

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., Гатьков 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.

Как известно, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС, первоначально спроектированные для использования в военных целях, в последние полтора десятилетия начали широко использоваться в гражданской и научной областях. Насущная общественная потребность в высокоточном позиционировании привела к мощному развитию индустрии навигационного оборудования, его удешевлению, миниатюризации и повсеместной доступности. Все это в комплексе кардинально изменило методы и возможности навигации, геодезии, геофизики и прочих смежных наук. В то же время имеющаяся возможность постоянно и повсеместно регистрировать радиоизлучение навигационных спутников позволяет развить целый ряд методов дистанционного зондирования Земли и околоземного пространства.

Впервые использовать сигналы ГНСС для альтиметрии океана предложил М. Мартин-Нейра в 1993 г. [1]. Затем аналогичные методики ГНСС-рефлектомерии были развиты несколькими группами в США и Европе для определения состояния водной поверхности, влажности почвы, толщины снежного покрова и т. п. [2–4].

В то же время работы, связанные с использованием сигналов GPS и ГЛОНАСС для зондирования лесных покровов практически отсутствуют, что, по-видимому, объясняется сложностью объекта исследования. В лаборатории дистанционного зондирования Института физики им. Киренского СО РАН предложено использовать сигналы ГНСС для изучения лесных покровов. Преимуществами данного метода исследования является сравнительная простота регистрирующей аппаратуры, ее мобильность и автономность, а также воз-

можность зондирования лесного покрова одновременно по всем направлениям от приемника излучения.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Радиоизлучение спутника ГНСС проходит через лесной полог средней высоты  $H_f$  и принимается антенной, расположенной на высоте  $h_a$ , сигнал которой принимается автономным регистрирующим комплексом (АРК).

Антенный модуль обеспечивает прием сигналов с правой круговой поляризацией в верхней полусфере, начиная от угла места  $10^\circ$ , и имеет в своем составе малошумящий усилитель с коэффициентом усиления 30 дБ. АРК состоит из комплекта, в который входит шестнадцатиканальный приемный модуль МРК-32, ноутбук и система автономного электропитания. Записи сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) в бинарном формате преобразуются в csv-формат и затем обрабатываются в камеральном режиме в программных средах MS Excel и OriginPro.

Были проведены три сеанса измерений сигналов НКА под пологом разновозрастного леса в окрестностях стационара «Погорелка» (Красноярский край) на трех площадках: 1 – лиственничный, посадки; 2 – сосновый, посадки и 3 – сосновый, природный. Одновременно производились замеры и оценки геометрических и массовых характеристик древостоя, результаты которых представлены в табл. 1. Кроме этого, были проведен сеанс измерений на безлесной территории (в качестве калибровочного).

Типичный вид зависимости логарифма амплитуды сигнала всех опознанных НКА от величины, обратно пропорциональной синусу угла места показан на рис. 2.

