

Материалы

Международной научной конференции

**«Зондирование земных покровов
радарными и радиометрами
с синтезированной апертурой»**

*24 – 29 июня 2013 года
г. Улан-Удэ – п. Энхалук*



РАЗДЕЛ
1

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ
ПОЛЯРИМЕТРИЯ
И ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ.
РАДИОМЕТРИЯ ЗЕМНЫХ
ПОКРОВОВ

УДК 528.71

**МЕРОПРИЯТИЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА РОССИИ
ПО СОЗДАНИЮ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ
И ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

В. А. Заичко¹, В. А. Селин²

¹Федеральное космическое агентство России
Россия, 107996, Москва, ул. Щепкина, 42. E-mail: opoi@roscosmos.ru

²ОАО «Российские космические системы»
Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53. E-mail: selin@spacecorp.ru

Сообщается о фактическом состоянии и перспективах развития российской орбитальной группировки средств радиолокационного наблюдения, наземного сегмента, а также комплексных технологий обработки данных ДЗЗ.

Ключевые слова: Роскосмос, космические средства радиолокационного наблюдения, РСА, БРЛК, АФАР, ЕТРИС ДЗЗ, Банк базовых продуктов.

**RUSSIAN FEDERAL SPACE AGENCY ACTIVITIES FOR THE CREATION
OF THE SPACE RADAR OBSERVATION FACILITIES AND INTEGRATED
DATA PROCESSING TECHNOLOGIES**

V. A. Zaichko¹, V. A. Selin²

¹Russian Federal Space Agency
42 Shchepkina st., Moscow, 107996, Russia. E-mail: opoi@roscosmos.ru

²JSC “Russian Space Systems”
53 Aviamotornaya st., Moscow, 111250, Russia. E-mail: selin@spacecorp.ru

The actual state and perspectives of the Russian space radar constellation, its ground segment facilities and remote sensing data integrated processing technologies are presented.

Keywords: ROSCOSMOS, radar satellites, SAR, radar complex equipment, active phased-array antenna, General Geographically Distributed Information System of Remote Sensing, databanks and data distribution technologies.

В соответствии с действующей Концепцией развития космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в России на период до 2025 г. запланировано создание и ввод в эксплуатацию ряда космических аппаратов (КА), оснащенных бортовыми радиолокационными комплексами (БРЛК) низкого и высокого разрешения, в целях решения задач гидрометеорологического, природно-ресурсного и картографического назначения.

Реализация основных мероприятий по созданию систем ДЗЗ осуществляется в рамках Федеральной космической программы России. Ожидается, что к 2020 г. орбитальная группировка ДЗЗ будет состоять из 33 спутников, 10 из которых будут оснащены БРЛК.

В 2009 г. запущен КА «Метеор-М» № 1, оснащенный БРЛК «Северянин-М», из состава космического комплекса гидрометеорологического и океанографического назначения «Метеор-3М». В 2013 г. планируется к запуску КА «Метеор-М» № 2, а в 2014 и 2015 гг. – «Метеор-М» № 2.1 и № 2.2, соответственно. В перспективе в состав космического комплекса войдет еще один КА – «Метеор-М» № 3, который создается

на новой платформе с БРЛК на основе активной фазированной антенной решетки (АФАР) X-диапазона частот. Приборами этого типа в настоящее время оснащена большая часть мировых спутников радиолокационного наблюдения.

В 2013 г. с космодрома Байконур будет выведен на орбиту КА «Кондор-Э», разработанный в НПО машиностроения (Реутов, Московская область). Спутник оснащен гибридной зеркальной антенной S-диапазона частот. В настоящее время КА, работающий в том же частотном диапазоне, есть только у Китая. При этом стоит отметить, что антенный комплекс для этого аппарата создавался с участием ряда российских предприятий.

Задачи по информационному обеспечению производственной деятельности – контроль судоходства и загрязнений морей, мониторинг районов крупномасштабного строительства, шельфовых зон и зон разработки полезных ископаемых, контроль состояния нефтепроводов, транспортных систем и других инженерных объектов, получение информации о рельефе местности, обеспечение безопасной навигации

по Северному морскому пути – на сегодняшний день можно успешно решать только с использованием данных радиолокационной съемки.

Создаваемая на принципах государственно-частного партнерства между Роскосмосом и ОАО «Газпром космические системы» космическая система «Арктика-Р» включает два радиолокационных спутника и обеспечит реализацию комплексного подхода при решении задач предоставления пользователям информационных продуктов, получаемых на основе синтеза радиолокационной информации с КА «Арктика-Р» и данных оптического диапазона съемки с действующих КА ДЗЗ.

В рамках Федеральной космической программы России ведется также создание космического комплекса (КК) оперативного радиолокационного наблюдения «Обзор-Р» (Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»). КК «Обзор-Р» предназначен для проведения съемки в X-диапазоне частот, обеспечивающем наилучшие показатели по разрешающей способности (до 1 м). БРЛК на основе АФАР позволит получить широкие возможности по режимам съемки и полосе захвата (до 750 км). Также будет реализована возможность проведения поляриметрической и интерферометрической съемки. Запуск первого КА «Обзор-Р» запланирован на 2015 г., второго – на 2018 г.

Гармоничное с орбитальной группировкой развитие наземной инфраструктуры в сочетании с минимизацией времени поставки данных потребителям обеспечивается созданием Роскосмосом Единой территориально-распределенной информационной системы (ЕТРИС ДЗЗ). Это позволит интегрировать в единую сеть имеющиеся ведомственные пункты приема информации с переносом основной нагрузки по приему и обработке космических данных на максимально разнесенные по территории страны крупные межведомственные центры, объединенные современными каналами передачи информации.

Создание и ввод в штатную эксплуатацию собственных центров приема, обработки и накопления космических данных потребителями требует значительных финансовых и временных затрат, что снижает экономическую эффективность разрабатываемых информационных систем – ведомственных и региональных. Целесообразно использовать возможности уже имеющихся специализированных центров Оператора космических систем ДЗЗ (Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы»). В настоящее время создается новый геоинформационный сервис по получению продуктов предварительной интерпретации данных наблюдения Земли, в том числе

радиолокационных, в интересах решения задач межведомственного уровня – Банк базовых продуктов ДЗЗ. Продукты этого вида занимают промежуточное место в цепочке между данными стандартных уровней обработки («1В», по классификации CEOS) и комплексными тематическими продуктами высокоуровневой обработки, осуществляемой экспертами предметной области.

Основными тематическими направлениями использования базовых продуктов являются: растительный покров, лесное хозяйство, морская среда, чрезвычайные ситуации, экология.

С помощью геоинформационных сервисов Роскосмоса все заинтересованные пользователи могут получить простой и быстрый доступ ко всему перечню информационных продуктов с использованием средств Интернета. При этом требования к получаемым продуктам и средствам доступа к ним регламентируются основными государственными потребителями – федеральными и региональными органами исполнительной власти.

Таким образом, запуск запланированных только до 2015 г. российских КА радиолокационного наблюдения восполнит существующий пробел в этом сегменте ДЗЗ. Уникальная возможность осуществления съемки одной и той же территории во многих частотных диапазонах с различным геометрическим разрешением, использованием технологий интегральной обработки и комплексирование радиолокационной и других видов информации, получаемой российскими и зарубежными космическими системами, даст возможность создания качественно новых продуктов ДЗЗ, значительно расширит перечень решаемых задач, а также будет способствовать повышению спроса на продукты спутникового мониторинга.

Создание ЕТРИС ДЗЗ позволит реализовать более эффективное использование возможностей отечественной орбитальной группировки за счет координации взаимодействия между центрами ДЗЗ различной ведомственной принадлежности.

Накопленный предприятиями Роскосмоса опыт в области разработки комплексных технологий обработки космической информации и создание геосервисов Роскосмоса обеспечит доступ к отечественным информационным продуктам ДЗЗ всем заинтересованным пользователям, при этом государственным пользователям – на безвозмездной основе.

Успешное выполнение всех мероприятий Федерального космического агентства России будет способствовать развитию и использованию отечественной информации радиолокационного наблюдения из космоса в интересах решения социально-экономических и научных задач.

© Заичко В. А., Селин В. А., 2013

УДК 528.8

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ НА ОСНОВЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В L-ДИАПАЗОНЕ

К. В. Музалевский^{1,2}, В. Л. Миронов^{1,2}, А. А. Швалева²

¹Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50/38

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

Изучается возможность дистанционного измерения температуры поверхностной части деятельного слоя замерзшей почвы на Северном склоне Аляски с использованием данных микроволнового радиометра космического аппарата SMOS на частоте 1,4 ГГц. Показано, что измеренная температура почвы с погрешностью 2,4 °С совпадает со средней температурой почвы в слое толщиной 0,27 м.

Ключевые слова: SMOS, микроволновый радиометр, почва арктической тундры, деятельный слой, температура почвы.

THE ACTIVE LAYER OF THE ARCTIC TUNDRA SOILS TEMPERATURE SOUNDING ON THE BASIS OF L-BAND RADIOMETRIC OBSERVATIONS

K. V. Muzalevskiy^{1,2}, V. L. Mironov^{1,2}, A. A. Shvaleva²

¹Institute of Physics named after L. V. Kirenskiy of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38 Akademgorodok st., Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia.
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

Possibility of remote sounding of temperature in the frozen active layer on the North Slope of Alaska was investigated with the use of SK SMOS microwave radiometer on a frequency of 1,4 GHz. It is shown that the soil temperature, sounded with the SMOS, with an error of 2,4 °C coincides with the average temperature of the soil in a layer of 0,27 m.

Keywords: Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), microwave radiometry, Arctic tundra soil, active layer, soil temperature.

Наиболее значительные результаты в области дистанционного зондирования температуры почвы арктической тундры, с использованием микроволнового радиометра AMSR-E, обсуждены в работе [1]. Для восстановления температуры почвы использовалась эмпирическая линейная связь между излучательной способностью на Н- и V-поляризациях, при этом яркостная температура измерялась радиометром AMSR-E в диапазоне частот от 6,9 ГГц до 89,0 ГГц при фиксированном угле наблюдения 55°. Данный подход позволил измерить эффективную температуру почвы с погрешностью 3,9 и 10,5 °С для талой и мерзлой почвы, соответственно [1]. В отличие от радиометра AMSR-E, радиометр космического аппарата (КА) SMOS позволяет измерять радиояркостную температуру на Н- и V-поляризациях в диапазоне углов 0° до 60° на частоте 1,4 ГГц [2]. Ожидается, что радиояркостная температура, измеренная радиометром SMOS в более широком диапазоне углов, позволит уменьшить погрешность восстановления температуры мерзлой почвы по сравнению с достигнутой на данный момент

погрешностью. Кроме того, данные SMOS до настоящей работы не были использованы для измерения температуры почвы арктической тундры.

В качестве тестового участка была выбрана территория Северного склона Аляски в районе расположения биосферной метеостанции оз. Туулик (68° 37' 22,9" с. ш., 149° 36' 35,4" з. д.). По данному участку доступны усредненные за сутки значения температуры и влажности деятельного слоя почвенного покрова в слое толщиной 0,98 м [3], а так же данные диэлектрической проницаемости верхнего горизонта почвы в широком диапазоне весовой влажности от 0,0 г/г до 0,98 г/г и температуры от -30 до +25 °С [4]. Данные радиояркостной температуры КА SMOS были получены для пиксела, содержащего координату метеостанции, каждый 1-й, 10-й и 20-й день месяца за период с 18.06.2010 по 01.06.2011 гг. (в период с 26.12.2010 по 08.02.2011 гг. доступных данных не оказалось). Территория тестового участка представляет собой кочкарниково-тундру с бедной растительностью и слабым снежным покровом.

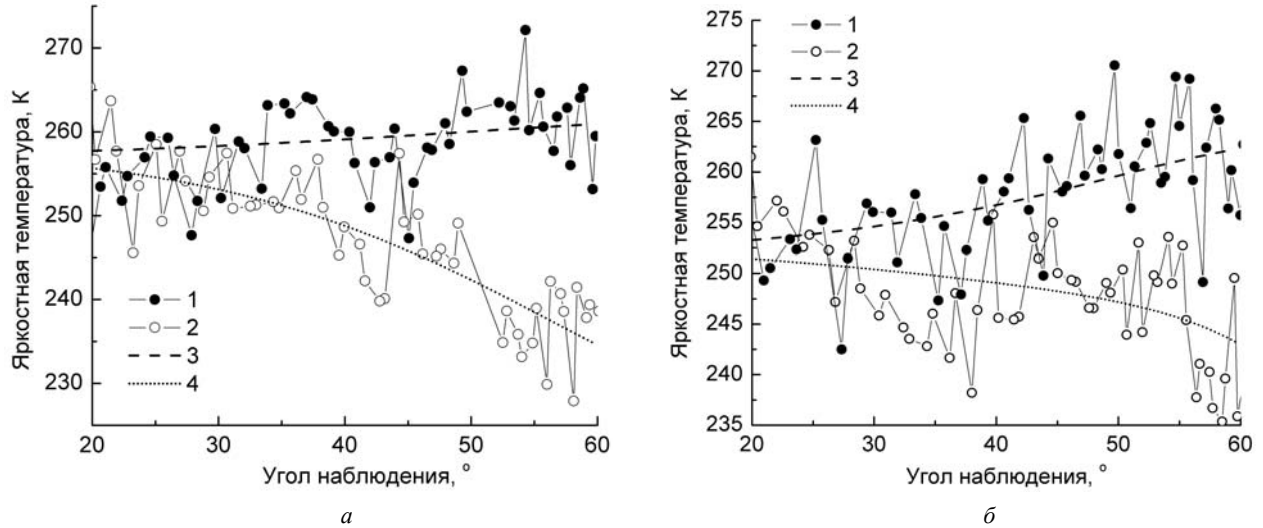


Рис. 1. Угловая зависимость радиояркостной температуры, измеренная SMOS (1), (2) и восстановленная (3), (4) в ходе решения обратной задачи, на вертикальной (1), (3) и горизонтальной (2), (4) поляризациях: а) 20.12.2010, $P_r = (2,34; 1,63; -0,66; 0,59; 0,63; 0,92; -9,49)$; б) 26.12.2010, $P_r = (1,10; 1,99; -1,99; 0,71; 0,34; 0,44; -10,07)$

Модель микроволнового излучения почвы. В качестве первого шага в данном исследовании эффектами объемного рассеяния и затухания волн, связанными со снежным и растительным покровом, пренебрегалось. Яркостная температура на горизонтальной $T_{B,H}^{th}(\theta)$ и вертикальной $T_{B,V}^{th}(\theta)$ поляризациях, в случае, когда почва непокрыта снежным покровом и растительностью, может быть рассчитана на основе полумпирической L-MEB модели [2] по следующим формулам:

$$T_{B,p}^{th}(\theta) = \eta_p(\theta) \cdot T_s, \quad (1)$$

$$\eta_p(\theta) = \{1 - [1 - Q] \Gamma_p \times \\ \times (\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q}) + \\ + Q \Gamma_q(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q})\} \quad (2)$$

$$\Gamma_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q}) = \\ = |R_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f))|^2 \times \\ \times \exp(-H_r \cos^{N_{p,q}} \theta), \quad (3)$$

где θ – угол наблюдения; p – H или V поляризации; q – V или H поляризации; Q – межполяризационный фактор (изменяется от 0 до 1); $\eta_p(\theta)$ – излучательная способность почвы; $\Gamma_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f), H_r, N_{p,q})$ – отражательная способность; $\varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость почвы; T_s – температура почвы, m_v – объемная влажность почвы, $\text{см}^3/\text{см}^3$; ρ_d – плотность сухого сложения почвы, $\text{г}/\text{см}^3$; f – частота электромагнитного поля; $R_{p,q}(\theta, \varepsilon_s(T_s, m_v, \rho_d, f))$ – коэффициент отражения Френеля; H_r – фактор шероховатости поверхности почвы; $N_{p,q}$ – степень влияния фактора шероховатости поверхности почвы от угла наблюдения. Комплексная

диэлектрическая проницаемость почвы рассчитывалась на основе обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси для органической почвы, образец которой был взят в районе биосферной станции оз. Туулик и содержал по весу 87 % органического вещества, 8 % кварца и 5 % кальцита (модель была создана на основе измерений образцов почвы, находящихся в процессе замерзания).

Метод измерения температуры почвы по данным радиометра SMOS. Метод основан на решении обратной задачи – восстановления параметров модели L-MEB: $P_r = (H_r, N_H, N_V, Q, m_v, \rho_d, T_s)$ при минимизации функционала следующего вида:

$$F = \sum_{i=1}^N \left| T_s - \frac{T_{B,H}^m(\theta_i)}{\eta_H(\theta_i)} \right|^2 + \left| T_s - \frac{T_{B,V}^m(\theta_i)}{\eta_V(\theta_i)} \right|^2, \quad (4)$$

где $T_{B,H}^m(\theta_i)$, $T_{B,V}^m(\theta_i)$ – яркостная температура на горизонтальной и вертикальной поляризациях, измеренные КА SMOS при угле наблюдения θ_i ; N – общее число углов наблюдения. Задача минимизации функционала (4) решалась на основе алгоритма Левенберга–Марквардта [5]. Измеренные и восстановленные угловые зависимости радиояркостной температуры для двух дней наблюдения (20 и 26 декабря 2010 г.) приведены на рис. 1.

Аналогично была решена обратная задача для 16 дней в период с 10 октября 2010 г. по 10 мая 2011 г., средние значения восстановленных параметров (P_r) модели L-MEB за данный период оказались равны: $H_r = 2,51 \pm 0,59$, $N_H = 1,22 \pm 0,64$, $N_V = -1,22 \pm 0,99$, $Q = 0,53 \pm 0,24$, $m_v = 0,60 \pm 0,20 \text{ см}^3/\text{см}^3$, $\rho_d = 0,83 \pm 0,34 \text{ г}/\text{см}^3$, $T_s = -10,17 \pm 2,03 \text{ °C}$. Отметим, что восстановленное среднее значение влажности почвы из анализа данных SMOS, близко к средней объемной влажности почвы $0,48 \text{ см}^3/\text{см}^3$, измеренной [3] в районе оз. Туулик метеостанцией, до замерзания почвы. Временной ход

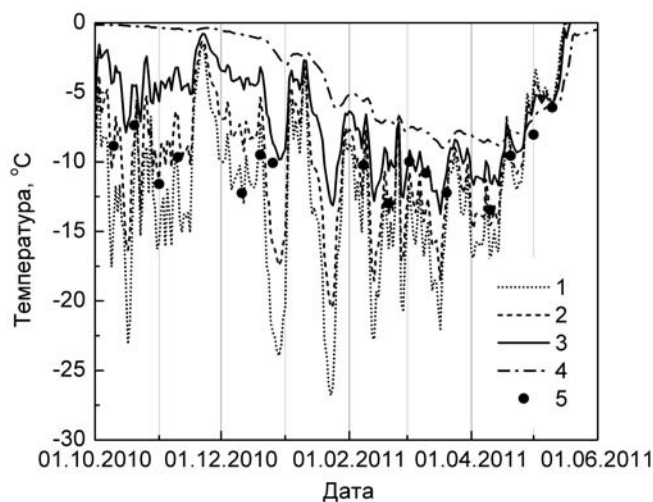


Рис. 2. Временные ряды температуры почвы:
1) измеренные метеостанцией на глубине 8,7 см; 2) 16,0 см;
3) 23,6 см; 4) 46,3 см; 5) восстановленные по данным SMOS

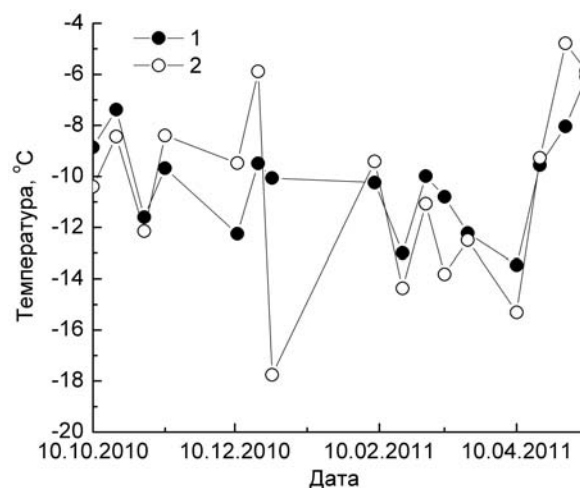


Рис. 3. Временной ход температуры почвы, восстановленной по данным SMOS (1) и средней температуры слоя толщиной 0,27 м по данным метеостанции (2). Среднеквадратичное отклонение 2,4 °С, коэффициент Пирсона 0,67

восстановленных значений температуры почвы T_s и измеренных метеостанцией температуры почвы на различных глубинах изображен на рис. 2. На основе измеренных метеостанцией профилей температуры были найдены толщины слоев, средняя температура в которых равна соответствующим значениям восстановленной температуры почвы T_s по данным SMOS. Средняя толщина излучающего слоя оказалась равной $0,27 \pm 0,17$ м. Временной ход средней температуры слоя толщиной 0,27 м по данным метеостанции и восстановленные значения температуры почвы по данным SMOS представлены на рис. 3. В результате корреляционного анализа установлено, что значения температуры измеренные по данным SMOS со среднеквадратичным отклонением 2,4 °С совпадают со средней температурой слоя почвы толщиной 0,27 м, измеренной метеостанцией в районе оз. Туулик.

В результате проведенного исследования было показано следующее.

Полуэмпирическая модель L-MEB [2] с использованием диэлектрической модели органической почвы [4] хорошо описывает угловые зависимости радиояркостной температуры, измеренные радиометром KA SMOS над территорией Северного склона Аляски со слабым растительным и снежным покровом.

Использование диэлектрической модели [4] арктической тундровой почвы позволяет восстанавливать не только температуру поверхностного слоя почвенного покрова, но и проводить оценки объемного содержания влаги и плотности верхнего горизонта почвы.

Для практического использования данного алгоритма необходима его дополнительная валидация над другими территориями арктической тундры.

Дальнейшая модификация данного алгоритма будет применена для восстановления профиля температуры поверхностного слоя почвы арктической тундры.

Библиографические ссылки

1. Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E / L. A. Jones, J. S. Kimball, K. C. McDonald et al. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. P. 2004–2018.
2. Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB / J. Wigneron, A. Chanzy, Y. H. Kerr et al. // Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions on. 2011. Vol. 49. P. 1177–1189.
3. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture [Electronic resource] // Toolik Soil Climate Station. URL: <http://soils.usda.gov/survey/smst/alaska/Toolik/>.
4. Mironov V. L., De Roo R. D., Savin I. V. Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 2010. Vol. 48. P. 2544–2556.
5. Golub G. H., Van Loan C. F. Matrix Computations. 3rd ed. Baltimore : Johns Hopkins University Press, 1996.

References

1. Jones L. A., Kimball J. S., McDonald K. C., Chan S. T. K., Njoku E. G., Oechel W. C. Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, 2007, pp. 2004–2018.
2. Wigneron J., Chanzy A., Kerr Y. H., Lawrence H., Jiancheng Shi, Escorihuela M. J., Mironov V., Mialon A., Demontoux F., de Rosnay P., Saleh-Contell K. Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in

L-MEB. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, Vol. 49, 2011, pp. 1177–1189.

3. Natural Resources Conservation Service. U. S. Department of Agriculture. (2013). [Online]. Toolik Soil Climate Station. Available: <http://soils.usda.gov/survey/smst/alaska/Toolik/>.

4. Mironov V. L., De Roo R. D., Savin I. V. Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, Vol. 48, 2010, pp. 2544–2556.

5. Golub G. H., Van Loan C. F. Matrix Computations. Johns Hopkins University Press 3rd edition, 1996.

© Музалевский К. В., Миронов В. Л., Швалева А. А., 2013

УДК 504.064.3 + 528.88

ОЦЕНКА ВЛАГОЗАПАСА СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОМЕТРИИ ДЛЯ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ*

К. Ю. Березин, А. В. Дмитриев, В. В. Дмитриев

Омский государственный педагогический университет
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: vdmitriev@omgpu.omsk.edu

Приведены результаты валидации алгоритмов восстановления влагозапаса снежного покрова для степных районов Западной Сибири. Источником исходных данных служили СВЧ радиометры AMSU-A и AMSR-E, установленные на спутниковых платформах NOAA и Aqua. Показано, что для двухчастотных алгоритмов, коэффициент корреляции между реальными и восстановленными значениями влагозапаса меняется от 0,06 до 0,5 при среднем значении 0,3. Статистическая значимость полученных оценок невелика и соответствует случаю сильного пространственного усреднения (около 50 км в пикселе), что также снижает репрезентативность результатов. Показано, что практически применимая точность (лучше 40 %) достигается при значительном усреднении – более 40 точек. Это соответствует временному усреднению до уровня среднемесячных показателей или пространственному усреднению по элементу площадью 280×280 км².

Ключевые слова: снежный покров, дистанционное зондирование, спутниковые данные.

ESTIMATION OF SNOW WATER EQUIVALENT BY USE OF SATELLITE RADIOMETRY FOR THE STEPPE ZONE OF WESTERN SIBERIA

K. Ju. Berezin, A. V. Dmitriev, V. V. Dmitriev

Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevsky st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: vdmitriev@omgpu.omsk.edu

In the work the authors present the results of validation of algorithms of restoration of snow water equivalent for steppe regions of Western Siberia. Microwave data from AMSU-A and AMSR-E radiometers installed on the satellite NOAA and Aqua platforms were a source of basic data. It is shown that for two-frequency algorithms, the correlation coefficient between the real and restored values of moisture content changes from 0,06 to 0,5 at average value 0,3. The statistical importance of the received estimates is insignificant and corresponds to a case of strong spatial averaging (about 50 km in pixel) that also reduces a value of results. It is shown that almost applicable accuracy (it is better 40 %) is reached at considerable averaging – more than 40 points. It corresponds to temporary averaging to level of average monthly indicators or to spatial averaging on an element of 280×280 sq. km.

Keywords: snow cover, remote sensing, satellite data.

Снежный покров является естественным природным образованием и оказывает существенное воздействие на климат, условия жизни и хозяйственную деятельность человека. Поэтому задача построения системы мониторинга снежного покрова по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является

актуальной и практически значимой. Данная работа посвящена исследованию методов восстановления влагозапаса снежного покрова. Влагозапас или водный эквивалент снега (SWE), представляет собой толщину слоя воды, образующейся в результате растапливания снега.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-05-98082-р_сибирь_a.

На сегодняшний день известны несколько алгоритмов оценки влагозапаса снежного покрова. К сожалению, радиометр AMSR-E на спутниковой платформе Aqua вышел из строя, и алгоритмы, использующие эти данные, имеют только ретроспективный интерес. В данной работе анализ по 2009 г. проводился с использованием данных AMSU-A и AMSR-E, аналогичное исследование по 2012 г. проводилось и использованием данных AMSU-A.

Основное внимание обращено на использовании данных AMSU. Формулы для расчета SWE по данным AMSU существуют в трех вариантах. Первый вариант, далее SWE1, для слежавшегося снега, с развитым метаморфизмом, возраст снега более двух недель [1]:

$$\text{SWE1} = 0,60 \cdot (\text{TB23} - \text{TB31}) + 1,71.$$

Второй вариант, далее SWE2, для свежего не метаморфизированного снега, возрастом несколько суток [1]:

$$\text{SWE2} = 0,08 \cdot (\text{TB31} - \text{TB89}) + 1,15.$$

Третий вариант, далее SWE3, для свежеснежавшегося снега, возрастом несколько часов [1]:

$$\text{SWE3} = 2,6 + 0,39 \cdot (\text{TB23} - \text{TB31}),$$

где TB23, TB31 и TB89 – радиояркие температуры на частотах 23, 31 и 89 ГГц соответственно.

На рис. 1. приведен пример использовавшихся кадров AMSU. Аналогичные кадры были получены на все исследуемые даты и частоты [2]. Область исследования – степные (южные) районы Омской области. Омская область на данном рисунке расположена внизу по центру по координатам 54÷58N (с. ш.) 70÷77E (в. д.). Можно заметить, что при разрешении радиометра AMSU на местности 45 км в одном пикселе Омская область в широтном направлении уместится в 6–8 точек на снимке. Пространственное разрешение радиометра AMSR-E имеет аналогичную величину. Так как в конце февраля в области исследования снег лежит повсеместно, выделение заснеженных участков не потребовалось.

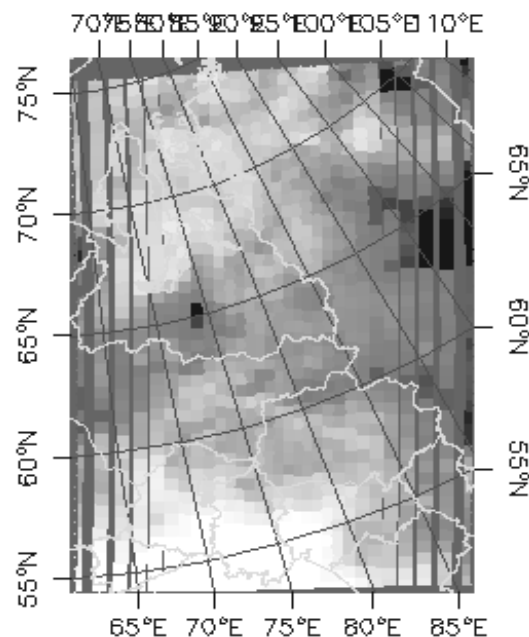


Рис. 1. Геопривязанный кадр AMSU на 29.02.2012 г., частота 23 ГГц, с наложенными границами субъектов РФ

В качестве источника наземных данных использовались результаты собственных измерений временной и пространственной динамики влажности и влагозапаса снежного покрова в окрестностях г. Омска в период снеготаяния, а также агрометеосводки [3–6] за февраль и март 2009 и 2012 гг.

В ходе исследования брались известные точки наземных данных и сравнивались с соответствующими значениями, рассчитанными по формулам для SWE на основании спутниковых данных. В графическом виде соответствие между SWE, определенными наземными методами и восстановленными по спутниковым данным, представлено на рис. 2–3. Для уменьшения объема приведены только самые характерные результаты.

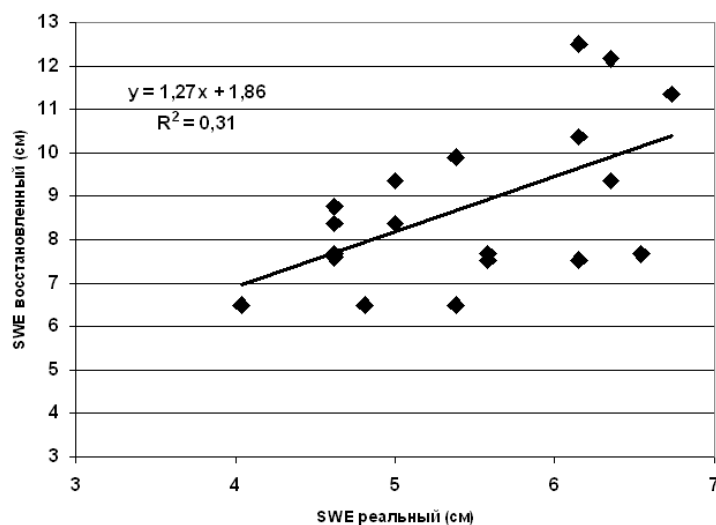


Рис. 2. Данные на 28 февраля 2009 г.

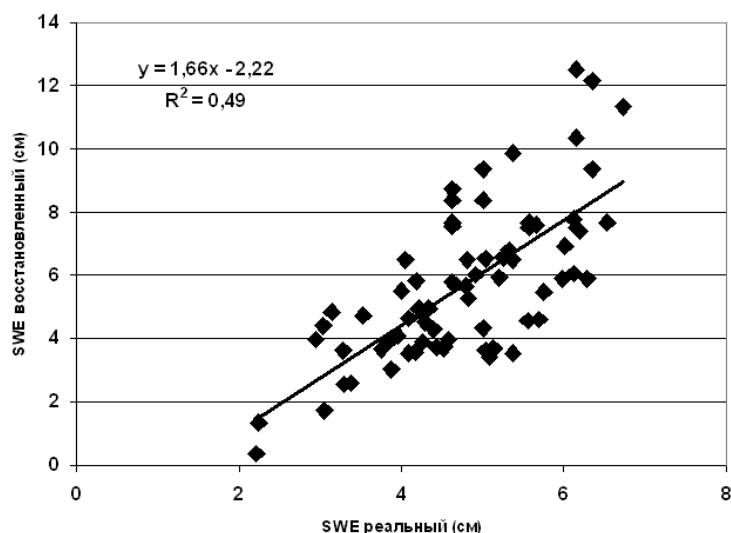


Рис. 3. Данные за февраль 2009 г.

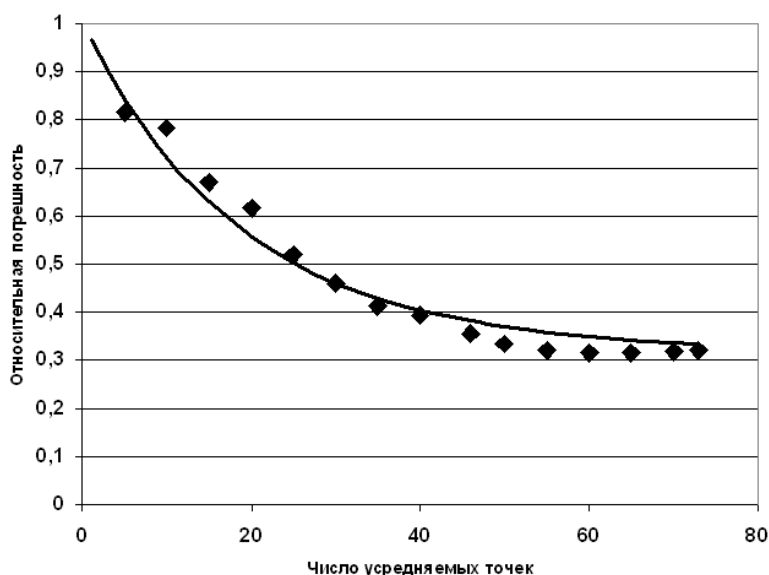


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности от числа усредняемых точек

Вычисления, пример которых приведен на рис. 2, проводились с использованием алгоритмов SWE2 и SWE3. Все остальные алгоритмы показали коэффициент корреляции менее 0,2. В ряде случаев (SWE1) зависимость носила обратный характер, т. е. неприемима в силу физической некорректности. Таким образом, не смотря на то, что к концу февраля снег был возраста более двух недель (в 2–3 декаду февраля рассматриваемых годов осадки практически не наблюдались), значения SWE, рассчитанные по алгоритмам для свежего снега дают наибольшее сходство с наземными данными. Наименьшая относительная погрешность среди 3-х использованных алгоритмов наблюдалась при использовании алгоритма 2.

