно затопленной или заболоченной почве: пресная, солоноватая или солёная вода; с) водоёмы; д) травянистая растительность (луга, саванны или лишайники/мхи) (>15 %); е) мозаичные луга (50–70 %) / леса или кустарники (20–50 %); ф) мозаичный лес или кустарник (50–70 %) / луга (20–50 %); г) смешанный широколиственный (>15 %) и игольчатый лес (>5 м).

Предложенный метод калибровки на основе выражения (3) прост и не требует знания диэлектрических свойств зондируемой подстилающей поверхности, а при восстановлении температуры поверхности почвы позволяет достичь точности, которая отвечает требованиям для продукта LST AMSR2 (https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/data/data_w_product-3.html). В будущем авторы планируют проверить предложенную методику на большем количестве тестовых участков, для которых будут доступны данные о температуре почвы, чтобы подтвердить или опровергнуть универсальность зависимости (3) для различных ландшафтных условий тундры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы П.12.1. приоритетных направлений и программ фундаментальных исследований СО РАН.

Литература

1. *Basharinov A., Shutko A.* Simulation studies of the SHF radiation characteristics of soils under moist conditions // NASA Technical Translation. 1975. TT F-16. P. 489.
2. *Bontemps S., Defourny P., Bogaert E. V., Arino O., Kalogirou V., Perez J. R.* GLOBCOVER 2009: Products description and validation report. Version 2.2.2011. Université catholique de Louvain and European Space Agency. 2011. 53 p. URL: http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf.
3. *Hachem S., Duguay C. R., Allard M.* Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 51–69.
4. *Jones L. A., Kimball J. S., McDonald K. C., Chan S. T. K., Njoku E. G., Oechel W. C.* Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2007. V. 45. No. 7. P. 2004–2018.
5. *Pullianen J., Grandell J., Hallikainen M.* Retrieval of surface temperature in boreal forest zone from SSM/I data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1997. V. 35. P. 1188–1200.
6. *Su Y., Chen X., Su H., Liu L., Liao J.* Digitizing the thermal and hydrological parameters of land surface in subtropical China using AMSR-E brightness temperatures // *Intern. J. Digital Earth*. 2017. V. 10. No. 7. P. 687–700.

Retrieving surface temperature of tundra soil based on AMSR2 polarimetric brightness observations

K. V. Muzalevskiy, Z. Ruzicka

*L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

The paper proposes a semi-empirical method for remote sensing of surface temperature of tundra soil based on polarimetric data of the AMSR2 radiometer installed on GCOM-W1 satellite. Using a simple microwave emission model based on the Kirchhoff law and obtained for a dielectric-homogeneous isothermal half-space, the problem was reduced to retrieving of the effective temperature and reflectivity of observed surface from two brightness temperatures measured at the vertical and horizontal polarization at a frequency of 6.9 GHz. The uniqueness of the inverse problem was ensured by the established linear relation between the inverse values of the polarization index and the difference in reflectivity, measured at the horizontal and vertical polarizations. The calibration of two parameters of the linear regression was performed on two test sites in the North Slope of Alaska for 7 years from 2012 to 2018. As a result, it was shown that the recovered soil temperature values with a standard deviation of about 3.0 K and a correlation coefficient of 0.83 corresponded to the temperature of the soil surface, as measured by weather stations, on four test sites located in different landscape conditions of the Arctic tundra. Two of the four test sites were additional to the calibration ones.

Keywords: radiometry, brightness temperature, soil temperature, Arctic tundra

Accepted: 05.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-293-297

References

1. Basharinov A., Shutko A., Simulation studies of the SHF radiation characteristics of soils under moist conditions, *NASA Technical Translation*, 1975, TT F-16, p. 489.
2. Bontemps S., Defourny P., Bogaert E. V., Arino O., Kalogirou V., Perez J. R., *GLOBCOVER 2009: Products description and validation report, Version 2.2.2011*, Université catholique de Louvain and European Space Agency, 2011, 53 p., available at: http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf.
3. Hachem S., Duguay C. R., Allard M., Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain, *The Cryosphere*, 2012, Vol. 6, pp. 51–69.
4. Jones L. A., Kimball J. S., McDonald K. C., Chan S. T. K., Njoku E. G., Oechel W. C., Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 7, pp. 2004–2018.
5. Pulliainen J., Grandell J., Hallikainen M., Retrieval of surface temperature in boreal forest zone from SSM/I data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1997, Vol. 35, pp. 1188–1200
6. Su Y., Chen X., Su H., Liu L., Liao J., Digitizing the thermal and hydrological parameters of land surface in subtropical China using AMSR-E brightness temperatures, *Intern. J. Digital Earth*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 687–700.