

УДК 528.8

К.В. МУЗАЛЕВСКИЙ\*, \*\*, В.Л. МИРОНОВ\*, \*\*, Дж. БОЙКЕ\*\*\*, А.А. ШВАЛЕВА\*, А.В. ЕВТЮШКИН\*\*\*\*,  
А.В. ФИЛАТОВ\*\*\*\*, М. ЛАНГЕР\*\*\*

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛОГО ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО РАДАРА ALOS PALSAR<sup>1</sup>

Исследуются температурные зависимости коэффициента обратного радарного рассеяния на горизонтальной-горизонтальной поляризации, измеренные радаром с синтезированной апертурой PALSAR космического аппарата ALOS над территорией о. Самойловский. Показано, что коэффициент обратного радарного рассеяния заметно коррелирует с температурой мерзлой почвы, измеренной на глубине 5 см.

**Ключевые слова:** ALOS PALSAR, коэффициент обратного радарного рассеяния, арктическая почва, температура почвы, комплексная диэлектрическая проницаемость.

В процессе замерзания и оттаивания почвы амплитудная зависимость коэффициента обратного радарного рассеяния (КОР) имеет значительные вариации (3–6дБ), которые впервые экспериментально были обнаружены в [1] при измерениях КОР на частоте 1,3 ГГц для тундровых территорий в районе г. Фэрбанкса, Аляска. Это явление было использовано для идентификации талого и мерзлого состояния почвы. В дальнейшем в [2] была установлена эмпирическая зависимость между КОР и температурой почвенного покрова на глубине 5 см. Измерения проводились на частоте 5,3 ГГц с помощью космическим аппаратом (КА) RADARSAT-1 для сельскохозяйственных полей в районе г. Квебек, Канада. Цель данной работы – установить такую зависимость для арктической тундры на о. Самойловский, расположенном в дельте реки Лена. Измерения КОР проводились на частоте 1,26 ГГц с помощью радара PASAR, установленного на КА ALOS.

Остров Самойловский (72,3699 с.ш., 126,4807 в.д.) был выбран в качестве тестовой территории, так как на нем установлен комплекс биосферных метеостанций. Здесь проводятся ежедневные измерения влажности, температуры деятельного слоя почвенного покрова в слое толщиной до 2,0 м, температуры воздуха, толщины снежного покрова [3]. На о. Самойловском было выбрано два тестовых участка: № 1 – обводненная область (влажная тундра) вблизи метеостанции (72,3700 с.ш., 126,4808 в.д.) и № 2 – относительно сухая область (сухая тундра) с координатой (72,3731 с.ш., 126,5028 в.д.). Почвенный покров о. Самойловский представляет собой полигональную тундру, верхний горизонт почвы толщиной 5–10 см содержит органику от 0,02 г/г (центр полигона) до 0,17 г/г (кромка полигона), песок 0,18–0,60 г/г, ил 0,37–0,76 г/г, глину менее 15 %, плотность сухого сложения 0,1–0,4 г/см<sup>3</sup> (кромка полигона) и 0,6–1,0 г/см<sup>3</sup> (центр полигона). Почва относится к типичным видам Historthels (центр полигона), Glacic Aquiturbels (кромка полигона) [3]. Для этих участков были получены 9 радарных снимков в период с 23 марта 2007 г. по 3 апреля 2011 г. Три снимка представлены в режиме FBS (только НН поляризация, угол съемки 34,3°), два – в режиме FBD (НН+НВ, угол съемки 34,3°), четыре – в режиме PLR (НН+НВ+ВН+ВВ, угол съемки 21,5°). Время съемки незначительно варьировалось около 13:00 по местному времени. В данной работе представлены результаты обработки пяти радарных снимков в режиме FBS и FBD. Радиометрическая коррекция и геометрическая привязка радарных снимков производилась с помощью свободно распространяемого программного обеспечения Next ESA SAR Toolbox [4]. В процессе обработки для каждой радарной сцены был применен фильтр усреднения (Mean-фильтр) с окном 9×9 пикселей. В результате наблюдаемые значения КОР соответствовали участку 100×100 м<sup>2</sup>. Коэффициент обратного рассеяния рассчитывался по интенсивности изображения с использованием калибровочной формулы, приведенной в [5].

