

УДК 537.874.34 : 631.445.52

Дистанционный микроволновый мониторинг засоленных почв

А.Н. Романов, И.В. Хвостов

Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Remote Microwave Monitoring Of Saline Soils

A.N. Romanov, I.V. Khvostov

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS
(Barnaul, Russia)

На примере степной зоны Западной Сибири проведен комплексный микроволновый мониторинг засоленных почв. Исследованы пространственно-временные характеристики микроволнового излучения почвенного покрова в условиях почвенного засоления. Исследованы зависимости микроволнового излучения засоленных почв Кулундинской степи от объемной влажности и температуры. Осуществлен анализ радиоярких температур подстилающей поверхности, измеренных со спутника SMOS (Европейское космическое агентство). Для дистанционного определения объемной влажности почвы предложено использовать данные микроволнового зондирования со спутника и зависимости коэффициентов излучения от объемной влажности и температуры, рассчитанные по результатам лабораторных измерений диэлектрических характеристик засоленных почв. Для определения значений радиоярких температур (T_b) подстилающей поверхности использовались данные спутника SMOS (продукт L1c), сделанные на частоте 1.41 ГГц под углом зондирования 42.5° и откалиброванные в единицах радиоярких температур. Данные продукта L1c привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9.

Ключевые слова: дистанционное микроволновое зондирование, радиояркая температура, коэффициент излучения, температура, влажность.

DOI 10.14258/izvasu(2017)4-09

Введение. Для дистанционного мониторинга засоленных почв разработаны космические методы зондирования, основанные на закономерностях излучения и отражения электромагнитных волн различных диапазонов подстилающей поверхностью и позволяющие обнаруживать участки почвенного засоления [1]. Микроволновое излучение почвенного покрова зависит от температуры, гранулометрического состава, влажности и засоленности почвы.

A complex microwave monitoring of saline soils with the example of the West Siberia steppe zone is carried out. Spatio-temporal characteristics of the microwave radiation of soils under salinization are studied. Dependences of microwave radiation of Kulunda steppe saline soils on volumetric moisture and temperature are investigated. The analysis of underlying surface radiobrightness temperatures measured from the SMOS satellite is performed. The usage of SMOS remote sensing data and the dependence of emissivity on volumetric moisture and temperature coefficients calculated from laboratory measurements of saline soils dielectric properties is proposed for remote evaluation of volumetric soil moisture.

Radiobrightness temperatures of underlying surface are obtained from SMOS satellite data (product L1c) at 1.41 GHz, 42.5° calibrated in units of radiobrightness temperature. The L1c data are tied to the DGG ISEA 4H9 discrete geodetic grid.

Key words: remote microwave sensing, brightness temperature, emissivity, moisture, temperature.

Совокупное влияние этих факторов ведет к значительным пространственно-временным вариациям радиоизлучательных параметров почв [2, 3]. Является актуальным совместное использование дистанционных и наземных наблюдений с целью определения пространственно-временного распределения влажности почвы в почвенном слое глубиной до 15 см [4]. Для обнаружения и картирования засоленных почв широко используются мульти-

спектральные и гиперспектральные данные, получаемые со спутников Landstat TM и Spot [5]. Засоленность почв может быть оценена по данным дистанционного гиперспектрального зондирования и наземных измерений электропроводности почвы на тестовых участках [6]. Предложен алгоритм определения почвенной засоленности, основанный на измерении значений мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости почвы [7].

Почвенное засоление ведет к изменению зависимостей микроволнового излучения почвы от объемной влажности и температуры. Оценка влажности почвы и степени засоленности возможна на основе использования данных дистанционного зондирования засоленных почв в оптическом и микроволновом диапазонах [8]. Мультиспектральное зондирование почвенного покрова позволяет провести картирование засоленных земель на основе спектров незасоленных почв и соленых растворов [9]. Несмотря на имеющиеся данные, существующие алгоритмы дистанционного определения влажности почвы не позволяют с приемлемой точностью восстанавливать по спутниковым измерениям влажность засоленной почвы. В данной работе приведены результаты исследований зависимостей микроволнового излучения засоленных почв на юге Западной Сибири от объемной влажности, температуры. Нами изучены пространственно-временные характеристики микроволнового излучения почвенного покрова.

