

УДК 528.8

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ НА ОСНОВЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В L-ДИАПАЗОНЕ

К. В. Музалевский<sup>1,2</sup>, В. Л. Миронов<sup>1,2</sup>, А. А. Швалева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50/38

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

*Изучается возможность дистанционного измерения температуры поверхностной части деятельного слоя замерзшей почвы на Северном склоне Аляски с использованием данных микроволнового радиометра космического аппарата SMOS на частоте 1,4 ГГц. Показано, что измеренная температура почвы с погрешностью 2,4 °С совпадает со средней температурой почвы в слое толщиной 0,27 м.*

*Ключевые слова:* SMOS, микроволновый радиометр, почва арктической тундры, деятельный слой, температура почвы.

## THE ACTIVE LAYER OF THE ARCTIC TUNDRA SOILS TEMPERATURE SOUNDING ON THE BASIS OF L-BAND RADIOMETRIC OBSERVATIONS

K. V. Muzalevskiy<sup>1,2</sup>, V. L. Mironov<sup>1,2</sup>, A. A. Shvaleva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics named after L. V. Kirenskiy of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
50/38 Akademgorodok st., Krasnoyarsk, 660036, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia.  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

*Possibility of remote sounding of temperature in the frozen active layer on the North Slope of Alaska was investigated with the use of SK SMOS microwave radiometer on a frequency of 1,4 GHz. It is shown that the soil temperature, sounded with the SMOS, with an error of 2,4 °C coincides with the average temperature of the soil in a layer of 0,27 m.*

*Keywords:* Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), microwave radiometry, Arctic tundra soil, active layer, soil temperature.

Наиболее значительные результаты в области дистанционного зондирования температуры почвы арктической тундры, с использованием микроволнового радиометра AMSR-E, обсуждены в работе [1]. Для восстановления температуры почвы использовалась эмпирическая линейная связь между излучательной способностью на H- и V-поляризациях, при этом яркостная температура измерялась радиометром AMSR-E в диапазоне частот от 6,9 ГГц до 89,0 ГГц при фиксированном угле наблюдения 55°. Данный подход позволил измерить эффективную температуру почвы с погрешностью 3,9 и 10,5 °С для талой и мерзлой почвы, соответственно [1]. В отличие от радиометра AMSR-E, радиометр космического аппарата (КА) SMOS позволяет измерять радиояркостную температуру на H- и V-поляризациях в диапазоне углов 0° до 60° на частоте 1,4 ГГц [2]. Ожидается, что радиояркостная температура, измеренная радиометром SMOS в более широком диапазоне углов, позволит уменьшить погрешность восстановления температуры мерзлой почвы по сравнению с достигнутой на данный момент

погрешностью. Кроме того, данные SMOS до настоящей работы не были использованы для измерения температуры почвы арктической тундры.

В качестве тестового участка была выбрана территория Северного склона Аляски в районе расположения биосферной метеостанции оз. Туулик (68° 37' 22,9" с. ш., 149° 36' 35,4" з. д.). По данному участку доступны усредненные за сутки значения температуры и влажности деятельного слоя почвенного покрова в слое толщиной 0,98 м [3], а так же данные диэлектрической проницаемости верхнего горизонта почвы в широком диапазоне весовой влажности от 0,0 г/г до 0,98 г/г и температуры от -30 до +25 °С [4]. Данные радиояркостной температуры КА SMOS были получены для пиксела, содержащего координату метеостанции, каждый 1-й, 10-й и 20-й день месяца за период с 18.06.2010 по 01.06.2011 гг. (в период с 26.12.2010 по 08.02.2011 гг. доступных данных не оказалось). Территория тестового участка представляет собой кочкарниково-тундру с бедной растительностью и слабым снежным покровом.