Данные метеостанции в дни радарной съемки представлены на рис. 1 и 2. Для 11.02.2008 и 16.02.2010 г. отсутствуют наземные измерения. В качестве температуры почвы на глубине 5 см и толщины снежного покрова брались усредненные значения величин для 11.02 и 16.02 с 2006 по 2011 г. За период радарных съемок температура почвы на глубине 5 см варьировалась от –21,6 до –1,3 °С, при этом средняя толщина снежного покрова была равна 0,13 м (см. рис. 2).

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 12-05-31269\_мод\_а, базовой программы П. 10.1: Радиофизические методы диагностики окружающей среды СО РАН. Радарные данные получены по гранту JAXA\_№ 563 «Study of topography and geology of Baikal region using optical and radar ALOS data».

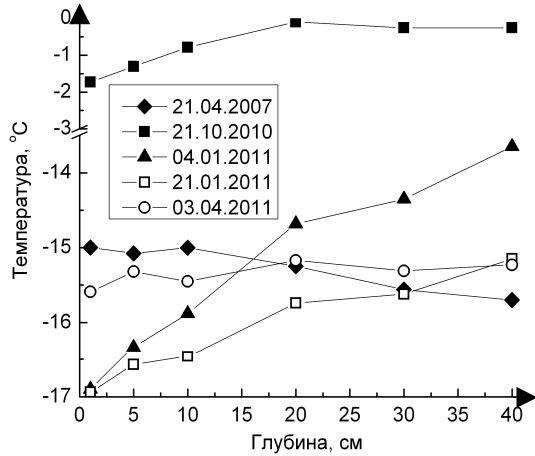


Рис. 1. Профили температур почвенного покрова в дни радарных съемок по данным метеостанции

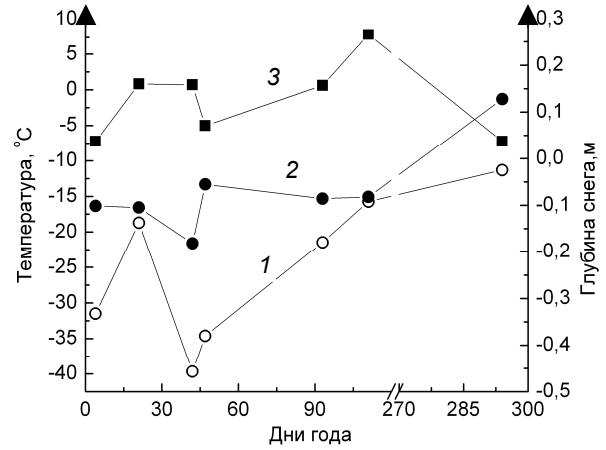


Рис. 2. Температура воздуха (кр. 1), температура деятельного слоя (кр. 2) на глубине 5 см и толщина снежного покрова (кр. 3) в дни съемки по данным метеостанции

Временной ход КОР для двух тестовых участков и общая зависимость КОР от температуры почвы на глубине 5 см приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

В результате корреляционного анализа данных, представленных на рис. 4, установлена следующая линейная регрессионная зависимость между КОР и температурой почвы на глубине 5 см:

$$\sigma_{\text{нн}} = -(16,77 \pm 0,54) + (0,14 \pm 0,04)T. \quad (1)$$

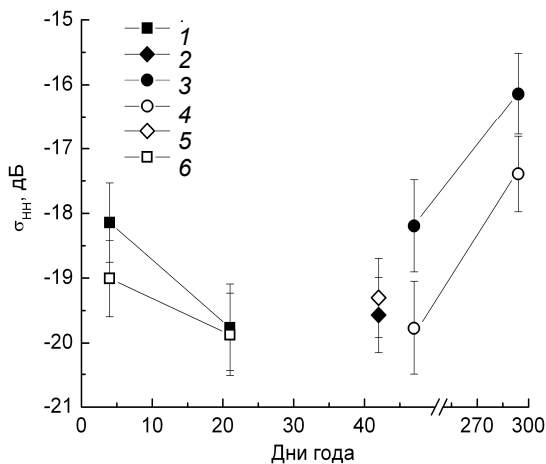


Рис. 3. Временной ход коэффициента обратного радарного рассеяния для двух тестовых участков: № 1 – кр. 1, 2, 3 и № 2 – кр. 4, 5, 6. Годы съемки: кр. 1, 6 – 2011 г.; кр. 2, 5 – 2008 г.; кр. 3, 4 – 2010 г.