Обращает на себя внимания тот факт, что с ростом числа рассматриваемых точек, статистическая значимость результатов существенно улучшается. Объяснение этому достаточно очевидное: с ростом числа

измерений уменьшается роль случайных факторов, не учтенных в простейшей двухчастотной модели. Для оценки достаточного с практической точки зрения размера используемой экспериментальной выборки, мы построили график (рис. 4), из которого следует, что относительная погрешность «выходит» на стабильный уровень менее 40 % при усреднении по 40 точкам. Это означает, что двухчастотные алгоритмы имеют смысл использовать для оценки среднемесячных значений SWE в конкретном пикселе или для элемента приблизительно $280 \times 280 \text{ км}^2$ на конкретную дату. Суммируя результаты работы, приходим к следующим выводам.

Существующие алгоритмы оценки SWE, использующие данные СВЧ радиометров, требуют проверки на данных конкретного региона. Без этого выбор модели и ее практическое использование затруднительно.

Алгоритмы оценки SWE, нуждаются в существенном временном или пространственном усреднении.

Это ограничивает использование алгоритмов в интересах реальных хозяйствующих субъектов, размеры которых менее 300 км. Временное усреднение затрудняет использование этих методов в практике оперативного мониторинга.

Библиографические ссылки

1. Kongoli C., Ferraro R. Development and Evaluation of the AMSU-Based Snow Water Equivalent Retrieval Algorithm // 13th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography. URL: https://ams.confex.com/ams/13SATMET/techprogram/paper_78989.htm/.
2. Документация. URL: <http://gis-lab.info/docs.html>.
3. Агрометеорологический бюллетень. № 2. Февраль 2012 г. (по оперативным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2012.
4. Агрометеорологический бюллетень. № 3. Март 2012 г. (по оперативным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2012.
5. Агрометеорологический бюллетень. № 2. Февраль 2009 г. (по телеграфным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2009.
6. Агрометеорологический бюллетень. № 3. Март 2009 г. (по телеграфным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2009.

References

1. Kongoli C., Ferraro R. Development and Evaluation of the AMSU-Based Snow Water Equivalent Retrieval Algorithm. 13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Available at: https://ams.confex.com/ams/13SATMET/techprogram/paper_78989.htm (accessed 12 February 2013).
2. Available at: <http://gis-lab.info/docs.html> (accessed 30 May 2012).
3. Агрометеорологический бюллетень (Агрометеорологический бюллетень). No. 2 [text]: for February, 2012 (according to operational data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2012. 16 c.
4. Агрометеорологический бюллетень (Агрометеорологический бюллетень). No. 3 [text]: for March, 2012 (according to operational data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2012. 15 c.
5. Агрометеорологический бюллетень (Агрометеорологический бюллетень). No. 2 [text]: for February, 2009 (according to cable data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2009. 15 c.
6. Агрометеорологический бюллетень (Агрометеорологический бюллетень). No. 2 [text]: for March, 2009 (according to cable data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2009. 15 c.

© Березин К. Ю., Дмитриев А. В., Дмитриев В. В., 2013

УДК 528.854+631.4

ЗАВИСИМОСТЬ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ИЗМЕРЕННОЙ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ SMOS, ОТ АЗИМУТАЛЬНОГО УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ*

П. П. Бобров¹, В. Л. Миронов², А. С. Яценко¹

¹Омский государственный педагогический университет

Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: x_rays1@mail.ru

²Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук

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

Приведены основные результаты анализа угловых зависимостей радиоярких температур почв, полученных в ходе натурного, модельного эксперимента, а также аппаратом SMOS. Обнаружено, что величина радиояркой температуры поверхностей, имеющих периодический профиль, существенно зависит от азимутального угла измерения. Такие поверхности при определенных условиях могут иметь значение радиояркой температуры на горизонтальной поляризации большие, чем на вертикальной. Аналогичные соотношения зачастую наблюдаются в данных SMOS. Показано, что особенности угловых зависимостей радиояркой температуры, полученные SMOS, могут быть обусловлены как физическими процессами, так и аппаратными ошибками. Полученные результаты могут быть использованы при обработке радиометрических данных SMOS.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, яркостная температура, коэффициент излучения, SMOS.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки в части проведения НИР.

DEPENDENCE OF BRIGHTNESS TEMPERATURE SOUNDED WITH SPACECRAFT SMOS ON THE AZIMUTH ANGLE OF SOUNDING

P. P. Bobrov¹, V. L. Mironov², A. S. Yashchenko¹

¹Omsk State Pedagogical University

14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: x_rays1@mail.ru

²Institute 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

The results of the analysis of angular dependence of soil brightness temperature obtained in the natural, model experiment, and with SMOS satellite, are presented. It is found that the value of surfaces brightness temperature with periodic profile considerably depends on the azimuth angle of sounding. Such surfaces under certain conditions can have a value of brightness temperature greater on the horizontal polarization than on the vertical polarization. Similar correlations are often observed in the SMOS data. It is shown that the features of the angular dependence of brightness temperature obtained by SMOS can be explained both by natural processes and hardware errors. The results can be used in the SMOS data processing.

Keywords: microwave radiometry, brightness temperature, emissivity, SMOS.

Основной функцией миссии SMOS является картирование влажности почв и солености поверхностного слоя Мирового океана в глобальном масштабе. На спутнике установлен 2-D интерференционный радиометр MIRAS, работающий в диапазоне частот 1,400–1,427 ГГц (L-диапазон). Радиометрическая съемка поверхности Земли осуществляется с периодичностью один раз в 1–2 суток в следующих режимах: горизонтальная поляризация (HH), вертикальная поляризация (VV) и кросс-поляризация (VH). Данные о радиояркости температуры (T_b) и влажности поверхностного слоя почв (W) для данного участка поверхности предоставляются с периодичностью не менее одного раза в три дня. Максимальная заявленная погрешность определения влажности не превышает, по словам разработчиков, 4 % по абсолютной величине. Контур радиометрического снимка MIRAS имеет характерную гексагональную форму. Разрешение снимка не является постоянной величиной, убывая от центра к периферии снимка; наилучшее разрешение при зондировании в надир – 32 км, наихудшее при зондировании под углом 65° – 101 км (рис. 1). Ширина полосы съемки вдоль трассы пролета составляет в среднем 1 300 км.

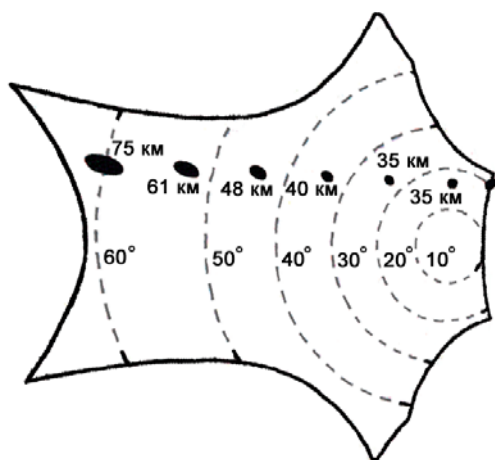


Рис. 1. Контур радиометрического снимка SMOS. Пунктирные линии соответствуют указанному углу зондирования. Черные овалы – характерный размер пикселя радиометрического снимка в данном месте кадра

Изучение угловых зависимостей T_b поверхности почв, измеренных КА SMOS, показывают, что зачастую они существенно отличаются от теоретических зависимостей. В отдельные моменты времени наблюдаются anomalously высокие значения радиояркости температуры, существенно превышающие термодинамическую температуру. Такое поведение можно объяснить тем, что среднеквадратичное отклонение значений T_b , а следовательно, и погрешность измерений значительно увеличиваются по мере приближения к краю радиометрического снимка [1]. Похожие выводы опубликованы нами в работе [2]. Еще одним отступлением от теории являются факты превышения значений T_b на горизонтальной поляризации над значениями на вертикальной, что не характерно ни для почв с гладкой, ни для почв со статистически неровной поверхностью.

Однако реальные земные поверхности могут иметь частично упорядоченный рельеф, например, поверхность почв, обрабатываемых механическими орудиями, растительность при рядовом способе посева и т. п. Угловые зависимости коэффициента излучения в этом случае зависят от азимутального угла [3]. Результаты расчета зависимости коэффициента излучения от угла зондирования при азимутальном угле $\varphi = 90^\circ$ для поверхности почвы с синусоидальным профилем поверхности приведены на рис. 2. Видно, что излучение является поляризованным даже при нулевом угле зондирования. При углах от 0 до 40° коэффициент излучения на горизонтальной поляризации больше, чем на вертикальной, при этом под углом 30° коэффициент излучения на горизонтальной поляризации достигает значения, равного 0,97.

Еще одной причиной превышения излучения на горизонтальной поляризации χ_h над χ_v может быть наличие на поверхности растительности с выраженными вертикальными стеблями (зерновые, подсолнечник и т. п.). В таком случае растительный слой будет иметь в вертикальном направлении диэлектрическую проницаемость большую, чем на вертикальной. Результаты натурального эксперимента, где обнаруживается указанный эффект [4], приведены на рис. 3. Как можно видеть из приведенных данных, T_b на горизонтальной поляризации превышает T_b на вертикальной, при этом между наземными и спутниковыми данными наблюдается соответствие в пределах погрешности.

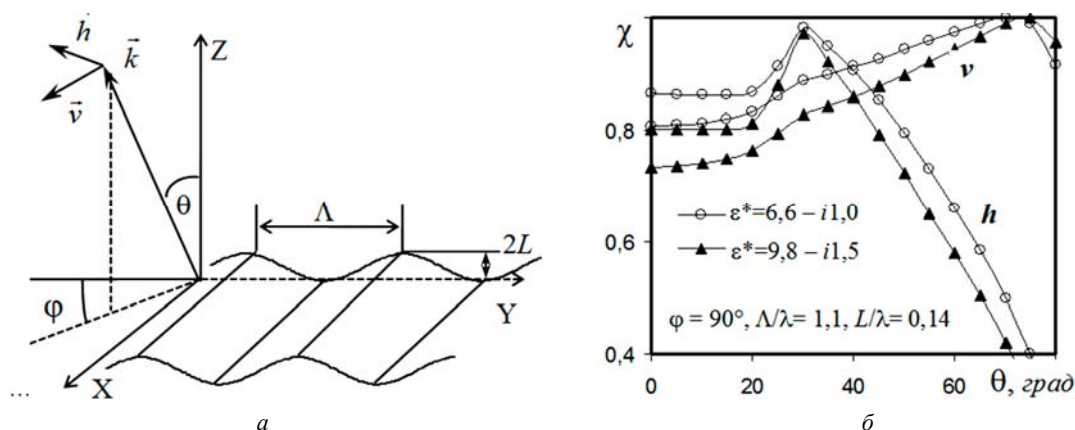


Рис. 2. Геометрия поверхности с синусоидальным профилем (а) и результаты расчета коэффициента излучения из такой поверхности при азимутальном угле $\varphi = 90^\circ$ (б)

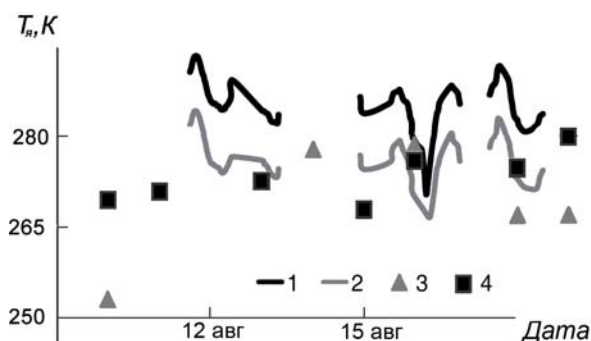


Рис. 3. Результаты эксперимента:

1, 2 – данные наземных измерений T_s для почвы, покрытой растительностью;
3, 4 – данные SMOS для пикселя, в пределах которого проходили измерения на горизонтальной и вертикальной поляризации, соответственно. Угол зондирования $\Theta = 30^\circ$

При пролете спутника SMOS радиотепловое излучение одного и того же участка поверхности регистрируется под разными углами относительно надира – углами зондирования, азимутальные углы относительно направления «север–юг» при этом также изменяются (рис. 4). Для выявления факта влияния азимутального угла съемки на результат измерений T_s спутником SMOS имеющиеся ряды данных за период январь 2010 – январь 2013 гг. были разбиты на следующие группы углов: $0^\circ \pm 10^\circ$, $90^\circ \pm 10^\circ$, $180^\circ \pm 10^\circ$ и $270^\circ \pm 10^\circ$. В данных SMOS направление от спутника к зондируемому участку, совпадающее с направлением на географический юг, принимают за азимутальный угол, равный $\varphi = 0^\circ$. Из всего массива углов зондирования для построения временных рядов данных был выбран диапазон углов зондирования в $41,5^\circ \pm 1^\circ$, как наиболее часто встречающийся (см. рис. 1). В случае если в указанном диапазоне углов зондирования одновременно попадало несколько значений T_s , данные усреднялись. Сравнение полученных рядов данных показало, что значения, относящиеся к азимутальным углам $0^\circ \pm 10^\circ$ и $180^\circ \pm 10^\circ$, в период вспашки и вегетации не отличаются друг от друга в пределах погрешности измерений аппаратуры. Различие между рядами данных $0^\circ \pm 10^\circ$ и $90^\circ \pm 10^\circ$ значительно превышало погрешность, но дальнейший анализ указал

на факт искусственного происхождения этого эффекта. Во-первых, это различие наблюдается в любое время года, в течение всего анализируемого временного промежутка. Во-вторых, заметно для любых ландшафтных зон: от степей, с большими площадями пашни, до северной заболоченной лесостепи. В-третьих, ряды данных, относящиеся к диапазону $90^\circ \pm 10^\circ$, соответствовали пикселям, находящимся вблизи края радиометрического снимка, погрешность измерения для которых имеет существенно большее значение, чем в центре кадра.

Таким образом, влияние анизотропии поверхностного слоя почв на величину T_s , обусловленное наличием травяной растительности, а так же выделенным направлением вспашки почв, заметное при наземных экспериментах, практически не наблюдается при спутниковой съемке. Это может быть объяснено:

- слабым влиянием указанного фактора на излучательную способность почв, сравнимую с погрешностью измерений SMOS;
- значительным размером пикселя радиометрического снимка;
- наличием в пределах области, излучающей в пиксель, различных объектов, приводящих к квазиизотропности поверхностного слоя.

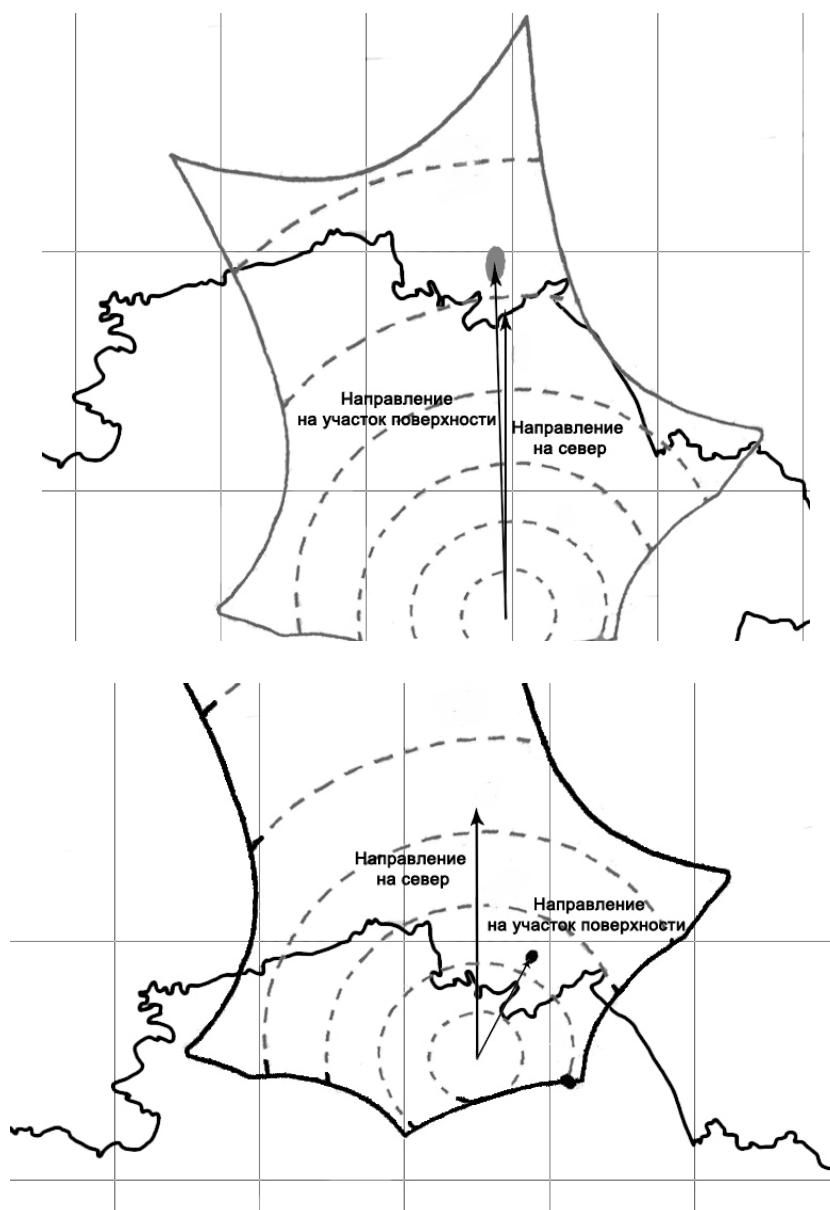


Рис. 4. Изменение азимутального угла съемки пикселя при пролете спутника SMOS

Библиографические ссылки

References

1. 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.
2. Бобров П. П., Миронов В. Л., Яценко А. С. Статистический анализ данных спутника SMOS о радиояркой температуре территории юга Омской области и Северного Казахстана // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 142–143.
3. Особенности сверхвысокочастотного излучения периодически неровных почв / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Ю. К. Шестопалов, И. М. Щеткин // Радиотехника и электроника. 2000. № 10. С. 1059–1067.
4. Results of the SMOS Data Validation over a Steppe and Forest Area in Siberia / P. P. Bobrov, V. L. Mironov, E. G. Shvetsov et al. // Proc. of PIERS'2011. P. 121–124.

1. 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.
2. Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 142–143.
3. Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Shestopalov Y. S., Shchetkin I. M. Radiotekhnika i elektronika. 2000, no 10, pp. 1059–1067.
4. Bobrov P. P., Mironov V. L., Shvetsov E. G., Sukhinin A. I. and Yashchenko A. S Proc. of PIERS'2011, pp. 121–124.

УДК 528.854+631.4

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

П. П. Бобров¹, В. Л. Миронов², А. С. Ященко¹

¹Омский государственный педагогический университет

Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: x_rays1@mail.ru

²Институт 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 географических 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
ABLATION MEASURED BY SMOS-SATELLITE**

P. P. Bobrov¹, V. L. Mironov², A. S. Yashchenko¹

¹Omsk State Pedagogical University

14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: x_rays1@mail.ru

²Institute 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; χ – коэффициент излучения. Изменение температуры почвы приводит как к изменению $T_{\text{эфф}}$, так и χ . Наибольшие изменения χ наблюдаются при температуре фазового перехода почвенной влаги.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-05-98082-р_сибирь_a).

Промерзание почвы при температуре воздуха немногим ниже 0°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 $T_{\text{я}}$ вначале монотонно увеличивается, затем, осциллируя, стремится к значению, соответствующему почве, промерзшей до глубины, превышающей глубину зондируемого слоя радиометра [3]. Величина перепада $T_{\text{я}}$ между значениями в талом и замерзшем состоянии в большей степени определяется влажностью почв перед промерзанием и может достигать величин от единиц кельвин для малоувлажненных почв до десятков кельвинов для сильно влажных (рис. 1). В силу климатических и географических особенностей юга Западной Сибири величина $T_{\text{я}}$ поверхности перед промерзанием велика, что затрудняет отслеживание процесса промерзания почв с помощью спутника SMOS (рис. 1, а).

В замерзшем состоянии изменения $T_{\text{я}}$ 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 $T_{\text{я}}$ 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 $T_{\text{я}}$, в отличие от наземных измерений, были более существенными, но не коррелировали с эффективной температурой ($T_{\text{эфф}}$), приведенной в SMOS Level 2 (рис. 2, а). При этом корреляция между температурой воздуха и $T_{\text{эфф}}$ почвы была несколько лучше (рис. 2, б).

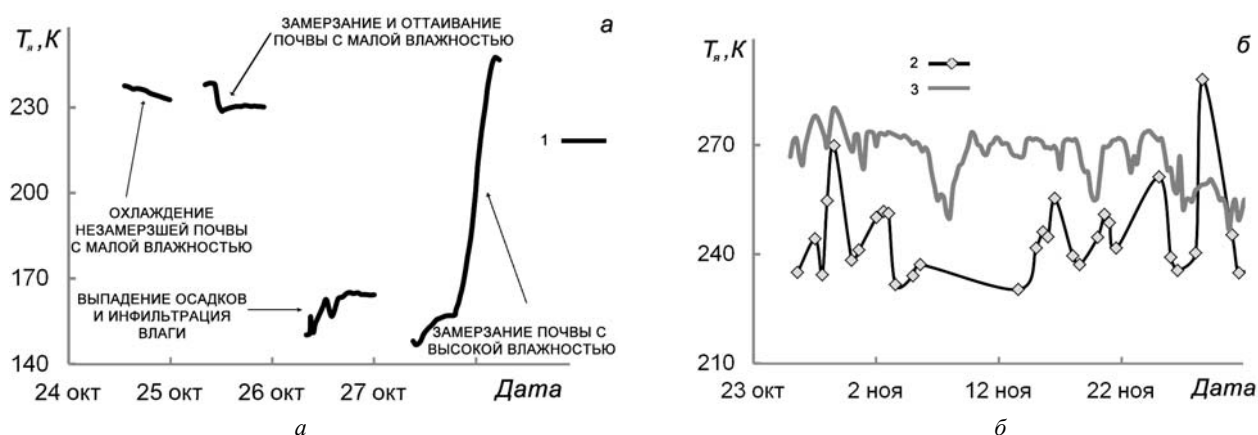


Рис. 1. Результаты наземных (1), спутниковых (2) измерений $T_{\text{я}}$ почв под углом зондирования 30° , а также временной ход температуры воздуха (3) на момент измерений в 2011 г. (а) и 2012 г. (б)

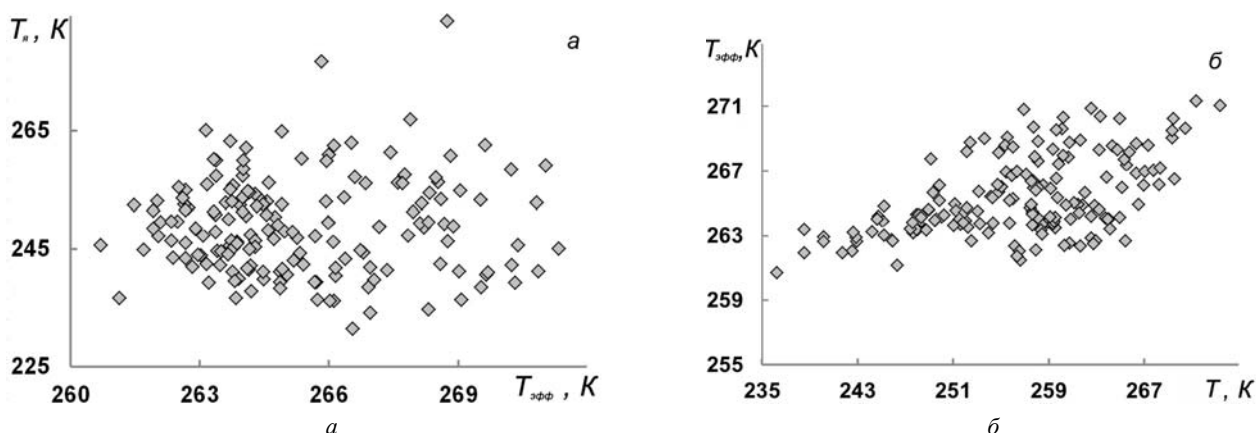


Рис. 2. Зависимости радиояростной ($T_{\text{я}}$), эффективной ($T_{\text{эфф}}$) и термодинамической (T) температур для одного из пикселей радиометрического снимка в период осень 2012 – зима 2013 гг.

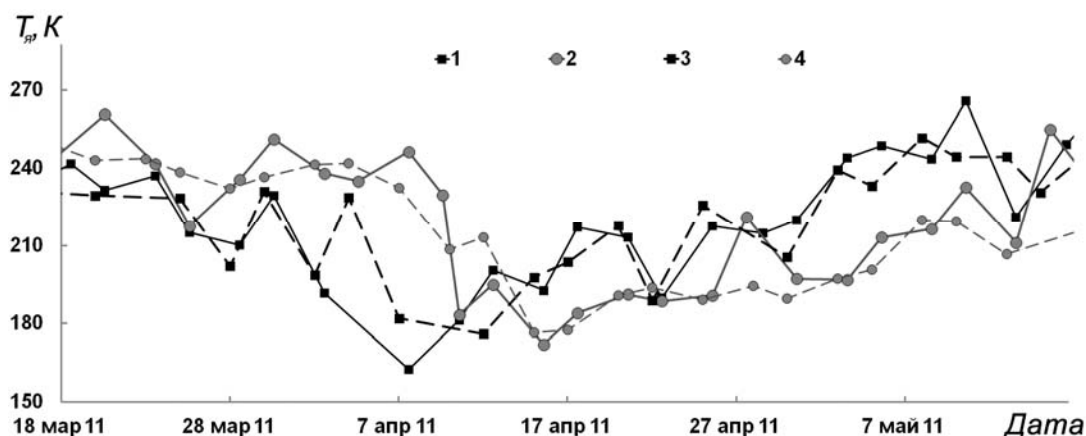


Рис. 3. Временной ход яркостной температуры для углов зондирования $40,5^{\circ}$ – $42,5^{\circ}$, полученной усреднением значений для пикселей с широтой $53,5^{\circ}$ с. ш. (1, 3) и $55,5^{\circ}$ с.ш. (2, 4) в диапазоне долгот от 70° до 76° в. д. для азимутальных углов зондирования 0° (1, 2) и 180°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

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° . Анализ радиометрических данных показал: между значениями $T_{я}$, полученными при азимутальных углах 0° и 180° 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° (зондированию северного склона) соответствует более ранний минимум (раннее окончание таяния), по сравнению с данными для азимутального угла зондирования в 180° (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., Яценко А. С. Суточная динамика радиояркостных 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., Яценко А. С. Статистический анализ данных спутника SMOS о радиояркостной 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.

© Бобров П. П., Миронов В. Л., Яценко А. С., 2013

УДК 528.813 + 631.432.2

ВЛИЯНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ НА ВРЕМЕННУЮ ДИНАМИКУ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ*

П. П. Бобров¹, О. А. Ивченко¹, С. В. Кривальцевич²

¹Омский государственный педагогический университет
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: bobrov@omgpu.ru

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Россия, 644009, Омск, ул. Масленникова, 231. E-mail: kriser2002@mail.ru

Приведены результаты исследования яркостной температуры почв на длинах волн 3,6, 5, 11 и 18 см. Показано, что различия в динамике яркостной температуры почв с различным засолением и содержанием гумуса объясняются различиями в шероховатости поверхности, в градиентах влажности и скорости высыхания после интенсивного увлажнения. Показаны возможности многочастотного радиометрического метода дистанционного зондирования для исследования почвенной структуры, определения некоторых почвенных гидрологических констант и глубины промерзания. Исследованы возможности оценки испарения с поверхности почв радиометрическим методом.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, засоление почв, гумус, испарение.

EFFECTS OF SOIL HYDROPHYSICAL PROPERTIES ON TEMPORAL DYNAMICS OF BRIGHTNESS TEMPERATURE WITHIN MICROWAVE RANGE

P. P. Bobrov¹, O. A. Ivchenko¹, S. V. Krivaltsevitch²

¹Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: bobrov@omgpu.ru

²Omsk Scientific and Research Institute of Instrument Engineering
231 Maslennikov st., Omsk, 644009, Russia. E-mail: kriser2002@mail.ru

The results of the soils brightness temperature study at wavelengths 3.6, 5, 11 and 18 cm are presented. It is shown that differences in the dynamics of the brightness temperature of soils with different salinity and humus content can be explained by differences in the surface roughness, moisture gradients and drying speed after intensive irrigation. The possibilities of multi-frequency radiometric remote sensing technique for studying the soil structure, for determination of some soil hydrological constants and depth of freezing, are shown. Possibilities of evaporation estimating from the soil surface by radiometric remote sounding method are investigated.

Keywords: microwave radiometry, soil salinization, humus, evaporation.

Длительные многочастотные радиометрические наблюдения во время выпадения осадков, в процессах высыхания почвы, ее промерзания и оттаивания дают новую богатую информацию для гидрологии и климатологии. Те или иные особенности динамики коэффициента излучения участков различных почв, находящихся при таких условиях, определяются тремя основными причинами: различной динамикой влажности поверхностного слоя, различной степенью шероховатости поверхности и ее устойчивостью в различных погодных условиях и, наконец, различной температурой поверхностного слоя. Температура поверхностного слоя почв при одних и тех же метеоусловиях зависит от коэффициента отражения почв в видимом и ИК диапазонах, теплопроводности и теплоемкости. Эти теплофизические характеристики зависят как от свойств почвенной породы и содержания гумуса, так и от влажности почвы.

Динамика влагосодержания определяется двумя факторами – испарением с поверхности и подтягива-

нием к поверхности грунтовых вод. Испарение и вертикальные потоки влаги в почве во многом зависят от коэффициента влагопроводности почвы и водоудерживающей способности (капиллярно-сорбционного потенциала). Эти гидрофизические характеристики почв определяются, в основном, гранулометрическим и агрегатным составом (на них в значительной степени влияет содержание гумуса), плотностью и степенью засоления.

Структура поверхностных неровностей формируется на стадии механической обработки почвы. При обработке одними и теми же орудиями степень шероховатости сильно зависит от типа почвы, степени засоления и влажности на момент обработки. Степень устойчивости поверхностных неровностей к воздействию осадков, ветра и других факторов определяется структурой почвы, водоустойчивостью агрегатов, межагрегатной и внутриагрегатной пористостью. На эти свойства почв сильно влияют опять-таки гранулометрический состав и степень засоления.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки в части проведения НИР.

Коэффициент излучения засоленной почвы после выпадения осадков изменяется медленно, что объясняется низким испарением из этой почвы из-за уменьшения пористости при набухании. В незасоленных почвах испарение выше, поэтому быстрее растет и коэффициент излучения [1]. Но наиболее сильный контраст яркостных температур засоленных и незасоленных почв наблюдается при отрицательных температурах ниже 0 °С, когда свободная вода в незасоленных почвах замерзает при температуре около 0 °С, а в засоленных – при температуре около –3...–4 °С.

Зависимости коэффициента излучения двух участков с разной степенью засоления S от температуры поверхностного слоя почвы, измеренные на длине волны 5 см приведены на рис. 1. Обращает на себя внимание значительный контраст яркостных температур около 55 К (контраст коэффициента излучения 0,2), существовавший на протяжении более двух часов при оттаивании почвы после ночного заморозка.

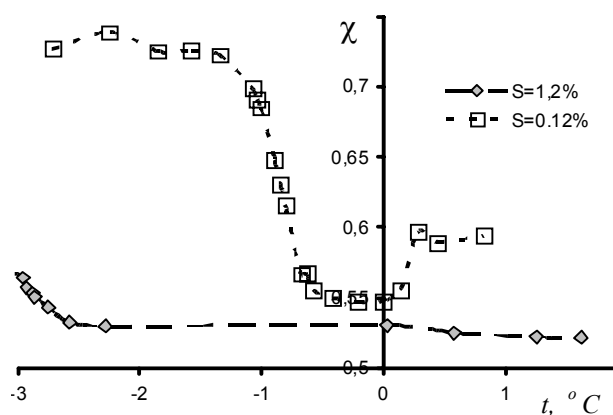


Рис. 1

Различия в структуре и водопрочности агрегатов почв с различным содержанием гумуса проявляются при сильном увлажнении после схода снежного покрова или после сильных дождей [2]. После таяния снежного покрова, когда почва достаточно длительное время находится в состоянии насыщения влагой, почвенные агрегаты из-за низкой водоустойчивости на поверхности почвы с малым содержанием гумуса почти полностью разрушаются, образуя более гладкую поверхность, чем почвы, богатые гумусом. Яркостная температура участка 2 с высоким содержанием гумуса (6,6 %) на длине волны 11 см примерно на 15 К превышает яркостную температуру участка 1 с низким содержанием гумуса (0,6 %), а на длине волны 3,6 см это превышение составляет 25–30 К (рис. 2).

Большая разность яркостных температур участка 2 на длинах волн 11 и 3,6 см свидетельствует о высоком градиенте влажности в поверхностном слое этой почвы. Градиент влажности, устанавливающийся в поверхностном слое почвы после интенсивного дождя или полива при значительном испарении, является информационным признаком, отражающим такие свойства почв, как пористость и влагопроводность. Значение градиента влажности можно оценить по значению

нормализованной разности яркостных температур на разных длинах волн:

$$NFI = (T_{я1} - T_{я2}) / (T_{я1} + T_{я2}),$$

где $T_{я1}$, $T_{я2}$ – яркостные температуры на длинах волн 11 и 3,6 см, соответственно [3].