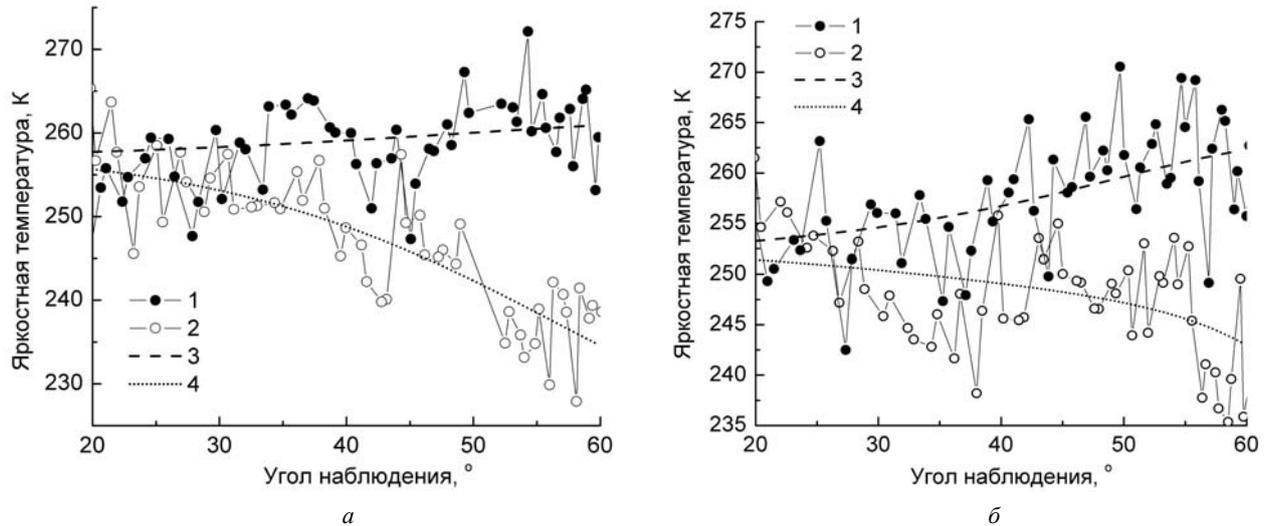


Рис. 1. Угловая зависимость радиояркостной температуры, измеренная SMOS (1), (2) и восстановленная (3), (4) в ходе решения обратной задачи, на вертикальной (1), (3) и горизонтальной (2), (4) поляризациях: а) 20.12.2010,  $P_r = (2,34; 1,63; -0,66; 0,59; 0,63; 0,92; -9,49)$ ; б) 26.12.2010,  $P_r = (1,10; 1,99; -1,99; 0,71; 0,34; 0,44; -10,07)$

**Модель микроволнового излучения почвы.** В качестве первого шага в данном исследовании эффектами объемного рассеяния и затухания волн, связанными со снежным и растительным покровом, пренебрегалось. Яркостная температура на горизонтальной  $T_{B,H}^{th}(\theta)$  и вертикальной  $T_{B,V}^{th}(\theta)$  поляризациях, в случае, когда почва непокрыта снежным покровом и растительностью, может быть рассчитана на основе полуэмпирической L-МЕВ модели [2] по следующим формулам:

$$T_{B,p}^{th}(\theta) = \eta_p(\theta) \cdot T_s, \quad (1)$$

$$\eta_p(\theta) = \left\{ 1 - [1 - Q] \Gamma_{p,q} \times \right. \\ \left. \times (\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q}) + \right. \\ \left. + Q \Gamma_q(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q}) \right\} \quad (2)$$

$$\Gamma_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q}) = \\ = \left| R_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f)) \right|^2 \times \\ \times \exp(-H_r \cos^{N_{p,q}} \theta), \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол наблюдения;  $p$  –  $H$  или  $V$  поляризации;  $q$  –  $V$  или  $H$  поляризации;  $Q$  – межполяризационный фактор (изменяется от 0 до 1);  $\eta_p(\theta)$  – излучательная способность почвы;  $\Gamma_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q})$  – отражательная способность;  $\varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f)$  – комплексная диэлектрическая проницаемость почвы;  $T_s$  – температура почвы,  $m_v$  – объемная влажность почвы,  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ;  $\rho_d$  – плотность сухого сложения почвы,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $f$  – частота электромагнитного поля;  $R_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f))$  – коэффициент отражения Френеля;  $H_r$  – фактор шероховатости поверхности почвы;  $N_{p,q}$  – степень влияния фактора шероховатости поверхности почвы от угла наблюдения. Комплексная