Методика исследований. Для определения значений радиоярких температур (T_B) подстилающей поверхности использовались данные спутника SMOS (продукт L1c) [10], сделанные на частоте 1.41 ГГц под углом зондирования 42.5° и откалиброванные в единицах радиоярких температур. Погрешность определения T_B изменяется от ±3 К в центре до ±6 К на краях полосы захвата шириной 890 км. Съемка территории Западной Сибири производится в диапазоне углов зондирования от 0° до 55°. Разрешающая способность радиометра при зондировании под углом 42.5° составляет 45 км. Данные продукта L1c привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 [11], Линейный размер ячейки составляет ~16 км, площадь ~195 км².

Для измеренной со спутника радиояркой температуры T_B геодезической ячейки, включающей в себя отдельные участки с разными радиоизлучательными характеристиками, справедливо соотношение

$$T_B = \frac{\sum_{j=1}^n T_B^j S_j}{\sum_{j=1}^n S_j}, \quad (1)$$

где T_B^j , S_j — радиояркие температуры отдельных участков, а также процентные доли их площадей.

Соответственно, T_B^i отдельного участка площадью S_i может быть рассчитана по формуле

$$T_B^i = \left(T_B \cdot \sum_{j=1}^n S_j - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_B^j S_j \right) / S_i. \quad (2)$$

С одной стороны, формула (2) может быть использована для расчета T_B объектов, размеры которых меньше разрешающей способности спутникового радиометра. С другой стороны, T_B может быть рассчитана по формуле, имеющей для плоской слабощероховатой подстилающей поверхности следующий вид [12]:

$$T_B = \chi \cdot T_{ef}, \quad (3)$$

где χ , T_{ef} — коэффициент излучения и эффективная температура скин-слоя подстилающей поверхности в слое толщиной $L_{ef} = \lambda / (4\pi \sqrt{|\epsilon|} tg\delta)$, λ — длина волны, $|\epsilon| = \epsilon' \sqrt{1 + tg^2\delta}$, $tg\delta = \epsilon''/\epsilon'$ — тангенс угла потерь, ϵ' , ϵ'' — действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ воды или почвы.

Величина T_{ef} рассчитывается по формуле

$$T_{ef} = T_0 + \int_0^\infty \frac{dT}{dz} \exp \left[- \int_0^\infty \gamma(z') dz' \right] dz, \quad (4)$$

где T_0 — температура поверхности, dT/dz — локальный градиент температуры, определенный по результатам наземных измерений на тестовых участках, погонный коэффициент поглощения по мощности при угле визирования θ определялся по формуле

$$\gamma(z) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon' - \sin^2 \theta}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon' - \sin^2 \theta} \right)^2} - 1 \right]. \quad (5)$$

Для интерпретации спутниковых данных на тестовых участках определялись физические свойства подстилающей поверхности, проводился отбор проб почвы. В лабораторных условиях измерялись диэлектрические характеристики почв, используемые для построения зависимостей коэффициентов излучения χ от объемной влажности W и температуры.

Результаты исследований. На рисунке 1 приведены карты-схемы пространственного распределения радиоярких температур подстилающей поверхности Кулундинской степи, определенных со спутника SMOS и совмещенных с картографической основой, построенной по данным спутника Landsat.