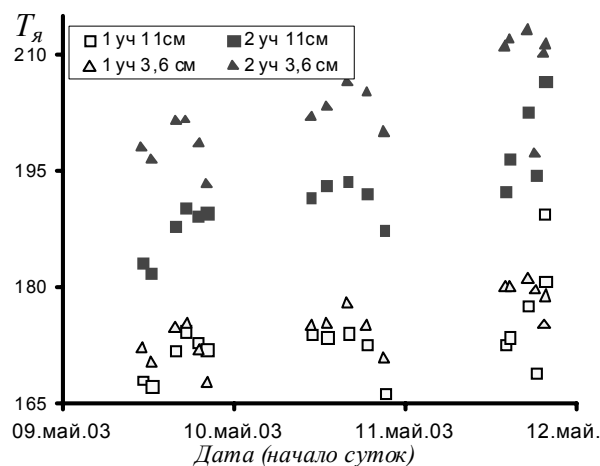


Рис. 2

Данные об изменении NFI двух почвенных участков с различным содержанием гумуса после полива слоем воды 18 мм приведены на рис. 3. Сплошной линией аппроксимированы данные для участка с высоким содержанием гумуса, штриховой – для участка с низким содержанием гумуса. Видно, что через сутки после полива установилось наибольшее различие в значениях NFI для разных почвенных участков. Положительному градиенту профиля влажности (возрастанию влажности с приближением к поверхности) соответствует положительная величина NFI . Почва с высоким содержанием гумуса обладает более высокой влагопроводностью, поэтому сразу после полива установился профиль с меньшим положительным градиентом, а в результате быстрого высыхания верхнего слоя через сутки установился отрицательный градиент.

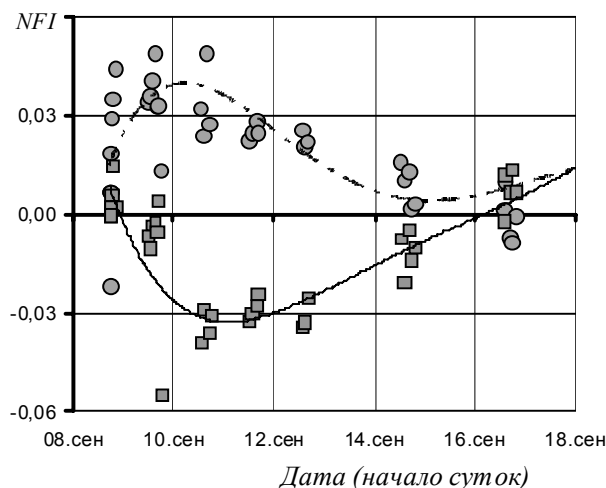


Рис. 3

Измерение яркостных температур и степени поляризации зенитного излучения на нескольких частотах позволяет определять профиль влажности в поверхностном слое [4; 5] и более точно определять влажность поверхностного слоя почв, а в случае проведения таких измерений в течение длительного времени вплотную подойти к решению задачи дистанционного определения испарения.

При невысоких температурных градиентах испарение можно рассчитать через плотность потока влаги в почве, определяемую обобщенным уравнением Дарси, которое в случае высокой влажности можно записать в виде

$$Q = -K \frac{\partial \Psi_c}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial z}, \quad (1)$$

где K – коэффициент влагопроводности жидкой фазы, W – объемная влажность почвы; $\Psi = \Psi_c + gz$ – полный потенциал почвенной влаги (Ψ_c – капиллярно-сорбционный потенциал); z – вертикальная координата. При отсутствии гравитационной влаги $\Psi = \Psi_c$. Таким образом, уравнение (1) позволяет, измерив градиент влажности dW/dz в поверхностном слое почвы, определить поток влаги через поверхность (т. е. испарение), если известны гидрофизические характеристики почвы – K и $d\Psi/dz$ [6].

Преимуществом такого способа явилось бы определение испарения на момент измерения градиента влажности. В экспериментах, проводимых с использованием трех радиометров с длинами волн 3,6, 5 и 11 см, когда в течение суток проводилось измерение градиента влажности и определялось на этой основе интегральное испарение за сутки, не удалось получить хорошего совпадения с данными, полученными при прямых измерениях влажности в слое 0–50 см [6]. Причины кроются в невысокой точности дистанционного измерения градиентов влажности (погрешность 40–50 %) и косвенной оценке гидрофизических характеристик почвы через гранулометрический состав по приближенным формулам.

Возможен способ дистанционной оценки испарения через измерение динамики влажности в поверхностном слое. Здесь трудность заключается в том, что влажность радиометрическим методом измеряется в тонком поверхностном слое, а изменяется она при испарении в слое толщиной до 0,5–1 м. Расчеты с использованием модели движения почвенной влаги [7], показывают, что связь изменения влажности с полным испарением наиболее сильная в слое 0–1 см, но влажность в этом слое наиболее всего подвержена влиянию гидрофизических параметров почвы и начальных условий. Наиболее устойчивая связь при влажности 0,2–0,3 см³/см³ наблюдается в слое 0–6 см. Для определения влажности в этом слое рабочая длина радиометра должна выбираться в пределах 15–25 см, и данные аппарата SMOS вполне могут использоваться для этих целей.

Эксперимент проводился нами с использованием радиометра с длиной волны 18 см. Испарение измерялось через общее уменьшение влагозапаса в слое 0–50 см по результатам прямых измерений, производимых с периодичностью в 1–3-е суток. Связь испарения E

со скоростью изменения коэффициента излучения за соответствующие периоды приведена на рис. 4. Здесь по оси абсцисс отложены изменения коэффициента излучения $\Delta\chi$, деленные на время Δt , в течение которого эти изменения произошли.

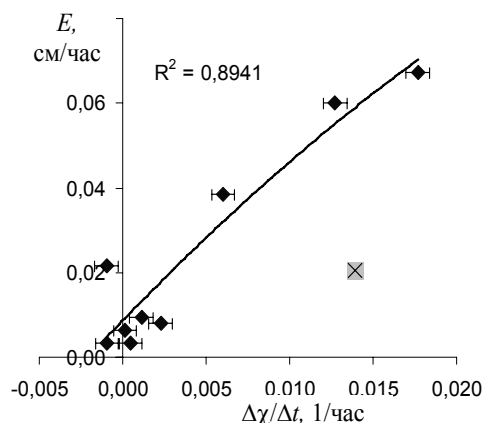


Рис. 4

Точки, сгруппированные вблизи начала координат, соответствующие малым значениям испарения, получены в сухой период. В некоторых случаях при достаточно большом среднем испарении изменения коэффициента излучения отрицательны. Это обусловлено тем, что при общем уменьшении влагосодержания слоя 0–50 см происходило увеличение влажности в тонком верхнем слое за счет выпадения росы или подтягивания влаги к поверхности в ночные часы. Большие значения испарения наблюдались в первые сутки после дождливого периода.

Из результатов эксперимента вытекает, что наиболее точно радиометрическим методом можно определять суточные значения испарения, если измерять коэффициент излучения в вечерние часы (за несколько часов до захода солнца) и сравнивать их с измерениями, производимыми в такое же время предыдущих суток. В эти часы испарение уже невелико, градиенты влажности в поверхностном слое немного уменьшены, но еще не начался подток влаги из нижних слоев.

Измеряя коэффициент излучения на одной частоте 6,9 или 1,4 ГГц при промерзании почвы, удастся определить не только влажность почвы, но и максимальное количество связанной воды [8], а также статистически связанные с ней гидрофизические параметры: влажность устойчивого завядания [9] и содержание физической глины [10]. Проведение поляризационных измерений на двух частотах 1,4 и 6,9 ГГц до и после промерзания позволяет определить не только диэлектрическую проницаемость почвы, но и толщину слоя промерзания [11].

Библиографические ссылки

1. Бобров П. П. Влияние различий в структуре засоленных и незасоленных почв на собственное СВЧ-излучение // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 83–87.

2. Бобров П. П., Галеев О. В. Динамика радиояростной температуры почв с различным содержанием гумуса // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 4. С. 74–80.

3. Бобров П. П., Ивченко О. А., Кривальцевич С. В. Исследование почвенной структуры методом двух-частотной микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 2. С. 82–88.

4. Особенности сверхвысокочастотного излучения периодически неровных почв / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Ю. К. Шестопалов, И. М. Щеткин // Радиотехника и электроника. 2000. № 10. С. 1059–1067.

5. Beljaeva T. A., Bobrov P. P., Ivchenko O. A. Radiohydropysical model of evaporation of soils moisture // XIV Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics : abstracts / Institute of Atmospheric Optics SB RAS. Tomsk, 2007. P. 213.

6. Оценка тепловых потоков при испарении с поверхности почв по метеорологическим параметрам и микроволновой радиометрии / А. Л. Афанасьев, П. П. Бобров, О. А. Ивченко, С. В. Кривальцевич // Естественные науки и экология : межвуз. сб. науч. тр. Вып. 8. Кн. 1. Омск : Изд-во ОмГПУ. 2004. С. 3–6.

7. Бобров П. П. Исследование испарения, влажности и структуры поверхностного слоя почв дистанционными микроволновыми методами // Почвоведение. 2000. № 5. С. 574–578.

8. Яценко А. С., Бобров П. П., Миронов В. Л. Дистанционный радиометрический метод определения некоторых почвенных гидрологических констант // Известия вузов. Физика. 2008. № 9/2. С. 105–110.

9. Пат. 2331062 С1 Российская Федерация, МПК G01N 22/04 / Бобров П. П., Миронов В. Л., Яценко А. С., заявитель и патентообладатель ИФ СО РАН – № 2006135882/09; заявл. 10.10.06; опубл. 10.08.08, Бюл. № 22.

10. Пат. 2411505 С2 Российская Федерация, МПК G01N 22/04 / Миронов В. Л., Бобров П. П., заявитель и патентообладатель ИФ СО РАН. № 2009108599/08; заявл. 10.13.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4.

11. Бобров П. П., Миронов В. Л., Яценко А. С. Суточная динамика радиояростных температур почв на частотах 1,4 и 6,9 ГГц в процессах промерзания и оттаивания // Радиотехника и электроника. 2010. № 4. С. 424–431.

References

1. Bobrov P. P. Issled. Zemli iz kosmosa. 1999, no. 5, pp. 83–87.

2. Bobrov P. P., Galeev O. V. Issled. Zemli iz kosmosa. 2001, no. 4, pp. 74–80.

3. Bobrov P. P., Ivchenko O. A., Krivaltsevich S. V. Issled. Zemli iz kosmosa. 2005, no. 2, pp. 82–88.

4. Bobrov P. P., Belyayeva T. A., Shestopalov Yu. K., Shchetkin I. M. Radiotekhnika i elektronika. 2000, no. 10, pp. 1059–1067.

5. Beljaeva T. A., Bobrov P. P., Ivchenko O. A. XIV International Symposium. Atmospheric and Ocean Optics: Abstracts. – Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS. 2007, pp. 213.

6. Afanasyev A. L., Bobrov P. P., Ivchenko O. A., Krivaltsevich S. V. Yestestvennyye nauki i ekologiya. Vol. 8, Kn. 1. Omsk : OmGPU. 2004, pp. 3–6.

7. Bobrov P.P. Eurasian Soil Science. 2000, no. 5, pp. 501–505.

8. Yashchenko A. S., Bobrov P. P., Mironov V. L. Izvestiya vuzov. Fizika. 2008, no. 9/2, pp.105–110.

9. Pat. 2331062 C1 RF, MPK G01N 22/04. Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S., zayavitel i patentoobladatel IF SB RAS – № 2006135882/09; zayavl. 10.10.06; opubl. 10.08.08, Byul. no. 22, 7 p.

10. Pat. 2411505 C2 RF, MPK G01N 22/04. Mironov V. L., Bobrov P. P., zayavitel i patentoobladatel IF SB RAS. № 2009108599/08; zayavl. 10.13.2009; opubl. 10.02.2011, Byul. no. 4, 11 p.

11. Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S. Journal of Communications Technology and Electronics, 2010, vol. 55, no. 4, pp. 395–402.

© Бобров П. П., Ивченко О. А., Кривальцевич С. В., 2013

УДК 535.391.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЯРОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ БУРЯТИИ КОСМИЧЕСКИМ РАДИОМЕТРОМ SMOS*

П. Н. Дагуров, А. В. Дмитриев, А. В. Базаров, С. Б. Раднаева

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

Приведены результаты исследования радиояростной температуры на территории Бурятии по данным космического микроволнового радиометра SMOS/MIRAS. В качестве примера рассмотрены точки, одна из которых находится на акватории оз. Байкал, а другая располагается вблизи озера. Представлены результаты, полученные в летний и зимний период. Показано, что наблюдается значительное расхождение расчета и эксперимента для точки на поверхности оз. Байкал, более удовлетворительное соответствие для точки на суше и хорошее соответствие для контрольной точки, расположенной в экваториальных водах. Сделан вывод о достоверности результатов, получаемых радиометром.

Ключевые слова: SMOS, радиометр, микроволны, радиояростная температура.

* Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ № 12-05-980622-р_сибирь_а, РФФИ № 13-08-01132, интеграционным проектом СО РАН № 73.

THE RESULTS OF BRIGHTNESS TEMPERATURE MEASUREMENTS AT THE TERRITORY OF BURYATIA MADE WITH SPACE RADIOMETER SMOS

P. N. Dagurov, A. V. Dmitriev, A. V. Bazarov, S. B. Radnaeva

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

The results of brightness temperature investigation in Buryatia made with microwave radiometer SMOS/MIRAS are presented. As an example, the points located on water area of Lake Baikal and near the lake are considered. The results obtained in the summer and winter period are presented as well. It is shown that there is a significant discrepancy between theory and experiment for a point on the water area of Lake Baikal, a satisfactory agreement for the point on the ground and a good agreement for the control point located in the equatorial waters. It is concluded that the results obtained with the radiometer are reliable.

Keywords: SMOS, radiometer, microwaves, brightness temperature.

Микроволновое дистанционное зондирование Земли является эффективным инструментом изучения процессов, происходящих на земной поверхности, вследствие охвата обширных территорий, в том числе труднодоступных, независимости от погодных условий и освещенности поверхности. В последние годы на космической орбите находится космический аппарат SMOS Европейского космического агентства (ESA) с микроволновым радиометром MIRAS [1], работающий в полосе частот 1 400–1 427 МГц и выполняющий миссию глобального определения влажности почвы и солености океана. Разрешающая способность антенны SMOS на земной поверхности составляет 35–50 км, периодичность пролета над определенной точкой 1–3 дня.

Алгоритмы определения влажности базируются на измерениях радиояркостной температуры T_b , которая связана с коэффициентом излучения χ и эффективной термодинамической температурой T соотношением [2]

$$T_b = \chi T. \quad (1)$$

Коэффициент χ связан с известными коэффициентами отражения Френеля R_p (индекс зависит от вида поляризации) соотношением

$$\chi = 1 - |R_p|^2 \quad (2)$$

В работе приведены некоторые результаты измерения радиояркостной температуры аппаратом SMOS на территории Бурятии в зависимости от угла обзора (падения) при различных поляризациях. Для сравнения также рассмотрены данные, полученные аппаратом SMOS в экваториальных водах.

Представленные результаты получены в основном для рассмотрения соответствия полученных аппаратом SMOS результатов расчетным оценкам.

Для получения космических снимков использовался архив на портале ESA. Снимки загружались с помощью программного продукта EOLI-SA. Визуализация снимков осуществлялась с помощью программного инструмента BEAM (VISAT). Оба продукта разработаны для ESA и находятся в свободном доступе.

В качестве примера приведена карта радиояркостной температуры, полученная 16.02.2013 г. (рис. 1).

На снимке ясно выделяется поверхность озера Байкал, а также активные помехи на территории Китая, проявляющиеся в наличии очень ярких пятен.

Для получения первичных оценок и сравнения были выбраны две точки: точка 1 на акватории Байкала (105,75° в. д., 51,90° с. ш.), точка 2 на территории, примыкающей к Байкалу (106,61° в. д., 52,14° с. ш.). Данная территория является равнинной, наверное, с наибольшими в Бурятии размерами порядка 30 км × 40 км. Отметим, что территория Бурятии имеет гористый рельеф с узкими долинами (шириной до 20 км) между хребтами. В качестве контрольной точки была выбрана точка 3 (124,09° в. д., –1,11° ю. ш.), находящаяся в Молуккском море.

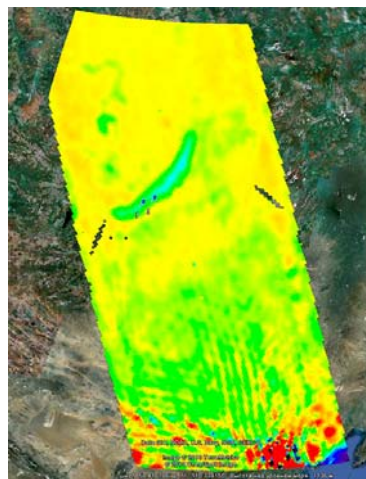


Рис. 1. Снимок 16.02.2013

Зависимости радиояркостных температур при горизонтальной и вертикальной поляризациях от угла падения для точки 1 приведены на рис. 2. В данном случае эти зависимости отображают радиояркостную температуру акватории оз. Байкал 15.07.2012 г. Здесь же показаны результаты расчета по формуле (1). Параметры расчета T , ϵ' , ϵ'' и h указаны в подписи к рисунку. Эти параметры здесь и для других точек подбирались таким образом, чтобы обеспечить наибольшее соответствие экспериментальных и расчетных результатов.

Представленные данные показывают, что наблюдается заметное расхождение экспериментальных и расчетных результатов, особенно для горизонтальной поляризации. Хотя акватория оз. Байкал представляет собой однородную среду, по видимому, в связи с его сравнительно небольшими поперечными размерами (35–45 км), на яркостную температуру большое влияние оказывает более яркая прилегающая суша. Поэтому радиояркостная температура является некоторой эффективной величиной, которая не описывается расчетами для однородной среды.

Зависимости, полученные для точки 2, приведены на рис. 3. В данном случае наблюдается лучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных, особенно для горизонтальной поляризации.

Для сравнения на рис. 4 показаны зависимости, полученные для контрольной точки 3, находящейся в экваториальных водах. Отметим, что все результаты относятся к одному и тому же снимку. Рассмотрение результатов для точки 3 показывает хорошее согласие теории и эксперимента.

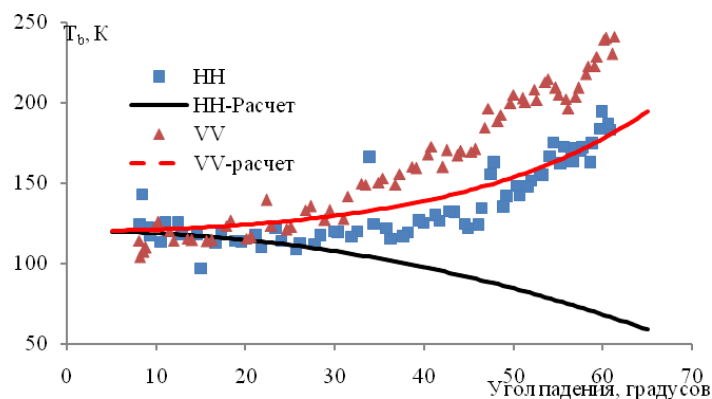


Рис. 2. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры оз. Байкал (точка 1; 15.07.2012 г.; расчет: $T = 290$ К; $\epsilon' = 80$; $\epsilon'' = 0,01$; $h = 0,005$)

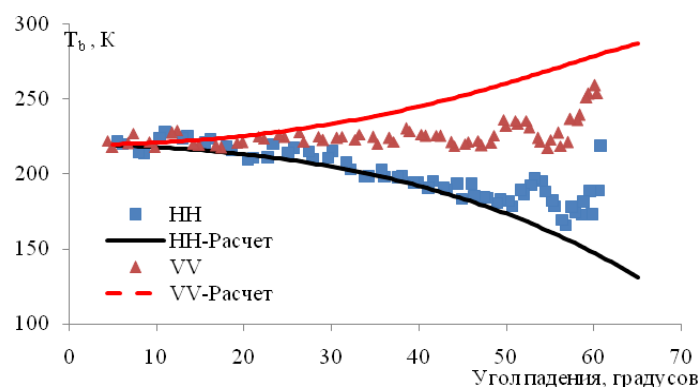


Рис. 3. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры почвы (точка 2; 15.07.2012 г.; расчет: $T = 293$ К; $\epsilon' = 9$, $\epsilon'' = 1$, $h = 0$).

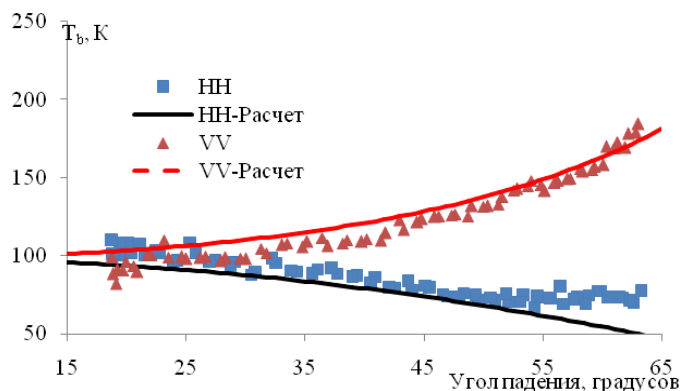


Рис. 4. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры моря (точка 3; 15.07.2012 г.; расчет: $T = 283$ К; $\epsilon' = 80$, $\epsilon'' = 30$; $h = 0$).

Результаты, полученные для этих же точек в зимний период, приведены на рис. 5–7. Здесь обращает на себя внимание несоответствие расчетных и экспериментальных данных в области больших углов падения для ледового покрова оз. Байкал. По-видимому, это объясняется тем, что ледовый покров оз. Байкал представляет собой слой толщиной около 1 м, лежащий на воде. Тогда как расчет сделан в предположении, что лед занимает все полупространство. Также отметим очень хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов для точки 3.

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что результаты измерений радиояркой температуры

космическим радиометром SMOS/MIRAS являются достоверными. Отличие расчетных и экспериментальных данных объясняется неоднородной структурой земной поверхности и в связи с большими размерами пиксела, радиояркая температура формируется как результат совместного действия разнородных составляющих этой поверхности. В связи со случайной в своей основе структурой почвы и ее покровов, представляется необходимым использование статистического подхода к определению радиояркой температуры почвы и, тем самым, к определению ее влажности [3].

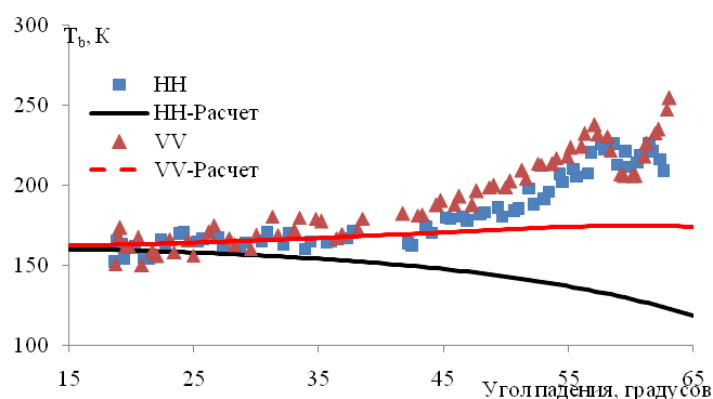


Рис. 5. Поляризационно-угловые зависимости радиояркой температуры оз. Байкал (точка 1; 16.02.2013 г.; расчет: $T = 175$ К; $\epsilon' = 3,15$; $\epsilon'' = 0,01$; $h = 0$).

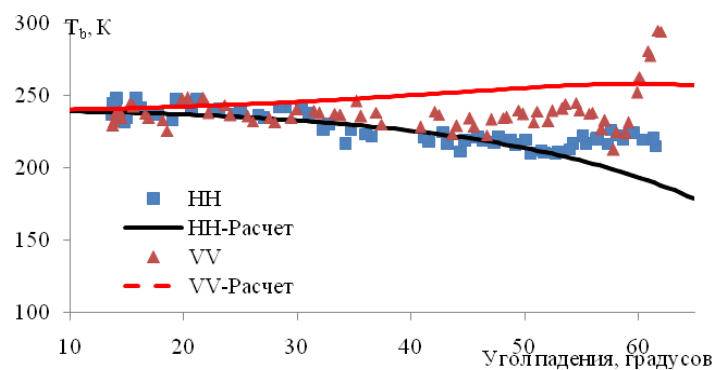


Рис. 6. Поляризационно-угловые зависимости радиояркой температуры мерзлой почвы (точка 2, 16.02.2013 г.; расчет: $T = 258$ К; $\epsilon' = 3$; $\epsilon'' = 0,01$; $h = 0$).

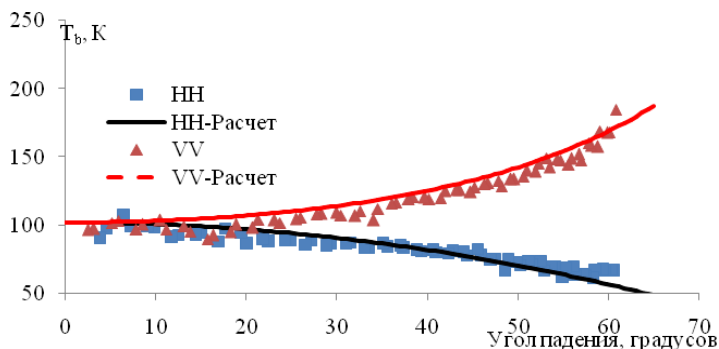


Рис. 7. Поляризационно-угловые зависимости радиояркой температуры моря (точка 3; 16.02.2013 г.; расчет: $T = 293$ К; $\epsilon' = 80$; $\epsilon'' = 30$).

Библиографические ссылки

1. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission: Mission Performance and Operations // S. Mecklenburg, M. Drusch, Y. Kerr et. al. / IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. Vol. 50, № 3. P. 606–612.
2. Миронов В. Л. Микроволновое зондирование почв. Новосибирск : Науч.-издат. центр СО РАН, 2000.
3. Дагуров П. Н. Микроволновая радиометрия статистически-неоднородной поверхности // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 31–32.

References

1. Mecklenburg S., Drusch M., Kerr Y. et. al. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission: Mission Performance and Operations. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2012, vol. 50, no. 3, pp. 606–612.
2. Mironov V. L. Mikrovolnovoye zondirovaniye pochv (Microwavesensing of soils). Novosibirsk, Nauchno-izdatel'skiy tsentr SO RAN, 2000.
3. Dagurov P. N. Izvestiya vuzov. Fizika. 2012, vol. 55, no. 8/2, p. 31–32.

© Дагуров П. Н., Дмитриев А. В.,
Базаров А. В., Раднаева С. Б., 2013

УДК 621.391.14

ОБОРУДОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ РАДАРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Т. А. Лепехина, В. И. Николаев, М. А. Семенов, И. В. Чарыков, В. С. Чикачев

Научно-производственный центр «СПУРТ»

Россия, 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 4. E-mail: tatonika@inbox.ru

Представлен облик радиолокационного полигона для задач калибровки и валидации космических РСА с позиций системного подхода. Целью работы является создание полигона, позволяющего в сжатые сроки подтверждать сквозные характеристики РСА и контролировать качество его выходного продукта, а также проводить периодические калибровки радиометрической шкалы радиолокатора.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), калибровка, валидация, системный подход, уголкового отражатели, активная контрольная станция.

TEST RANGE EQUIPMENT FOR SPACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR CALIBRATION AND VALIDATION

T. A. Lepekhina, V. I. Nikolaev, M. A. Semenov, I. V. Charykov, V. S. Chikachev

Scientific Production Centre "SPURT"

4 1-st Zapadny passage, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia. E-mail: tatonika@inbox.ru

An outline of radar test range for spaceborne SAR calibration and validation using system approach is presented. The goal of the investigation is creating a range permitting SAR through performances approval, its resultant data quality verification procedures, and radiometric scale calibration recurrent routines. Region choice for test range deployment, measured SAR parameter set and metrological means configuration foundation is given in the paper.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), calibration, validation, system approach, corner reflector, active receiver/transponder.

Расширение круга задач, для решения которых применяют радиолокационные изображения (РЛИ), обусловило предъявление к современным РСА повышенных требований как к измерительным средствам. Потребителям необходимо не только высокое разрешение изображения, но и возможность получить из снимка геометрические характеристики объектов, а также электродинамическую и радиометрическую информацию.

В настоящее время существует ряд космических РСА с высоким разрешением, работающих в разных

диапазонах частот, поэтому потребитель располагает широким ассортиментом РЛИ, полученных в различных режимах съемки, с разной глубиной обработки и значительно отличающихся по стоимости. Для того чтобы РЛИ, полученные космическим РСА, были конкурентоспособными и гарантировали пользователю решение его задач, процедуры калибровки и валидации необходимо проводить как после вывода радиолокатора на орбиту, так и периодически в процессе эксплуатации, что является достаточно сложной научно-технической и организационной задачей.

Наряду с определением параметров, по которым оценивается качество РЛИ, в данной работе будут рассмотрены следующие аспекты этой задачи: 1) разработка единой системы наземных, летных и валидационных испытаний, которая позволит значительно сократить время и затраты на проведение процедур калибровки и валидации; 2) выбор территории для размещения полигона; 3) определение требований к метрологическим средствам и их аппаратно-программной реализации.

Традиционно, основным показателем качества РЛИ является пространственная разрешающая способность, характеризующая его детальность. Кроме того, требуется определение координат объектов на РЛИ, а также учет геометрических искажений с точностью до размеров элемента разрешения. Привлечение космических радиолокаторов к исследованию природных, сельскохозяйственных ресурсов и мирового океана обуславливает повышение требований к РСА по радиометрическим характеристикам: радиометрической разрешающей способности, определяющей возможность различения на РЛИ поверхностей (объектов), отличающихся по удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) на величину, не меньшую заданной; динамическому диапазону и шумовому эквиваленту, характеризующему чувствительность РСА. Подтверждение этих характеристик является задачей валидации. Для обеспечения измерения ЭПР объектов и удельной ЭПР местности по изображению с требуемой точностью проводится процедура радиометрической калибровки РСА. Для геометрической калибровки требуется полигон с радиомишенями, имеющими точную геодезическую привязку.

Значительные затраты на обустройство полигонов и проведение калибровки РСА с использованием их измерительных средств оказались вполне оправданными: уже первые снимки, полученные TerraSAR-X, полностью соответствовали требованиям, предъявляемым к качеству РЛИ [1], а RADARSAT-1, благодаря периодической калибровке, более 9 лет позволял получать изображения без ухудшения качества [2].

После вывода РСА на орбиту процедуры калибровки и валидации должны проводиться в сжатые сроки. Например, Европейское космическое агентство отводит на полетную калибровку и валидацию PCA Sentinel-1 не более 3 месяцев [3]. Большое внимание уделяется проблеме заблаговременного выбора полигона с учетом возможных сценариев калибровки, размеров территории и климатических условий. Например, размещение полигона в Svalbard обеспечивало бы, благодаря высокой зоне покрытия, проведение до 34 измерений за цикл, однако этот вариант был отклонен из-за неблагоприятных климатических условий полярного района.

При выборе места расположения полигона необходимо принимать во внимание, в первую очередь, ландшафтно-климатические особенности территории, поскольку местный климат, характерная растительность и рельеф предопределяют структуру полигона и состав тестовых объектов. Предпочтение следует отдавать географическим районам с климатом, обес-

печивающим всесезонность осуществления наблюдений и измерений, предпочтительно на удалении от техногенных зон. Для размещения полигона необходимо выбирать участок, позволяющий избежать зон, характеризующихся частыми осадками. Не менее важно учесть как среднегодовое количество осадков, так и среднегодовую температуру в области расположения испытательного полигона.

В ходе создания и ввода в эксплуатацию к радиолокационным полигонам предъявляются следующие общие требования: радиолокационные характеристики калибровочных объектов должны быть хорошо исследованными; поверхность тестовых участков должна была близкой к ламбертовской (равномерно рассеивающей); все искусственные объекты на полигоне должны сохранять стабильность характеристик. Полигон должен иметь геодезические привязочные метки, пассивные отражатели с большой ЭПР, имеющие точную геодезическую привязку, для юстировки наведения антенны. Полигон и его измерительные средства должны проходить периодическую калибровку и иметь метрологические паспорта.

Реализуя системный подход к испытаниям РСА на всех этапах его жизненного цикла, предлагается для определения пространственной разрешающей способности использовать единые методики, базирующиеся на методе импульсного отклика. Разрешающая способность по дальности и азимуту определяется по ширине сечений радиолокационного изображения точечной цели на уровне -3 дБ [4]. Для уточнения результата измерения по дискретному изображению выполняется его интерполяция. Привязка результата измерения к масштабу на местности выполняется путем пересчета координат по известной длине стороны квадрата миры, установленной на полигоне и состоящей из 9 отдельных уголкового отражателей, расположенных квадратом в 3 ряда по 3 единицы. Одна из диагоналей квадрата расположена перпендикулярно к маршруту полета носителя. Расстояние между соседними уголковыми отражателями комплекта задается одинаковым и не менее 10 элементов разрешения: 100 м для режимов высокого разрешения, 1 000 м для среднего. ЭПР уголкового отражателя комплекта должна быть одинаковой и быть по меньшей мере на 40 дБ выше ЭПР участка фона, равного по площади элементу разрешения РСА: $15...30$ дБм² для режимов высокого разрешения, не менее 49 дБм² (длина ребра уголкового отражателя с треугольными гранями не менее 2 м в X-диапазоне) для среднего разрешения.

Для режимов низкого разрешения (300 м, 1 000 м) требуются УО с размером ребра более 5 м, что затрудняет их изготовление, транспортировку и обслуживание. Вместо пассивных отражателей целесообразно использовать активные транспондеры или активную контрольную станцию (АКС).

Активные устройства целесообразно применять для решения следующих задач: создание дискретного отражателя с большой ЭПР и равномерной диаграммой рассеяния в широком диапазоне углов при небольших собственных размерах; селекция и форми-

рование сигналов с требуемой поляризацией, в том числе с поляризацией возвращенной волны, отличающейся от падающей; регулировка имитируемой ЭПР; имитация сложных целей. Активные устройства, по сравнению с пассивными отражателями, позволяют контролировать больший набор характеристик радиолокатора и обеспечивают значительно более высокую точность измерений. Активные транспондеры могут создаваться на базе широконаправленных рупорных антенн. Точность их калибровки и стабильность установленного значения ЭПР может достигать 0,1 дБ [5].

