

УДК 528.8

К.В. МУЗАЛЕВСКИЙ\*,\*\*, В.Л. МИРОНОВ\*,\*\*

### ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ МЕРЗЛОЙ ПОЧВЫ АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАДИОМЕТРА MIRAS КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА SMOS<sup>1</sup>

Предложен метод, который позволяет на основе наблюдений радиояростной температуры радиометром MIRAS космического аппарата SMOS проводить измерение профилей температуры верхнего горизонта почвы арктической тундры на территории Северного склона Аляски. Показано, что погрешность измерения профиля температуры в слое толщиной до 16,0 см в среднем составляет не более 5,5 °С.

**Ключевые слова:** Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), арктическая почва, профиль температуры деятельного слоя, радиояростная температура, комплексная диэлектрическая проницаемость.

В работе [1] впервые теоретически была предсказана возможность измерения температуры поверхности почвы и градиента температуры в поверхностной части деятельного слоя мерзлой почвы арктической тундры на основе наблюдения угловых зависимостей радиояростной температуры на частоте 1,4 ГГц. В данной работе на основе измерений радиометра MIRAS космического аппарата (КА) SMOS радиояростной температуры территории Северного склона Аляски, с использованием модели комплексной диэлектрической проницаемости арктической тундровой почвы [2] и полуэмпирической модели радиотеплового излучения [3], восстановлена температура поверхности почвы и градиент температуры в поверхностной части деятельного слоя почвы. 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 деятельного слоя почвенного покрова в слое толщиной 0,98 м [4], а также модель диэлектрической проницаемости верхнего горизонта почвы, справедливая в широком диапазоне значений весовой влажности от 0 до 0,98 г/г [2] и температуры от -30 до +25 °С. Данные радиояростной температуры для каждого 1, 10 и 20 дня месяца за период с 21.10.2010 по 21.05.2011 г. были получены для пиксела, содержащего координату метеостанции. Территория тестового участка представляет собой кустарниковую тундру.

#### Модель микроволнового излучения почвы

В качестве первого приближения в данном исследовании будем пренебрегать эффектами объемного рассеяния и затухания волн, связанными с растительным и снежным покровом. Радиояростная температура для горизонтальной  $T_{B,H}^{th}(\theta)$  и вертикальной  $T_{B,V}^{th}(\theta)$  поляризации может быть рассчитана как функция угла визирования  $\theta$  на основе предложенной в [3] полуэмпирической L-МЭВ-модели по следующим формулам:

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

$$\eta_p(\theta) = \left\{ 1 - [1 - Q] \Gamma_p(\theta, \epsilon_s(T_s, m_V, \rho_d, f), H_r, N_p) + Q \Gamma_q(\theta, \epsilon_s(T_s, m_V, \rho_d, f), H_r, N_q) \right\}; \quad (2)$$

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

$$Q = 0,1771 H_r, \quad N_H = 1,615(1 - \exp(-H_r / 0,359)) - 0,238, \quad N_V = 0,767 H_r - 0,099, \quad (4)$$

где  $\eta_p(\theta)$  – излучательная способность почвы;  $\Gamma_{p,q}(\theta, \epsilon_s(T_s, m_V, \rho_d, f), H_r, N_{p,q})$  – отражательная способность почвы;  $T_s$  – температура почвы. Сочетания пар  $p = H, q = V$  и  $p = V, q = H$  соответствуют радиояростным температурам при приеме на антенны с горизонтальной и вертикальной поляризациями;  $Q$  – межполяризационный фактор (изменяется от 0 до 1);  $\epsilon_s(T_s, m_V, \rho_d, f)$  – комплексная диэлектрическая проницаемость почвы;  $m_V$  – объемная влажность почвы (см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>);  $\rho_d$  – плотность почвы (г/см<sup>3</sup>);  $f$  – частота электромагнитного поля;  $R_p(\theta, \epsilon_s(T_s, m_V, \rho_d, f))$  – коэффициенты отражения Френеля для горизонтальной,  $p = H$ , и вертикальной,  $p = V$ , поляризаций;  $H_r$  – фактор шерохо-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках базовой программы П. 10.1: Радиофизические методы диагностики окружающей среды СО РАН.

