

### Библиографические ссылки

1. Richards J. A. Remote Sensing with Imaging Radar. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2009.
2. Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования / Т. Н. Чимитдоржиев, П. Н. Дагуров, А. И. Захаров и др. // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 1. С. 80–87.
3. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of Earth. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 2003.
4. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой / П. Н. Дагуров, А. В. Дмитриев, Ж. Б. Дымбрылов, Т. Н. Чимитдоржиев // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 266–267.
5. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models / M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M. A. El-Rayes // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1985. Vol. 23, № 1. P. 35–46.
6. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils / V. L. Mironov, M. C. Dobson, V. H. Kaupp et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004. Vol. 42, № 4. P. 773–785.
7. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations / M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1985. Vol. 23, № 1. P. 25–34.

8. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973.

### References

1. Richards J. A. Remote Sensing with Imaging Radar. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2009.
2. Chymitdorzhiev T. N., Dagurov P. N., Zakharov A. I., Tatkov G. I., Bykov M. E., Dmitriev A. V., Baldanov N. D., Muhorin E. A., Milheev E. U. Kriosfera Zemli, 2013. Vol. 17, № 1, pp. 80–87.
3. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of Earth. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2003.
4. Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Dymbrylov J. B., Chimitdorzhiev T. N. Izvestia vuzov. Physics. 2012. Vol. 55. № 8/2. Pp. 266–267.
5. Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-Rayes M. A. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1985, vol. 23, no. 1, pp. 35–46.
6. Mironov V. L., Dobson M. C., Kaupp V. H., Komarov S. A., Kleshchenko V. N. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004, vol. 42, no. 4, pp. 773–785.
7. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., M. C. El-Rayes M. C., Wu L. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1985, vol. 23, no.1, pp. 25–34.
8. Brehovskih L. M. Waves in в layer media. Moscow, Nauka, 1973.

© Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Базаров А. В., Балтухаев А. В., Дымбрылов Ж. Б., 2013

УДК 535.391.4

### ОТРАЖЕНИЕ МИКРОВОЛН L-ДИАПАЗОНА ОТ СНЕЖНОГО ПОКРОВА\*

П. Н. Дагуров<sup>1</sup>, А. В. Дмитриев<sup>1</sup>, С. И. Добрынин<sup>1</sup>, Г. И. Татков<sup>2</sup>,  
Т. Н. Чимитдоржиев<sup>1</sup>, А. В. Базаров<sup>1</sup>, А. К. Балтухаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: dprn@ipms.bscnet.ru

<sup>2</sup>Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а

*Рассматривается отражение микроволн частотой 1,4 и 1,8 ГГц от структуры «снег–почва». Приведены результаты наземного экспериментального исследования по бистатической схеме. Проведено сравнение с расчетными результатами. Показано, что изменение высоты снежного покрова вызывает заметные вариации уровня отраженного поля. Установлено, что экспериментальные и расчетные результаты частично согласуются между собой. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения теоретических моделей активного и пассивного микроволнового дистанционного зондирования.*

*Ключевые слова:* микроволны, отражение, снег, слоистая структура.

\* Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ № 12-05-980622-р\_сибирь\_а, РФФИ № 13-08-01132, Интеграционными проектами СО РАН № 73 и № 144.

## L-BAND MICROWAVES REFLECTION FROM A SNOW COVER

P. N. Dagurov<sup>1</sup>, A. V. Dmitriev<sup>1</sup>, S. I. Dobrynin<sup>1</sup>, G. I. Tatkov<sup>2</sup>,  
T. N. Chymitdorzhiev<sup>1</sup>, A. V. Bazarov<sup>1</sup>, A. K. Baltukhaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: dpn@ipms.bsnet.ru

<sup>2</sup>Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
6a Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia

*Microwaves reflection at frequency of 1,4 GHz and 1,8 GHz from the structure "snow-soil" is considered. The results of field experiment with help of bistatic scheme are presented, the comparison of the results with the calculation data is made. It is shown that variation of a snow cover height produce considerable variations in reflected field level. It is revealed that experimental and numerical results partly meet. The obtained results can be used to refine the theoretical models of active and passive microwave remote sensing.*