Особенностью АКС [6] является ее возможность принимать, регистрировать, обрабатывать сигналы, излучаемые бортовой радиолокационной аппаратурой, измерять их параметры, а также генерировать и излучать контрольные сигналы, которые могут быть приняты аппаратурой РСА, обработаны в трактах приема и преобразования и переданы обратно на наземные пункты приема, где из них будет извлечена нужная информация. Главным достоинством АКС являются ее возможности по определению радиометрических характеристик радиолокаторов.

В настоящее время радиометрическая разрешающая способность РСА, как правило, не проверяется экспериментально, а оценивается расчетным путем. Это связано, в том числе, с отсутствием природных и сложностью создания искусственных поверхностно-распределенных объектов, содержащих ряд участков большой площади с однородной и калиброванной УЭПР, отличающейся с заданным шагом. Имеющиеся природные объекты с равномерной калиброванной УЭПР, такие как леса бассейна Амазонки, бореальные леса в Канаде и ледовый купол в Антарктиде, используются для радиометрической калибровки РСА по абсолютному значению.

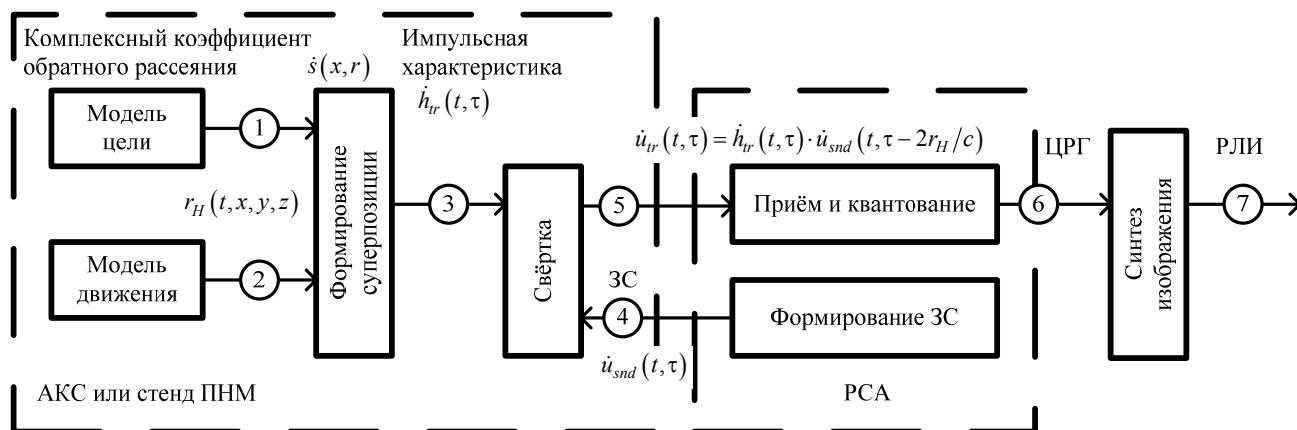
Аппаратно-программными средствами АКС может выполняться имитация траекторных сигналов, соответствующих съемке одиночных, групповых, протяженных и поверхностно-распределенных целей с заданными характеристиками, что позволяет проводить уточненную радиометрическую калибровку и экспериментальное определение радиометрических характеристик РСА [7]. Структура алгоритма

имитации траекторных сигналов для испытаний РСА приведена на рисунке.

Предварительно строится модель снимаемого объекта 1 как двумерного поля комплексного коэффициента рассеяния в радиолокационных координатах (наклонная дальность-азимут). В соответствии с известным или моделируемым законом движения спутника 2 строится матрица импульсных характеристик для каждого зондирующего импульса в сеансе, имитирующих суперпозицию его отражений от элементов земной поверхности 3. Эти операции выполняются заблаговременно. Зондирующий сигнал 4 принимается от проверяемого РСА, и вычисляется свертка 5 огибающей каждого импульса ЗС с предварительно рассчитанной импульсной характеристикой фильтра.

Полученная в результате матрица представляет собой массив данных имитированного отраженного сигнала, загружаемый в генератор сигналов произвольной формы для воспроизведения и подачи на вход приемника РСА. В зависимости от вида испытаний и конфигурации аппаратуры, подача имитированного сигнала на РСА может осуществляться от АКС (при летных испытаниях), через измерительную антенну или коаксиальный кабель (при наземных испытаниях). Записанная ЦРГ 6 при летных испытаниях передается на наземный РЛК, содержащий систему синтеза изображения, по радиолинии. При наличии бортовой системы синтеза изображения готовое РЛИ 7 передается на НРЛК для анализа с целью определения сквозных характеристик РСА. При наземных испытаниях ЦРГ принимается с выхода информационного интерфейса РСА штатным или технологическим запоминающим устройством, а затем обрабатывается системой синтеза РЛИ. Также имеется возможность записи на измерительный АЦП сигналов с контрольных выходов промежуточных сечений приемного тракта РСА и тестового сигнала 5 с выхода генератора для самоконтроля аппаратуры стенда.

Описанные методики используются для экспериментального определения сквозных характеристик космического РСА при лабораторно-отрабаточных испытаниях макета с использованием стенда натурного моделирования. При этом выполняется разработка и отладка унифицированного программного



Структура алгоритма имитации траекторных сигналов для испытаний РСА

обеспечения для автоматизированного определения сквозных характеристик РСА путем анализа РЛИ типовых целей с заданными характеристиками. Для аппаратной имитации и регистрации сигналов при наземных испытаниях в составе стенда применяется комплект приборов производства Agilent Technologies. В дальнейшем планируется использование отечественных модульных приборов Информтест, а в перспективе – разработка специализированных блоков компактной конструкции для серийного производства АКС, которые будут устанавливаться на радиолокационных полигонах.

Учитывая, что сейчас в нашей стране нет специализированных радиолокационных полигонов, их создание и оборудование является важной и насущной задачей. Географически требуемый полигон может быть расположен в Забайкалье или на юге Бурятии, южнее г. Улан-Удэ: незначительное количество осадков (существенно влияющих на измерения в Х-диапазоне), невысокий растительный покров, рельеф с требуемыми перепадами высот, отсутствие техногенных объектов, наличие трудовых ресурсов и производственных мощностей, а также имеющийся центр космической связи недалеко от г. Улан-Удэ создают благоприятные условия для устройства радиолокационного полигона требуемой площади в этом районе [8].

В настоящее время для проведения процедур калибровки и валидации космического РСА высокого разрешения может быть использован украинский полигон Скрипай [9] с установленными на нем мирами из угловых отражателей для измерения пространственного разрешения и динамического диапазона. Юстировка наведения антенны выполняется по искусственным объектам полигона с известной геодезической привязкой. Для режимов низкого и среднего разрешения целесообразно установить на полигоне активные транспондеры.

Применение описанных единых методик для измерения пространственных и радиометрических характеристик космического РСА на всех этапах его жизненного цикла позволяет значительно сократить временные и материальные затраты на проведение летных испытаний и процедур калибровки и валидации.

Предложенная аппаратно-программная реализация активной контрольной станции дает возможность экспериментального определения радиометрических характеристик космического РСА в процессе валидации, а также периодической калибровки его радиометрической шкалы.

Библиографические ссылки

1. TerraSAR-X Calibration Results / M. Schwerdt, B. Bräutigam, M. Bachmann, B. Döring // Proc. of EUSAR'2008. 2008. Vol. 1. P. 91–94.
2. From Commissioning to Extended Mission: 9 Years of Maintaining RADARSAT-1 Image Quality Performance / S. Cote, S. Srivastava, P. Le Dantec, B. Hawkins // Proc. of EUSAR'2006. P. 093.
3. In-Orbit Calibration Plan of Sentinel-1 / M. Schwerdt, B. Döring, M. Zink, D. Schrank // EUSAR'2010. P. 350.
4. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Исследование аппаратной функции отклика фрагмента космическо-

го радиолокатора дистанционного зондирования Земли // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XIX Междунар. Крымская конф. КрыМиКо, 2009. Т. 2. С. 951–953.

5. Linking Reference Target Properties to Its Perceived RCS in SAR Images / B. Döring, P. Looser, M. Jirousek, M. Schwerdt // Proc. of EUSAR'2012. P. 9.

6. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Активная контрольная станция для задач валидации и калибровки космического РСА // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXI Междунар. Крымской конф. КрыМиКо, 2011. Т. 2. С. 1063–1064.

7. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Экспериментальное определение радиометрического разрешения космического РСА // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXII Междунар. Крымской конф. КрыМиКо, 2012. Т. 2. С. 1009–1010.

8. Zakharova L., Darizhapov D., Kirpizhekova I. Study of Natural Objects in Transbaikalia by means of Polarimetry and Polarimetric Interferometry // Proc. of EUSAR'2004. P. 733.

9. Полигонно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования / Л. М. Атрошенко, А. Н. Горобец, А. Л. Костриков и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXII Междунар. Крымской конф. КрыМиКо, 2012. Т. 2. С. 1005–1006.

References

1. Schwerdt M., Bräutigam B., Bachmann M. Döring B. TerraSAR-X Calibration Results. Proc. of EUSAR'2008, vol.1, pp.91-94.
2. Cote S., Srivastava S., Le Dantec P., Hawkins B. From Commissioning to Extended Mission: 9 Years of Maintaining RADARSAT-1 Image Quality Performance. Proc. of EUSAR 2006, ID: 093.
3. Schwerdt M., Döring B., Zink M., Schrank D. In-Orbit Calibration Plan of Sentinel-1. – EUSAR 2010, p. 350.
4. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. The 19th International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2009. P. 951–953.
5. Döring B, Looser P., Jirousek M., Schwerdt M. Linking Reference Target Properties to Its Perceived RCS in SAR Images. Proc. of EUSAR 2012, p.9.
6. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. The 21st International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2011. P.429–430.
7. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. The 22nd International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2012. P. 1009-1011.
8. Zakharova L., Darizhapov D., Kirpizhekova I., Study of Natural Objects in Transbaikalia by means of Polarimetry and Polarimetric Interferometry. Proc. of EUSAR 2004, p. 733.
9. Atroshenko L. M., Gorobets N. N., Gorobets A. N., Kostrikov A. L., Krasnogorskiy M. G., Lebedev A. S., Malyukov V. M., Ratushnaya E. S. The 22nd International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2012. P.1005–1007.

© Лепехина Т. А., Николаев В. И., Семенов М. А., Чарыков И. В., Чикачев В. С., 2013

УДК 528.855

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПОЛИГОННО-КАЛИБРОВОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Л. М. Атрошенко, Н. Н. Горобец¹, М. Г. Красногорский, В. М. Малюков²

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

Украина, 61022, Харьков, площадь Свободы, 4. E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

²Открытое акционерное общество Военно-промышленная корпорация «НПО машиностроения»
Россия, 143966, Реутов, ул. Гагарина, 33

Рассматривается полигонно-калибровочный комплекс (ПКК) для верификации и валидации радиолокационных изображений (РЛИ). По результатам летного эксперимента: съемки ПКК «Скрипали» (Украина) КА «Radarsat-2» и анализа полученных изображений сделан вывод о принципиальной готовности ПКК для подтверждения характеристик РЛИ с КА «Кондор-Э» на этапе летных испытаний КА и верификации и валидации РЛИ других систем.

Ключевые слова: полигонно-калибровочный комплекс, угловой отражатель, маркер, разрешающая способность, опорная точка.

EXPERIENCE OF CREATION OF THE GROUND CALIBRATION POLYGON COMPLEX FOR THE SPACE SYNTHETIC APERTURE RADAR TESTING

L. M. Atroshenko, N. N. Gorobec¹, M. G. Krasnogorskiy, V. M. Malukov²

¹ Kharkov National University named after V. N. Karazina

4 Svobody square, Kharkov, 61022, Ukraine. E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

²JSC "Military and industrial corporation of "SPA Mashinostroyeniye"

33 Gagarin st., Reutov, Moscow Region, 143966, Russia. E-mail: almaz0030@mail.ru

The presented calibration polygon complex (CPC) is intended for verification and validation of radar images (RI). Results of the flight experiment: imaging of CPC "Skrpali" (Ukraine) by the S/C "Radarsat-2" and the subsequent analysis of the gained images have led to the conclusion about basic readiness CPC for acknowledging of RI performances from S/C "Kondor-E" at a stage of flight tests and verification and validation RI from other systems.

Keywords: calibration polygon complex, angular reflector, marker, resolution, control points.

Комплексная проверка качественных характеристик получаемых снимков и калибровка спецаппаратуры на этапе проведения летных испытаний КА и штатной эксплуатации обычно проводится с использованием наземного оборудования полигонно-калибровочного комплекса (ПКК), оснащенного необходимыми метрологическими средствами. В качестве метрологических средств могут быть использованы различного рода миры, отражатели и т. д., что зависит от диапазона длин волн спецаппаратуры, используемой для получения снимков и оцениваемых характеристик снимков.

В настоящее время нет готовых для использования по назначению ПКК, поэтому, принимая во внимание теоретические разработки и их практическое применение работ [1; 2], реализованных в рамках темы «Открытое небо» было принято решение о разработке ПКК для МКА «Кондор-Э»

МКА «Кондор-Э» является многоцелевым космическим аппаратом легкого класса, который предназначен для получения информации в интересах задач социально-экономического развития и коммерческого использования методом дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Бортовая аппаратура космического аппарата реализует принцип радиолокационного наблюдения земной поверхности.

Космический аппарат обеспечивает наблюдение Земной поверхности в диапазоне 80° с. ш. – 80° ю. ш., а получаемая информация позволяет решать коммерческим потребителям следующие задачи:

- картографирование и мониторинг за природными ресурсами;
- экологический мониторинг заданных территорий с целью предупреждения о катастрофах и бедствиях природного и техногенного характера;
- геологическая разведка местности при строительстве объектов социально-экономического назначения и градостроительства;
- Контроль ледовой обстановки в северных широтах и проводка морских судов;
- контроль за нахождением морских судов в территориальных водах в местах интенсивного лова рыбы;
- поиск судов, терпящих бедствие;
- контроль оползневых процессов на склонах дамб и инженерных гидротехнических сооружений;
- контроль просадок (вспучиваний) почвы техногенного и природного характера;

– обнаружение поверхностно-активных пленок на водных поверхностях, а также утечек ряда загрязняющих веществ.

МКА состоит из универсальной космической платформы со служебными бортовыми системами и модуля полезной нагрузки, который комплектуется радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА). Основные характеристики МКА приведены в таблице.

Для проверки и периодического подтверждения сквозных характеристик РСА, оценки радиометрической чувствительности РСА, периодической калибровки радиометрической шкалы и оценки точности привязки получаемых радиолокационных изображений к географическим координатам в настоящее время разработан и апробирован полигонно-калибровочный комплекс [3].

ПКК размещается на территории Харьковской области (Украина).

В состав метрологических средств ПКК входят пять маркеров ПКК – центральный (точка прицеливания) и граничные (вблизи углов ПКК), состоящие из четырех трехгранных уголковых отражателей (УО), с треугольными гранями, ориентированных в верхнюю полусферу. По своим характеристикам маркеры обеспечивают ЭПР на уровне 20–40 дБ.

Маркеры размещены на стационарных опорных устройствах – плоских деревянных платформах, поднятых на высоту 2,5 м над поверхностью земли. Также выполнены краевые маркеры контрольно – калибровочного комплекса (ККК) ПКК.

На ПКК организовано в виде пикетов и абрисов около 300 опорных точек, на каждой из которых согласно плану эксперимента могут быть в случайном или регулярном порядке размещены метрологические средства. Выделено более 20 эталонных участков – площадок $25 \times 25 \text{ м}^2$, сохраняющих изоморфность инфраструктуры и отражающих характеристик в любых сезонных и погодных условиях.

ККК состоит из потенциальной миры для оценки радиометрической чувствительности и динамического

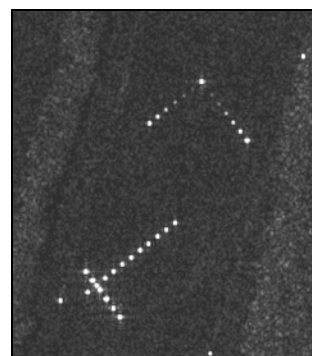
диапазона РСА и пространственной миры для оценки пространственной разрешающей способности РСА, состоящих из самофазированных трехгранных уголковых отражателей с треугольными гранями.

Метрологические средства располагаются на опорно-поворотных устройствах, обеспечивающих их переориентацию и исключающих влияние переотражений, на подстилающей поверхности с УЭПР –30 дБ.

Все метрологические средства ПКК аттестованы и сертифицированы.

Итогом разработки и создания ПКК на данном этапе явилось проведение летных испытаний, которые состоялись 14.02.2012 г. с привлечением КА «RadarSat-2» ($\lambda = 5,6 \text{ см}$).

Фрагмент РЛИ ККК с потенциальной и пространственной мирами приведен на рисунке. Как видно, созданные метрологические средства и разработанные методы их установки и ориентации обеспечивают получение надежных данных для оценки основных характеристик РСА космического базирования.



РЛИ ККК с двумя мирами УО и краевыми маркерами

РЛИ ПКК в целом, несмотря на сложные погодные условия (метель, $t_{\text{воз.}} = -300^\circ\text{C}$), обеспечило возможность оценки разрешения по приращению уровня обратного рассеяния сцен, точной ($p > 0,99$) географической привязки всех тестируемых объектов.

Основные характеристики МКА

Наименование	Значение		
Параметры рабочей орбиты: – высота; – наклонение	450–900 км до 98°		
Режимы работы РСА	Детальный прожекторный (ДПР) Детальный непрерывный (ДНР) Обзорный (ОР)		
Характеристики наблюдения:	ДПР	ДНР	ОР
– разрешение, м	1–2	1–3	5–30
– полоса захвата, км	10×10	10×15	200
– длина маршрута, км	–	до 150	до 800
– полоса обзора, км	2×500		
– поляризация	Н и/или V		
Длины волны, см	$\sim 9,6$ (S-диапазон)		
Производительность покадровой съемки (ДПР)	до 30 кадров в сутки		

Летные испытания показали [4], что созданный ПКК, разработанные метрологические средства и способы их установки обеспечивают возможность валидации, верификации и калибровки характеристик РСА и полученных с их использованием РЛИ.

Специальное описание и оборудование территории ПКК может быть расширено и унифицировано, что значительно расширяет возможности наземного обслуживания ДЗЗ из космоса.

Библиографические ссылки

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. М.: Радиотехника, 2010.
2. Толстов Е. Ф., Яковлев А. М., Карпов О. А. Радиолокационный комплекс аппаратуры наблюдения в программе «Открытое небо» // Радиотехника. № 11. Серия «Радиолокационные системы и системы радиоправления». 1995. № 2. Вып. 6. С. 54–57.
3. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования / Л. М. Атрошенко, Н. Н. Горобец, А. Н. Горобец и др. // Вестник Харьк. нац. ун-та им. В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». Вып. 20. № 110. С. 3–9.
4. Летно-экспериментальные испытания полигонно-калибровочного комплекса подспутникового полигона «Скрипалі» («Скрипачи», «Violinists») / Л. М. Атрошенко, Н. Н. Горобец, А. Н. Горобец и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : X Всеросс. открытая конф. (12–16 ноября 2012, г. Москва).

References

1. Verba V. S., Neronский L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya (Radar remote sensing space-based). Moscow, Radiotekhnika, 2010. 514 p.
2. Tolstov E. F., Iakovlev A. M., Karpov O. A. Ser. "Radiolokacionnye systemy i sistemy radioupravleniya" no. 2 (6), 1995, pp. 54–57.
3. Atroshenko L. M., Gorobec N. N., Gorobec A. N., Krasnogorskiy M. G., Kostrikov A. L., Kupko V. S., Lebedev A. S., Malukov V. M., Ratushnaia E. S. Vestnik Xar'kovskogo nacional'nogo universiteta im. V. N. Karazina. Ser. "Radiofizika i elektronika", no. 20 (110), pp. 3–9.
4. Atroshenko L. M., Gorobec N. N., Gorobec A. N., Kostishkin S. I., Krasnogorskiy M. G., Lebedev A. S., Malukov V. M., Ratushnaia E. S. 10-ya Vserossiyskaya otkritaya konferenciya «Sovremennye problemi distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa» (10th National Open Conference "Modern problems of remote sensing of the Earth from Space"), Moscow, Space Research Institute, 12–16 November 2012.

© Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М., 2013

УДК 621.391.14

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕРКИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ПРИ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Т. А. Лепехина, В. И. Николаев

Научно-производственный центр «СПУРТ»

Россия, 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 4. E-mail: tatonika@inbox.ru

Рассматриваются основные проблемные вопросы летных испытаний космических РСА: организация и планирование экспериментов с целью сокращения временных и материальных затрат, выбор методов и формирование единого подхода к определению сквозных характеристик. Изложены методики проверки основных характеристик РСА с помощью метрологических средств радиолокационного полигона.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), калибровка, пространственная разрешающая способность, радиометрическая разрешающая способность, системный подход.

SOME PROBLEMS OF SPACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR PRINCIPAL PERFORMANCE VERIFICATION IN FLIGHT TESTS

T. A. Lepekhina, V. I. Nikolaev

Scientific Production Centre "SPURT"

4 1-st Zapadny passage, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia. E-mail: tatonika@inbox.ru

The most debatable aspects of spaceborne SAR flight tests are considered in the paper. Those are: designing an experiment for time and cost saving; technique selection and unified approach developing for SAR through performance determination. SAR principal performance verification methods using radar test range metrological facilities are presented.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), calibration, spatial resolution, radiometric resolution, flight tests.

При летных испытаниях впервые проводятся проверки соответствия характеристик космического РСА требованиям по назначению в реальных условиях, поэтому организации, методическому и аппаратно-программному обеспечению испытаний должно быть уделено самое серьезное внимание. Особое значение летные испытания приобретают в случае, когда запуск космического РСА высокого разрешения осуществляется после длительного перерыва.

Для сокращения времени и затрат на проведение летных испытаний требуется их четкая организация на основе следующих принципов: системный подход к построению единых методик наземных, летных и валидационных испытаний, основанный на общем системном критерии; преемственность методов и результатов измерения сквозных характеристик при наземных и летных испытаниях; единство определений основных характеристик РСА и интерпретации результатов их измерений.

Одной из важнейших сквозных характеристик РСА является пространственное разрешение. Для его измерения обычно используются два метода: метод импульсного отклика и критерий Рэлея. В работе [1] показана взаимосвязь между результатами измерений, полученными с использованием этих методов. В методиках, базирующихся на методе импульсного отклика, реализован системный подход к измерению пространственного разрешения: в качестве системного критерия используется ширина сечений функции отклика на одиночную точечную цель [2]. Преимущество этих методик в том, что они могут быть реализованы на всех этапах жизненного цикла изделия.

Аппаратной реализацией этих методик при наземных испытаниях является шлейфовый контроль [3], который может применяться как при автономных испытаниях РСА, так и при комплексных в составе КА в безэховой камере или на антенном полигоне. Результаты проверки функции отклика, полученные при наземных испытаниях, протоколируются для последующего сравнения с аналогичными результатами летных испытаний, так как большинство РСА имеет функцию встроенного шлейфового контроля. Таким образом, непосредственно после запуска РСА проводится измерение функции отклика по встроенному шлейфу. Хорошее совпадение с результатами наземных испытаний свидетельствует о сохранении работоспособности РСА после вывода на орбиту.

Для геометрической привязки и юстировки наведения антенны целесообразно использовать уголкового отражателя с достаточной ЭПР и геодезической привязкой, установленный на радиолокационном полигоне. Для определения пространственного разрешения проводится съемка квадратной миры из 9 уголкового отражателей. Полученная цифровая радиоголограмма (ЦРГ) обрабатывается средствами испытательного программного обеспечения с усреднением результатов по всем 9 отражателям и приведением к масштабу, привязанному к координатам на местности [4].

Если описанные выше методики позволяют однозначно определить и измерить пространственное разрешение, то единых определений радиометрических

характеристик и методик их измерения до сих пор не выработано. Предлагается использовать методику определения радиометрической разрешающей способности, основанную на методе дифференциального радиоконтраста [5]. Преимуществом этого метода является возможность однозначного определения радиометрического разрешения по вероятностному критерию и автоматического анализа радиолокационного изображения. Метод основан на подсчете вероятности того, что для пары точек, случайным образом выбранных из участков РЛИ поверхностей с различными УЭПР, радиояркость элемента изображения участка с большей УЭПР окажется больше. Критерием радиометрического разрешения для заданного соотношения УЭПР участков является вероятность правильного обнаружения не менее 0,67.

Для практической реализации этого метода необходимо наличие ряда поверхностно-распределенных целей достаточной площади с простой геометрической формой, имеющих однородную калиброванную УЭПР, отличающуюся на заданную величину. Так как подобных целей в природе не существует, для измерения радиометрических характеристик предлагается воспользоваться их аппаратно-программной имитацией с помощью активной контрольной станции [6]. Для измерения радиометрических характеристик (разрешения, шумового эквивалента и динамического диапазона) необходимо имитировать ряд однородных поверхностно-распределенных целей, соответствующих требованиям для проверяемого режима: 1) соотношение УЭПР смежных участков должно соответствовать требованию по радиометрическому разрешению; 2) минимальное значение УЭПР должно быть на 3...5 дБ ниже расчетного значения шумового эквивалента; 3) соотношение максимального значения УЭПР и расчетного значения шумового эквивалента при экспериментальном определении последнего должно быть на 3...5 дБ ниже, а при экспериментальном определении динамического диапазона – на 3...5 дБ выше расчетного значения динамического диапазона РЛИ; 4) должен иметься участок с нулевым коэффициентом рассеяния, по которому определяется уровень собственного шума [5].

Для привязки радиометрической шкалы РСА, определяющей связь коэффициента радиолокационного рассеяния снимаемых объектов с численными значениями радиояркостей их РЛИ, необходима радиометрическая калибровка, выполняемая в два этапа. Первичная калибровка выполняется путем съемки природных поверхностно-распределенных объектов, имеющих однородную на большой площади и стабильную УЭПР [7]. Результатом такой калибровки является уточнение диаграммы направленности антенны и коэффициента, компенсирующего зависимость затухания сигнала от угла места, с остаточной постоянной ошибкой, составляющей около 1 дБ, обусловленной наличием флуктуаций и незначительных сезонных колебаний УЭПР природного объекта.

Окончательную радиометрическую калибровку, позволяющую уменьшить остаточную ошибку до 0,3 дБ и учесть возможную нестабильность коэффициента

усиления радиотракта, предлагается периодически осуществлять путем съемки активной контрольной станции, обеспечивающей имитацию точечных целей с калиброванной ЭПР.

Для повышения точности измерений необходима калибровка коэффициента усиления собственного радиотракта активной контрольной станции с точностью до 0,1 дБ, а также может применяться дополнительная модуляция ретранслированного сигнала для глубокого подавления отклика от подстилающей поверхности [8].

Анализируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

Для успешного проведения летных испытаний требуется специально оборудованный радиолокационный полигон с установленными на нем угловыми отражателями, имеющими калиброванную ЭПР и проходящими периодическую поверку, и активной контрольной станцией.

Для сокращения временных и материальных затрат целесообразно как можно больший объем измерений выполнять при наземных испытаниях радиолокатора, а затем, используя единые методики, провести летные испытания и сравнить полученные результаты с целью уточнения сквозных характеристик космического РСА.

Использование метода импульсного отклика и единого системного критерия позволяет проводить наземные и летные испытания по единым методикам. Установлена однозначная взаимосвязь между разрешающей способностью по критерию Рэля и шириной функции отклика на точечную цель на основе вероятностного метода.

Метод дифференциального радиоконтраста и разработанные на его базе методики обеспечивают однозначное определение радиометрических характеристик РСА путем автоматического анализа РЛИ. Предложен способ формирования калиброванных испытательных воздействий для реализации измерений радиометрического разрешения, шумового эквивалента и динамического диапазона по этому методу.

Периодическая радиометрическая калибровка РСА с помощью активной контрольной станции обеспечивает повышение качества РСА как измерительного инструмента для исследования свойств снимаемых объектов по их радиометрическим характеристикам.

Библиографические ссылки

1. Лепехина Т. А., Николаев В. И., Толстов Е. Ф. Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика // II Всерос. Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конф. (26–28 июня 2012, г. Муром). Муром : ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С. 486–490.
2. Лепехина Т. А. Методика применения моделей комплекса наземной отработки при проведении испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли : материалы VII науч.-техн. конф. М. : МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. С. 225–230.
3. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Стенд полунатурного моделирования для проверки сквозных характеристик космических РСА апертурой // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли : материалы VII науч.-техн. конф. М. : МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. С. 231–236.
4. Программно-математическое обеспечение для оценки показателей качества радиолокаторов с синтезированной апертурой / А. А. Баталов, Т. А. Лепехина, В. И. Николаев, М. А. Семенов // II Всерос. Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конф. (26–28 июня 2012, г. Муром). Муром : ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С. 471–475.
5. Лепехина Т. А., Николаев В. И. Вопросы экспериментального подтверждения сквозных характеристик космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Радиолокация, навигация, связь : материалы XVIII междунар. науч.-техн. конф. (RLNC'2012). Воронеж : ОАО «Концерн «Созвездие», 2012. Т. 3. С. 1725–1737.
6. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Experimental determination of spaceborne SAR radiometric resolution / Microwave & Telecommunication Technology: the 22nd Intern. Conf. Ukraine, 2012. P. 1009–1011.
7. Canadian Government Calibration Operations: Imaging Performance Update in the Fifteenth Year of Service [Electronic resource] / S. Cote, S. Srivastava, S. Muir, R. Hawkins URL: <http://sarvc.ceos.org/documents/doc/41>.
8. An innovative calibration concept for space SAR using an active antenna with improved efficiency, reliability and radiometric accuracy / J. Richard, K. Dumper, F. Heliere, C. Buck // Proc. of EUSAR'2006. P. 026.

References

1. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I., Tolstov E. F. Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Radiofizicheskie metody v distancionnom zondirovanii sred». Murom: Izd.-poligraficheskij centr MI VIGU, 2012. 567 p. ISSN 2304-0297 (CD-ROM), pp. 486–490.
2. Lepekhina T. A. Materialy VII nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sistemy nabljudeniya, monitoringa i distancionnogo zondirovaniya Zemli». Moscow, MNTORJeS im. A. S. Popova, Adler, 2010, p. 225–230.
3. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Materialy VII nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sistemy nabljudeniya, monitoringa i distancionnogo zondirovaniya Zemli». Moscow, MNTORJeS im. A. S. Popova, g.Adler, 2010, p. 231–236.
4. Batalov A. A., Lepekhina T. A., Nikolaev V. I., Semenov M. A. Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Radiofizicheskie metody v distancionnom zondirovanii sred». Murom, Izd.-poligraficheskij centr MI VIGU, 2012. 567 c. ISSN 2304-0297 (CD-ROM), p. 471–475.
5. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Materialy XVIII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konf. «Radiolokacija, Navigacija, Svjaz» (RLNC*2012). Voronezh, OAO «Koncern «Sozvezdie», 2012, vol. 3, p. 1725–1737.
6. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Experimental Determination of Spaceborne SAR Radiometric Resolution.

The 22nd International Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2012. P. 1009–1011.

7. Cote S., Srivastava S., Muir S., Hawkins R. Canadian Government Calibration Operations: Imaging Performance Update in the Fifteenth Year of Service. CEOS

SAR calibration and validation workshop 2010. Available at: <http://sarcv.ceos.org/documents/doc/41>.

8. Richard J., Dumper K., Heliere F., Buck C. An innovative calibration concept for space SAR using an active antenna with improved efficiency, reliability and radiometric accuracy. Proc. of EUSAR 2006, ID: 026.

© Лепехина Т. А., Николаев В. И., 2013

УДК 537.867+523.034.43

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ И ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МНОГОЧАСТОТНЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ «КОМПАКТ»

С. Л. Внотченко, М. Ю. Достовалов, Р. В. Ермаков, Т. Г. Мусинянц, Е. П. Севалкина

Научно-исследовательский институт точных приборов
Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51. E-mail: kotik_55@mail.ru

*Представлены результаты зондирования земной и водной поверхности, полученные авиационным много-
частотным радиолокационным комплексом РСА «КОМПАКТ». Комплекс устанавливается на борту вертоле-
та Ми-8 и функционирует одновременно в четырех диапазонах (X, L, P, VHF). С его использованием был полу-
чен большой объем экспериментальных данных, направленных на решение следующих задач: анализ отра-
жающих характеристик объектов и фонов в разных диапазонах, оценка затухания РЛ сигнала в лесных масси-
вах, наблюдение объектов на водной поверхности.*

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, РСА, РСА «КОМПАКТ».

THE RESULTS OF MULTIFREQUENCY SAR OBSERVATIONS WITH 4-BAND AIRBORNE RADAR COMPLEX «COMPACT»

S. L. Vnotchenko, M. Y. Dostovalov, R. V. Ermakov, T. G. Moussiniants, E. P. Sevalkina

Research Institute of Precise Instruments
51 Dekabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: kotik_55@mail.ru

*Multifrequency airborne SAR "Compact" was designed to operate in X, L, P and VHF band, mounted on board of
Mi-8 helicopter without the need of any platform modification. The comparative analysis of backscattering properties
for some natural surfaces was performed with the use of generated SAR images. Backscatter coefficients for surfaces
for different bands were calculated. The examples of 4-band SAR observations are demonstrated. The joint use of multi-
frequency radar data seems to be an interesting instrument in SAR image analysis of natural surfaces and water areas.*

Keywords: synthesized aperture radar, SAR, multifrequency SAR.

Применение синхронной многочастотной радио-
локационной (РЛ) съемки является перспективным
направлением повышения информативности систем
наблюдения на основе РСА космического и авиа-
ционного базирования.