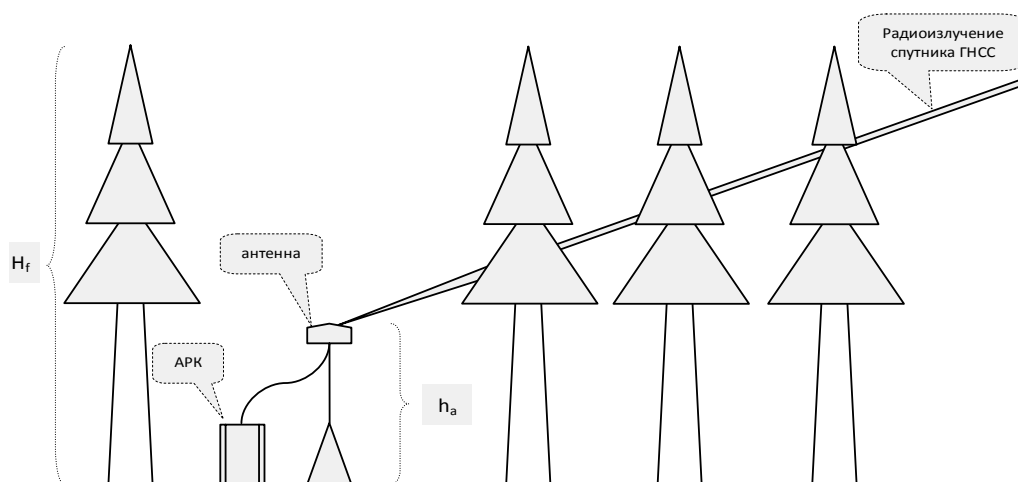


Рис. 1. Схема эксперимента

Таблица 1

**Биометрические параметры древостоя**

Площадка, №	Средние значения геометрических и массовых характеристик леса					
	Высота, м	Диаметр, м	Плотность, шт/м	Расстояние между деревьями, м	Удельная плотность древесины в слое древостоя	
					Объемная, м <sup>3</sup> (др)/м <sup>3</sup>	Массовая, кг <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
1 – Лиственница	13,4	0,067	0,377	1,6	0,00177	0,001 06
2 – Сосна	16,3	0,117	0,181	2,3	0,002 58	0,001 29
3 – Сосна природная	19,1	0,181	0,067	3,9	0,002 30	0,001 15

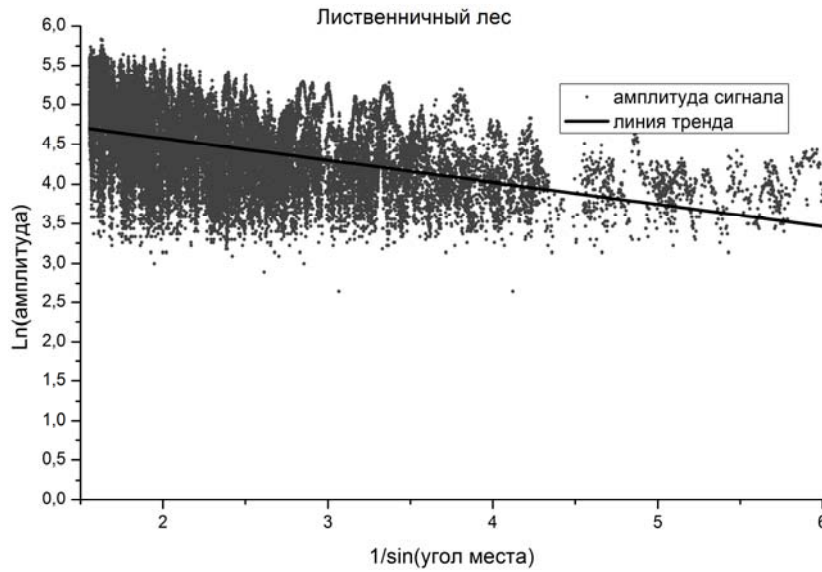


Рис. 2. Амплитуды сигналов НКА по всем азимутам

Таблица 2

Значения ослабления сигнала НКА различных типов лесного полога

Тип лесного полога	Высота полога над антенной ( $H_f - h_a$ ), м	Мнимая часть ПП $k \cdot 10^4$	Затухание, дБ/м	Средний радиус стволов, м <sup>2</sup>	Плотность древостоя, шт/м <sup>2</sup>	Объемная плотность древесины м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> · 10 <sup>3</sup>
Лиственница	9,4	4,39	0,291	0,067	0,377	1,77
Сосна (посадки)	12,3	1,96	0,131	0,117	0,181	2,58
Сосна (природный)	15,2	1,90	0,127	0,181	0,067	2,30

Для обработки полученных результатов и оценки ослабления сигнала в лесном пологе были сделаны следующие предположения: 1) слой, ослабляющий радиоизлучение, принимается однородным и имеющим определенное линейное ослабление; 2) произведение величины сигналов НКА над лесным пологом на значение диаграммы направленности приемной антенны в диапазоне углов места 10°–40° аппроксимируется величиной, пропорциональной 1/sin φ. В соответствии с этим, принятое значение величины сигнала можно найти по формуле

$$E(\varphi) = A \cdot F \cdot \exp(-\alpha_0 / \sin \varphi - 2\pi k(H_f - h_a) / (\lambda \cdot \sin \varphi)),$$

где  $A$  – величина сигнала над лесным пологом;  $F$  – нормированное значение диаграммы направленности приемной антенны при угле места  $\varphi$ ;  $H_f$  – высота лесного полога;  $h_a$  – высота приемной антенны;  $\lambda$  – длина радиоволны;  $k$  – мнимая часть показателя преломления;  $\alpha_0$  – величина, определяющая ослабление сигнала при уменьшении угла места над безлесной территорией.