*Keywords: microwaves, reflection, snow, layered structure.*

Отражение и рассеяние земной поверхностью микроволнами является основой теории и практики радиолокационного и радиотеплового аэрокосмического зондирования Земли. Отраженные сигналы несут информацию о характеристиках земной поверхности и верхнем слое почвы, определение которых происходит в результате решения обратной задачи. Поэтому очень важно иметь электродинамическую модель, которая адекватно описывает процессы отражения от земной поверхности. Снег является важнейшей составляющей земного покрова в холодный период и одним из актуальных направлений дистанционного зондирования является изучение снежных покровов земной поверхности, которому посвящено большое количество работ, например, [1–3]. Значение снега и льда обусловлено непосредственной связью их состояния на планете с проблемой глобального потепления и другими критическими процессами.

В известной литературе не обнаружено исследований по расчетно-экспериментальным оценкам коэффициента отражения микроволн от слоистой структуры «снег–почва». Между тем, они могут дать возможность как более точного учета их влияния на характеристики радиолокационных и радиотепловых сигналов, так и более адекватного восстановления параметров льда и снега с помощью дистанционного зондирования. В природе снег является достаточно сложной системой, имеющей, например различную зернистую структуру, от которой возможно объемное рассеяние, и слоистое строение, которые не учитываются теорией для однородных сред. С целью экспериментального исследования отражения микроволн от снежного покрова и сравнения с результатами расчета были проведены предварительные натурные наземные исследования отражения микроволн в условиях полигона.

**Теория.** В качестве первого приближения будем считать рассматриваемые среды однородными и характеризующимися своими комплексными диэлектрическими проницаемостями (КДП)

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2,$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – действительная и мнимая части КДП, соответственно.

Для численных оценок используем следующие значения КДП.

**Снег.** В качестве КДП в микроволновом диапазоне используем полуэмпирическую формулу [1; 4]

$$\varepsilon_1 = 1 + 1,6\rho + 1,86\rho^3, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность снега, г/см<sup>3</sup>. Значения  $\rho$  могут быть заключены в пределах от 0,02–0,25 для свежеснежного снега и 0,3–0,5 перед периодом таяния. Значения  $\varepsilon_2$  для снега не превышают  $10^{-4}$ – $10^{-2}$  [5].

**Мерзлая почва.** У мерзлой почвы в зависимости от состава и температуры согласно графическим зависимостям, приведенным в работе [5],  $\varepsilon_1 = 4$ –8,  $\varepsilon_2 = 0,1$ –2.

При расчетах амплитуды и фазы коэффициента отражения  $R$  от слоистых структур использовалась формула [6]

$$R = \frac{R_{12} + R_{23}e^{-2ik_2d}}{1 + R_{12}R_{23}e^{-2ik_2d}}, \quad (2)$$

где  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  – коэффициенты отражения на границах «полупространство 1 – полупространство 2» и «полупространство 2 – полупространство 3», соответственно;  $k_2$  – проекция волнового вектора в среде 2 на перпендикулярное поверхностям направление;  $d$  – толщина слоя. Соответственно, цифра 1 обозначает атмосферу, 2 – снег, 3 – почву.

Формула (2) получена для случая плоской волны, падающей на дискретно-слоистую среду с плоскими границами раздела.

Вычисления по формуле (2) показывают, что как амплитуды, так и аргументы коэффициента отражения при определенных соотношениях параметров сред изменяются достаточно заметно [7]. Аналогичные изменения были также получены для случая дискретной слоистости влажности почвы [8]. В радиолокационной интерферометрии, основанной на измерении фазы отраженной волны, отсутствие учета этих изменений фазы может привести к заметным ошибкам.

