

**ОСОБЕННОСТИ ЯРКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРРИТОРИИ ЮГА  
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА В ПЕРИОД ТАЯНИЯ  
СНЕЖНОГО ПОКРОВА, ИЗМЕРЯЕМЫХ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ SMOS\***

П. П. Бобров<sup>1</sup>, В. Л. Миронов<sup>2</sup>, А. С. Яценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный педагогический университет

Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: x\_rays1@mail.ru

<sup>2</sup>Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

*Приведены результаты анализа радиояркостных характеристик почв в период промерзания, нахождения в замерзшем состоянии и оттаивания. Установлено, что яркостная температура, измеренная радиометром MIRAS спутника SMOS, слабо изменяется при замерзании почвы в силу климатических и графических особенностей юга Западной Сибири. Показано, что спутниковые данные, как и данные наземных измерений, слабо коррелируют с параметрами, характеризующими состояние почвы при нахождении в замерзшем состоянии. Установлено, что при таянии снега наблюдается влияние азимутального угла съемки относительно меридионального направления на временной ход яркостной температуры. Найденные зависимости следует учитывать при обработке и использовании спутниковых радиометрических данных SMOS.*

*Ключевые слова: микроволновая радиометрия, спутниковые данные, промерзание и оттаивание почв.*

**FEATURES OF THE BRIGHTNESS CHARACTERISTICS OF THE SOUTH  
OF WESTERN SIBERIA AND NORTHERN KAZAKHSTAN DURING SNOW  
TAWNING MEASURED BY SMOS-SATELLITE**

P. P. Bobrov<sup>1</sup>, V. L. Mironov<sup>2</sup>, A. S. Yashchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Pedagogical University

14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: x\_rays1@mail.ru

<sup>2</sup>Institute of Physics named after L.V. Kirenskiy of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

*Results of the analysis of brightness characteristics of soil during freezing/thawing process and frozen state are presented. It is found that the brightness temperature measured by MIRAS radiometer of the SMOS-satellite, changes only slightly during the soil freezing due to the climatic and geographical features of the south of Western Siberia. It is shown that satellite data like ground measurements poorly correlate with the parameters characterizing the state of the soil while it is in the frozen state. The effect of azimuth survey regarding from the meridional direction at the time evolution of brightness temperature during snow thawing was observed. Founded dependences should be taken into an account in the processing and use of the SMOS satellite radiometric data.*

*Keywords: microwave radiometry, satellite data, process freezing/thawing of soil.*

Результаты исследований процессов замерзания-оттаивания земных покровов востребованы при решении задач климатологии и метеорологии. По причине глобального характера решаемых задач главным средством мониторинга поверхности являются спутниковые технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Достоинство микроволновых радиометрических методов, по сравнению с другими методами мониторинга, заключается в возможности получения информации об относительно толстом поверхностном слое почв. Спутник SMOS является одним из немногих аппаратов ДЗЗ, имеющим на борту микроволновый радиометр [1].

Яркостная температура почвы определяется выражением вида

$$T_{\text{я}} = T_{\text{эфф}} \cdot \chi$$

где  $T_{\text{эфф}}$  – эффективная температура почв, зависящая от функций изменения термодинамической температуры и комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) с глубиной;  $\chi$  – коэффициент излучения. Изменение температуры почвы приводит как к изменению  $T_{\text{эфф}}$ , так и  $\chi$ . Наибольшие изменения  $\chi$  наблюдаются при температуре фазового перехода почвенной влаги.

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-05-98082-п\_сибирь\_a).

Промерзание почвы при температуре воздуха немногим ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  будет отличаться тем, что вся свободная вода в пределах замерзшего слоя замерзнет, а большая часть связанной воды будет находиться в жидком состоянии [2]; по мере роста глубины промерзания  $T_{я}$  вначале монотонно увеличивается, затем, осциллируя, стремится к значению, соответствующему почве, промерзшей до глубины, превышающей глубину зондируемого слоя радиометра [3]. Величина перепада  $T_{я}$  между значениями в талом и замерзшем состоянии в большей степени определяется влажностью почв перед промерзанием и может достигать величин от единиц кельвин для маловлажных почв до десятков кельвинов для сильно влажных (рис. 1). В силу климатических и географических особенностей юга Западной Сибири величина  $T_{я}$  поверхности перед промерзанием велика, что затрудняет отслеживание процесса промерзания почв с помощью спутника SMOS (рис. 1, а).

В замерзшем состоянии изменения  $T_{я}$  обусловлены дальнейшим понижением термодинамической температуры почвы, слабым увеличением коэффициента

излучения вследствие постепенного замерзания связанной воды, а также ростом толщины снежного покрова на поверхности почвы. Эксперимент, проведенный в январе 2013 г., показал, что вариации  $T_{я}$  почвы, покрытой слоем снега в 25 см, не превышали 2 К. При этом термодинамическая температура снега в его толще изменялась на 15 К, а температура поверхности почвы на 10 К. Объяснить такой факт, на наш взгляд, можно взаимной компенсацией влияния роста коэффициента излучения и падения термодинамической температуры почвы.