В соответствии с формулой (1), логарифм величины сигнала линейно зависит от значения 1/sin φ. Параметры линии тренда определяются по методу наименьших квадратов, соответственно, можно определить ослабление сигналов НКА всеми типами лесных пологот. Результаты оценок приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, значения затухания под лесным пологом в общем соответствуют значениям, полученным ранее в этих типах лесных массивов другими методами [5; 6]. В молодом и старом сосновых лесах

величина ослабления коррелирует с объемной плотностью древесины притом, что диаметры стволов, плотности древостоя и высоты лесного полога существенно различаются. Различия в ослаблении под пологими соснового и лиственного леса, могут объясняться различием в пространственной структуре древостоя и кроны, различиями в плотности и влажности древесины сосны и лиственницы, а также наличием значительного рассеяния компонентами древостоя, имеющими размеры, близкие к длине волны падающего излучения.

В данной работе продемонстрирован новый метод изучения характеристик лесного полога с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и стандартных приемников навигационных сигналов. Полученные значения ослабления радиоволн L-диапазона лесными пологими разных типов в общем, соответствуют известным данным. Такое, можно сказать, нестандартное использование сигналов ГНСС в сочетании с различными типами приемных антенн, в различных сезонных условиях может представить собой новое перспективное направление в области дистанционного зондирования земных покровов.

#### Библиографические ссылки

1. M. Martin-Niera A passive reflectometry and interferometry system (PARIS); Application to ocean altimetry // ESA J. 1993. Vol. 17. P. 331–355.
2. A Physical Model for GPS Multipath Caused by Land Reflections: Toward Bare Soil Moisture Retrievals / V. Zavorotny et al. IEEE Journal of Selected Topics

in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2010. Vol. 3, Iss. 1. Part 2. P. 100–110.

3. Can we measure snow depth with GPS receivers? / K. Larson et al. // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36, Iss. 17. GL039430.

4. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field / N. Rodriguez-Alvarez et al. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 2009. Vol. 47, № 11. P. 3616–3624.

5. Чухланцев А. А., Шутко А. М., Головачев С. П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 11. С. 1285–1311.

6. Доржиев Б. Ч. Очиров О. Н. Определение эффективной проводимости леса в УКВ диапазоне // Известия вузов. Физика. 2010. № 11. С. 3–8.

## References

1. M. Martín-Niera – ESA J., 1993, Vol. 17, pp. 331–355.
2. Zavorotny V. et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, vol. 3, no. 4, part 2, pp. 100–110.
3. Larson K. et al. Geophysical Research Letters, 2009, vol. 36, L17502, doi:10.1029/2009 GL039430.
4. Rodriguez-Alvarez N. et al. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2009, vol. 47, no. 11, pp. 3616–3624.
5. Chukhlansev A. A., Ghutko A. M., Golovachev S. P. Radiotekhnika I Elektronika. 2003, vol. 48, no. 11, pp. 1285–1311.
6. Dorzhev B. Ch., Ochirov O. N. Izvestiya vuzov. Fizika. 2010, no. 11, pp. 3–8.

© Миронов В. Л., Михайлов М. И., Сорокин А. В., Музалевский К. В., Фомин С. В., 2013

УДК 621.396.96.01

## ШИРОКОПОЛОСНОЕ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ\*

А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: vay@ipms.bscnet.ru

*Описываются результаты экспериментов по радиопросвечиванию лесной растительности широкополосными импульсными сигналами. Отмечаются существенные отличия в изменениях спектров сигналов при взаимодействии с разными типами лесов.*

*Ключевые слова: широкополосное радиопросвечивание, импульсные сигналы, спектр, лесная растительность.*

## WIDEBAND RADIO SOUNDING OF VEGETATION COVERS OF THE EARTH SURFACE

A. Yu. Vetluzhsky, V. P. Kalashnikov

Institute of Physical Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: vay@ipms.bscnet.ru

*The article describes the results of experiments on radio sounding of forest vegetation with wideband pulse signals. The authors give notice to significant differences in changes of spectra of signals at interaction with different types of forests.*

*Keywords: wideband radio sounding, pulse signals, spectra, forest vegetation.*

В настоящее время методы радиопросвечивания широко используются при изучении физических свойств различных природных сред. Это относится к исследованиям атмосферы Земли и других планет, а также околосолнечной плазмы [1], к различным методам георазведки [2] и к определению электродинамических характеристик земных покровов, например, ледовых [3] или растительных [4]. Радиопросвечивание является весьма эффективным инструментом опреде-

ления химического состава среды распространения зондирующих сигналов, а также ее внутренней структуры, особенно при наличии резких границ, характерных для слоистых и многокомпонентных гетерогенных сред.

В данной работе рассматриваются результаты экспериментов по наземному радиопросвечиванию лесной растительности широкополосным излучением. Основной задачей, решаемой при проведении экспе-

\*Работа поддержана грантом РФФИ №12-02-98010.