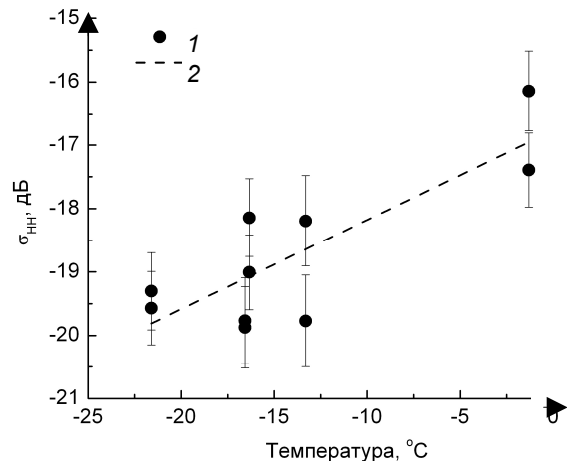


Рис. 4. Зависимость коэффициента обратного радарного рассеяния на горизонтальной-горизонтальной поляризации от температуры мерзлой почвы на глубине 5 см. Пунктирной линией показана линейная регрессионная зависимость (см. формулу (1))

При этом коэффициент корреляции Пирсона равен 0,82. Согласно (1), КОР увеличивается на 0,14 дБ при увеличении температуры почвы на один градус. Учитывая, что погрешностью измерения КОР с помощью радара PALSAR составляет  $\pm 0,5$  дБ, ошибка измерения температуры может достигать 7,1 °C. Данная величина коррелирует с теоретически рассчитанной погрешностью 5,7 °C восстановления средней температуры в слое мерзлой арктической почвы толщиной 5 см [6].

В результате проведенного исследования была получена линейная регрессионная зависимость (коэффициент Пирсона равен 0,82) между коэффициентом обратного радарного рассеяния на частоте 1,26 ГГц, измеренного радаром PALSAR КА ALOS, и температурой деятельного слоя мерзлой арктической почвы на глубине 5 см, для тестового участка тундры, расположенного на о. Самойловским в дельте р. Лена. Данная линейная зависимость может быть использована в качестве калибровки радара ALOS PALSAR для оценки температуры почвы о. Самойловский.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Way J.B., Paris J., Kasischke E., et al. // Int. J. Remote Sensing. – 1990. – V. 11. – P. 1119–1144.
2. Khaldoune J., van Bochove E., Bernier M., and Nolin M.C. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceeding. – 2008. – V. 3. – P.III-382–III-385.
3. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., et al. // Biogeosciences Discuss. – 2012. – V. 9. – P. 1–58.
4. ESA. (2013). [Online]. Next ESA SAR Toolbox. Available: <http://nest.array.ca/web/nest>
5. PALSAR Calibration Factor Updated. (2009). [Online]. Available: [https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en\\_3.html](https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/en/doc/an/20090109en_3.html)
6. Mironov V.L. and Muzalevskiy K.V. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 55. – No. 8. – P. 899–902.

\*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

\*\*\*Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера,

г. Бремерхафен, Германия

\*\*\*\*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

E-mail: [rsdkm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdkm@ksc.krasn.ru), [rsdvm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdvm@ksc.krasn.ru)

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

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

Джулия Боике, д.ф.-м.н.;

Швалева Анна Александровна, аспирантка;

Евтюшкин Аркадий Викторович, к.ф.-м.н., доцент;

Филатов Антон Валентинович, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;

Лангер Мориц, к.ф.-м.н.

*K.V. MUZALEVSKIY, V.L. MIRONOV, J. BOIKE, A.A. SHVALEVA, A.V. YEVTYUSHKIN, A.V. FILATOV, M. LANGER*

## **THE ABILITY TO MEASURE THE TEMPERATURE OF THE FROZEN ACTIVE TOPSOIL OF THE ARCTIC TUNDRA BASED ON THE ALOS PALSAR DATA**

The temperature dependence of the radar backscattering coefficient on a horizontal-horizontal polarization, measured by the SAR ALOS over the territory Samolovsky Island, are studied in the paper. In article was shown, the temperature dependence of the backscattering coefficient on the horizontal-horizontal polarization is strongly correlated with soil temperature measured at a depth of 5 cm.

**Keywords:** *ALOS PALSAR, radar backscattering coefficient, Arctic soil, soil temperature, complex dielectric permittivity.*