ватости поверхности почвы. Комплексная диэлектрическая проницаемость почвы рассчитывалась на основе диэлектрической модели [2] для органической почвы, образец которой был взят в районе биосферной станции оз. Туулик. Почва содержала по весу 87 % органического вещества, 8 % кварца и 5 % кальцита. Алгоритм восстановления влажности почвы по данным радиометра SMOS основан на решении обратной задачи, восстановления вектора  $P_r = P_r(H_r, m_V, \rho_d, T_s)$ , компоненты которого являются параметрами модели, представленной формулами (1) – (4). Решение было найдено с помощью минимизации функционала следующего вида:

$$F = \sum_{i=1}^N \left| T_s - \frac{T_{B,H}^m(\theta_i)}{\eta_H(\theta_i)} \right|^2 + \left| T_s - \frac{T_{B,V}^m(\theta_i)}{\eta_V(\theta_i)} \right|^2 \quad (5)$$

где  $T_{B,H}^m(\theta_i)$ ,  $T_{B,V}^m(\theta_i)$  – измеренные с помощью SMOS радиояркостные температуры на горизонтальной и вертикальной поляризации в диапазоне углов визирования  $20^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$ ,  $N$  – общее число углов визирования. Задача минимизации функционала (5) решалась на основе алгоритма Левенберга – Марквардта [5]. Данные радиояркостной температуры были получены из базы данных SMOS Level 2, доступной в рамках проекта [6].

Временной ход температуры почвы по данным метеостанции оз. Туулик (на глубине 0,6 и 16,0 см), а также восстановленные значения температуры на различных глубинах представлены на рис. 1 и 2.

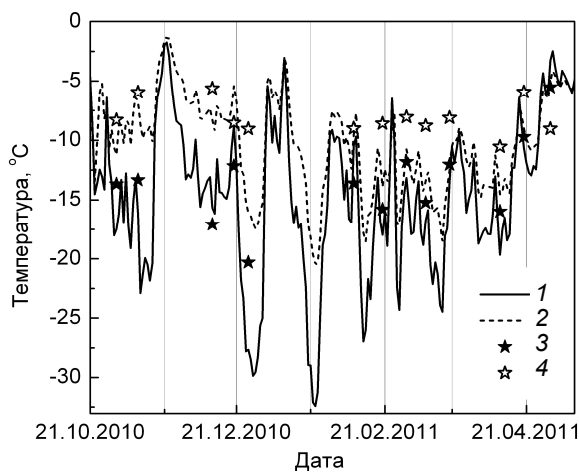


Рис. 1. Временной ход температуры почвы: 1 и 2 – измерение метеостанции на глубине 0,6 и 16,0 см соответственно; 3 и 4 – восстановленная температура почвы из данных SMOS на глубине 0,6 и 16,0 см соответственно

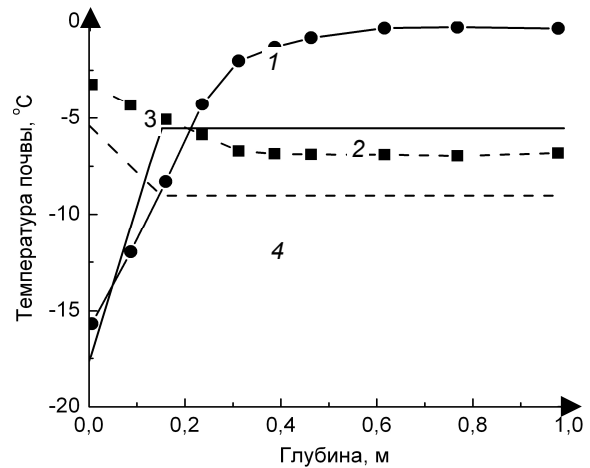


Рис. 2. Типичные профили температуры, восстановленные из данных SMOS (кр. 2, 4) и измеренные метеостанцией (кр. 1, 3): кр. 1 и 2 - 11.12.2010, кр. 3 и 4 - 01.05.2011

В результате статистического анализа данных, представленных на рис. 1 и 2, установлены следующие линейные регрессионные зависимости между температурой почвы на глубине 0,6 см, (см. рис. 3), восстановленной по данным SMOS,  $T_{SMOS}$ , и данным метеостанции,  $T_{WS}$ , а также между градиентом температуры поверхностной части деятельного слоя толщиной 16,0 см (см. рис. 4), восстановленного из данных SMOS,  $\Delta T_{SMOS}$ , и данных метеостанции,  $\Delta T_{WS}$ :

$$\begin{aligned} T_{SMOS} &= (-5,42 \pm 1,22) + (0,55 \pm 0,08) T_{WS}, \\ \Delta T_{SMOS} &= (17,41 \pm 6,40) + (0,88 \pm 0,19) \Delta T_{WS}, \end{aligned} \quad (6)$$

при этом коэффициент корреляции Пирсона и среднеквадратичное отклонение составили 0,80 и 2,77 °C для температуры почвы на глубине 0,6 см, 0,75 и 17,96 °C/м для градиента температуры. Отметим, что среднеквадратичное отклонение температуры почвы на глубине 16,0 см в 2 раза больше среднеквадратичного отклонения температуры почвы на глубине 0,6 см. Средние значения восстановленных параметров: фактор шероховатости поверхности почвы, плотности сухого сложения и объемной влажности почвы за период с 01.06.10 по 01.09.11 г. оказались равны:  $H_r = 1,41 \pm 0,79$ ,  $r_d = (0,26 \pm 0,05) \text{ г/см}^3$ ,  $m_V = (0,15 \pm 0,06) \text{ см}^3/\text{см}^3$ . Отметим, что в первый день (01.10.2010) установления отрицательных температур почвы на глубине 0,6 см, восстановленное

значение объёмной влажности почвы составило  $0,32 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , а по данным метеостанции –  $0,41 \text{ см}^3/\text{см}^3$ .