Исследования в области многочастотных РЛ сис-
тем проводятся в ОАО «НИИ ТП» в течение длитель-
ного времени. В 2005 г. был разработан авиационный
РЛ-комплекс функционирующий в X- и L-диапазонах [1].
Следующая модификация комплекса (2007 г.) вклю-
чала РСА L- и VHF-диапазонов (0,23 и 2,5 м соответ-
ственно) [2; 3]. В 2009 г. была проведена летная от-
работка 3 диапазонного комплекса (X-, L- и P-диапазоны),
а в 2011 г. комплекс РСА «КОМПАКТ» был модерни-
зирован для одновременной работы четырех диапазо-
нов (X, L, P, VHF) на борту вертолета Ми-8 без необ-
ходимости доработки носителя (рис. 1).

Основной задачей РЛ-комплекса было обеспече-
ние возможности проведения многоканальных радио-
локационных экспериментов, в том числе, и в длин-
новолновом диапазоне, в удаленных районах без не-
обходимости использования специализированного но-
сителя, с целью снижения затрат на проведение экс-
периментальных работ. Аппаратура РСА, включая
не только электронные компоненты, но и VHF антен-
ну и калибровочные отражатели, может перевозиться
на пассажирском самолете и легко транспортировать-
ся в любой необходимый район работ.

Создание подобного комплекса потребовало ре-
шения большого числа научно-технических задач
в различных областях: аппаратное построение, систе-
мы, сегмент обработки информации, проблемы обес-
печения электромагнитной совместимости.

Характеристики комплекса РСА «КОМПАКТ».

Радиолокационный комплекс РСА «КОМПАКТ» состоит из четырех РСА, функционирующих независимо друг от друга, навигационного комплекса, и рабочего места управления и контроля, объединенных в бортовую локальную вычислительную сеть. Комплекс управляется одним оператором с использованием средств удаленного доступа. Основные параметры системы представлены в табл. 1 и подробно освещены в [4].

Особенностью данного комплекса является возможность получения калиброванной РЛ-информации. Для калибровки экспериментальных данных использовались наборы уголкового отражателя. Для калибровки X-диапазона применялись треугольные отража-

тели с длиной ребра 0,5 м. Для калибровки остальных диапазонов применялись треугольные отражатели с длиной ребра 1 м. Данные отражатели были прокалиброваны в L- и VHF-диапазонах в VV- и HH-поляризациях. В рамках калибровки были определены максимальные значения ЭПР отражателей, а также угловые зависимости ЭПР-диаграммы обратного рассеяния.

Результаты многочастотной РЛ съемки. Результаты синхронной четырехдиапазонной съемки РЛ-комплекса «КОМПАКТ» представлены на рис. 2. Фрагмент сюжета включает области лесных массивов различной степени однородности и плотности, поля, населенный пункт, участки шоссе и железной дороги.



Рис. 1. Размещение антенн X- и L-диапазонов в иллюминаторах, вид снаружи (слева) и размещение антенн P- и VHF-диапазонов (справа). Антенна P-диапазона крепится за иллюминатор, а антенна VHF-диапазона устанавливается в штатный люк вертолета Ми-8

Таблица 1

Параметры комплекса РСА «КОМПАКТ»

Наименование	X	L	P	VHF
Центральная частота (МГц)	8 550	1 310	430	140
Полоса сигнала (MHz)	300	100(200)	80	50 (40)
Размеры антенны (m)	0,25 × 0,25	Ø 0,35	Ø 0,5	1,3 × 0,1
Мощность импульса (W)	60	250	200	150



X-диапазон (3,5 см)



L-диапазон (23 см)



P-диапазон (70 см)



VHF-диапазон (2,15 м)

Рис. 2. Результаты синхронной четырехдиапазонной съемки РЛ-комплекса «КОМПАКТ». Сюжет включает области лесных массивов, поля, населенный пункт, участки шоссе и железной дороги

Результаты сравнительного анализа изображений сюжета, полученных в разных каналах, показывают, что даже в длинноволновых диапазонах характерен существенный уровень отражений от растительных покровов. Рисунок демонстрирует, что в областях леса отраженный сигнал остается интенсивным даже в диапазонах Р и VHF, в то время как на открытых участках в данных диапазонах он существенно снижается.

Усредненные по нескольким изображениям результаты измерений уровней УЭПР участков травы и леса, выраженные в децибелах, представлены в табл. 2.

Для анализа характеристик отражения и затухания сигнала в лесных массивах в разных частотных диапазонах были проведены специальные экспериментальные исследования. Оценка ослабления РЛ-сигнала при распространении в лесной среде проводилась путем сравнения мощностей сигналов угловых отражателей, находящихся в области РЛ тени с сигналами аналогичных отражателей, размещенных на открытой местности.

Отражатели устанавливались вдоль прямой линии таким образом, чтобы один из них был размещен непосредственно в лесу, один или два находились в области радиолокационной тени на разных расстояниях от кромки леса, а остальные устанавливались на открытом (незатененном) участке. Измерения мощностей отраженных сигналов проводились по отметкам отражателей на сформированных радиолокационных изображениях.

Анализ результатов показал, что ослабление радиолокационных сигналов играет определяющую роль для высокочастотных (L- и еще большую для X-) диапазонов. Измеренные уровни погонного затухания при распространении через лес составили 1–2 дБ/м для X- и 0,2–0,4 дБ/м для L-диапазона.

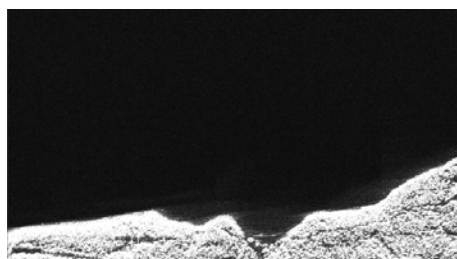
В то же время ослабление существенно снижается для низкочастотных радиосигналов и составляет порядка 0,15 дБ/м для Р- и ~0,05 дБ/м для VHF-диапазона, т. е. для данного диапазона лес оказывается практически прозрачен. Однако, при этом происходит снижение уровня отраженного сигнала от цели с одной стороны, и, с другой стороны, сохраняется относительно высокий уровень отражения от самого лесного массива, что в определенной степени ограничивает возможность наблюдения объектов скрытых в растительности в РЛ-диапазоне.

С использованием многочастотного РЛ-комплекса РСА «Компакт» была проведена серия экспериментов по наблюдению акваторий. Во время наблюдений в длинноволновых диапазонах были обнаружены характерные отражающие свойства волновых следов от движущихся судов на водной поверхности. Кадры, представленные на рис. 3 показывают, что волновые следы в X-диапазоне не наблюдаются совсем, но, в то же время отчетливо видны в L, Р и VHF диапазонах. При этом оказалось, что во многих случаях следы в VHF-диапазоне являются весьма стабильными и отчетливо наблюдаются длительное время (более 30 мин).

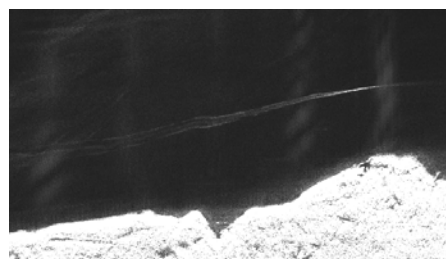
Таблица 2

Усредненные уровни УЭПР травы и леса в X-, L- и VHF-диапазонах

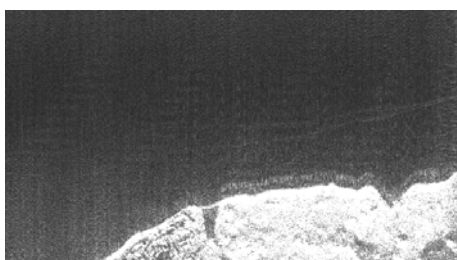
	Трава, σ^0 , дБ	Лес, σ^0 , дБ	Контраст, дБ
X-диапазон VV	–12	–11	~1
L-диапазон VV	–22	–10	12
VHF-диапазон VV	–28	–12	16



X-диапазон (3,5 см)



L-диапазон (23 см)



Р-диапазон (70 см)



VHF-диапазон (2,15 м)

Рис. 3. Синхронная многочастотная РЛ-съемка водной поверхности. Результаты наблюдения волновых следов судов. Кадры показывают, что волновые следы в X-диапазоне не наблюдаются совсем, но в то же время отчетливо видны в L-, Р- и VHF-диапазонах

В работе были продемонстрированы результаты, полученные авиационным многочастотным радиолокационным комплексом РСА «КОМПАКТ». Комплекс может быть установлен на борту вертолета Ми-8 и функционирует одновременно в четырех диапазонах (X, L, P, VHF).

Многочастотная РЛ-съемка с использованием длинноволновых диапазонов в настоящее время является областью, в которой явно ощущается недостаток экспериментальных данных. Использование представленного комплекса РСА с борта обычного вертолетного носителя позволяет существенно удешевить и расширить объемы экспериментальных работ. При этом в ряде случаев обнаруживаются интересные отражающие свойства объектов – как на суше, так и на водной поверхности.

Получение наборов данных экспериментальной РЛ-информации в необходимых объемах и разработка средств комплексного количественного ее анализа позволяет в перспективе ожидать появления эффективных методик применения РЛ-данных для решения различных задач.

Библиографические ссылки

1. Dostovalov M., Lifanov A., Moussiniants T. Comparative Analysis of Images Obtained by Two-frequency (X, L band) Airborne SAR // 6th European Conf. on SAR, EUSAR'06 (16–18 May 2006, Dresden). P. 151.
2. Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства «Компакт» (принципы реализации и опыт применения) / С. Л. Внотченко, М. Ю. Достовалов,

А. В. Дьяков и др. // Радиолокация и радиосвязь : материалы III Всерос. конф. (26–30 окт. 2009, г. Москва). С. 326–340.

3. Dostovalov M. Y., Ermakov R. V., Moussiniants T. G. L and VHF Band Airborne SAR. System Features and Comparative Image Analysis // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. № 10. P. 3639–3647.

4. Сравнительный анализ характеристик отражения объектов и фоновых поверхностей по РЛ изображениям высокого разрешения в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах / С. Л. Внотченко, М. Ю. Достовалов, Р. В. Ермаков и др. // Исследование Земли из космоса. 2009. № 3. С. 16–26.

References

1. Dostovalov M., Lifanov A., Moussiniants T. Comparative Analysis of Images Obtained by Two-frequency (X, L band) Airborne SAR. 6th European Conf. on SAR, EUSAR-06, 16–18 May, 2006, Dresden, Germany. P. 151.
2. Vnotchenko S., Dostovalov M., Dyakov A., Dyakov I., Ermakov R. III Vserossiiskaya konferencia “Radiolocacia i radiosvyaz” (Materials III All-Russian. Conf. “Radiolocation and radio”). Moscow, 26–30 oct 2009, pp. 326–340.
3. Dostovalov M. Y., Ermakov R. V., Moussiniants T. G. L and VHF Band Airborne SAR. System Features and Comparative Image Analysis. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2011. № 10, pp. 3639–3647.
4. Vnotchenko S. L., Dostovalov M. Y., Ermakov R. V., Moussiniants T. G. Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2009, № 3, pp. 16–26.

© Внотченко С. Л., Достовалов М. Ю., Ермаков Р. В., Мусинянц Т. Г., Севалкина Е. П., 2013

УДК 629.7

СИНТЕЗ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫХ В БОРТОВОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ «СЕВЕРЯНИН»

М. Ю. Достовалов, А. И. Коваленко, В. М. Костусьяк, В. В. Римап, С. Г. Судоргин

Научно-исследовательский институт точных приборов
Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51. E-mail: kostusyak@yandex.ru

Рассматриваются возможности синтеза и использования изображений земной поверхности полученных с помощью радиолокатора космического базирования. Анализируются схема визирования, устройство бортовой антенны и параметры траектории космического аппарата. Решены проблемы навигационного обеспечения радиолокационных данных и временной привязки радиолокационной информации. Приводятся примеры и характеристики реальных изображений.

Ключевые слова: бортовой радиолокационный комплекс, дистанционное зондирование земли, радиолокационное изображение, алгоритм синтеза.

SYNTHESIS OF EARTH SURFACE RADAR IMAGES RECEIVED IN "SEVERYANIN" SPACEBORNE RADAR SYSTEM

M. J. Dostovalov, A. I. Kovalenko, V. M. Kostusyak, V. V. Riman, S. G. Sudorgin

Scientific Research Institute of Precision Instruments
51 Dekabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: kostusyak@yandex.ru

The possibilities of the synthesis and use of the earth surface images obtained using space-based radar are considered. The main problem solved by radar is information support navigation of ships along the Northern Sea Route. Scheme sensing, device on-board antenna and trajectory parameters of the spacecraft are analyzed. Spaceborne radar set to the radiation phase-shift keyed signal. Navigation support radar data and timing of radar data problems have been solved. Examples and characteristics of real images are represented. Basic calculations performed in the synthesis of radar data are described. Earth probing radar is now considered a promising way to diagnose the environment.

Keywords: spaceborne radar system, remote sensing of the earth, radar image, synthesis algorithm.

Бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК) «Северянин-М», характеристики которого представлены в [1; 2] – предназначен для сканирования поверхности Земли в радиодиапазоне в целях обеспечения безопасности мореплавания, исследования ледового покрова, мониторинга наводнений, гидрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства.

Отличительной особенностью зондирования земли в радиолокационном диапазоне является возможность проводить съемку в любую погоду.

Основная задача, решаемая с помощью БРЛК – это информационное обеспечение навигации судов по Северному морскому пути. Для решения данной задачи предусмотрено построение РЛИ со следующими параметрами:

- размеры 750 км поперек трассы полета КА и более 4 000 км вдоль трассы полета КА, разрешение РЛИ 400 м, объем РЛИ – 22,5 млн пикселей;
- точность геометрической привязки желательна в пределах нескольких элементов разрешения;
- точность определения УЭПР желательна около 1 дБ (для оценки толщины и возраста льда, проверки наличия полыньи по курсу судна);

Работа БРЛК в составе КА осуществляется на солнечно-синхронной орбите со следующими расчетными параметрами:

- средняя высота орбиты 832 км (высота над земным сфероидом от 815 до 850 км);
- период обращения 101,3 мин $\pm$ 4 с. Выполняется 14 суточных витков;
- эксцентриситет орбиты 0,001 15;
- наклонение орбиты 98,77°;
- орбитальная скорость движения КА около 7 500 м/с;

Бортовая антенна состоит из 7 секций и имеет размер 13,4 $\times$ 0,25 м. Штатная ДНА шириной по азимуту 0,123° обеспечивает на земле ширину освещенного пятна около 3 км. Сканирование в азимутальной плоскости выполняется только за счет пролета КА. В угломестной плоскости ДНА имеет форму косекансного типа.

Так как есть ограничения по потребляемой энергии, бортовая РЛС настроена на излучение фазоманипулированного сигнала с функцией неопределенности кнопочного типа. При этом интегральный уровень

боковых лепестков составляет до + 6 дБ. Длина фазовой последовательности установлена $N = 359$ и $N = 723$ для разных режимов съемки. Есть возможности оперативной замены сигнала.

Первые примеры синтезированных РЛИ опубликованы в [3; 4]. Синтезируется РЛИ типа RAW, без дополнительной обработки, так как по снимкам нужно оценивать реальное значение УЭПР. Пример изображения тихоокеанского побережья Антарктиды приведен на рис. 1, европейской части России – на рис. 2.

Алгоритмы синтеза РЛИ, реализованные в БРЛК «Северянин-М», описаны в работе [5].

В процессе разработки методов синтеза РЛИ были решены следующие проблемы:

- навигационного обеспечения радиолокационных данных;
- временной привязки радиолокационной информации.

Основными вычислениями, выполняемыми при синтезе РЛИ, являются следующие:

- распаковка входной информации (радиоголограмма и баллистические данные) фильтрация искажений, внесенных при передаче этой информации на пункт приема по радиолинии, а также фрагментация входной информации для обработки средствами многомашинного комплекса;
- расчет пространственного и временного распределения доплеровских частот по периферии РЛИ является основополагающим алгоритмом для синтеза качественного РЛИ земной поверхности в БРЛК «Северянин-М». Из-за большого объема вычислений расчет доплеровских частот выполняется поэтапно средствами многомашинного комплекса. Вследствие этого, расчет доплеровских частот реализован фрагментами по временной последовательности исполнения и по месту исполнения в многомашинном комплексе;
- синтез парциальных РЛИ путем применения спектральных преобразований согласованной фильтрации;
- формирование полного РЛИ и файла геометрической привязки.

На данном этапе исследований достигнуты следующие характеристики РЛИ:

- точность геометрической привязки 0,5–8 км;
- точность определения УЭПР около 3 дБ.

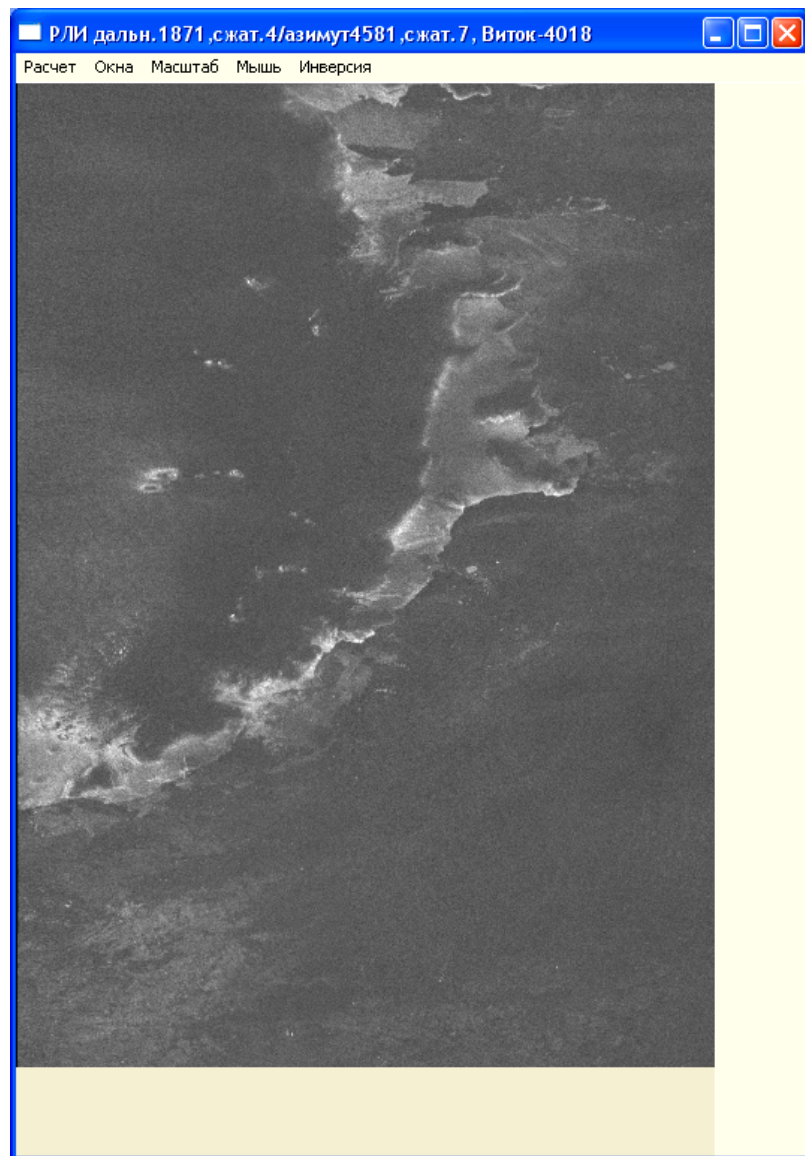


Рис. 1

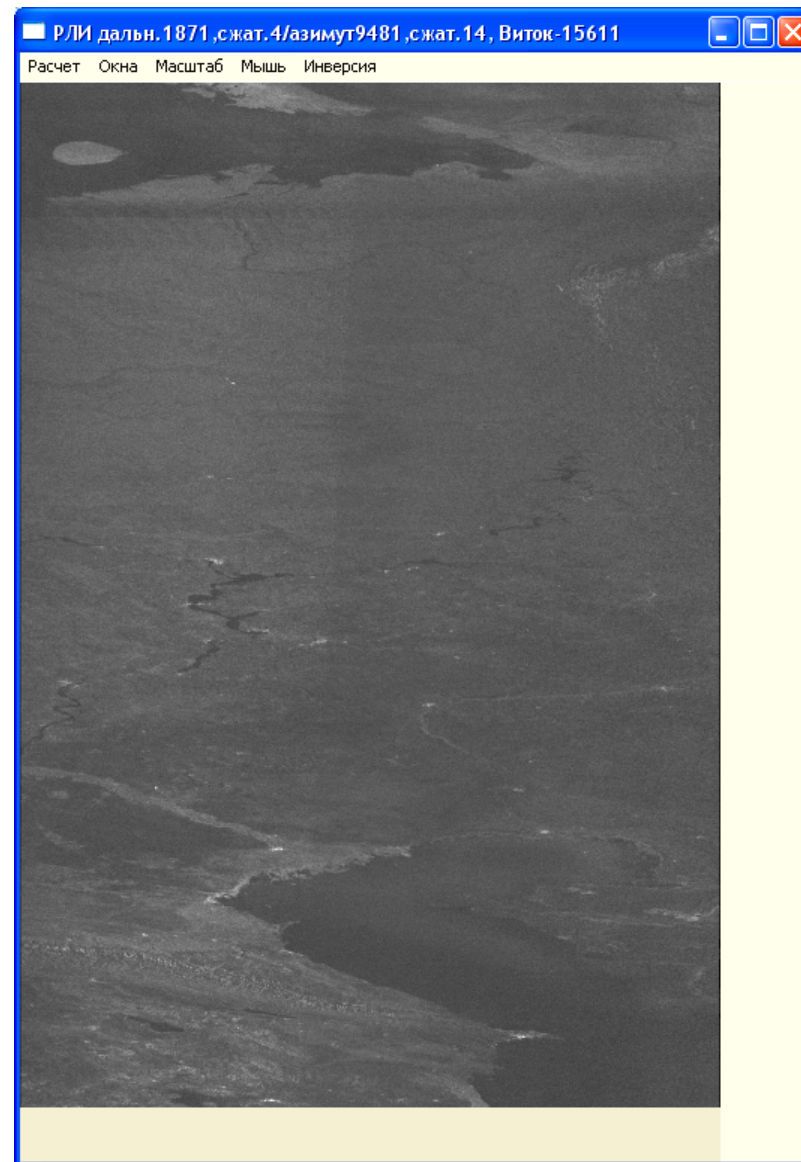


Рис. 2

Общим положительным результатом проведенных исследований является тот факт, что радиолокационное зондирование поверхности земли сейчас считается перспективным способом диагностики окружающей среды. Согласно действующей Федеральной космической программе России на 2006–2015 гг. второй спутник космического комплекса «Метеор-3М» будет запущен в 2013 г. Он должен соответствовать первому по назначению и составу и дополнять его с целью улучшения параметров обзорности и периодичности.

Библиографические ссылки

1. Чуркин А. Л. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» со спутником «Метеор-М» // Геоматика. 2009. № 3.
2. Системные принципы реализации космического радиолокатора «Северянин-М» / С. Л. Внотченко, А. И. Коваленко, В. В. Риман и др. // Радиолокация и радиосвязь : материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. (29.11–03.12.2010, г. Москва) / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. М., 2010. С. 279–293.
3. Космический радиолокатор «Северянин-М» с широкой полосой съемки / С. Л. Внотченко, М. Ю. Достовалов, В. С. Дудукин и др. // Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой : материалы Рос. науч. конф. (06.09–10.09.2010, г. Улан-Удэ) : электрон. сб. докл. / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. М., 2010. С. 72–84.
4. Wide-Swath Spaceborne SAR System «Severyanin-M» For Remote Sensing: First Results / S. Vnotchenko, M. Dostovalov, V. Dudukin et al. // EUSAR 2012 : 9th

Europ. Conf. on Synthetic Aperture Radar (23–26 April 2012, Nurnberg). P. 422.

5. Сборник алгоритмов БРЛК «Северянин-М». НИИТП. Рег. № НТК-11/978(a) от 08.12.2008.

References

1. Churkin A. L. GEOMATIKA 2009. № 3.
2. Vnotchenko S. L., Kovalenko A. I., Riman V. V., Telichev A. V., Chernishov V. S., Shishanov A. V. IV Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya "Radiolokaciya i svyaz" (Proceedings of IV All-Russia scientific and engineering. Conf. Radiolocation and radio), 29.11–3.12.2010, Moscow, Izdanie JRE im. V. A. Kotelnikova RAN, Moscow, 2010, p. 279–293.
3. Vnotchenko S. L., Dostovalov M. J., Dudukin V. S., Kovalenko A. I., Musinyants T. G., Riman V. V., Selyanin A. I., Smirnov A. I., Shishanov A. V. Rossiyskaya nauchnaya konferenciya «Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovanoy aperturoy» (The Russian researcher. Conf. "Probing Earth's surface with a synthetic aperture radar"). 06.09–10.09.2010. Ulal-Ude. Elektronnyy sbornik dokladov, Izdanie JRE im. V. A. Kotelnikova RAN, Moscow, 2010. p. 72–84.
4. Vnotchenko S., Dostovalov M., Dudukin V., Kovalenko A., Musinyants T., Riman V., Selyanin A., Smirnov S., Telichev A., Chernishov V., Shishanov A. Wide-Swath Spaceborne SAR System "Severyanin-M" For Remote Sensing: First Results EUSAR 2012 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Electronic Proceedings, 23–26 April 2012, Nurnberg, Germany, p. 422–kovalenko.pdf
5. Sbornik algoritmov BRLK «Severyanin-M». NIITP. Reg. № НТК-11/978(a) 08.12.2008.

© Достовалов М. Ю., Коваленко А. И., Костусьяк В. М., Риман В. В., Судоргин С. Г., 2013

УДК 528.85

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОЗЕРА БАЙКАЛ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА 2010 г. ПО ДАННЫМ ALOS PALSAR*

Н. В. Родионова¹, А. В. Филатов², А. В. Евтюшкин²

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук
Россия, 141190, Фрязино Московской области, площадь им. акад. Б. А. Введенского, 1.
E-mail: rnv@ire.rssi.ru

²Балтийский федеральный университет имени И. Канта,
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14.
E-mail: AnFilatov@kantiana.ru, AYevtyushkin@kantiana.ru

Осуществлена текстурная RGB-сегментация с использованием статистик второго порядка Харалика одноканальных изображений ледяного покрова оз. Байкал по радарным данным ALOS PALSAR в сезоне зимы-весна. Сделано сравнение с кластеризацией изображений. Подсчитаны текстурные параметры и фрактальный размер в 140 точках вдоль становой трещины Т1 для января и марта, и сделано предположение о возможной связи изменений текстуры с временной и пространственной динамикой деформации льда.

Ключевые слова: одноканальное изображение, ледяной покров, текстурные признаки, статистики второго порядка, сегментация, фрактальный размер, становой трещины.

* Радарные данные ALOS/PALSAR предоставлены Японским агентством аэрокосмических исследований по гранту 09/JAXA/AEO № 022300.

LAKE BAIKAL ICE COVER TEXTURE FEATURES CHANGE DURING THE FREEZING PERIOD OF THE YEAR 2010 DUE TO ALOS PALSAR DATA

N. V. Rodionova¹, A. V. Filatov², A. V. Evtyushkin²

¹Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences
1 Vvedensky square, Fryazino, Moscow region, 141190, Russia. E-mail: rnv@ire.rssi.ru

²Baltic Federal University
14 A. Nevskiy st., Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: AnFilatov@kantiana.ru; AYevtyushkin@kantiana.ru

The textural segmentation of lake Baikal ice cover have been done by means of GLCM, using ALOS PALSAR one channel images in freezing period of 2010 year. The textural features and surface fractal dimension have been calculated in 140 points along the crack T1 for January and March, and texture change connection with temporal and spatial ice deformation dynamics is hypothesized.

Keywords: one channel image, ice cover, texture features, second order statistics, segmentation, fractal dimension.

Ледяной покров озера Байкал является природным полигоном для изучения закономерностей деформационных процессов в протяженном бассейне с установившейся структурой подледных течений. Дистанционное зондирование ледяного покрова из космоса позволило изучать глобально деформационные процессы на ледяной поверхности за весь период ледостава, который в среднем длится с начала января до первых чисел мая. В данной работе для исследования ледяного покрова оз. Байкал были использованы четыре SLC (single look complex) радиолокационных изображения (РЛИ) южной части озера, полученные японским аппаратом ALOS/PALSAR, L-диапазона, HH поляризации, угол съемки 34°, даты съемки 21.01.10, 07.02.10, 08.03.10, 25.03.10. Исходный размер файлов 9344 × 18432 пикселей, при сжатии в 2 раза по строкам пространственное разрешение равно ~ 7 м.

Исходные изображения являются одноканальными, т. е. получены на одной частоте с одной поляризацией. Информация в одноканальных данных ограничена интенсивностью отраженного сигнала (пиксельная информация) и текстурой (пространственная информация, определяемая в некоторой окрестности пиксела). В работе [1] авторами подсчитана средняя относительная интенсивность радарного отражения от ледяного покрова и средние значения трех статистик второго порядка для рассматриваемых исходных данных, что в результате позволило авторам сделать определенные выводы о динамике деформации льда в период ледостава. Цель данной работы более детально изучить динамику изменения текстуры ледяного покрова южной части оз. Байкал на РЛИ и выявить возможную связь изменений текстуры с временной и пространственной динамикой деформации льда.

В данной работе текстура описывается статистическими методами с помощью текстурных признаков Харалика [2], которые определяются через матрицу смежности. Из множества текстурных признаков (ТП) были выбраны два некоррелирующих признака: контраст (мера распространения уровней яркости) и обратный момент (мера локального сходства). Третьим признаком рассматривалась энтропия – мера беспорядка на изображении. ТП вычислялись на изображениях в движущемся окне [5×5] пикселей при N = 32,

где N – количество строк (и столбцов) матрицы смежности. В результате осуществлена текстурная RGB-сегментация исходных изображений и сделано сравнение с изображениями, полученными применением кластерного анализа. Выявлено изменение ТП и фрактального размера поверхности по 140 точкам вдоль становой трещины Т1, что позволило связать изменения текстуры с изменениями ледяного покрова в окрестности трещины.

Ледяной покров на озере Байкал в период ледостава. Замерзает Байкал целиком, кроме небольшого, в 15–20 км протяженностью, участка, находящегося в истоке Ангары. Возникающие при понижении температуры сжимающие усилия во льду, встречая сопротивление изрезанных берегов, к которым «припаян» панцирь по всему контуру озера, рвут лед на поля с размером сторон 10–30 км, при этом между ними образуются термические швы, называемые на Байкале станowymi щелями. Местоположение и направление щелей мало меняется, ширина их постоянно колеблется от 0,5 до 4 м. Ледяные бугры, образующиеся при подвижках льда вдоль станowych трещин, могут достигать 10–12-метровой высоты.

На динамику формирования, деформации и разрушения льда Байкала влияют разные факторы: это и сама форма байкальской впадины с протяженностью, равной 636 км, и шириной 25–79 км, метеословия, подледные течения. Способность льда к значительному тепловому расширению приводит к тому, что при средней ширине акватории Байкала порядка 50 км одноактное суточное расширение покрова льда может достигать 45,4 м, а ночью при понижении температуры соответствующее сокращение, это ведет к торошению льда, поддвиганию ледяных пластин (подсовам).

Для э/м волны L-диапазона снег на ледяном покрове можно считать прозрачным в силу того, что электропроводность свежеснежного снега при $t = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ для $\lambda = 10\text{ см}$ равна $0,6 \times 10^{-4}\text{ См (сименс)/м}$, а плотного снега в 3,5 раза больше, и глубина проникновения э/м волны составляет, соответственно, 100 м и 30 м. Глубина проникновения э/м волны в пресноводный лед при $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 9 м для $\lambda = 0,3\text{ м}$.

Текстурная RGB-сегментация ледяного покрова. Сегментация – это разбиение изображения на области, удовлетворяющие некоторым критериям однород-

ности, в качестве которых могут быть яркость, текстура, цвет и другие. Сегментация является инструментом для распознавания, понимания изображений. В постановке задачи сегментации прослеживается аналогия с задачей кластеризации.

В данной работе вычисление статистик второго порядка осуществлялось на отфильтрованных с помощью фильтра Lee [3] изображениях в движущемся окне $[5 \times 5]$ пикселей с $N = 32$. Фильтрация необходима из-за сильного влияния спеклов на текстуру [4]. Зная физический смысл текстурных признаков, можно интерпретировать полученные текстурные RGB-изображения (контраст – red, энтропия – green, обратный момент – blue) в терминах параметров поверхности, а, именно, области с синим цветом соответствуют большим значениям обратного момента – это относительно гладкие поверхности, области с зеленым цветом соответствуют большим значениям энтропии – это области с повышенным хаосом, беспорядком, области с красным цветом характеризуются большими перепадами яркости в соседних точках.

Сравнение с кластеризацией, осуществленной с помощью пакета Ilwis, показывает преимущество текстурной RGB сегментация из-за возможности получить информацию об объектах на изображении без априорного знания.

Изменения текстурных параметров вдоль становой трещины T1 в период ледостава.

На исходных РЛИ есть общий фрагмент со становой трещиной T1, идущей от пос. Большие коты почти в меридиональном направлении на пос. Танхой [5] (рис. 1). В данной работе были подсчитаны значения ТП в окне $[43 \times 43]$ пиксела вдоль становой трещины T1 в направлении с севера на юг, что позволило определить пространственные изменения ТП вдоль трещины, а также временные изменения за время ледостава (ТП вычислены для двух сеансов: 21.01 и 25.03).

Причины формирования станowych трещин в одних и тех же местах связываются с разными факторами, зачастую противоречивыми. В Лиственничном заливе существует антициклоническая циркуляционная ячейка [6], причиной генерации которой является сток в Ангару. Положение этой зоны совпадает со становой трещиной T1 [5].

На рис. 2 приведены графики изменения значений ТП вдоль становой трещины T1 в направлении с севера на юг для двух сеансов (21.01 и 25.03). Конечная точка (140-ая) немного не доходит до берега (она обозначена белым кружком на рис. 1).

Проанализируем графики на рис. 2.