**Условия и результаты эксперимента.** На сравнительно ровную мерзлую почву с остатками прошлогодней травы и с размерами вертикальных неровностей приближенно до  $\pm 1$  см механическим способом

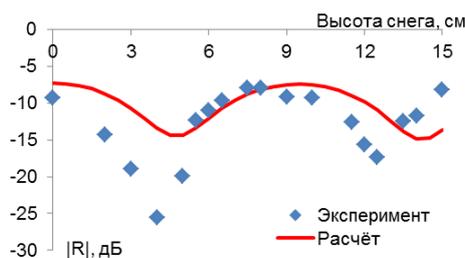


Рис. 1. Зависимости коэффициента отражения от высоты снежного покрова на частоте 1,4 ГГц

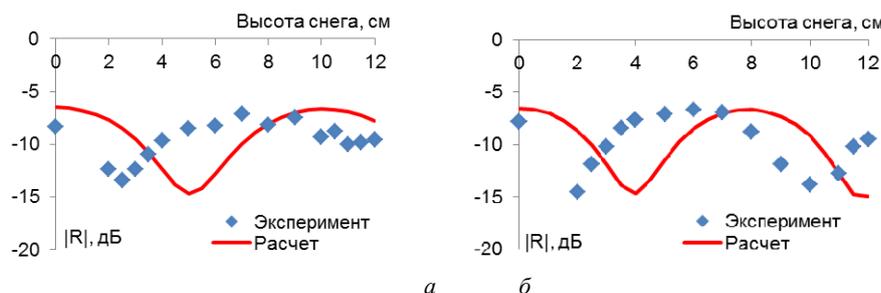


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от высоты снежного покрова на частотах 1,4 ГГц (а) и 1,8 ГГц (б)

накладывался снег с целью образования покрова различной высоты, затем поверхность снега заглаживалась, насколько это было возможно, далее процесс проходил в обратном порядке. Измеренная плотность снега находилась в пределах  $0,24\text{--}0,35\text{ г/см}^3$ . Измерения выполнялись по бистатической схеме. Излучающая и приемная антенны представляли собой измерительные рупорные антенны Пб-23, направленные на точку зеркального отражения. Центры антенных апертур находились на высоте 1,73 м и расстояние между ними, соответственно, составляло 2 м. Диаграммы направленности антенн имели ширину  $33^\circ$  в  $E$ -плоскости и  $28^\circ$  в  $H$ -плоскости.

На рис. 1 приведены зависимости модуля коэффициента отражения от высоты снега на частоте 1,4 ГГц при горизонтальной поляризации излучения, полученные 16.03.2013 г. при температуре воздуха  $-3^\circ\text{C}$  и температуре снега  $-5^\circ\text{C}$ . Угол падения составлял  $30^\circ$ , границы облучаемой зоны при этом угле представляют контур размером  $1,2 \times 1,2$  м. Развязка по полю, прямо распространяющемуся от излучающей антенне к приемной, составляла 60 дБ.

Расчетная кривая, полученная из формулы (2) при плотности снега, равной 0,3, также представлена на рис. 1.

Результаты, полученные 31.03.2013г. при температуре воздуха  $-5^\circ\text{C}$  и температуре снега  $-7^\circ\text{C}$  на частотах 1,4 ГГц и 1,8 ГГц при горизонтальной поляризации и угле падения  $40^\circ$ , на рис. 2 представлены. Высота антенн составляла 2,3 м, расстояние между ними 3,86 м. Размеры облучаемой зоны  $1,6\text{ м} \times 1,8\text{ м}$  Развязка по прямому полю составляла 40 дБ и 54 дБ, соответственно.

Из приведенных результатов следует, что наблюдается достаточно существенные вариации уровня отраженного поля от высоты снежного слоя. Так, экспериментальные данные, приведенные на рис. 1, показали наличие колебаний уровня поля до 18 дБ. Ме-

жду тем, расчетная кривая, довольно точно показывая расположение экстремумов, предсказывает колебания уровня до значения 7 дБ. Результаты, приведенные на рис. 2, напротив, показывают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных по значениям отраженного поля в максимумах и минимумах и расходятся между собой в местоположении экстремумов в зависимости от высоты снежного слоя. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдается частичное соответствие между расчетными и экспериментальными результатами. Возможными причинами расхождения между ними могут являться: неровности почвы, влияние остатков травы, зернистость снега, неизбежные неровности поверхности снега при его механическом заглаживании, влияние слоистости снега, поскольку при заглаживании поверхности верхний слой уплотняется. Необходимо также учитывать сферический характер падающей волны и влияние направленности антенн. Для более достоверного понимания механизма отражения от почвы, покрытой снегом, необходимы дальнейшие исследования.