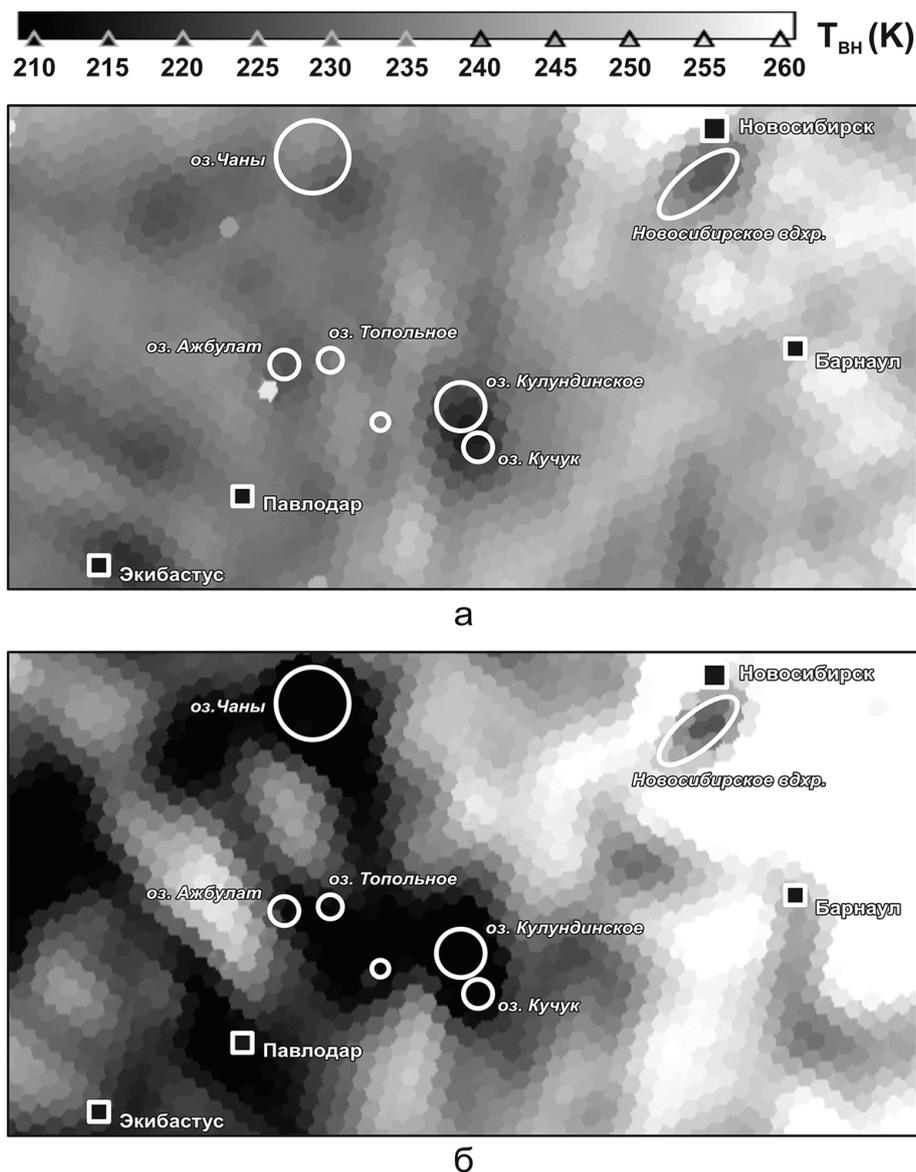


Рис. 1. Карты-схемы пространственного распределения радиоярких температур подстилающей поверхности Кулундинской степи, определенных по данным спутника SMOS: 26.02.2016 (а) и 13.06.2016 (б)

Значения T_B определялись на горизонтальной поляризации под углом 42.5° . На рисунке 1а выделяются участки с пониженной радиояркой температурой, соответствующие незамерзающим озерам Чаны и Кучук и участкам с почвенным засолением. Радиояркий контраст ΔT_B для разных участков достигает 50–100 К. На рисунке 1б выделяются участки с пониженной радиояркой температурой, связанные с переувлажнением территории за счет весеннего снеготаяния, оттаивания поверхностного слоя почвы.

На рисунке 2 приведен сезонный ход радиояркой температуры, измеренной на горизонтальной поляризации под углом 42.5° . Видно, что для разных лет зависимость $T_B(JD)$ имеет качественно похожий

вид, однако различается количественно, что связано с погодными условиями в каждом году. В разные сезоны радиояркие контрасты достигают 70–100 К. В течение года выделяются четыре временных периода с разным поведением T_B почвы.

Рассмотрим вариации T_B начиная с понижения температуры воды ниже 0°C :

1. Период с понижения температуры почвы ниже 0°C до промерзания почвенного покрова на глубину $d \geq L_{ef}$, где L_{ef} — толщина скин-слоя, обратная коэффициенту затухания, зависящая от диэлектрических характеристик подстилающей поверхности и длины волны λ , на которой ведется зондирование [12]. Значения T_B изменяются от 175 до 245 К.