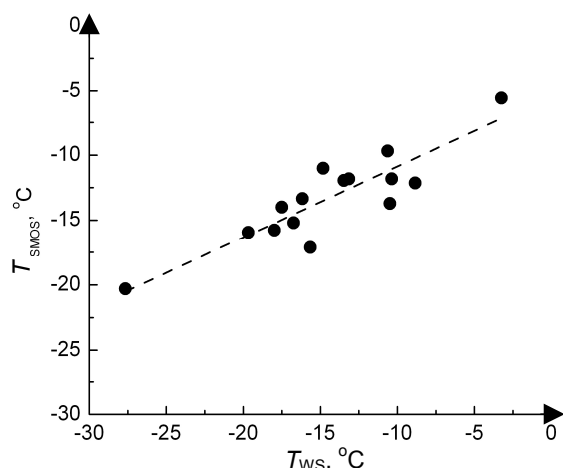


Рис. 3. Корреляция между температурой почвы на поверхности деятельного слоя, восстановленной из измерений SMOS,  $\Delta T_{\text{SMOS}}$ , и данных метеостанции,  $\Delta T_{\text{WS}}$

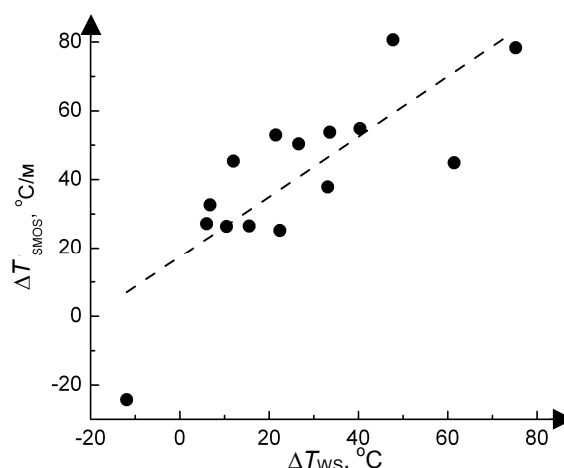


Рис. 4. Корреляция между градиентом температуры поверхностной части деятельного слоя почвы толщиной 16,0 см, измеренного по данным SMOS,  $\Delta T_{\text{SMOS}}$ , и данных метеостанции,  $\Delta T_{\text{WS}}$

### Заключение

В результате выполнения работы экспериментально доказана возможность измерения температуры поверхности почвы и градиента температуры в поверхностном слое мерзлого почвенного покрова арктической тундры на основе данных радиометра MIRAS космического аппарата SMOS. При этом могут быть достигнуты погрешности в среднем не более  $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$  в восстановлении профиля температуры в слое толщиной до 16,0 см.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mironov V.L., Muzalevskiy K.V., and Savin I.V. // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2013. (accepted for publication).
2. Mironov V.L., De Roo R.D., and Savin I.V. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – V. 48. – No. 6. – P. 2544–2556.
3. Lawrence H., Wigneron J.-P., Demontoux F., et al. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – No. 99. – P. 1–10.
4. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. (2013). [Online]. Toolik Soil Climate Station. Available: <http://soils.usda.gov/survey/smst/alaska/Toolik/>.
5. Golub G.H. and Van Loan C.F. Matrix Computations. – Johns Hopkins University Press, 1996. – 694 p.
6. ESA Category-1 Project ID: No. C1P.8414.

\*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 15.07.13.

\*\*Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия  
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru, rsdvm@ksc.krasn.ru

Музалевский Константин Викторович, к.ф.-м.н., науч. сотр.;

Миронов Валерий Леонидович, д.ф.-м.н., профессор, чл.-кор. РАН, зав. лабораторией.

K.V. MUZALEVSKIY, V.L. MIRONOV

### MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE PROFILES OF THE ARCTIC TUNDRA FROZEN TOPSOIL BASED ON MIRAS RADIOMETER SMOS SATELLITE

This paper presents a method, that allows to measure temperature profiles in the topsoil of the Arctic tundra in the North Slope of Alaska with using a brightness temperature observations of the MIRAS radiometer's of SMOS spacecraft.

**Keywords:** SMOS, microwave radiometry, profile of the soil temperature, Arctic tundra, complex dielectric permittivity.