

УДК 528.8

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

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ТАЛОЙ ПОЧВЫ АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ РАДИОМЕТРОМ MIRAS КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА SMOS¹

Разработана космическая информационная технология дистанционного зондирования влажности поверхностного слоя талого почвенного покрова арктической тундры. В качестве исходной информации использовались данные о радиояростной температуры поверхности почвенного покрова тундры в районе оз. Туулик, Северный склон Аляски, измеренные с помощью радиометра MIRAS, установленного на космическом аппарате SMOS. Алгоритм восстановления влажности почвы из радиояростной температуры основан на модели радиотеплового излучения и диэлектрической модели тундровой почвы. Показано, что погрешность восстановленной влажности почвы с использованием предлагаемого алгоритма существенно меньше, чем при использовании действующего алгоритма SMOS.

Ключевые слова: SMOS, арктическая почва, влажность почвы, радиояростная температура, комплексная диэлектрическая проницаемость.

Алгоритм космического аппарата (КА) SMOS для дистанционного зондирования влажности талой почвы основан на использовании модели комплексной диэлектрической проницаемости минеральных почв [1] и измерении угловых зависимостей радиояростной температуры почвенного покрова. Применение данной диэлектрической модели [1] для территории арктической тундры с почвенным покровом, обладающим высоким содержанием органики, может давать значительные погрешности при измерении влажности. В настоящей работе на основе данных радиометра MIRAS, установленного на космический аппарат SMOS, разработан метод восстановления влажности почвенного покрова арктической тундры. С этой целью использовались данные радиояростной температуры по территории Северного склона Аляски, доступные в рамках проекта [2], полуэмпирическая модель радиотеплового излучения [3] и модель комплексной диэлектрической проницаемости арктической тундровой почвы [4].

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 влажности деятельного слоя почвенного покрова в слое толщиной 0,98 м [5], а также модель комплексной диэлектрической проницаемости верхнего слоя почвы [4]. Данные радиояростной температуры для каждого 1, 10 и 20 дня месяца за период с 18.06.2010 по 01.06.2011 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 покровом. Радиояростная температура для горизонтальной $T_{B,H}^{th}(\theta)$ и вертикальной $T_{B,V}^{th}(\theta)$ поляризаций может быть рассчитана как функция угла визирования θ на основе предложенной в [3] полуэмпирической L-МЭВ-модели по следующим формулам:

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

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

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

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

где $\eta_p(\theta)$ – излучательная способность почвы; $\Gamma_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_V, \rho_d, f), H_r, N_{p,q})$ – отражательная способность почвы; T_s – температура почвы. Сочетания пар $p = H, q = V$ и $p = V, q = H$ соответствуют

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

радиоярким 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 ($\text{см}^3/\text{см}^3$); ρ_d – плотность почвы ($\text{г}/\text{см}^3$); 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 шероховатости поверхности почвы. Комплексная диэлектрическая проницаемость почвы рассчитывалась на основе диэлектрической модели [4] 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:

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

где $T_{B,H}^m(\theta_i)$, $T_{B,V}^m(\theta_i)$ – измеренные с помощью SMOS радиояркие 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 [6].

Временной ход восстановленных с помощью предложенного алгоритма значений объемного содержания влаги в почве представлен на рис. 1. Здесь же показаны значения объемной влажности, полученные с помощью действующего алгоритма SMOS, и значения объемной влажности, измеренные на глубине 9 см контактными датчиками метеостанции.

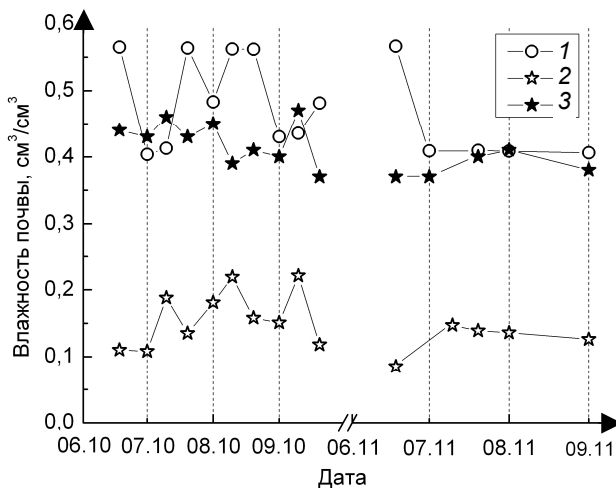


Рис. 1. Временной ход влажности почвы по данным: 1 – измерений метеостанции на глубине 9 см; 2 – штатного алгоритма SMOS; 3 – восстановленных значений влажности

полученные с помощью действующего алгоритма SMOS, и значения объемной влажности, измеренные на глубине 9 см контактными датчиками метеостанции.