1. Средние значения ТП 'контраст' вблизи берега меньше, чем в средней части акватории, а значения в марте почти в 2 раза превышают значения в январе. Значительное увеличение контраста в марте возможно связано с ростом высоты бугров вдоль трещины из-за роста деформационных процессов при резких температурных перепадах, составляющих порядка 14° в марте (по температурным данным в пос. Танхой).

2. Для январского сеанса средние значения ТП «обратный момент» вблизи берега выше (меньшая шероховатость), чем в средней части, со значительными перепадами значений вдоль всей становой трещины. Значения обратного момента в марте, в отличие от января, меняются плавно со значительно меньшими перепадами. В марте значения вблизи берега почти в 1,5 раза меньше, чем в январе, что свидетельствует о том, что вблизи берега в марте поверхность вдоль трещины более шероховатая, чем в январе. Вдали от берега для некоторых зон значения обратного момента близки для обеих дат.

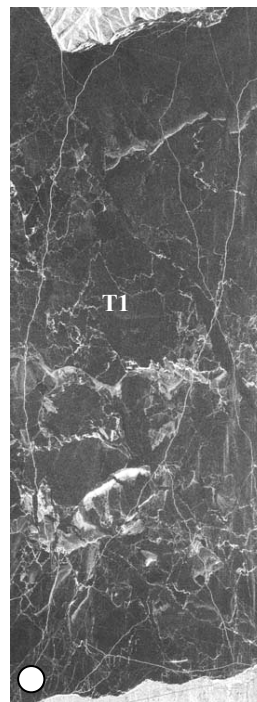


Рис.1. Фрагмент исходного РЛИ со становой трещиной T1. Дата съемки 25.03.2010 г., размер изображения 2 216 × 6 016 пикселей

3. Средние значения энтропии в январе вблизи берегов меньше, чем в средней части, со значительными перепадами значений вдоль трещины. Для марта ход изменений энтропии плавный с небольшими перепадами. Значения 'энтропии' в марте выше, чем в январе, как вблизи, так и вдали от берега, что свидетельствует о большем хаосе вдоль всей становой трещины в марте.

Для измерения силы линейной корреляционной связи ТП для двух дат воспользуемся коэффициентом корреляции Пирсона (ККП). Для ТП «контраст» ККП равен 0,59 с вероятностью ошибки, соответствующей предположению о ненулевой корреляции, равной $1,93E-14$, что свидетельствует о значительной корреляции значений контраста вдоль становой трещины T1 для января и марта. ККП для двумерной выборки значений ТП «обратный момент» равен 0,62 с вероятностью ошибки, равной $2,22E-16$ и 2-мерной выборки значений ТП «энтропия» равен 0,657 с вероятностью ошибки, равной нулю.

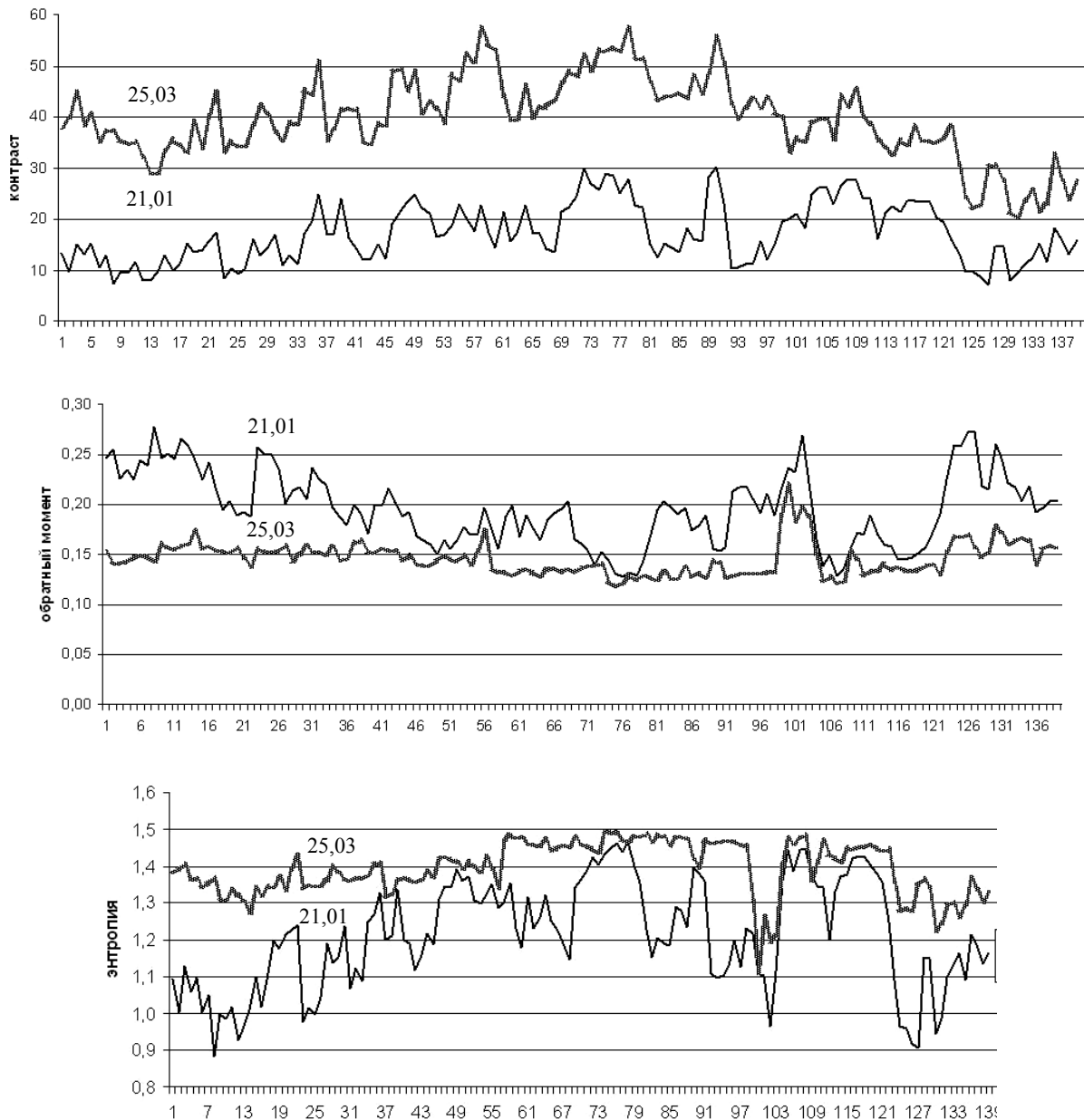


Рис. 2. Изменение значений текстурных параметров вдоль становой трещины Т1 в направлении с севера на юг для сеансов: 21.01 и 25.03

Изменения фрактального размера поверхности вдоль становой трещины Т1 в период ледостава. Фрактальный размер (ФР) обычно связывают с шероховатостью поверхности. В данной работе вычисление ФР осуществлялось с помощью пакета обработки изображений Fiji. Результат вычисления ФР поверхности в окне 43×43 пиксела вдоль становой трещины Т1 для двух сеансов 21.01 и 25.03 показан на рис. 3. В январе ФР испытывает значительные колебания значений вдоль трещины, причем средние значения вблизи берега меньше, чем вдали от берега. Для мартовского сеанса характерны стабильные на всем протяжении становой трещины высокие значения ФР, значительно превышающие соответствующие значения для января у берега. Это можно интерпретировать как стабильно высокую шероховатость вдоль всей

становой трещины в сеансе 25 марта, что подтверждает результаты, полученные при вычислении статистик второго порядка Харалика.

ККП для выборки значений ФР равен 0,434 с вероятностью ошибки, равной $8,34E-08$.

Текстурная RGB сегментация на базе статистик второго порядка Харалика позволила получить предварительную информацию об объектах на изображении без априорного знания, что является преимуществом перед кластеризацией и является шагом к классификации изображения. Значения коэффициента корреляции Пирсона для ТП вдоль становой трещины Т1 показали сильную взаимосвязь данных в январе и марте. В январе характерно увеличение шероховатости вдоль трещины по мере удаления от берега с большими перепадами значений. В марте изменения

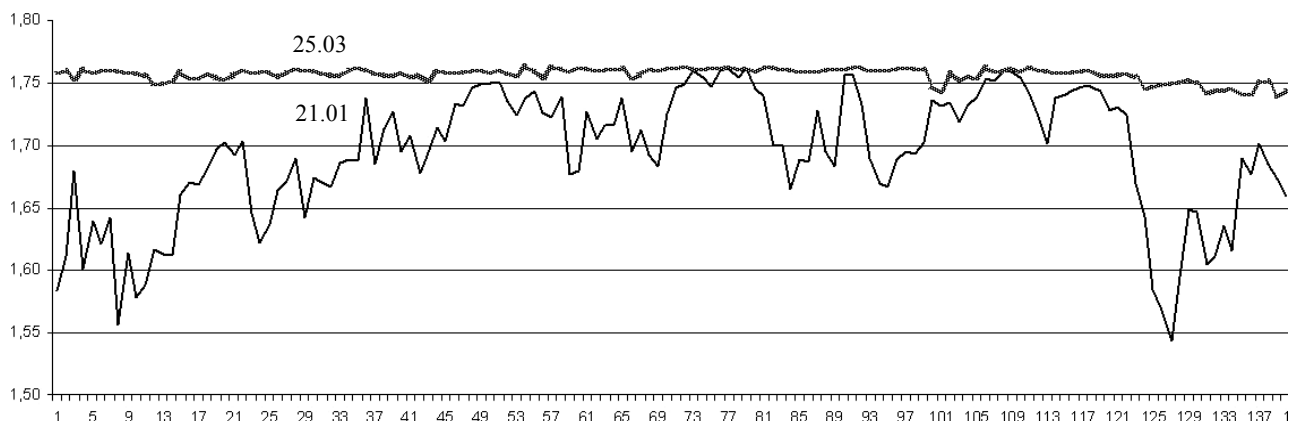


Рис. 3. Изменение значений фрактального размера поверхности вдоль становой трещины Т1 в направлении с севера на юг для двух сезонов: 21.01 и 25.03

значений ТП вдоль трещины плавные (кроме контраста) и их можно интерпретировать как стабильно большой беспорядок и повышенную шероховатость поверхности в сравнении с январскими данными. Значительное увеличение ‘контраста’ для марта связано, возможно, с ростом высоты бугров вдоль становой трещины. Изменения значений фрактального размера вдоль становой трещины подтверждают данные, полученные для ТП.

Библиографические ссылки

1. Тектурный анализ радарных изображений ледового покрова озера Байкал на основе данных ALOS PALSAR / И. И. Кирбижекова, Т. Н. Чимитдоржиев, А. С. Леонов и др. // II Всерос. Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конф. Муром : ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С. 203–208.
2. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // IEEE. Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973. № 3 (6). P. 610–621.
3. Lee J.-S. A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Trans. SMC. 1983. № 13 (1). P. 85–89.
4. Родионова Н. В. Влияние фильтрации спекл-шума на статистические характеристики поляриметрических РЛИ // Исследования Земли из космоса. 2005. № 5. С. 34–43.

5. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал / В. В. Ружич, С. Г. Псахье, Е. Н. Черных и др. // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289–299.

6. Бордонский Г. С. Причины возникновения становых трещин в ледяных покровах озер // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 69–75.

References

1. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Leonov A. S., Tubanov T. A., Tatkov G. I. II Vserossijskie Armandovskie chtenija. Radiofizicheskie metodi v distantsionnom zondirovanii sred. Materiali V Vserossijskoi nauchnoj konferentsii. Murom, 2012. 567 p. ISSN 2304-0297 (CD-ROM). pp. 203–208.
2. Haralick, R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification (1973) IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics, 3 (6), pp. 610–621.
3. Lee, J.-S. A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images (1983) IEEE Trans. SMC, 13 (1), pp. 85–89.
4. Rodionova N. V. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2005, no. 5, pp. 34–43.
5. Ruzhich V. V., Psah'e S. G., Chernih E. N., Bornjakov S. A., Granin N. G. Geologija i geofizika, 2009, 50(3), pp. 289–299.
6. Bordonskij G. S. Geografija i prirodni resursi, 2007, no. 2, pp. 69–75.

© Родионова Н. В., Филатов А. В., Евтюшкин А. В., 2013

УДК 528.85

СОПРОВОЖДЕНИЕ АРХИВА ERS-2\SAR НА ТЕРРИТОРИЮ РОССИИ*

А. В. Евтюшкин, А. В. Филатов, В. М. Брыксин

Балтийский федеральный университет имени И. Канта
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14. E-mail: AnFilatov@kantiana.ru

Рассмотрены особенности создания и хранения банка данных радиолокатора с синтезированной апертурой установленного на спутнике ERS-2. На территории России накоплено 76 тыс. кадров сенсора SAR за период с 2005 по 2011 гг.

Ключевые слова: ERS-2, SAR, радар, каталог геоданных, метаданные, MySQL, Geoserver.

ARCHIVING OF ERS-2\SAR IN RUSSIA

A. V. Yevtyushkin, A. V. Filatov, V. M. Bryksin

Baltic Federal University named after I. Kant
14 Nevskiy st., Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: AnFilatov@kantiana.ru

Features of creating and storing data bank synthetic aperture radar from satellites ERS-2. At the territory of Russia it is accumulated 76 thousand scenes of SAR sensor for the period since 2005 to 2011.

Keywords: ERS-2, SAR, radar, catalog of metadata, metadata, MySQL, Geoserver.

Успешное применение радарных данных миссий АЛМАЗ-1, SIR-C\X-SAR, JERS-1, SRTM, ALOS-1 при разработке методик зондирования почвенно-растительных покровов позволило поставить задачи по развитию технологий использования данных ERS-2 на территорию Западной Сибири [1; 2]. Прием радарных данных ERS-2\SAR осуществлялся на приемную станцию ТНА-9 на базе Югорского НИИ информационных технологий в г. Ханты-Мансийске. Данная станция дополняла зону видимости, недоступную для станций Европейского космического агентства (ESA) в Кируне, Шпицбергене и Пекине. Цель организации приема на новой станции (КМ) – обеспечение выполнения научных проектов ESA Category-1 на территорию Сибири:

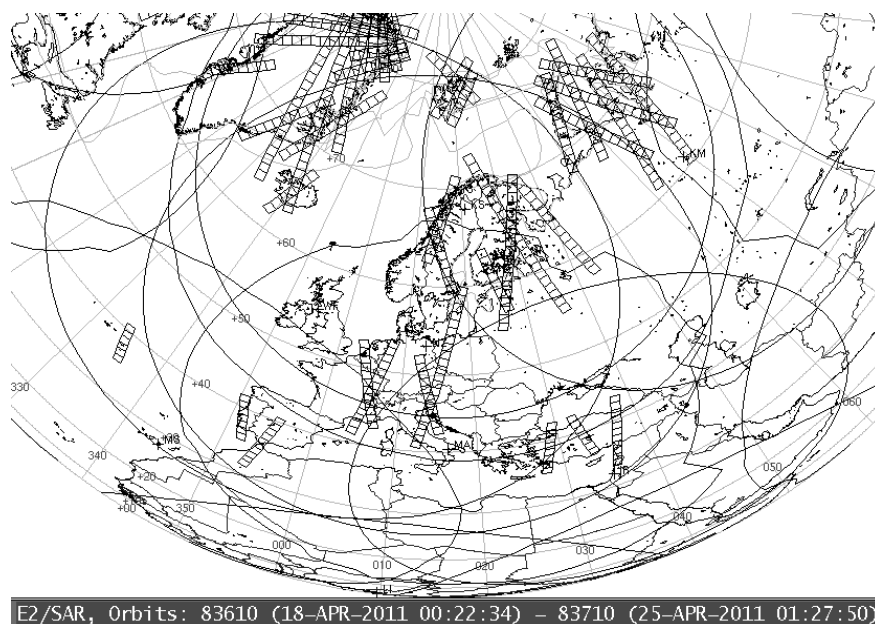
- ID 3110 «All-weather detection of forest fires and their consequences in Northern Siberia»;
- ID 3158 «Agricultural applications of remote sensing in West Siberia»;
- ID 3159 «Environmental pollution monitoring of the oil production regions using ERS-2 data»;
- ID 3161 «Application of remote sensing and GIS for flood monitoring in Western Siberia»;
- ID 3162 «Establishing the system of the near-real time space monitoring of changes in the buffer zone of pipelines with ERS-2 SAR use»;
- ID 3166 «InSAR application for monitoring of ground displacement in areas of an intensive oil recovery in Western Siberia».

Прием данных сенсора SAR в период с 22.06.05 по 4.07.11 осуществлялся на всю зону радиовидимо-

сти станции КМ от Норвегии до Забайкалья. Спутник был отключен 4.07.11 и выведен из эксплуатации, при этом его орбита понижена включением маршевых двигателей на торможение до высоты 520 км для последующего схода с орбиты в течение 15 лет. Для хранения и обработки данных SAR используются вычислительные ресурсы на базе Silicon Graphics предоставленные в бессрочное пользование безвозмездно ESA для выполнения грантов Cat-1. Орбитальные данные для планирования витков и ведения каталога поступали по FTP протоколу с центра управления ESA ESRIN. Общее число принятых качественных кадров в формате PRI составляет 76106. В 2011 г. архив данных ERS-2\SAR на 560 DLT-лентах и вычислительные комплексы Silicon Graphics с программным обеспечением были переданы ESA в Балтийский федеральный университет имени И. Канта для дальнейшего использования в научных исследованиях.

Полоса захвата сканера SAR составляет 100 км, разрешение 12,5 м, интервал между полосами перекрытия 3 сут, период повторения подспутниковых трасс 35 сут, интервал повторения витков с перекрытием в половину кадра 17 сут. Планировались сеансы длительностью до 10 мин, что соответствует протяженности 4 000 км. После плановой коррекции орбиты период повторных съемок в период с марта по июль 2011 г. составлял трое суток и число территорий мониторинга было ограничено (см. рисунок).

* Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ по гранту 13-07-00419.



План съемок ERS-2\SAR при повторе орбит в 3 сут

В результате выхода из строя систем ориентации на орбите аппарата ERS-2 после аварии в 2001 г. получаемые снимки имеют большую ошибку в геопривязке (до 1 200 м) и являются малоприспособными для интерферометрической обработки. Только для определенных пар кадров, у которых разница доплеровских центроидов не превышает половины частоты повторения зондирующих импульсов (1680 Hz), возможно получить достаточно информативную интерферограмму. Для обработки архива снимков ERS-2 в формате PRI разработан комплекс программ для отбора интерферометрических пар пригодных для расчета смещений земной поверхности на основе разности доплеровских центроидов и длины базовой линии. Использование результатов, полученных при помощи данного комплекса, совместно с поисковой системой BaseImages [3], позволяет выбрать из архива интерферометрические пары пригодные для построения ЦМР рельефа и расчета смещений.

В ходе интерферометрической обработки кадров на территорию Новой Земли, где есть естественное движение ледников, установлено, что данные ERS-2\SAR с периодом в трое суток пригодны для использования в методе интерферометрии устойчивых отражателей PSI – Persistent Scatterers Interferometry. Данный метод позволяет анализировать отдельные когерентные точки на интерферограммах, дающие высокий и устойчивый во времени уровень обратного отражения, и получать смещения с точностью до 1мм. Также на Новую Землю найдены кадры ERS-2\SAR с периодом повторного пролета 35 сут и интервалом до трех лет, пригодные для использования в методе DInSAR.

Сервер Silicon Graphics Challenge, выполняет основные задачи по вводу и обработке «сырых» данных. Основная стойка состоит из ЦПУ на базе 4 процессоров R4400 с тактовой частотой 250 МГц, оперативной памяти емкостью 320 Мб, 2 жестких дисков по 9,1 Гб

каждый, накопителя на магнитной ленте EXB8500, буферной платы CIEL, трансивера локальной сети. Дополнительная стойка включает RAID массивы на 43 Гб, 2 накопителя на магнитной ленте DLT (объем ленты 40 Гб) и других блоков необходимых для приема спутниковых данных в реальном масштабе времени. Для повышения производительности работы в пакетном режиме добавлены HDD с интерфейсом SCSI160 емкостью 8,5 и 17 Гб, что позволило повысить число восстанавливаемых PRI кадров с 28 до 98, а также выделить отдельное дисковое пространство для восстановления RAW кадров. Разработано программное обеспечение для управления X-терминалом сервера Silicon Graphics Challenge с дополнительной клиентской машины Silicon Graphics O₂ работающей в операционной системе IRIX для построения кадров в форматах RAW, SLC и PRI. Для ведения архива ERS-2\SAR используется СУБД IDEAS/PostgreSQL.

В ходе выполнения грантов Cat-1 проводились синхронные подспутниковые наблюдения за ледовой обстановкой, нефтеразливами, состоянием лесов и агро-ресурсов. В период ледохода и ледостава в 2006–2011 гг. проводился анализ состояния ледовой поверхности рек Обь и Иртыш, Обской губы и Карского моря по радарным данным ERS-2 и оптическим изображениям сканера MODIS с разрешением 250 м со спутников TERRA и AQUA. Временной интервал между пролетами спутников в утренние часы составлял 10–30 мин.

Наземное квазисинхронное визуальное дешифрирование радарных изображений ERS-2 проводились на расстоянии 20 км от г. Ханты-Мансийска на реках Обь и Иртыш. Установлено, что темные участки на амплитудных изображениях соответствуют гладкому снежному насту на речном льду и отмелях, а светлые – ледяным торосам высотой до 0.7 м и снежным наметам на мелких торосах. На снимке ERS-2 за 3.03.2006 г. участки ледяных торосов более

контрастны, чем на снимке за 7.04.2006 г. Из наземных наблюдений в апреле также видно, что происходит разрушение ледяных торосов и одновременно увеличивается шероховатость на снежном насте за счет таяния. В результате уменьшается контраст на выполненных после наступления оттепелей радарных снимках ERS-2 между торосными участками и ровным льдом и снегом. Полыньи на реках в аномально холодную зиму 2005–2006 гг. с температурами до -49°C не обнаружены.

На осенних снимках MODIS видно, что замерзание реки Обь происходило не одновременно на больших протяженных участках. Это и является причиной образования торосов из молодого льда в период ледостава. На изображении MODIS за 20 мая 2006 г. выделяются последние ледяные поля и открытая вода в период ледохода на р. Обь. Участки ледяных заторов совпадают с местоположением торосов, выделенных ранее на снимке ERS-2 за 17 марта. Как правило, торосные участки льда образуются перед изгибами рек.

Снимки в оптическом диапазоне со спутников МЕТЕОР-3М, AQUA, TERRA не позволяли определить места расположения торосов на речном льду до начала ледохода. Достоверно выделяются только различные по плотности и размеру ледяные поля в акватории Карского моря и Обской губе. В период ледохода использование космоснимков в оптическом диапазоне ограничено облачностью. Всепогодные радарные изображения ERS-2 во время ледохода в мае 2006 года оперативно обрабатывались и передавались в течение 2 ч после пролета спутника в МЧС ХМАО для принятия решений о степени опасности затопления. Совмещенные с картоосновой и контрастированные кадры ERS-2 позволяли специалистам гидрологам достоверно дешифровать места скопления льда и чистой воды в любое время суток и сплошной облачности, планировать взрывные работы.

На основе амплитудных изображений ERS-2 выполнялись мониторинговые наблюдения за танкером «Белокаменка» пришвартованном в Кольском заливе вблизи Мурманска. Танкер водоизмещением 360 тыс. тонн используется НК «Роснефть» как временный накопитель сырой нефти экспортируемой морским путем в Западную Европу. Танкер со сроком эксплуатации 24 года представляет потенциальную опасность для всего Кольского залива в случае разлива нефти. На снимках ERS-2 фиксируются темные участки на поверхности воды соответствующие ветровой тени от корпуса танкера длиной 340 метров или береговой линии. Совпадение направлений ветровой тени от различных препятствий позволяет классифицировать темные участки водной поверхности именно как ветровую тень, а не разливы нефти. Также нет совпадений темных участков с направлением движения воды в Кольском заливе от Мурманска в Баренцево море. Небольшие скопления льда образуют плавающие

торосы и выделяются светлыми пятнами в акватории залива. Наибольшее число нефтеразливов и сбросов балластных вод от судов было зафиксировано на Балтийском море.

Наличие большого числа разнородных геоданных потребовало разработки специализированной поисковой системы обладающей возможностью доступа к исходным кадрам и метаданным для большого числа пользователей в локальной сети, а также удаленного поиска через WEB интерфейс [3; 4]. При создании интерактивного WEB интерфейса применялась компоненты MySQL, AJAX и Geoserver\GeoNetwork в открытых кодах. Экспорт метаданных и квиклуков позволил создать каталоги данных ERS-2\SAR на серверах ЮНИИИТ (dzz.uriit.ru), НЦОМЗ Роскосмоса (www.ntsomz.ru) и БФУ (metageo.aimg.kantiana.ru).

Библиографические ссылки

1. Bryksin V. M., Filatov A. V., Yevtyushkin A. V. Using of SAR data and DInSar-PSInSar technique for monitoring Western Siberia and Arctic // J. of Radio Electronics. 2012. № 6. P. 1–53.
2. Filatov A. V., Yevtyushkin A. V., Bryksin V. M. Some results of long-term geodynamic monitoring of oil and gas fields and power engineering infrastructure in Western Siberia and Arctic by InSar technique using ERS-2, ENVISAT and ALOS satellite data // Oil and Gas Business : electronic scientific j. 2012. Iss. 3. P. 43–73.
3. Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Филатов А. В. Технология создания комплексного банка космических снимков Земли // Известия Алтай. гос. ун-та. 2011. № 1–1 (69). С. 55–59.
4. Брыксин В. М. База радиолокационных кадров ERS-2 в формате PRI (ERSPRIData): свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2010620129 от 19.02.2010 г.

References

1. Bryksin V. M., Filatov A. V., Yevtyushkin A. V. Using of SAR data and DInSar-PSInSar technique for monitoring Western Siberia and Arctic. Journal of radio electronics. 2012. № 6. pp. 1–53.
2. Filatov A. V., Yevtyushkin A. V., Bryksin V. M. Some results of long-term geodynamic monitoring of oil and gas fields and power engineering infrastructure in Western Siberia and Arctic by InSar technique using ERS-2, ENVISAT and ALOS satellite data. Electronic scientific journal «Oil and Gas Business». 2012. Issue 3. pp. 43–73.
3. Bryksin V.M., Filatov A.V., Yevtyushkin A.V. News of ASU. 2011. no. 1–1 (69). pp. 55–59.
4. Bryksin V.M. Baza radiolokatsionnykh kadrov ERS-2 v formate PRI (ERSPRIData): Svidetelstvo o gos. registratsii bazy danykh no. 2010620129, 19.02.2010.

© Евтюшкин А. В., Филатов А. В., Брыксин В. М., 2013

УДК 528.85

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PSINSAR-ТЕХНОЛОГИИ НА КЛАСТЕРЕ ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

А. В. Филатов¹, В. М. Брыксин¹, А. В. Евтюшкин¹, Ю. В. Васильев², А. Ю. Белоносов²

¹Балтийский федеральный университет имени И. Канта
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14. E-mail: AnFilatov@kantiana.ru

²Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики
имени А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 625670, Тюмень, ул. Володарского, 56. E-mail: radan92@list.ru

Представлены результаты интерферометрической обработки многолетних данных радара PALSAR. Мониторинг просянок земной поверхности с образованием муть оседания проводился на нефтегазовых месторождениях в Западной Сибири. Рассмотрены преимущества реализации метода PSI в среде MatLab на высокопроизводительном суперкомпьютерном кластере.

Ключевые слова: ALOS, PALSAR, радиолокационная интерферометрия, геодинамический полигон, просянки, вычислительный кластер.

USE OF PSINSAR TECHNIQUE ON COMPUTING CLUSTER FOR GEODYNAMIC MONITORING OF OIL AND GAS FIELDS

A.V. Filatov¹, V. M. Bryksin¹, A. V. Yevtyushkin¹, Yu. V. Vasiliev², A. Yu. Belonosov²

¹Baltic Federal University named after I. Kant
14 Nevskiy st., Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: AnFilatov@kantiana.ru

²West Siberian Division of the Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk
of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
56 Volodarskiy st., Tyumen, 625670, Russia. E-mail: radan92@list.ru

The results of the interferometric processing of multi-time data of radar PALSAR are presented. Monitoring of subsidence of the earth surface with subsidence mould formation was performed on the oil and gas fields in Western Siberia. The advantages of PSI method implementation in MatLab package on a high supercomputing cluster are considered.

Keywords: ALOS, PALSAR, radar interferometry, geodynamic polygon, subsidence, supercomputing cluster.

Проблеме сопоставления спутниковых радарных интерферометрических и наземных геодезических измерений для контроля сложных геодинамических процессов на разрабатываемых месторождениях в последние годы уделяется большое внимание [1–2]. Накопление большого числа повторных съемок с радарных спутников привело к росту разработок научных и коммерческих пакетов интерферометрической обработки на основе метода интерферометрии устойчивых отражателей Persistent Scatterers Interferometry (PSI) [3]. При обработке в пакете GAMMA данных радара TerraSar-X на район образования муть оседания на затопленном калийном руднике были выявлено значительное снижение производительности расчетов при увеличении числа съемок [1].

Для повышения производительности интерферометрических расчетов предлагается использовать сво-

бодно распространяемый программный пакет StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers). StaMPS прошел длительную апробацию у исследователей, использующих результаты обработки спутниковых радиолокационных данных при решении широкого спектра прикладных задач. Ранее авторами статьи основная вычислительная часть программного комплекса StaMPS была реализована при помощи математического окружения MatLab путем распараллеливания для расчетов на высокопроизводительном кластере DELL Power Edge M600Server [4]. Достигнуто увеличение производительности до 10–12 раз. Тестирование методики для расчета подвижек земной поверхности выполнялись по данным ALOS-1/PALSAR на территории Губкинского и Саянско-Тасовского месторождений [5].

* Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ по гранту 13-07-00419.

Самотлорское месторождение нефти открыто в 1965 г. и введено в разработку в 1969 г. По состоянию на 1.01.2013 г. из недр месторождения накопленная добыча жидкости составила 11 597 772,9 тыс. т (за 2012 г. 323 541,2 тыс. т), в том числе накопленная добыча нефти составила 2 374 768,1 тыс. т нефти (за 2012 г. 17 444,9 тыс. т). Для получения такого результата закачено 13 430 082,4 тыс. м³ рабочего агента (подземных, поверхностных и сточных вод). Кроме того, добыто попутного газа 5 382 104 тыс. м³. Общий фонд скважин составляет 15 508 (7 952 добывающих и 3 253 нагнетательных) единиц. Площадь горного отвода лицензионного участка ОАО «СНГ» составляет 1 674,74 км². Такая техногенная нагрузка (почти 10 скважин на 1 км² площади) инициирует проявление геодинамических процессов природно-техногенного генезиса, которые формируют деформационные, сейсмические и флюидодинамические изменения в недрах.

В результате интенсивной и долговременной эксплуатации месторождения за 40-летний период пластовые давления в 11 основных продуктивных пластах снизились до 22,7 атмосфер (по группе АВ) и до 53,7 атмосфер (по группе БВ). Быстрое падение пластовых давлений (на начальном этапе разработки в упругом режиме пластовых условий) создает предпосылки для обводнения продуктивных толщ и усложняет технологию нефтедобычи. Притоки пластовых вод в залежь идут как снизу по вертикали, так и сбоку по латерали. При изменении гидрогеодинамических условий неизбежна перестройка напряженно-деформационного состояния массива горных пород, которое, в основном, сопровождается увеличением размеров трещин и изменением напряжений в жестком минеральном скелете коллекторской толщи. При использовании систем поддержания пластового давления (ППД) и гидроразрыва пласта (ГРП) на месторождении происходит увеличение фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов и повышение нефтеотдачи, с одной стороны, и появлению техногенной трещиноватости, с другой.

Толщи пород этажа нефтегазоносности на Самотлорском месторождении испытывают техногенное воздействие, что зафиксировано также косвенным путем – по изменению уровней вод в отдельных скважинах. Научно-практический опыт прогноза и регистрации осадок земной поверхности при долговременной добыче углеводородного сырья свидетельствует о том, что величина оседания так или иначе увязывается с величиной уплотнения коллектора. Именно деформирование порового пространства и минерального скелета коллекторов, вследствие падения пластовых давлений, является основной причиной самого уплотнения и деформаций окружающих пород.

Анализ данных геодезических измерений на геодинамическом полигоне за период 2002 по 2012 гг. свидетельствует о том, что система недр месторождения из-за долговременной и интенсивной разработки нефти, газа, формирует «раскаченную» гидродинамическую систему, что в свою очередь создает условия для пульсационного характера напряженно-деформи-

рованного состояния пород коллекторов из-за применения системы ППД и ГРП. Кроме того, на техногенное влияние в формировании мульды оседания накладывается природный фактор гравитационного поля Земли и регионального поля тектонических напряжений. Поэтому причиной образования мульды оседания земной поверхности являются геодинамические процессы природно-техногенного генезиса.