В процессе анализа радиометрических данных SMOS в зимний период использовались данные, усредненные в диапазоне углов зондирования в  $40,5^{\circ}$ – $42,5^{\circ}$  (данные, полученные для этих углов зондирования, встречаются чаще всего). Вариации  $T_{я}$ , в отличие от наземных измерений, были более существенными, но не коррелировали с эффективной температурой ( $T_{эфф}$ ), приведенной в SMOS Level 2 (рис. 2, а). При этом корреляция между температурой воздуха и  $T_{эфф}$  почвы была несколько лучше (рис. 2, б).

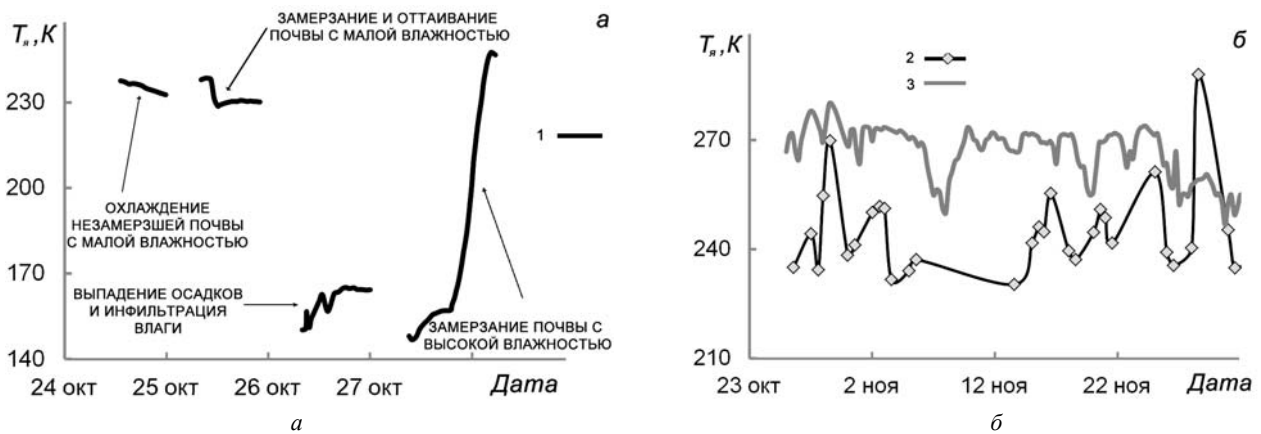


Рис. 1. Результаты наземных (1), спутниковых (2) измерений  $T_{я}$  почв под углом зондирования  $30^{\circ}$ , а также временной ход температуры воздуха (3) на момент измерений в 2011 г. (а) и 2012 г. (б)

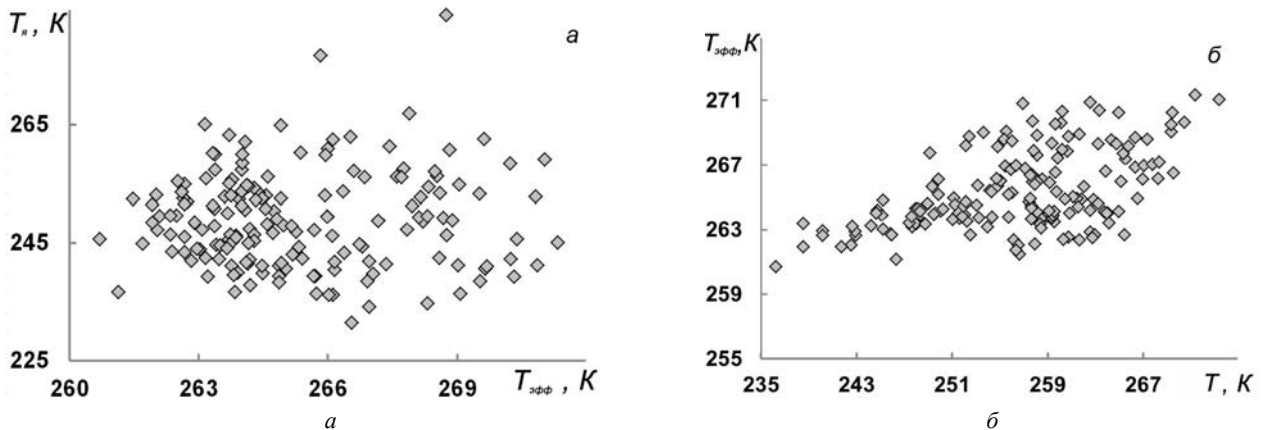


Рис. 2. Зависимости радиояростной ( $T_{я}$ ), эффективной ( $T_{эфф}$ ) и термодинамической ( $T$ ) температур для одного из пикселей радиометрического снимка в период осень 2012 – зима 2013 гг.