диэлектрическая проницаемость почвы рассчитывалась на основе обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси для органической почвы, образец которой был взят в районе биосферной станции оз. Туулик и содержал по весу 87 % органического вещества, 8 % кварца и 5 % кальцита (модель была создана на основе измерений образцов почвы, находящихся в процессе замерзания).

**Метод измерения температуры почвы по данным радиометра SMOS.** Метод основан на решении обратной задачи – восстановления параметров модели L-МЕВ:  $P_r = (H_r, N_H, N_V, Q, m_v, \rho_d, T_s)$  при минимизации функционала следующего вида:

$$F = \sum_{i=1}^N \left| T_s - \frac{T_{B,H}^m(\theta_i)}{\eta_H(\theta_i)} \right|^2 + \left| T_s - \frac{T_{B,V}^m(\theta_i)}{\eta_V(\theta_i)} \right|^2, \quad (4)$$

где  $T_{B,H}^m(\theta_i)$ ,  $T_{B,V}^m(\theta_i)$  – яркостная температура на горизонтальной и вертикальной поляризациях, измеренные КА SMOS при угле наблюдения  $\theta_i$ ;  $N$  – общее число углов наблюдения. Задача минимизации функционала (4) решалась на основе алгоритма Левенберга–Марквардта [5]. Измеренные и восстановленные угловые зависимости радиояркостной температуры для двух дней наблюдения (20 и 26 декабря 2010 г.) приведены на рис. 1.

Аналогично была решена обратная задача для 16 дней в период с 10 октября 2010 г. по 10 мая 2011 г., средние значения восстановленных параметров ( $P_r$ ) модели L-МЕВ за данный период оказались равны:  $H_r = 2,51 \pm 0,59$ ,  $N_H = 1,22 \pm 0,64$ ,  $N_V = -1,22 \pm 0,99$ ,  $Q = 0,53 \pm 0,24$ ,  $m_v = 0,60 \pm 0,20 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ,  $\rho_d = 0,83 \pm 0,34 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $T_s = -10,17 \pm 2,03 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отметим, что восстановленное среднее значение влажности почвы из анализа данных SMOS, близко к средней объемной влажности почвы  $0,48 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , измеренной [3] в районе оз. Туулик метеостанцией, до замерзания почвы. Временной ход

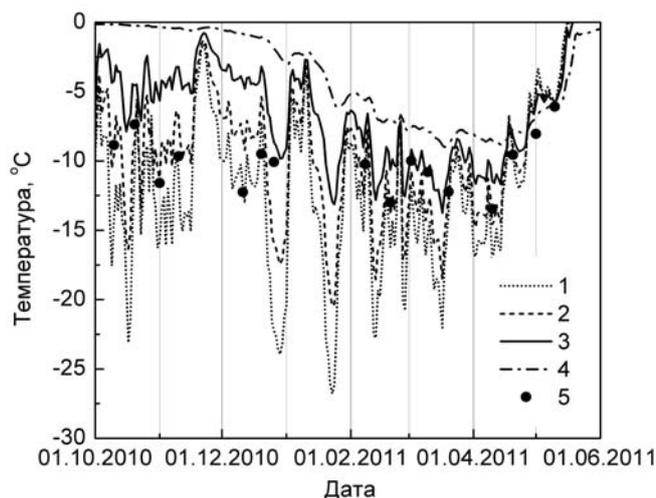


Рис. 2. Временные ряды температуры почвы:  
1) измеренные метеостанцией на глубине 8,7 см; 2) 16,0 см;  
3) 23,6 см; 4) 46,3 см; 5) восстановленные по данным SMOS