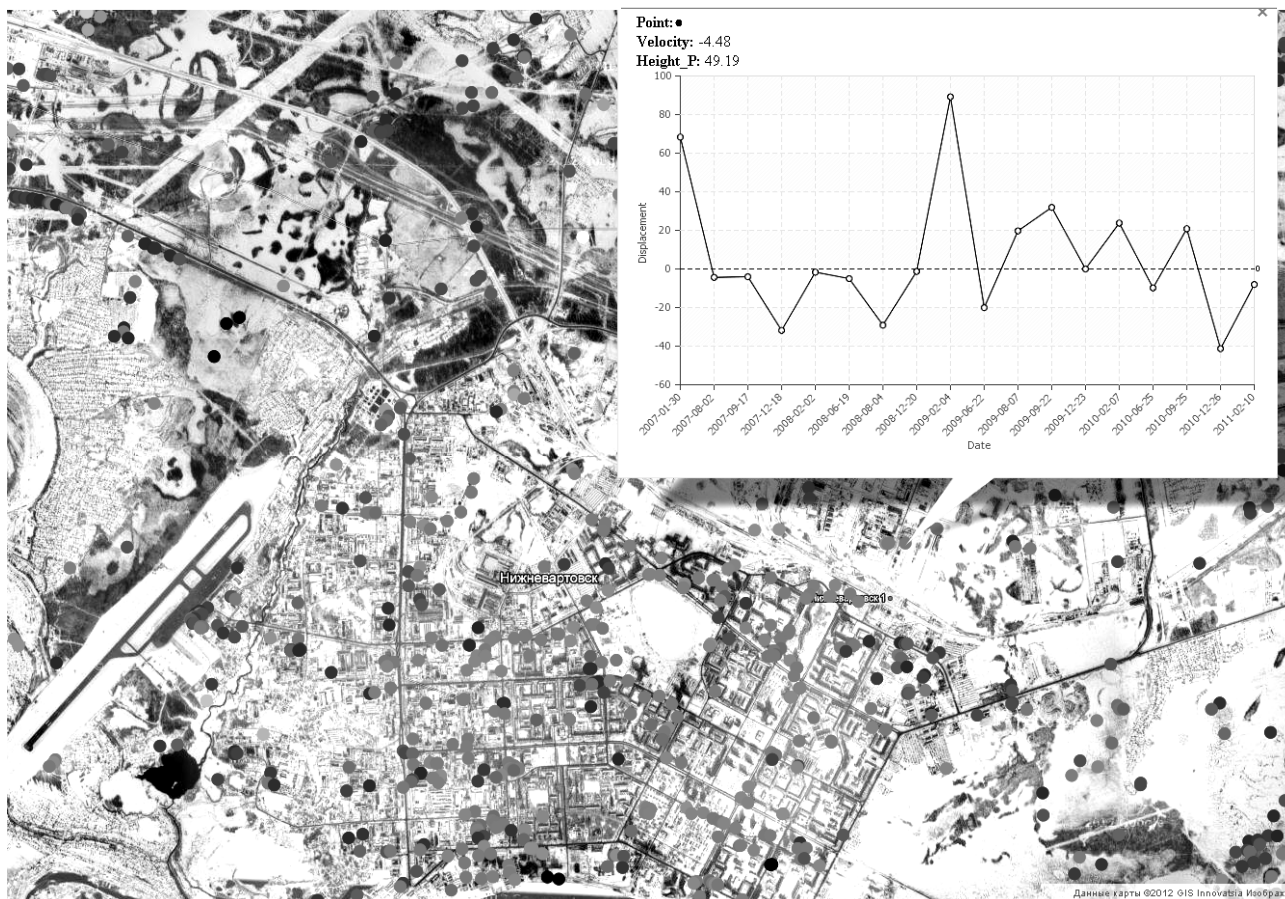
Интерактивное облако точек, соответствующих стабильным отражающим объектам, для которых рассчитаны скорости смещений приведено на рисунке. Результаты получены при обработке 18 разновременных кадров ALOS/PALSAR на территорию Самотлорского нефтяного месторождения. Установлено, что скачки значений смещений для отдельных дат радиолокационных съемок вызваны значительным разбросом длин базовых линий (от –8886 до +4688 м), присутствующим для спутника ALOS. Компонента интерферометрической фазы, содержащая высоты отражающих объектов, прямо пропорциональна длине перпендикулярной базовой линии. Поэтому причиной возникающей погрешности является неполное устранение высотной составляющей интерферометрической фазы.

Для территории Самотлорского месторождения проведена проверка точности расчета смещений на основе совместного анализа результатов обработки в пакете StaMPS на кластере и материалов наземных измерений на 86 заглубленных реперах Самотлорского геодинамического полигона. Средняя точность расчета скорости вертикальных смещений устойчивых техногенных отражающих объектов составила 4 мм/год.

Анализ схемы накопленных отборов нефти с начала разработки Самотлорского месторождения на 01.01.2013 г. и последующего совмещения с изолиниями наблюдаемых значений сил тяжести Земли за период 2002–2012 гг., свидетельствует о высокой корреляционной связи деформационных процессов с добычей углеводородов и изменением гравитационного поля Земли. Мульда оседания земной поверхности на Самотлорском месторождении находится в стадии активного переформирования из-за высокоскоростных гидродинамических и гравитационных процессов происходящих при интенсивной добыче углеводородов.

Кластеризация точек сгущений максимальных скоростей устойчивых отражателей, рассчитанных по радарным данным, хорошо совпадает с зонами максимальных просадок в мульде оседания и областей поднятий на краю мульды. Это дает предпосылки для обнаружения зон геодинамического риска на основе анализа цифрового поля скоростей смещений и диаграмм временных рядов смещений, усредненных для сгруппированных точек. Необходимо выделить районы, содержащие близкорасположенные группы объектов, движущиеся разнонаправленно и имеющие высокую среднегодовую скорость смещений.

Спутниковые данные ALOS/PALSAR предоставлены Японским агентством аэрокосмических исследований по некоммерческим грантам 07/JAXA/ASP № 0704001 PI 405 и 09/JAXA/AEO № 022300 PI-563.



Динамика смещений техногенного отражающего объекта за 2007–2011 гг.

Библиографические ссылки

1. Определение зон сдвижений на подработанной территории Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) по результатам интерферометрической обработки радарных данных / И. А. Лысков, В. В. Мусихин, Ю. А. Кашников, М. В. Гилеев // Маркшейдерский вестник. 2011. № 3. С. 34–39.
2. Елсаков В. В. Спутниковая съемка в экологическом мониторинге регионов добычи углеводородов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 133–139.
3. Hooper A. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation // Ph. D. thesis, Stanford University, 2006.
4. Евтюшкин А. В., Брыксин В. М., Филатов А. В. Метод интерферометрии устойчивых отражателей в среде MatLab на высокопроизводительном кластере // Вестник Балт. федер. ун-та им. И. Канта. 2012. № 10. С. 146–152.

5. Использование метода интерферометрии устойчивых отражателей при геодиническом мониторинге Самотлорского месторождения / А. В. Филатов, А. В. Евтюшкин, В. М. Брыксин и др. // Маркшейдерский вестник. 2012. № 4. С. 57–62.

References

1. Lyskov I. A., Musihkin V. V., Kashnikov Yu. A., Gileev M. V. Markscheiderski vestnik, 2011. no. 3. pp. 34–39.
2. Elsakov V. V. Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. Vol. 9, no. 5, pp.133–139.
3. Hooper A. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation // Ph.D. thesis, Stanford University, 2006. 144 p.
4. Yevtyushkin A. V, Bryksin V. M., Filatov A. V. Vestnik IKBFU. 2012, no. 10, pp. 146–152.
5. Filatov A. V., Yevtyushkin A. V, Bryksin V. M., Vasiliev Yu. V., Yuriev M. L., Belonosov A. Yu. Markscheiderski vestnik, 2012, no. 4, pp. 57–62.

© Филатов А. В., Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Васильев Ю. В., Белоносов А. Ю., 2013

УДК 528.7

КОСМИЧЕСКИЙ РАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ СМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СООРУЖЕНИЙ. ОПЫТ КОМПАНИИ «СОВЗОНД»

Ю. И. Кантемиров

Компания «СОВЗОНД», бизнес-центр «Милан»
Россия, 115563, Москва, ул. Шипиловская, 28а. E-mail: y_kantemirov@sovzond.ru

Рассматриваются технологии радарной интерферометрии постоянных рассеивателей и интерферометрии серий малых базовых линий, реализованных в программном комплексе SARscape (Exelis VIS, США-Франция). Приводится их сравнительный анализ и примеры их совместного применения при мониторинге смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на месторождениях полезных ископаемых.

Ключевые слова: Радарная интерферометрия, мониторинг смещений земной поверхности, деформационный мониторинг.

SATELLITE SYNTHETIC APERTURE RADAR MONITORING OF GROUND AND CONSTRUCTIONS DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS. «SOVZOND» COMPANY EXPERIENCE

Yu. I. Kantemirov

“SOVZOND” company, business-center “Milan”
28a Shipilovskaya st., Moscow, 115563, Russia. E-mail: y_kantemirov@sovzond.ru

Persistent scatterers SAR interferometry and small baselines series SAR interferometry techniques of SARscape software (Exelis VIS, USA-France) are considered in the article. Comparative analysis of these two techniques and examples of their complex usage during ground and constructions displacements and deformations monitoring on oil and gas and ore fields are presented.

Keywords: SAR interferometry, ground displacements monitoring, deformations monitoring.

Как известно, по результатам многопроходных космических радарных съемок одной и той же территории, выполненных с одинаковыми параметрами и геометрией съемки, возможно оценивать смещения земной поверхности или зданий и сооружений с сантиметровой (для земной поверхности) и даже с миллиметровой (для зданий и сооружений) точностью [1–3]. Для решения этой задачи необходимо выполнение интерферометрической обработки радарных снимков многопроходной серии.

Возможность такой обработки реализована, например, в программном комплексе SARscape (Exelis VIS, США-Франция), эксклюзивным дистрибьютором которого на территории России и СНГ является компания «СОВЗОНД».

На практике для решения задач космического радарного мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений применяются технологии интерферометрической обработки Persistent Scatterers Interferometry (интерферометрия постоянных рассеивателей радарного сигнала) и Small Baselines Series Interferometry (интерферометрия серий малых базовых линий), реализованные в программном обеспечении SARscape.

Последовательная интерферометрия постоянных рассеивателей радарного сигнала (PS). Этот вариант радарной интерферометрии характеризуется максимально возможной точностью оценки смещений (2–4 мм для зданий и сооружений при условии ис-

пользования на входе не менее 30 радарных съемок за период не менее 1 года). Входными данными для обработки должны являться радарные снимки одной и той же территории за разные даты, сделанные в одной и той же геометрии съемки спутникового радара [4].

Программой выбирается основное изображение, на которое автоматически – с точностью до 1/100 пикселя корегистрируются (взаимно отождествляются) остальные снимки интерферометрической цепочки. Далее программа строит так называемые интерферограммы (комплексно поэлементно перемноженные фазовые слои радарных снимков) по каждой паре снимков. Затем для каждой пары оцениваются величины когерентности (меры корреляции фаз радарных снимков). Также для каждой пары строятся карты величин стандартных отклонений амплитуд снимков.

Затем программой определяются точки – постоянные (или устойчивые) рассеиватели радарного сигнала. Для выбора точек используется несколько порогов (порог корреляции амплитуд, порог когерентности, порог пространственного и временного отклонений величин смещений первой итерации и т. д.). После того как постоянные рассеиватели определены – для них выполняется процедура оценки фазовых разностей и мультивременной развертки фазы для точечных целей. Именно в разности фаз каждого снимка «зашиита» величина смещений за период между съемками этих снимков.

Таким образом, для каждой из выбранных точек восстанавливается хронология изменения фазы во времени, которая затем математически пересчитывается в смещения в миллиметрах. Дополнительно в процессе обработки применяется специальный фильтр, удаляющий возможное влияние атмосферы на интерферометрическую фазу.

Результатом обработки является векторный файл точек (шейп-файл для программы ArcGIS и kml-файл для программы Google Earth), в атрибутах которых записаны:

- смещения на каждую дату съемки в мм;
- среднегодовая скорость смещений в мм/год;
- суммарная величина смещений в мм;
- когерентность;
- высота над эллипсоидом wgs-84.

Усовершенствование технологии интерферометрии постоянных рассеивателей, разработанное в 2009 г. М. Константины и другими [5], заключается в следующем:

- результаты интерферометрической обработки нередко осложнены различными осложняющими факторами, в том числе низкочастотными, дающими системную ошибку определения смещений, возрастающую от одной границы снимка к другой. К таким помехам можно отнести влияние неточности знания орбит спутника, влияние непараллельности орбит спутника, атмосферные артефакты и др.;
- различные вариации технологий интерферометрической обработки, в том числе, вышеописанная технология PS, предлагают различные решения по удалению вышеуказанных систематических ошибок;
- в рамках наиболее поздней из модификаций интерферометрических технологий – методики PSP IfSAR – предлагается инновационный подход, позволяющий удалить эти систематические ошибки за счет дополнительной совместной обработки пар соседних постоянных отражателей (вышеуказанные систематические ошибки характеризуются низкочастотной пространственной изменчивостью, поэтому отдельная обработка именно соседних друг с другом отражателей, позволяет избавиться от этих ошибок);
- дополнительным преимуществом данной технологии является большая максимально достижимая плотность точек – до 30 000 точек на км² (для плотно застроенных территорий).

Основным недостатком технологии постоянных рассеивателей (и PS и PSP) является ее применимость только для застроенных территорий, либо территорий без растительности, а также для отдельных зданий и сооружений при съемке в высоком разрешении.

Перекрестная интерферометрия серий малых базовых линий (SBas). Интерферометрия серий малых базовых линий, в отличие от интерферометрии постоянных рассеивателей, является менее автоматизированным методом и требующим большей квалификации исполнителя. В этом случае, усиливается вклад статистики в финальный результат за счет перекрестной обработки очень большого количества интерферометрических пар при том же самом количе-

стве исходных снимков [6]. Для обработки по этому методу (в отличие от технологий PS и PSP) не обязательно наличие 30 снимков, обработка возможна и при меньшем их количестве.

Например, в случае 15-проходной цепочки, количество пар снимков достигает 105.

Из них, по величине наименьшей пространственной базы, выбираются, к примеру, 30–40 пар. Пары могут быть перекрестными (первый проход с вторым, второй с третьим, первый с третьим, второй с четвертым и т. п.). Обработка каждой пары ведется в полуавтоматическом режиме с выполнением нижеуказанных четырех шагов:

1. Автоматическая корегистрация (взаимное отождествление), расчет интерферограммы, синтез фазы рельефа, вычитание фазы рельефа из интерферограммы, фильтрация дифференциальной интерферограммы, расчет когерентности, развертка фазы;
2. Набор точек с известными координатами и высотами для коррекции орбитальных параметров;
3. Расчет скорректированных фильтрованных дифференциальных интерферограмм и развернутых фаз;
4. Инверсия полученных перекрестных во времени развернутых фаз по методике SBas с восстановлением последовательной во времени истории смещений.

В итоге также восстанавливается хронология смещений от первого снимка цепочки до последнего.

Опыт компании «СОВЗОНД». Компания широко применяет вышеуказанные технологии PS, PSP и SBas при мониторинге смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на месторождениях полезных ископаемых и на других объектах.

Среди последних проектов, выполненных с применением технологий PS, PSP и SBas, можно отметить следующие:

- мониторинг оседаний земной поверхности над Жезказганским месторождением медной руды (Казахстан) за 2011–2012 гг.;
- мониторинг деформаций бортов карьеров ОАО «Гайский ГОК» (Россия) и сооружений промышленной площадки предприятия;
- мониторинг деформаций бортов угольного разреза «Уртуйский» (Россия);
- мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз (Казахстан) за 2004–2011 гг.;
- мониторинг смещений земной поверхности и сооружений над Уренгойским, Южнорусским, Заполярным и Астраханским нефтегазовыми месторождениями (Россия);
- мониторинг смещений и деформаций сооружений в городах Новый Уренгой и Сочи (Россия) и Астана (Казахстан).

Предлагаемые технологии интерферометрической обработки PS, PSP и SBas, реализованные в программном комплексе SARscape, позволяют осуществлять мониторинг смещений и деформаций как сооружений и даже отдельных и частей (PS и PSP), так и площадной мониторинг смещений земной поверхности на территориях без растительности (SBas).

На территориях с растительностью применяются все вышеуказанные технологии в комплексе, при необходимости, производится изменение настроек (усиление фильтрации интерферограмм, понижение порога когерентности при развертке фазы, понижение ожидаемой пространственной плотности постоянных рассеивателей и т. д.). В случае территорий, характеризующихся ярко выраженным зимним периодом с выпадением снега – радарный мониторинг выполняется в бесснежный период года за исключением случая застроенных территорий – по ним отработана технология мониторинга подвижек и деформаций зданий и сооружений и в зимний период. Точность этих методов многократно проверена по данным наземных инструментальных наблюдений.

Представляется целесообразным применение радарных интерферометрических методов для мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на месторождениях полезных ископаемых, в городах, для мониторинга критических промышленных сооружений, трубопроводов, авто- и железных дорог и других объектов.

Библиографические ссылки

1. Рис У. Основы дистанционного зондирования. М. : Техносфера, 2006.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. М. : Радиотехника, 2010.
3. Richards M. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing // IEEE Aerospace and Electronic. 2007. Vol. 22, № 9.
4. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential

SAR interferometry // Geoscience and Remote Sensing : IEEE Transactions on. 2000. Vol. 38, № 5. Part 1. P. 2202–2212.

5. Method of Persistent Scatterer Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry / M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa et al. // IGARSS. 2009. № 3. P. 904–907.

6. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry / P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti // IEEE Aerospace and Electronic. 2002. Vol. 40, № 11.

References

1. Rys U. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 336 p.
2. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya (Radar systems zemleobzora space-based). Moscow, Radiotekhnika, 2010, 680 p.
3. M. Richards: "A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing". IEEE Aerospace and Electronic, Vol. 22, No. 9, September 2007.
4. A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry". Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 38, no. 5, Part 1, Sept. 2000, pp. 2202–2212.
5. M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, F. Minati, F. Trillo. Method of Persistent Scatterer Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry. IGARSS, (3), 2009, 904-907.
6. P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti: "A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry". IEEE Aerospace and Electronic, Vol. 40, No. 11, November 2002.

© Кантемиров Ю. И., 2013

УДК 528.7

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ РАДАРНЫХ СЪЕМОК ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕМАТИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЙ

Ю. И. Кантемиров

Компания «СОВЗОНД», бизнес-центр «Милан»
Россия, 115563, Москва, ул. Шипиловская, 28а. E-mail: y_kantemirov@sovzond.ru

Рассматривается технология расчета радарных мультивременных когерентных композитов. Приводятся принципы интерпретации цветов на таком композите. Рассматриваются примеры применения радарных и радарно-оптических композитов для задач тематического картографирования территорий и мониторинга вырубок в лесном хозяйстве.

Ключевые слова: радарные данные ДЗЗ, радарный мониторинг, радарные съемки, мониторинг изменений, тематическое картографирование, мониторинг вырубок леса.

SATELLITE SAR DATA USAGE FOR THEMATIC MAPPING AND CHANGE DETECTION PURPOSES

Yu. I. Kantemirov

“SOVZOND” company, business-center “Milan”
28a Shipilovskaya st., Moscow, 115563, Russia. E-mail: y_kantemirov@sovzond.ru

Techniques of multitemporal coherent radar composites generation is considered in the article. Keys for colors interpretation on such composites are described. Examples of SAR and combined SAR-optical composites usage for thematic mapping and clear-cuts mapping in forestry are presented.

Keywords: SAR data, SAR monitoring, radar data, change detection, thematic mapping, clear-cuts mapping.

Как известно, радарные данные дистанционного зондирования Земли содержат в себе амплитудную и фазовую информацию. Сочетание этих двух видов информации в одном композитном изображении обеспечивает принципиальный прирост информации по сравнению с использованием амплитудной и фазовой информации по отдельности. По мнению автора, наиболее простым и в то же время информативным видом амплитудно-фазового композита является цветной композит МТС (Multi-Temporal Coherent), составляемый следующим образом [1]:

- в красном канале – амплитуда первого по дате радарного снимка;
- в зеленом канале – амплитуда второго по дате радарного снимка, сделанного с теми же параметрами съемки, что и первый снимок;
- в синем канале – когерентность фаз этих двух радарных снимков.

Поскольку одним из каналов этого композита является когерентность фаз двух радарных съемок, а она разрушается с увеличением времени между съемками, то максимальная информативность такого композита достигается при коротких временных промежутках между съемками (несколько суток). Такие композиты с короткой временной базой могут быть использованы для задач тематического картографирования. Композиты же с длинной временной базой (недели, месяцы, годы) могут быть использованы для задач выявления изменений и мониторинга наземной активности.

Принципы интерпретации цветов на композите МТС приведены в таблице.

Композиты с короткой временной базой в несколько суток характеризуются примерно одинаковым качеством и уровнем зашумленности всех трех каналов (двух амплитуд и когерентности), поэтому они могут быть использованы для задач составления тематических карт с примерно следующим базовым набором слоев: лес, вырубки и гари (свежие и с восстановлением растительности), неиспользуемые поля, сельскохозяйственные используемые поля, антропогенные объекты, гидросеть, дороги. При необходимости состав слоев может быть адаптирован под решение конкретных задач. Следует отметить, что радарные когерентные композиты с временной базой в несколько суток могут быть получены только с помощью радарной спутниковой группировки COSMO-SkyMed-1-4 (e-GEOS, Италия).

По данным радарных съемок с разрешением 3 м возможно строить тематические карты масштаба 1 : 25 000, по данным радарных съемок с разрешением 1 м – 1 : 10 000.

Опыт применения композитов МТС в компании «СОВЗОНД». Первым примером широкого применения композитов МТС в России стал проект по оперативному выявлению вырубок леса на территориях лесного фонда России. К концу съемочного сезона 2011 г. оптические спутники по причине облачности не смогли отснять все территории, подлежащие мониторингу вырубок в 2011 г. За две недели до срока окончания проекта, была оперативно спланирована радарная съемка участков, не покрытых оптическими данными.

На каждый участок была выполнена съемка интерферометрической пары радарных снимков со спутников COSMO-SkyMed-1-4 (e-GEOS, Италия). Для каждой пары снимков была рассчитана картограмма когерентности и затем радарный когерентный композит МТС [2].

Вся площадь лесничества не зависимо от облачности и освещенности была отснята интерферометрическими парами радарных снимков с пространственным разрешением 3 м за 9 дней (одна пара – 2 и 3 октября, вторая пара – 6 и 10 октября). На композите МТС на территорию лесничеств наиболее четко разделяются следующие типы территории: ненарушенный лес – желто-зеленым цветом; участки без растительности (поля с убранным урожаем и свежие вырубки) – ярким синим цветом; участки со слабой природной растительностью (болота, старые вырубки с восстановлением растительности) – бледно-синим цветом с вкраплениями желтого цвета; антропогенные объекты – ярким белым цветом; вода – черным цветом. Вырубки были затем оцифрованы по этим композитам вручную с привлечением дополнительно архивного оптического снимка для более четкого разделения вырубок от обычных полей.

Для задач выявления тех вырубок леса, которые произошли конкретно за период с 2010 по 2011 гг. была поставлена задача генерации радарно-оптического мультивременного композита, отображающего изменения, произошедшие за период между съемкой архивного оптического снимка и новой радарной съемки. Экспериментально было установлено, что когерентность пары радарных снимков с короткой временной базой в несколько суток визуально хорошо коррелируется с оптическим панхроматическим снимком.

Принципы интерпретации цветов на композите МТС

Относительная выраженность каналов RGB-композита	Итоговый цвет на композите МТС	Тип объекта
Сильная амплитуда обоих снимков, низкая когерентность	Желтый	Естественная природная растительность. В случае наличия текстуры – лес, в случае отсутствия текстуры – поля, луга и т. д.
Сильная амплитуда обоих снимков, высокая когерентность	Белый с оттенками синего	Здания и сооружения, объекты имеющие углы, объекты из бетона и металла, столбы, опоры ЛЭП, железные дороги. Наиболее интенсивный белый цвет в случае, если вышеперечисленные объекты ориентированы параллельно азимуту радарной съемки (т. е. перпендикулярно направлению дальности)
Слабая амплитуда обоих снимков, высокая когерентность	Темно-синий	Плоские поверхности (низкая амплитуда) с высокой когерентностью (из-за отсутствия растительности на этих поверхностях) Голая плоская и (или) влажная земля без изменений за период между радарными съемками. Чем темнее оттенок синего – тем более плоская (либо влажная) поверхность на обоих снимках. Примеры объектов: асфальтированные дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов, политые и засеянные сельскохозяйственные поля
Амплитуда второго снимка больше, чем амплитуда первого, при очень низкой когерентности	Ярко-зеленый (сильные амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда второго снимка выше)	Быстро растущая растительность, участки активно растущих сельхозкультур, новые объекты (техника, сооружения), отсутствующие на первом снимке, но появившиеся на втором)
	Темно-зеленый (слабые амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда второго снимка выше)	Участки голой земли, вспаханные за период между радарными съемками
Амплитуда первого снимка больше, чем амплитуда второго, при очень низкой когерентности	Ярко-красный (сильные амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда первого снимка выше)	Поля, с которых за период между съемками был собран урожай, хорошо отражающие объекты, присутствовавшие на первом снимке и пропавшие на втором
	Темно-красный (слабые амплитуды у обоих снимков, при этом амплитуда первого снимка выше)	Голая земля, увеличившая влагосодержание за период между съемками (например, после дождя или полива)
Все три канала равномерно средне выражены	Темные оттенки красного, зеленого и синего	Шероховатое поле без растительности, влагосодержание которого незначительно изменилось за период между съемками
Очень низкая амплитуда обоих снимков и очень низкая когерентность	Черный или темно-серый цвет	Водная поверхность

Оптический снимок и радарная когерентность были приведены к единым условным единицам яркости и из них был построен композит со следующим набором каналов:

- в красном канале – когерентность фаз двух новых радарных снимков, сделанных с разницей в несколько суток;
- в зеленом канале – архивный оптический панхроматический снимок;
- в синем канале – когерентность фаз двух новых радарных снимков, сделанных с разницей в несколько суток.

На таком оптико-радарном композите новые вырубки, произошедшие за период со времени съемки архивного оптического снимка до времени съемки новых радарных снимков, автоматически выделяются розовым цветом (сочетание ярких красного и синего каналов и темного зеленого канала дает розовый цвет).

С помощью радарных съемок, не зависящих от облачности и освещенности, возможно гарантированно отснять значительные площади лесного фонда России, в том числе, оперативно доотснять участки, не покрытые оптическими съемками к концу съемочного сезона;

На самом амплитудном радарном снимке вырубки выделяются только лишь текстурой и не выделяются цветом, однако на мультिवременном радарном композите МТС, вырубки четко выделяются синим цветом на фоне зеленого леса (поскольку они характеризуются слабой амплитудой и высокой когерентностью);

Композит МТС и, в частности, его синий канал (когерентность) хорошо стыкуется с предшествующими архивными оптическими съемками, позволяя не просто выявить имеющиеся вырубки, но и закартировать вырубки, произошедшие конкретно за период между предшествующей оптической и новой радарной съемками.

Композит МТС показал свою пригодность как для тематического картографирования, так и для задач мониторинга изменений в лесном хозяйстве. С таким же успехом он может быть использован для мониторинга сельскохозяйственных процессов, строительства и любой наземной активности, влияющей на изменение амплитуды отражения радарного сигнала и на когерентность фаз радарных съемок.

Библиографические ссылки

1. Новый продукт МТС, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed / Л. Пиетранера, Ф. Бритти, Л. Чезарано и др. // Геоматика, Совзонд. 2012. № 1 (14). С. 46–51.

2. Полуавтоматическое выявление вырубок леса на мультивременных радарных и радарно-оптических цветных композитах / Е. В. Бахтинова, А. Ю. Соколов, Д. Б. Никольский, Ю. И. Кантемиров // Геоматика, Совзонд. 2012. № 1 (14). С. 52–55.

References

1. Pietranera L., Britti F., Cesarano L. etc. Geomatica, Sovzond, 2012, № 1 (14), pp. 46–51.

2. Bakhtinova Ye. V., Sokolov A. Yu., Nikolskiy D. B., Kantemirov Yu. I. Geomatica, Sovzond, 2012, № 1 (14), pp. 52–55.

© Кантемиров Ю. И., 2013

УДК 528.88

ПРИМЕНЕНИЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОПОЛЗНЕВЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ГОРНОМ ПРЕДПРИЯТИИ НА ПРИМЕРЕ ОАО «УРТУЙСКИЙ УГОЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ»

В. Д. Хан

Национальный исследовательский иркутский государственный технический университет
Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: Mithril1990@mail.ru

Рассматривается возможность осуществления мониторинга деформаций бортов карьера по данным многопроходных радарных съемок.

Ключевые слова: деформации земной поверхности, радарные съемки, интерферометрия.

APPLICATION RADAR INTERFEROMETRY FOR MONITORING THE LANDSLIDE PROCESSES AT MINING PLANT AT THE EXAMPLE OF JSC “URTUYSKIY COAL MINE”

V. D. Khan

National Research Irkutsk State Technical University
83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russia. E-mail: Mithril1990@mail.ru

In the article the author considers the possibility of monitoring deformations of the coal mine beads according to multipass radar surveys.

Keywords: deformation of the earth's surface, radar imaging, interferometry.

Существуют компании, предлагающие свои услуги в области получения и обработки данных дистанционного зондирования Земли, в целях выявления деформаций бортов карьеров, а также природных и техногенных смещений земной поверхности, деформаций сооружений над месторождениями твердых полезных ископаемых вблизи разработки предприятий. Эти данные позволяют решать приведенные задачи с применением методики интерферометрической обработки серий спутниковых радиолокационных изображений [1].

Данная технология, будучи интегрированной в систему маркшейдерско-геодезических наблюдений, позволяет определять вертикальные и горизонтальные

смещения поверхности и объектов инфраструктуры, а также деформации неразрабатываемых бортов карьера с очень высокой точностью. Основное преимущество метода – это независимая дистанционная оценка смещений по всей площади снимка. Для расчета смещений используется массив спутниковых данных, которые получают с космических аппаратов с определенной периодичностью.

Целью мониторинга с помощью радиолокационных данных является снижение рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и уменьшение их возможных последствий за счет современного выявления смещений и деформаций земной поверхности и сооружений.

Основная решаемая задача это регулярное получение информации о смещениях и деформациях земной поверхности и сооружений дистанционными (космическими) методами.

В 2012 г. сотрудниками НИ ИрГТУ совместно с компанией «Совзонд» был опробован метод дистанционных исследований на действующем горнодобывающем предприятии ОАО «Уртуйский угольный разрез» [2]. Угольный разрез Уртуйский расположен к северо-западу от г. Краснокаменск, на котором ведется добыча бурого угля открытым способом. Разрез был снят 15 раз с радарных спутников группировки COSMOSkyMED (E-GEOS, Италия) в режиме HImage (разрешение 3 м, площадь сцены 40 × 40 км). Схема покрытия территории Уртуйского разреза данными COSMOSkyMED приведена на рис. 1.

Основная цель выполнения проекта – установить возможно ли по данным многопроходных радарных

съемок осуществить мониторинг деформаций бортов карьера с достаточно высокой точностью [3]. Данные 15-проходной радарной съемки Уртуйского угольного разреза были интерферометрически обработаны по методике «Small Baselines Interferometry (SBas)» в программном комплексе SARscape (Exelis VIS, США) с применением трехмерной развертки фазы. Всего было обработано 105 пар снимков, показанных на диаграмме «время – базовая линия», рис. 2.

Для каждой из пар в автоматизированном режиме были построены интерферограммы, дифференциальные интерферограммы, выполнены фильтрация интерферометрической фазы, расчет когерентности и развертка фазы [4].

На выходе были рассчитаны смещения земной поверхности на каждую дату съемки, результирующая карта смещений и файл точек – постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала [5].



Рис. 1. Схема покрытия территории данными COSMOSkyMED

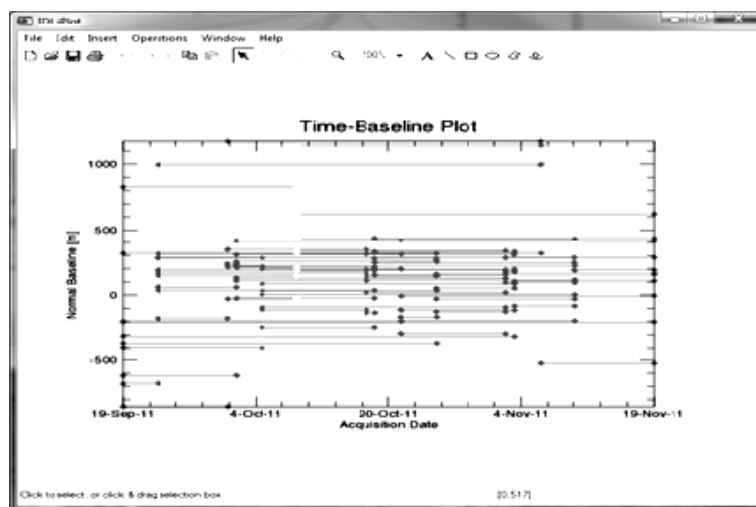


Рис. 2. Диаграмма время – базовая линия

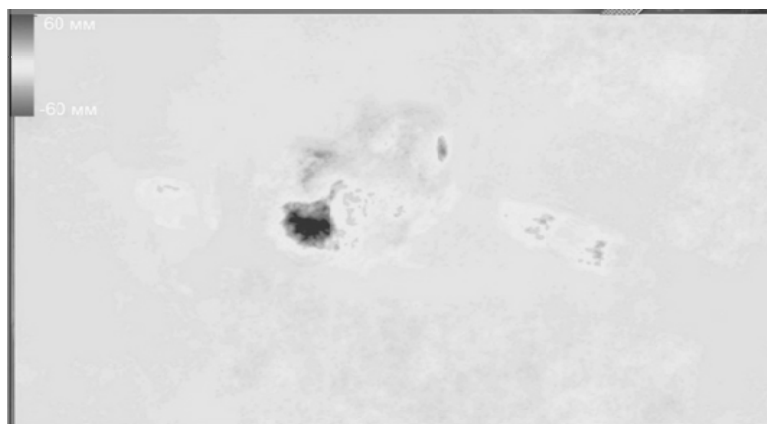


Рис. 3. Карта смещений и деформаций земной поверхности

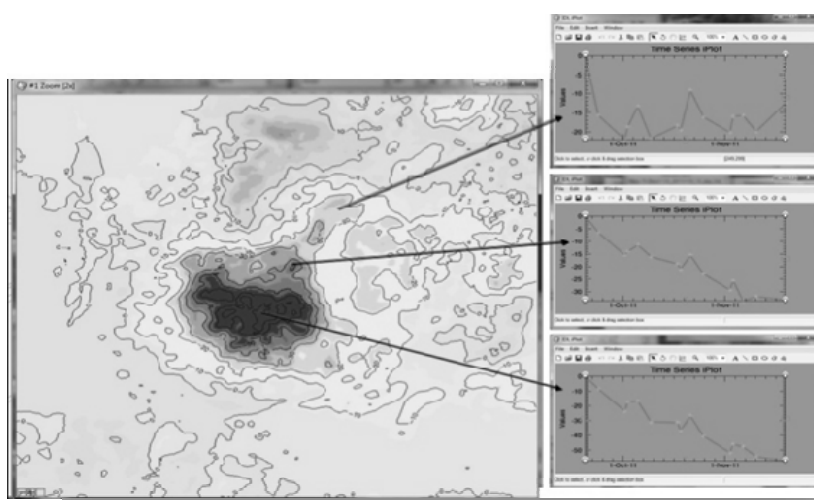


Рис. 4. Основной очаг оседаний крупным планом, графики смещений для нескольких типовых точек

Оптический снимок и пространственно соответствующая ему карта смещений приведены на рис. 3. Основной выявленный очаг оседаний находится в юго-западной части карьера. Основной очаг оседаний крупным планом и график смещений для нескольких типовых точек в пределах этого очага показаны на рис. 4. Кроме того, на крупном плане заметны несколько участков поднятий, эти поднятия образованы за счет формирования отвалообразований.