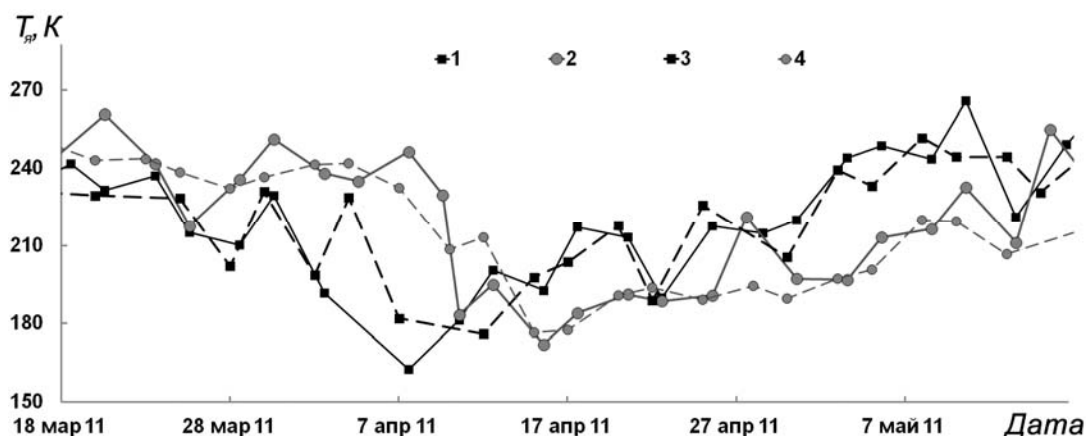


Рис. 3. Временной ход яркостной температуры для углов зондирования  $40,5^{\circ}$ – $42,5^{\circ}$ , полученной усреднением значений для пикселей с широтой  $53,5^{\circ}$  с. ш. (1, 3) и  $55,5^{\circ}$  с.ш. (2, 4) в диапазоне долгот от  $70^{\circ}$  до  $76^{\circ}$  в. д. для азимутальных углов зондирования  $0^{\circ}$  (1, 2) и  $180^{\circ}$  (1, 2)

Таяние снега сказывается на величине  $T_{я}$ , измеренной SMOS, в гораздо большей степени. В данных SMOS направление от спутника к зондируемому участку, совпадающее с направлением на географический юг, принимают за азимутальный угол, равный  $0^{\circ}$ . Анализ радиометрических данных показал: между значениями  $T_{я}$ , полученными при азимутальных углах  $0^{\circ}$  и  $180^{\circ}$  в момент таяния снега, имеются достоверные различия, которые нельзя свести к ошибкам работы аппаратуры (рис. 3) [4; 5]. На наш взгляд, различия в  $T_{я}$  можно объяснить влиянием крупномасштабных неровностей поверхности. Однако объяснить поведение  $T_{я}$ , наблюдаемое на приведенном графике, простым затенением северных склонов не представляется возможным, поскольку азимутальному углу зондирования в  $0^{\circ}$  (зондированию северного склона) соответствует более ранний минимум (раннее окончание таяния), по сравнению с данными для азимутального угла зондирования в  $180^{\circ}$  (зондированию южного склона). Более развернутое объяснение эффекта требует дополнительных исследований.

Таким образом, проведенные исследования и анализ данных показали, что радиометрические данные SMOS не позволяют достоверно определять момент начала промерзания. Процессы таяния сказываются на временном ходе  $T_{я}$ , измеренной аппаратом SMOS, в гораздо большей степени. Найденные различия  $T_{я}$ , полученные при разных азимутальных углах, в моменты таяния снега требуют дополнительного анализа.

#### Библиографические ссылки

1. Measuring Ocean Salinity with ESA's SMOS Mission / M. Berger, A. Camps, J. Font et. al // ESA Bulletin. 2002. Vol. 111. 113f.

2. Миронов В. Л., Лукин Ю. И. Физическая модель диэлектрических спектров талой и мерзлой бентонитовой глины в диапазоне частот от 1 до 15 ГГц // Известия вузов. Физика. 2010. № 9. С. 71–76.

3. Бобров П. П., Миронов В. Л., Ященко А. С. Суточная динамика радиоярких температур почв на частотах 1,4 и 6,9 ГГц в процессах промерзания и оттаивания // Радиотехника и электроника. 2010. № 4. С. 395–403.

4. SMOS Calibration and Instrument Performance After One Year in Orbit / R. Oliva, M. Martin-Neira, I. Corbella et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. Vol. 51. № 1. P. 654–670.

5. Бобров П. П., Миронов В. Л., Ященко А. С. Статистический анализ данных спутника SMOS о радиояркости температуре территории юга Омской области и Северного Казахстана // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 142–143.

#### References

1. Berger M., Camps A., Font J., Kerr et. al. ESA Bulletin 111. 2002. 113f.

2. Mironov V. L., Lukin Yu. I. Izvestiya vuzov. Fizika. 2010, no. 9, pp. 71–76.

3. Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S. Radiotekhnika i elektronika. 2010, no. 4, pp. 142–143.

4. Oliva R., Martin-Neira M., Corbella I., Torres F., Kainulainen J., Tenerelli J. E., Cabot F., and Martin-Porqueras F. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013, vol. 51, no. 1, pp. 654–670.

5. Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 142–143.