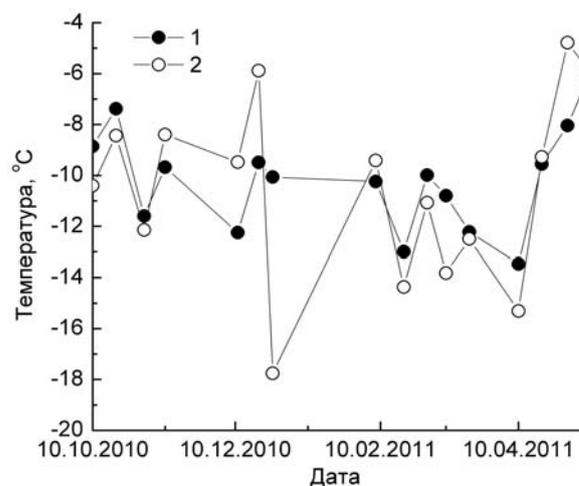


Рис. 3. Временной ход температуры почвы, восстановленной по данным SMOS (1) и средней температуры слоя толщиной 0,27м по данным метеостанции (2). Среднеквадратичное отклонение 2,4 °С, коэффициент Пирсона 0,67

восстановленных значений температуры почвы  $T_s$  и измеренных метеостанцией температуры почвы на различных глубинах изображен на рис. 2. На основе измеренных метеостанцией профилей температуры были найдены толщины слоев, средняя температура в которых равна соответствующим значениям восстановленной температуры почвы  $T_s$  по данным SMOS. Средняя толщина излучающего слоя оказалась равной  $0,27 \pm 0,17$  м. Временной ход средней температуры слоя толщиной 0,27 м по данным метеостанции и восстановленные значения температуры почвы по данным SMOS представлены на рис. 3. В результате корреляционного анализа установлено, что значения температуры измеренные по данным SMOS со среднеквадратичным отклонением 2,4 °С совпадают со средней температурой слоя почвы толщиной 0,27 м, измеренной метеостанцией в районе оз. Туулик.

В результате проведенного исследования было показано следующее.

Полуэмпирическая модель L-MEB [2] с использованием диэлектрической модели органической почвы [4] хорошо описывает угловые зависимости радиояркостной температуры, измеренные радиометром KA SMOS над территорией Северного склона Аляски со слабым растительным и снежным покровом.

Использование диэлектрической модели [4] арктической тундровой почвы позволяет восстанавливать не только температуру поверхностного слоя почвенного покрова, но и проводить оценки объемного содержания влаги и плотности верхнего горизонта почвы.

Для практического использования данного алгоритма необходима его дополнительная валидация над другими территориями арктической тундры.

Дальнейшая модификация данного алгоритма будет применена для восстановления профиля температуры поверхностного слоя почвы арктической тундры.

#### Библиографические ссылки

1. Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E / L. A. Jones, J. S. Kimball, K. C. McDonald et al. // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45. P. 2004–2018.
2. Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB / J. Wigneron, A. Chanzy, Y. H. Kerr et al. // *Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions on*. 2011. Vol. 49. P. 1177–1189.
3. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture [Electronic resource] // Toolik Soil Climate Station. URL: <http://soils.usda.gov/survey/smst/alaska/Toolik/>.
4. Mironov V. L., De Roo R. D., Savin I. V. Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. 2010. Vol. 48. P. 2544–2556.
5. Golub G. H., Van Loan C. F. *Matrix Computations*. 3rd ed. Baltimore : Johns Hopkins University Press, 1996.