В результате статистического анализа установлено, что значения влажности, восстановленные с помощью предложенного в настоящей работе алгоритма, смещены в среднем относительно значений влажности на глубине 9 см на величину $-0,065 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (2010) и $-0,054 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (2011), что соответствует относительной погрешности 13,3 и 12,3 %. В то время как значения влажности, взятые из базы данных SMOS Level 2, доступные в рамках проекта [2], смещены на величину $-0,331 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (2010) и $-0,320 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (2011), равную примерно самим восстановленным значениям влажности, что соответствует относительной погрешности 67,6 % (2010) и 72,7 % (2011). Средние значения дру-

гих восстановленных параметров оказались следующими: $H_r = 1,45 \pm 0,18$, $r_d = (0,95 \pm 0,06) \text{ г}/\text{см}^3$, $T_s = (9,2 \pm 4,4) ^\circ\text{C}$. Отметим, что по данным метеостанции средняя положительная температура поверхности почвы за рассматриваемый период составила $(10,1 \pm 5,6) ^\circ\text{C}$. Отклонение восстановленных значений влажности от данных наземных контактных измерений в том числе может быть вызвано неоднородностью плотности, органического и минерального состава почвенного покрова в пределах пиксела измерений радиояркой температуры, размер, которого в среднем составляет $44 \times 44 \text{ км}$. Полученный результат позволяет сделать вывод о существенной роли диэлектрической модели почвенного покрова арктической почвы при радиотепловом дистанционном зондировании влажности.

Заключение

В результате проведенного исследования было показано, что применение полуэмпирической модели [3] для расчета радиояркой температуры почвенного покрова в сочетании с диэлектрической моделью арктической почвы [4] позволило восстановить объемное содержание влаги в

тундровой почве по данным космического аппарата SMOS со средней относительной погрешностью порядка 12,8 % для территории на Северном склоне Аляски. В то время как применяемый в настоящее время алгоритм SMOS для восстановления влажности дал заниженные более чем в 2 раза значения влажности. Для практического использования предложенного в работе алгоритма необходима его дополнительная валидация для других территорий арктической тундры, с учетом пространственной неоднородности органического и минерального состава почвенного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mironov V.L. and Fomin S.V. // PIERS Proceeding. – 2009. – P. 938–942.
2. ESA Category-1 Project ID: № C1P.8414.
3. Lawrence H., Wigneron J.-P., Demontoux F., et al. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – V. PP. – No. 99. – P. 1–10.
4. Mironov V.L., De Roo R.D., and Savin I.V. // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – V. 48. – No. 6. – P. 2544–2556.
5. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. (2013). [Online]. Toolik Soil Climate Station. Available: <http://soils.usda.gov/survey/smst/alaska/Toolik/>.
6. Golub G.H. and Van Loan C.F. Matrix Computations. – Johns Hopkins University Press, 1996. – 694 p.

*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.

K.V. MUZALEVSKIY, V.L. MIRONOV

MEASUREMENT OF THE SOIL MOISTURE OF THE ARCTIC TUNDRA THAWED TOPSOIL BASED ON MIRAS RADIOMETER SMOS SATELLITE

On the basis of the dielectric model of the Arctic tundra soil and brightness temperature data measured by MIRAS radiometer of the SMOS, a soil moisture are measured over the test site in North Slope of Alaska. In article was shown, a soil moisture of the Arctic topsoil, retrieved using the proposed method has significantly smaller error than soil moisture retrieved using actual SMOS algorithms.

Keywords: SMOS, microwave radiometry, soil moisture, Arctic tundra.