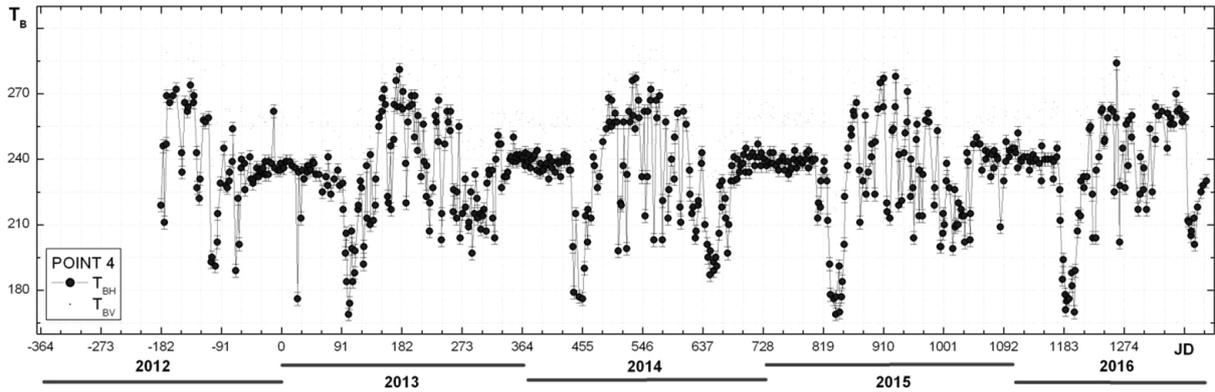


Рис. 2. Временной ход радиояркой температуры подстилающей поверхности на горизонтальной поляризации в период с 2012 по 2016 г. для геодезической ячейки с координатами 52.95° с.ш., 79.49° в.д.

2. Период отрицательных температур (при $d > L_{ef}$). $T_{я}$ изменяется в пределах от 225 до 245 К и зависит от температуры поверхности почвы.

3. Переходный период от отрицательных температур к положительным. Значения T_B изменяются от 245 до 175 и связаны с таянием снега, оттаиванием поверхностного слоя почвы.

4. Период положительных температур. Вариации $T_B = 175 \div 275\text{K}$ зависят от изменений температуры, объемной влажности почвы. В свою очередь влажность почвы зависит от атмосферных осадков. Максимумы T_B соответствуют засушливым периодам, минимумы T_B — периодам с интенсивными дождевыми осадками.

Измеренные значения T_B могут быть использованы при определении объемной влажности территории. Перепишем формулу (3) в следующем виде: $\chi = T_B / T_{ef}$, где T_B определяется по данным SMOS, T_{ef} — по данным MODIS/Terra (продукт MOD11A1), полученным из открытой базы LP DAAC (<https://lpdaac.usgs.gov>).

Комбинирование временных трендов T_B с зависимостями коэффициентов излучения χ от объемной влажности (W) и температуры (T) позволяет оценить влажность засоленной почвы. Зависимость $\chi(W)$, установленная по данным диэлектрических измерений, приведена на рисунке 3а. Обратная зависимость $W(\chi)$, аппроксимированная полиномом второй степени, имеет вид

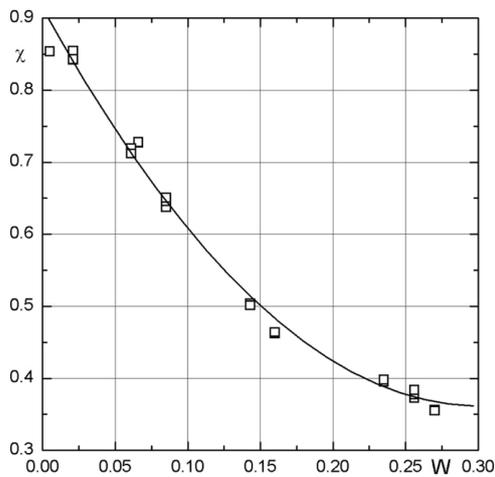
$$W = 0.517 - 0.932 \cdot \chi + 0.4135 \chi^2, \quad \sigma = 0.06, \quad (3.1)$$

где σ — среднеквадратическая погрешность.