#### References

1. 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*, Vol. 45, 2007, pp. 2004–2018.
2. Wigneron J., Chanzy A., Kerr Y. H., Lawrence H., Jiancheng Shi, Escorihuela M. J., Mironov V., Mialon A., Demontoux F., de Rosnay P., Saleh-Contell K. Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in

L-MEB. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, Vol. 49, 2011, pp. 1177–1189.

3. Natural Resources Conservation Service. U. S. Department of Agriculture. (2013). [Online]. Toolik Soil Climate Station. Available: <http://soils.usda.gov/survey/srst/alaska/Toolik/>.

4. Mironov V. L., De Roo R. D., Savin I. V. Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, Vol. 48, 2010, pp. 2544–2556.

5. Golub G. H., Van Loan C. F. Matrix Computations. Johns Hopkins University Press 3rd edition, 1996.

© Музалевский К. В., Миронов В. Л., Швалева А. А., 2013

УДК 504.064.3 + 528.88

## ОЦЕНКА ВЛАГОЗАПАСА СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОМЕТРИИ ДЛЯ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ\*

К. Ю. Березин, А. В. Дмитриев, В. В. Дмитриев

Омский государственный педагогический университет  
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: [vdmitriev@omgpu.omsk.edu](mailto:vdmitriev@omgpu.omsk.edu)

*Приведены результаты валидации алгоритмов восстановления влагозапаса снежного покрова для степных районов Западной Сибири. Источником исходных данных служили СВЧ радиометры AMSU-A и AMSR-E, установленные на спутниковых платформах NOAA и Aqua. Показано, что для двухчастотных алгоритмов, коэффициент корреляции между реальными и восстановленными значениями влагозапаса меняется от 0,06 до 0,5 при среднем значении 0,3. Статистическая значимость полученных оценок невелика и соответствует случаю сильного пространственного усреднения (около 50 км в пикселе), что также снижает репрезентативность результатов. Показано, что практически применимая точность (лучше 40 %) достигается при значительном усреднении – более 40 точек. Это соответствует временному усреднению до уровня среднемесячных показателей или пространственному усреднению по элементу площадью 280×280 км<sup>2</sup>.*

*Ключевые слова: снежный покров, дистанционное зондирование, спутниковые данные.*

## ESTIMATION OF SNOW WATER EQUIVALENT BY USE OF SATELLITE RADIOMETRY FOR THE STEPPE ZONE OF WESTERN SIBERIA

K. Ju. Berezin, A. V. Dmitriev, V. V. Dmitriev

Omsk State Pedagogical University  
14 Tukhachevsky st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: [vdmitriev@omgpu.omsk.edu](mailto:vdmitriev@omgpu.omsk.edu)

*In the work the authors present the results of validation of algorithms of restoration of snow water equivalent for steppe regions of Western Siberia. Microwave data from AMSU-A and AMSR-E radiometers installed on the satellite NOAA and Aqua platforms were a source of basic data. It is shown that for two-frequency algorithms, the correlation coefficient between the real and restored values of moisture content changes from 0,06 to 0,5 at average value 0,3. The statistical importance of the received estimates is insignificant and corresponds to a case of strong spatial averaging (about 50 km in pixel) that also reduces a value of results. It is shown that almost applicable accuracy (it is better 40 %) is reached at considerable averaging – more than 40 points. It corresponds to temporary averaging to level of average monthly indicators or to spatial averaging on an element of 280×280 sq. km.*

*Keywords: snow cover, remote sensing, satellite data.*

Снежный покров является естественным природным образованием и оказывает существенное воздействие на климат, условия жизни и хозяйственную деятельность человека. Поэтому задача построения системы мониторинга снежного покрова по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является

актуальной и практически значимой. Данная работа посвящена исследованию методов восстановления влагозапаса снежного покрова. Влагозапас или водный эквивалент снега (SWE), представляет собой толщину слоя воды, образующейся в результате растапливания снега.

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-05-98082-р\_сибирь\_a.