#### Библиографические ссылки

1. Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Springer, 2011.
2. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow / Guneriusen et. al. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. P. 2101–2108.
3. Derksen C. Evaluation of passive microwave brightness temperature simulations and snow water equivalent retrievals through a winter season // Remote Sens. Environment, 2012. Vol. 117. P. 236–248.
4. Mätzler C. Microwave Permittivity of Dry Snow // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34, № 2. P. 573–581.

5. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil. Part I: Empirical Models and Experimental Observations / M. T. Hallikainen et. al. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1985. Vol. 23, № 1. P. 25–34.

6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973.

7. Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н. Отражение микроволн от почвы со снежным и ледяным покровом / Контроль окружающей среды и климата : материалы VIII Всерос. симп. Томск, 2012. С. 34–35.

8. Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Дымбрылов Ж. Б., Чимитдоржиев Т. Н. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 266–267.

#### References

1. Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Springer, 2011. 1300 p.

2. Guneriusson et. al. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, pp. 2101–2108, Oct. 2001.

3. Derksen C. Evaluation of passive microwave brightness temperature simulations and snow water equivalent retrievals through a winter season. Remote Sens. Environment, 2012, vol. 117, pp. 236–248.

4. Mätzler C. Microwave Permittivity of Dry Snow. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1996, vol. 34, no. 2, pp. 573–581.

5. Hallikainen M. T. et. al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part I: Empirical Models and Experimental Observations. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1985, vol. 23, no 1, pp. 25–34.

6. Brekhovskikh L. M. Volny v sloistykh sredakh (Waves in Layered Media). Moscow, Nauka, 1973.

7. Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N. Reflection of microwaves from soil with snow and ice cover. Proceedings of VIII Russian symposium “Control of environment and climate”. Tomsk, 2012. P. 34–35.

8. Dagurov P.N., Dmitriev A. V., Dymbrylov Zh. B., Chimitdorzhiev T. N. Influence of layer structure soil moisture on performance of interferometry synthetic aperture radar. Izvestia vuzov. Phizika. 2012, vol. 55, № 8/2, pp. 266–267.

© Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Татьков Г. И., Чимитдоржиев Т. Н., Базаров А. В., Балтухаев А. В., 2013

УДК 537.86

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛЕСНОМ ПОЛОГЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS

В. Л. Миронов<sup>1,2</sup>, М. И. Михайлов<sup>2</sup>, А. В. Сорокин<sup>1,2</sup>, К. В. Музалевский<sup>1,2</sup>, С. В. Фомин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Институт физики имени академика Л. В. Киренского, Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: fractaloff@mail.ru

*Описан новый метод изучения характеристик лесного полога с использованием сигналов навигационных спутников. Приведены данные экспериментов и их обсуждение по определению величины ослабления радиосигналов L-диапазона в нескольких типах бореальных лесов Сибири.*

*Ключевые слова:* ГНСС, дистанционное зондирование, лесной покров.

### METHOD OF MEASURE OF MICROWAVE RADIATION AT THE FOREST CANOPY USING GLONASS- AND GPS-SIGNALS

V. L. Mironov<sup>1,2</sup>, M. I. Mihaylov<sup>2</sup>, A. V. Sorokin<sup>1,2</sup>, K. V. Muzalevskiy<sup>1,2</sup>, S. V. Fomin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia

<sup>2</sup>Kirensky Institute of physics, Sciences Center of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: fractaloff@mail.ru

*This paper describes a new method for studying the characteristics of the forest canopy using the signals of navigation satellites. Experimental data on measurements of L-band radio-signals lost range in several types of boreal forests of Siberia are presented and discussed.*

*Keywords:* GNSS, remote sensing, forest canopy.