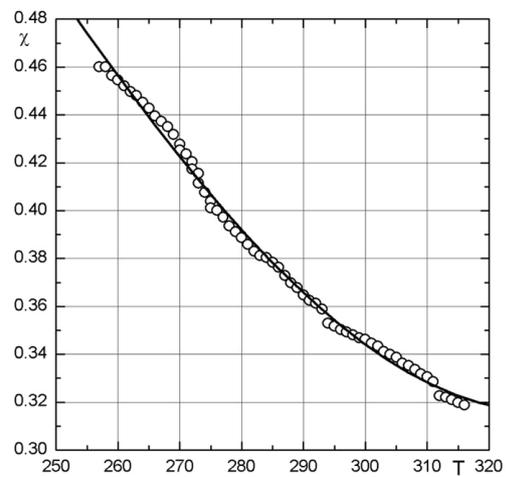
Зависимость $\chi(T)$, приведенная на рисунке 3б, имеет вид

$$\chi = 2.97 - 0.016 \cdot T + 2.3 \cdot 10^{-5} \cdot T^2, \quad \sigma = 0.003. \quad (3.2)$$

Установленные зависимости являются основой для разработки дистанционного микроволнового способа определения влажности засоленной



а)



б)

Рис. 3. Зависимости коэффициента излучения χ засоленной почвы от объемной влажности W при $T = 297\text{ K}$ (а) и температуры при $W = 0.32$ (б) на горизонтальной поляризации при угле зондирования 42.5°

почвы и могут быть использованы для калибровки радиометрической аппаратуры космического базирования.

Заключение. По данным спутника SMOS построены карты-схемы пространственного распределения радиоярких температур подстилающей поверхности Западной Сибири. Для тестового участка, расположенного в Кулундинской степи, установлен сезонный и годовой ход радиоярких температур. Для дистанционного определения объемной влажности почвы предложено

использовать данные дистанционного микроволнового зондирования и зависимости коэффициентов излучения от объемной влажности и температуры, рассчитанные по данным лабораторных измерений диэлектрических характеристик засоленных почв.

Данные SMOS получены в рамках проекта ESA № 4747 «Remote mapping of Siberian saline soils». Экспедиционное обследование территории выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-05-98041, 15-05-05018, № 15-45-04060.

Библиографический список

1. Metternicht G.I. Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS. Foundations of an expert system // *Ecological Modelling*. — 2001. — V. 144, № 2–3.
2. Guo Y., Shi Z., Zhou L., Jin X., Tian Y., Teng H. Integrating Remote Sensing and Proximal Sensors for the Detection of Soil Moisture and Salinity Variability in Coastal Areas // *Journal of Integrative Agriculture*. — 2013. — V. 12, № 4.
3. Mulder V.L., Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping // *Geoderma*. — 2011. — V. 162, № 1–2.
4. Gravalos I., Moshou D., Loutridis S., Gialamas T., Kateris D., Bompolas E., Tsiropoulos Z., Xyradakis P., Fountas S. 2D and 3D soil moisture imaging using a sensor-based platform moving inside a subsurface network of pipes // *Journal of Hydrology*. — 2013. — V. 499.
5. Ding J.-L., Wu M.-C., Tiyip T. Study on Soil Salinization Information in Arid Region Using Remote Sensing Technique Original Research Article // *Agricultural Sciences in China*. — 2011. — V. 10, № 3.
6. Mashimbye Z.E., Cho M.A., Nell J.P., De Clercq W.P., Van Niekerk A., Turner D.P. Model-Based Integrated Methods for Quantitative Estimation of Soil Salinity from Hyperspectral Remote Sensing Data: A Case Study of Selected South African Soils // *Pedosphere*. — 2012. — V. 22, № 5.
7. Bell D., Menges C., Ahmad W., van Zyl J.J. The Application of Dielectric Retrieval Algorithms for Mapping Soil Salinity in a Tropical Coastal Environment Using Airborne Polarimetric SAR // *Remote Sensing of Environment*. — 2001. — V. 75, № 3.
8. Melendez-Pastor I., Navarro-Pedreño J., Koch M., Gómez I. Applying imaging spectroscopy techniques to map saline soils with ASTER images // *Geoderma*. — 2010. — V. 158, № 1–2.
9. Weng Y.-L., Gong P., Zhu Z.-L. A Spectral Index for Estimating Soil Salinity in the Yellow River Delta Region of China Using EO-1 Hyperion Data // *Pedosphere*. — 2010. — V. 20, № 3.
10. Gutierrez A., Castro R. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model / SO-DS-DME-L1PP-0009. — N 2.7. — 2010. 31 May [Electronic resource]. — URL: <http://www.smos.com.pt/downloads/release/documents/SO-DS-DME-L1PP-0009-DPM-L1c.pdf>
11. Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid Systems // *Cartography and Geographic Information Science*. — 2003. V. 30, № 2.
12. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. — М., 2014. — Т. 1.