По результатам работ установлено наличие деформаций бортов карьера с максимальной интенсивностью до 6 см за 2 месяца. Результаты дистанционного зондирования угольного разреза Уртуйский были проконтролированы наземной съемкой с применением геодезического GNSS оборудования методом статических наблюдений. В результате контроля были выявлены деформации с аналогичной интенсивностью [6].

Полученные результаты показали, что при частоте порядка 6–8 съемок в месяц даже на незастроенной территории удастся поддерживать когерентность фаз радарных съемок за разные даты на необходимом для выполнения обработки уровне. Что делает данную технологию применимой для выполнения мониторинговых работ.

Библиографические ссылки

1. Гужов В. И., Ильиных С. П. Компьютерная интерферометрия : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004.
2. Компания «Совзонд» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sovzond.ru/>.
3. Cumming I. G., Wong F. H., Digital processing of synthetic aperture radar data. Norwood : Artech House, Inc., 2005.
4. ENVI – Программный комплекс ENVI [Электронный ресурс]. URL: <http://www.envisoft.ru/>.
5. Радиолокационное исследование Земли из космоса [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gis.gorodok.net/>.
6. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / ООО «Недра-Бизнесцентр». М., 2007.

References

1. Guzhov V. I., Ilyin S. P. Komp'yuternaya interferometriya (Computer interferometry). Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2004.
2. Company Sovzond. Available at: <http://www.sovzond.ru/>.

3. Cumming I. G. and Wong, F. H. Digital processing of synthetic aperture radar data. Norwood, MA: Artech House, Inc., 2005.

4. ENVI – software package ENVI. Available at: <http://www.envisoft.ru/>.

5. Radar study of the Earth from space. Available at: <http://www.gis.gorodok.net/>.

6. Kashnikov Y. A., Ashikhmin S. G. Mekhanika gornykh porod pri razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodnogo syr'ya (Rock mechanics in the development of hydrocarbon fields). Moscow, LLC Core-business centers, 2007.

© Хан В. Д., 2013

УДК 528.71

СПУТНИКОВЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗОНЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ*

А. А. Феоктистов¹, А. И. Захаров², П. В. Денисов¹, М. А. Гусев¹

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы»
Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51/25. E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова Российской академии наук
Россия, 141190, Фрязино Московской области, площадь им. акад. Б. А. Введенского, 1.
E-mail: izakhar@sunclass.ire.rssi.ru

Сообщается о результатах дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA ASAR/ENVISAT по зоне землетрясения в Японии с использованием программного пакета SARscape. Представлены результаты совместного анализа данных дистанционного зондирования и подспутниковых GPS-измерений.

Ключевые слова: PCA, дифференциальная интерферометрия, деформация земной поверхности, ASAR/ENVISAT, SARscape, фильтр Goldstein, землетрясение.

SAR MONITORING OF TERRESTRIAL SURFACE DEFORMATION IN THE EARTHQUAKE ZONE USING GPS DATA

A. A. Feoktistov¹, A. I. Zakharov², P. V. Denisov¹, M. A. Gusev¹

¹Research Center for Earth Operative Monitoring JSC “Russian Space Systems”
51/25, Dekabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru

²Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov
of Russian Academy of Sciences
1 Vvedensky square, Fryazino, Moscow region, 141190, Russia. E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

The results of ASAR/ENVISAT data DInSAR processing for earthquake in Japan by means of SARscape software are presented. Results of the joint analysis of SAR data and ground-based GPS precision measurements are presented.

Keywords: SAR, DInSAR processing, surface deformation, ASAR/ENVISAT, SARscape, coherence, interferogram, Goldstein filter, earthquake.

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО «Российские космические системы» проводится отработка комплексных технологий интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки данных перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) с использованием тестовых данных современных зарубежных РСА. Исследуются практические возможности использования данных разных диапазонов для построения цифровых моделей местности (ЦММ) и цифровых карт смещений (ЦКС) по территории Российской Федерации; проводится

выбор оптимальных алгоритмов совмещения, фильтрации и развертки фазы для различных типов подстилающей поверхности.

Проведено несколько циклов интерферометрической обработки данных РСА COSMO-SkyMed (Италия), работающего в коротковолновом X-диапазоне с длиной волны излучения 3,1 см, включая: (1) серию из четырех изображений по территории Астраханской области, (2) серию из трех изображений по территории Краснодарского края (Черноморское побережье в районе г. Сочи) и (3) серию из 15 изображений по территории Амурской области (вблизи г. Шимановск).

* Исследования выполнены в рамках ОКР «Регион В-Архив».

Съемка выполнена в период времени с ноября 2009 г. по январь 2010 г. в маршрутном режиме съемки HIMAGE с пространственным разрешением 3 м и размером кадра $40 \times 40 \text{ км}^2$. Кроме того, проведена интерферометрическая обработка данных PCA ALOS/PALSAR (Япония), работающего в длинноволновом L-диапазоне с длиной волны излучения 23,6 см; данные PCA ALOS/PALSAR получены по территории тестового полигона в Тверской обл. в период времени с декабря 2006 г. по февраль 2008 г. в маршрутном режиме съемки FBS с пространственным разрешением 7 м и размером кадра $70 \times 70 \text{ км}^2$ [1].

Цель – отработка основных процедур дифференциальной интерферометрической обработки с использованием данных европейского PCA ASAR/ENVISAT (С-диапазон, длина волны излучения 5,6 см) по зоне землетрясения в Японии (11.03.2011 г.) и результатов прецизионных наземных GPS-измерений; выбор данной территории обусловлен возможностью одновременного доступа к спутниковым и наземным данным, размещенным в открытом доступе в сети Интернет (Группа по наблюдению Земли. URL: <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>). Даты съемки – 19.02.2011 г. и 21.03.2011 г. Режим съемки – IMS, пространственное разрешение 30 м. Общие размеры отснятой территории – $738 \times 72,5 \text{ км}^2$. Обработка проводилась с использованием программного пакета SARscape 4.3 (фирма Sarmap s. a., Швейцария) и опорной цифровой модели местности SRTM V4 [2].

Основные результаты обработки. На первом этапе исследований проведен анализ зависимости средних значений когерентности от размеров окна, используемого при проведении расчетов; полученные результаты показали, что при изменении размеров окна с 3×3 до 21×21 имело место их монотонное падение с 0,23 до 0,13 – очень низкий уровень когерентности изображений [2].

Особое внимание уделено анализу предельных возможностей фильтрации в рамках модифицированного метода Goldstein; данный метод особенно эффективен при фильтрации сильно зашумленных интерферограмм [2]. Установлено, в частности, что при изменении размера d_{IW} квадратных фрагментов, на которые разбивается интерферограмма для проведения быстрого преобразования Фурье (БПФ), от 32 до 4 096 пикселей имело место резкое увеличение площади той части интерферограммы, которая характеризовалась достаточно четкой структурой интерференционных полос [2].

Необходимо отметить, что наиболее существенные ошибки в процессе формирования ЦКС могут возникать по следующим основным причинам:

- 1) программа развертки фазы может не «обнаружить» некоторое количество интерференционных полос, а «неучет» каждой полосы, приводит к уменьшению максимальной величины смещений на величину, равную половине длины волны сигнала PCA, т. е. 2,8 см;

- 2) происходит формирование ложных полос вследствие фильтрации сильно зашумленных интерферограмм с использованием экстремально высоких значений параметров процедуры фильтрации, причем по

аналогии с предыдущим случаем появление каждой такой полосы приводит к ошибке в 2,8 см, но теперь уже в сторону завышения оценки для максимальной величины смещений.

Для оценки общего диапазона возможных ошибок в ЦКС, связанных с фильтрацией интерферограммы, выполнена операция развертки фазы (методом Minimum Cost Flow, рекомендованным для использования в случае сильно зашумленных интерферограмм [3; 4]) для восьми интерферограмм, со значениями ключевого параметра процедуры фильтрации d_{IW} , равными, соответственно, 32, 64, 128, 256, 512, 1 024, 2 048 и 4 096 пикселей. Далее выполнена операция преобразования фазы в смещения и последующего геокодирования, на выходе которой сформированы следующие восемь ЦКС (нижний индекс соответствует значению параметра d_{IW}): ЦКС₃₂, ЦКС₆₄, ЦКС₁₂₈, ЦКС₂₅₆, ЦКС₅₁₂, ЦКС₁₀₂₄, ЦКС₂₀₄₈ и ЦКС₄₀₉₆. Для каждой из 8 ЦКС определены минимальные и максимальные значения получаемых оценок для величин смещений земной поверхности. Показано, что при изменении параметра d_{IW} от 32 до 4 096 пикселей общий диапазон изменения оценок для максимальных значений смещений оказался равным 63 см. Таким образом, некорректный выбор значения параметра d_{IW} способен привести к возникновению очень серьезных ошибок.

Отработка методики выбора оптимального значения параметра d_{IW} проводилась с дополнительным использованием прецизионных результатов подспутниковых GPS-измерений, находящихся в открытом доступе. Проанализирован «косейсмический» файл с данными GPS-датчиков, установленных в зоне землетрясения, в котором зафиксированы величины основных смещений земной поверхности. В результате предварительного анализа отобраны девять GPS-датчиков – по три датчика в областях максимальных, средних и относительно невысоких деформаций земной поверхности (с модулями векторов смещений в диапазоне от 313 до 362 см для первой области, от 176 до 212 см для второй и от 78 до 91 см для третьей).

Для количественного сопоставления результатов спутникового радиолокационного мониторинга и подспутниковых GPS-измерений необходимо рассчитать величины проекций векторов смещений каждого из девяти GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на PCA, чтобы обеспечить их «стыковку» с данными рассчитанных ранее восьми ЦКС (дифференциальная интерферометрия «работает» только с одним компонентом смещений земной поверхности – проекцией смещений на направление наклонной дальности; другие компоненты смещений не влияют на фазовый компонент радиолокационного сигнала, который PCA регистрирует одновременно с амплитудой). С этой целью в координатах East/North/Vert реализована специальная достаточно простая расчетная схема, в рамках которой рассчитывались:

- 1) направляющие косинусы для векторов смещений GPS-датчиков;

- 2) направляющие косинусы для направлений от GPS-датчиков на PCA;

3) значения косинуса угла между направлениями векторов смещений GPS-датчиков и направлениями от GPS-датчиков на РСА;

4) искомые величины проекций векторов смещений GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на РСА.

Величины смещений, полученные по ЦКС для координат трех GPS-датчиков из области относительно невысоких деформаций, имели очень слабую зависимость от значений параметра d_{IW} . При изменении этого параметра от 32 до 4096 пикселей отклонения от среднего уровня в среднем не превышали 1 см. Результаты расчетов величин проекций векторов смещений GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на РСА отличались от этих средних значений всего на 4, 0,5 и 7 см, соответственно.

Напротив, величины смещений, полученные из ЦКС для координат GPS-датчиков из области максимальных деформаций земной поверхности, имели сильную зависимость от значений параметра d_{IW} . При изменении этого параметра в тех же пределах – от 32 до 4096 пикселей – значения величин смещений возрастали на 68, 68 и 66 см, соответственно. Сопоставление полученных результатов наземных наблюдений и результатов спутниковых измерений позволило установить, что наземные данные во всех трех случаях чуть превышают величины оценок, полученных с помощью ЦКС₆₄ (на 4, 6 и 7 см, соответственно) и относительно заметно ниже, чем данные из ЦКС₁₂₈ (на 24, 23 и 22 см соответственно).

Результаты, полученные для второй, промежуточной, группы GPS-датчиков из области средних деформаций, в целом соответствуют аналогичным результатам для области максимальных деформаций. Результаты наземных наблюдений также достаточно близки к соответствующим значениям из ЦКС₆₄ (их разность равна, соответственно, 14, 2 и 4 см). При изменении параметра d_{IW} в пределах от 32 до 4096 пикселей значения величин смещений также возрастают очень значительно – на 54, 71 и 31 см, соответственно.

Итак, продемонстрировано достаточно разумное согласование результатов спутниковых и наземных наблюдений и показано, что оптимальное значение параметра d_{IW} оказалось равным 64 пикселям.

В заключение необходимо отметить, что представленные результаты получены с использованием достаточно ограниченного массива данных наземных наблюдений и по этой причине их следует рассматривать как предварительные. Планируется, что повторный цикл исследований с использованием более полного объема наземных данных будет выполнен с использованием новой версии 5.0 программного пакета SARscape, в которой предусмотрена возможность автоматического выполнения всех процедур сравнительного анализа результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных РСА и результатов измерений наземных GPS-датчиков.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Выполнен совместный анализ результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA ASAR/ENVISAT и подспутниковых GPS-

измерений по зоне землетрясения в Японии с использованием программного пакета SARscape 4.3.

2. Показана сильная зависимость характеристик создаваемых ЦКС от основных параметров обработки. На примере ключевого параметра процедуры фильтрации в рамках метода Goldstein – размера фрагмента интерферограммы для проведения БПФ – продемонстрированы возможности разработанной методики для выбора оптимальных значений параметров обработки с использованием данных наземных GPS-измерений.

3. Полученный опыт интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки будет использован при разработке программного обеспечения перспективных российских РСА.

4. Перспективы развития связаны с отработкой высокоточных методов постоянных отражателей PS и малых базовых линий SBAS, основанных на одновременной обработке большого числа радиолокационных изображений.

Библиографические ссылки

1. Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X и L диапазонов / А. А. Феоктистов, А. И. Захаров, П. В. Денисов, М. А. Гусев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : сб. науч. ст. 2012. Т. 9. № 2. С. 106–110.

2. Анализ предельных возможностей оценки деформации земной поверхности в зоне землетрясения в Японии 11.03.2011 г. по данным PCA ASAR/ENVISAT с использованием программного пакета SARscape / А. А. Феоктистов, А. И. Захаров, П. В. Денисов, М. А. Гусев // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конф. (26–28 июня 2012, г. Муром).

3. Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. № 36(3). P. 813–821.

4. Exploring the SARscape Modulus for ENVI / Classbook. ITT Visual Information Solutions. 2010.

References

1. Feoktistov A. A., Zaharov A. I., Denisov P. V., Gusev M. A. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Sb. nauch. st. Moscow, DoMira. 2012, Vol. 9. № 2, pp. 106–110.

2. Feoktistov A. A., Zaharov A. I., Denisov P. V., Gusev M. A. Trudy IV Vserossyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Aktualnye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnologiy” (Proceedings of the 5th Russian Conference «Radio-physics methods in remote sensing environments»). Murom, 26-28 June 2012.

3. Costantini, M. A Novel phase unwrapping method based on network programming. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998, no 36(3), pp. 813-821.

4. Exploring the SARscape Modulus for ENVI. ITT Visual Information Solutions. 2010.

УДК 528.8.044.2 + 528.873.044.1

АКТИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛОМОВ МОНДИНСКОЙ ВПАДИНЫ ПО ДАННЫМ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ*

М. А. Лебедева¹, В. А. Саньков¹, А. И. Захаров², Л. Н. Захарова²

¹Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664047, Иркутск, Лермонтова, 128. E-mail: lebedeva@crust.irk.ru

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова Российской академии наук
Россия, 141190, Фрязино Московской области, площадь им. акад. Б. А. Введенского, 1.
E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

РСА интерферометрия впервые применена для исследования современных деформаций наблюдаемых в зоне сочленения субширотной Мондинской впадины и субмеридиональной Хубсугульской впадины юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы. Данные, полученные с помощью метода интерферометрии повторного хода, коррелируют с геологическими и геодезическими данными.

Ключевые слова: дифференциальная РСА-интерферометрия, интерферограмма, современные деформации, трещины.

ACTIVE DEFORMATIONS IN THE ZONE OF INFLUENCE OF FAULTS OF MONDY BASIN BY SAR INTERFEROMETRY DATA

M. A. Lebedeva¹, V. A. Sankov¹, A. I. Zakharov², L. N. Zakharova¹

¹Institute of the Earth's Crust of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
128 Lermontov st., Irkutsk, 664047, Russia. E-mail: lebedeva@crust.irk.ru

²Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Academy of Sciences
1 Vvedensky square, Fryazino, Moscow region, 141190, Russia. E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

SAR interferometry firstly used for the investigation of modern deformations observed in a zone of a joint of the sublatitudinal Mondy basin and submeridional Khubsugul basin of the south-west flank of the Baikal rift system. Data obtained by repeat-pass interferometry correlated with geological and geodetic data.

Keywords: differential SAR interferometry, interferogram, modern deformations, cracks.

Деформационная активность разрывных структур Мондинской впадины обуславливается их геодинамическим положением в зоне сочленения субмеридиональных активных разломов юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы с субмеридиональными структурами Хубсугульской впадины. В ходе полевых исследований на южном плече Мондинской впадины была обнаружена серия протяженных трещин отрыва СВ-простираения, рассекающих кору выветривания и скальное основание на локальном водоразделе. Ширина рвов составляет 0,5–2,3 м, глубина до 1,5 м, длина от 30 до 120 м (рис. 1). Ширина зияния трещин в коренных породах достигает 0,5 м.

Для оценки скорости современных движений в пределах исследуемых структур мы применили метод дифференциальной РСА-интерферометрии. Суть метода состоит в обработке пар снимков, снятых в раз-

ное время таким образом, чтобы деформация происходила между пролетами спутников. При наложении снимков друг на друга вычитаются фазы сигналов и, таким образом измеряется изменение дальности по направлению к радару. В нашем исследовании применены снимки L-диапазона японских космических спутников ALOS/PALSAR. Длина волны при съемке в L-диапазоне составляет 23,6 см, что соответствует изменению дальности 11,8 см. Величина разности фаз отображается на интерферограмме. Изменения дальности по направлению к радару пересчитываются в истинные изменения земной поверхности на основании дополнительной информации об объекте и понимании геодинамических процессов. Для вычитания сигнала, обусловленного рельефом, используют цифровые модели рельефа (ЦМР).

* Данные спутниковой интерферометрии получены в рамках проекта 3rd ALOS RA при поддержке японского космического агентства JAXA. Работы выполняются при частичной поддержке фонда РФФИ (№ 13-05-01097_а) и проекта программы ОНЗ РАН № 7.7.

Применение пар снимков с маленькими перпендикулярными базами ($B_{\perp}$), позволяет уменьшить влияние рельефа на получаемый результат. При дополнительном вычитании ЦМР, такой подход позволяет наблюдать деформации даже в гористой местности, если деформации не попадают в область радиолокационной тени. Чтобы уменьшить влияние временной декорреляции, обычно рекомендуется также использовать снимки с небольшой временной базой. Однако известны случаи, когда хорошая корреляция может наблюдаться на протяжении нескольких лет [1]. Таким образом, метод РСА-интерферометрии позволяет уловить сантиметровые смещения поверхности, причем размеры самого объекта исследования (например, сейсмогенного разрыва или активного разлома со значительным крипом) могут достигать нескольких десятков километров. Существуют ограничения метода, такие, как временная декорреляция, происходящая из-

за изменения характеристик поверхности, и влияние атмосферных и ионосферных явлений. Ограничения и методы их преодоления детально описаны [2].

На интерферограмме, полученной из снимков с разницей пролетов 2 года (20090116–20070111), отчетливо выделяется линейная зона активных деформаций сантиметрового уровня (рис. 2). Перпендикулярная база интерферометрической пары мала (114 м), что позволяет исключить влияние остаточного рельефа. Длина структуры составляет около 4 километров. Сдвиг по линии визирования радара (LOS) составляет от 18 до 42 мм, что соответствует вертикальному смещению от 22 до 50 мм, либо горизонтальному смещению от 32 до 74 мм. На данном этапе исследования разделить вертикальную и горизонтальную составляющую смещения невозможно, вследствие применения пары только с одного (восходящего) пролета спутника.

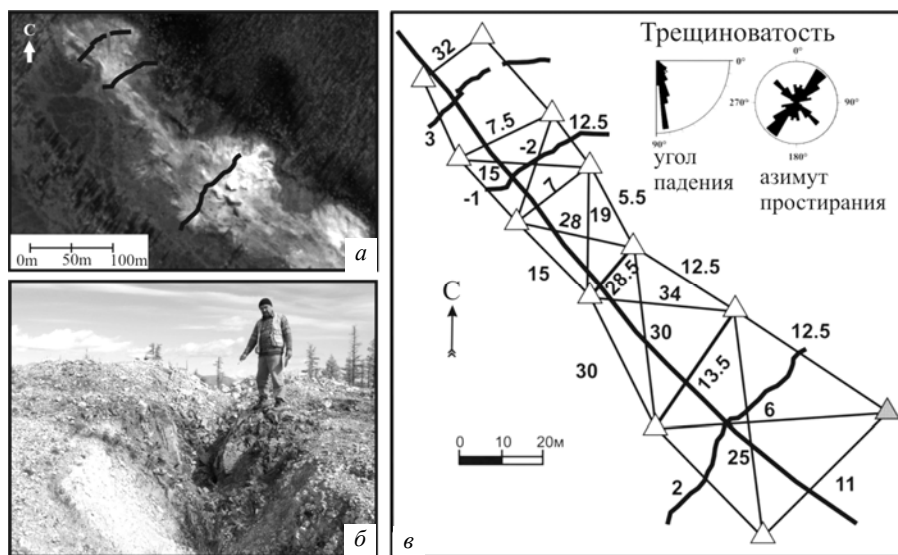


Рис. 1. Трещины в южном борту Мондинской впадины:

a – фрагмент космического снимка EROS A/B (на снимке старый карьер, расположенный в районе Мондинской обсерватории); *б* – вид одной из трещин; *в* – локальный геодезический полигон. Скорости изменения базовых линий измерены в зоне развития трещин. Толстыми линиями показаны трещины отрыва (извилистые линии) и сдвиговая зона СЗ простираения. Треугольники – пункты полигона. Серым цветом выделен опускающийся пункт. Цифры у базовых линий показывают скорости их изменения за период 2009–2011 гг. в мм/год

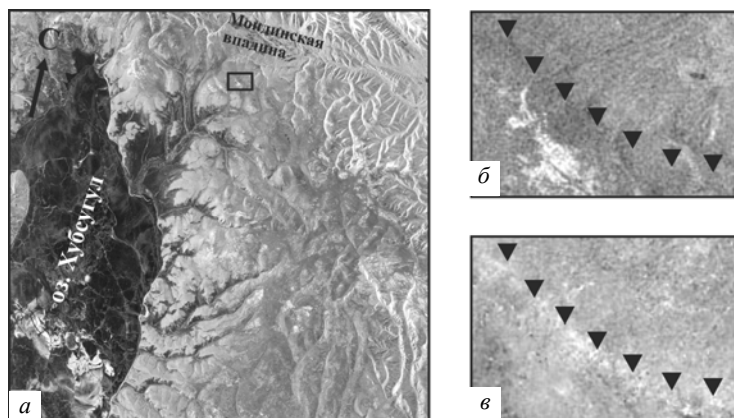


Рис. 2. Деформации земной поверхности в южном борту Мондинской впадины по данным РСА интерферометрии: *a* – обзорный амплитудный снимок; *б* – амплитудный снимок локального полигона; *в* – неразвернутая интерферограмма. Треугольниками показано положение зоны повышенных деформаций СЗ-простираения (светлая полоса)

Данные, полученные с помощью метода РСА-интерферометрии, коррелируют с данными геодезических измерений проведенных в период 2009–2011 гг. с использованием комплекта электронного тахеометра Leica TCR 405 (см. рис. 1, в). Результаты обработки данных измерений показали, что большинство базовых линий полигона испытывает удлинение с максимальными значениями, достигающими 30 мм/год. Отмечается опускание одного из пунктов в юго-восточной части полигона со скоростью более 20 мм/год. Остальные пункты либо стабильны по высоте, либо испытывают некоторое поднятие.

Таким образом, в зоне сочленения субширотной (Тункинской) и субмеридиональной (Хубсугульской) ветвей юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы выявлена зона активного деформирования земной поверхности с характерными скоростями первые сантиметры в год. Активизация разрывных структур в ее пределах происходит в соответствии с современным полем напряжений. Большое влияние на деформации приповерхностной части горного массива, который испытывает удлинение в различных направлениях, оказывает сила гравитации. Данные наземной геодезии и РСА-интерферометрии по местоположе-

нию и интенсивности выявленных деформаций коррелируют между собой. Можно заключить, что исследования современных деформаций на основе данных РСА показали высокий потенциал метода для его использования в горно-таежных районах Сибири. Планируется продолжить исследование с обработкой других сцен и комбинированием их с геодезическими измерениями.

Библиографические ссылки

1. Massonnet D., Rabaute T. Radar interferometry: Limits and potential // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1993. Vol. 31, № 2. P. 455–464.
2. Hanssen R. F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis / Delft University of Technology.

References

1. Massonnet, D., Rabaute, T. Radar interferometry: Limits and potential. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1993, vol. 31, № 2, pp. 455–464.
2. Hanssen, R.F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. Delft University of Technology, the Netherlands, 308 p.

© Лебедева М. А., Саньков В. А.,
Захаров А. И., Захарова Л. Н., 2013

УДК 550-551

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ И ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ*

Т. Н. Чимитдоржиев¹, М. Е. Быков¹, М. О. Лейбман², П. Н. Дагуров¹,
И. И. Кирбижекова¹, Ю. А. Дворников², Н. М. Бердников²

¹Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: tchimit@ipms.bsnet.ru.

²Институт криосферы Земли Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86. E-mail: moleibman@gmail.com

В настоящее время на северной территории России происходят масштабные разрушительные процессы вследствие усиливающейся антропогенной нагрузки и глобального изменения климата. На основе радиолокационных изображений полуострова Ямал и Ямало-Ненецкого автономного округа методами дифференциальной интерферометрии и текстурного анализа локализованы участки микродеформаций и оползневых процессов.

Ключевые слова: радарная интерферометрия, текстурный анализ, оползневые процессы.

* Исследования выполнены при поддержке гранта № 144 «Криогенные ресурсы Арктики и Субарктики: состояние и структура криолитозоны, физико-химическое моделирование и биологический потенциал криогенных систем».

STUDY OF MICRODEFORMATION AND LANDSLIDES OF THE NORTHERN TERRITORIES OF WEST SIBERIA FROM INTERFEROMETRIC DATA

T. N. Chimitdorzhiev¹, M. E. Bikov¹, M. O. Leibman², P. N. Dagurov¹,
I. I. Kirbizhekova¹, Y. A. Dvornikov², N. M. Berdnikov²

¹Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: tchimit@ipms.bscnet.ru

²Institute of the Earth Cryosphere of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
86 Malygin st., Tyumen, 625000, Russia. E-mail: moleibman@gmail.com

Currently at the northern territory of Russia large-scale destructive processes take place, as a result of increase of anthropogenic pressure and climate change. Based on radar images of Yamal peninsula and Yamal-Nenets Autonomous Area, the areas of microstrain and landslides were localized by means of differential interferometry and texture analysis technique.

Keywords: radar interferometry, texture analysis, landslide processes.

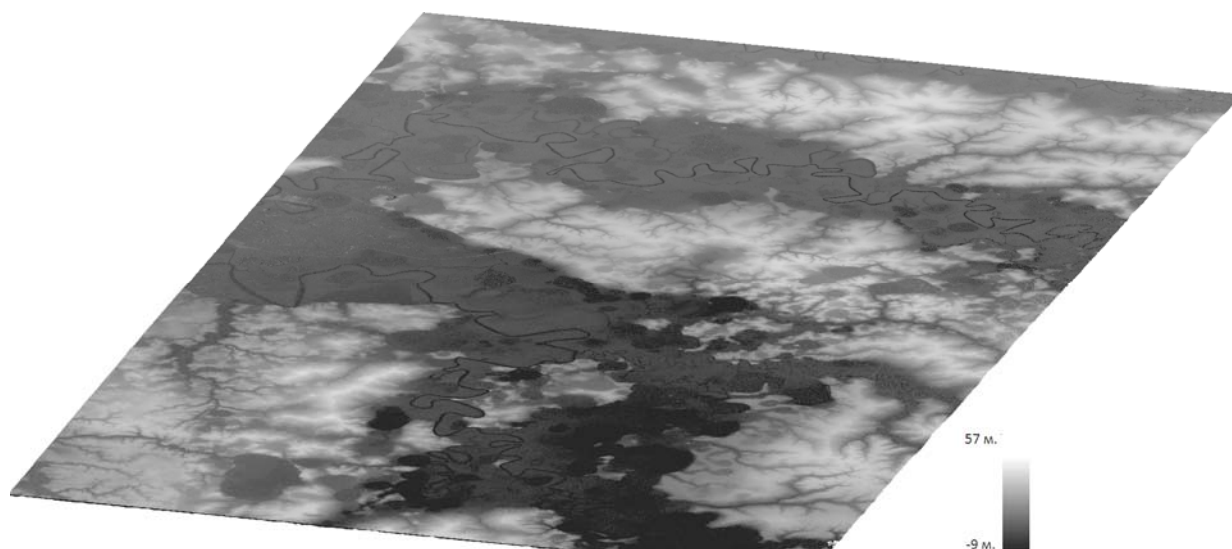
В начале XXI в. одной из наиболее актуальных проблем является изменение среды обитания человека вызванные как антропогенной деятельностью, так и глобальными климатическими процессами. Одними из самых мощных средств мониторинга состояния и динамики окружающей среды в настоящее время стали дистанционные методы зондирования Земли (ДЗЗ). Особую актуальность ДЗЗ приобретает при освоении протяженных и труднодоступных северных территорий Западной Сибири и Арктики [1; 2]. В последние десятилетия вследствие возрастающей антропогенной нагрузки и климатических изменений здесь активизировались оползневые процессы, деформация и разрушение почвы [3]. Сложные погодные условия, продолжительные полярные зимы, снежный покров затрудняют наблюдения северных территорий в оптическом диапазоне. В то время как спутниковые методы радиолокации независимы от погодных условий, времени суток и снежный покров практически прозрачен для радиоволн. В частности методы радарной интерферометрии продемонстрировали высокую эффективность при обнаружении горизонтальных и вертикальных смещений почвенного покрова сейсмического и техногенного характера, «морозного пучения» влажных и заболоченных участков, подвижек льда и др. [4; 5]

В данной статье представлены результаты обработки радарных изображений ALOS PALSAR (L-диапазон, 23,6 см) и TanDEM-X (X-диапазон, 3,1 см) по северным территориям Ямало-Ненецкого автономного округа и полуострова Ямал в 2007–2012 гг. методами дифференциальной интерферометрии и текстурного анализа.

Оценка вертикальных подвижек методом дифференциальной интерферометрии. По тестовым участкам были подобраны радиолокационные изображения, образующие интерферометрические пары. Методом дифференциальной интерферометрии были сформированы фильтрованные геокодированные интерферограммы и созданы карты распределения вертикальных подвижек между съемками. Например, по полигону Марре-Сале (п-в Ямал) на основе радарных снимков ALOS PALSAR 5 февраля 2008 г.,

28 марта, 28 июня и 13 ноября 2010 г. установлено, что большая часть территории исследования стабильна и локализованы участки проседаний и вспучивания. Участки проседания до 5–6 см расположены вдоль береговой линии, а по центру тестового полигона расположена область с поднятием до 2–3 см по краям и 5–6 см в середине соответственно. В частности опускание верхней и нижней оконечности полуострова, возможно, происходит из-за подтаивания ледовой подложки частей выдающихся в море. Либо из-за перехлестывания волн через эти фрагменты происходит смыв-размыв этих выступающих частей. Центральная зона поднятия соответствует морозному пучению почв вдоль заболоченного русла реки. Поскольку величина морозного пучения почвы пропорциональна средней температуре в зимний период [4], то вертикальное смещение до 6 см могло возникнуть за счет разницы амплитуд пучения зимой 2008 г. и более холодной зимой 2010 г.

Построение ЦМР на основе интерферометрических данных. В настоящее время по северным территориям доступны цифровые модели рельефа (ЦМР) с низким пространственным разрешением порядка 1 км. При исследовании склоновых оползневых процессов, а в дальнейшем при их прогнозировании большое значение имеет информация об особенностях топографии местности. Поэтому одной из задач проводимого исследования стало построение ЦМР. Методика построения заключается в следующем: сначала по первой паре изображений строится «опорная» интерферограмма, которая содержит информацию о рельефе; затем по второй паре строится интерферограмма с вычитанием опорной. При этом отображаются только смещения поверхности без влияния топографии. После чего проводятся стандартные процедуры для расчета карты вертикальных смещений [6]. По тестовому полигону Васькины Дачи п-ва Ямал на основе трех радарных изображений ALOS PALSAR 2007–2010 гг. с разрешением 15 м были построены карты относительных высот и вертикальных смещений. А на основе снимков высокого разрешения TanDEM-X (X-диапазон, 3,1 см) создана высокоточная ЦМР с пространственным разрешением 10 м (см. рисунок).



Цифровая модель рельефа территории п-ва Ямал полученная по паре радиолокационных изображений TanDEM-X 9 ноября 2012 г.

Исследования показали, что для оценки долговременных деформаций наиболее результативны съемки в середине зимы (декабрь–январь) с устоявшимися процессами морозных деформаций. В частности, по тестовому полигону Надым за двухгодичный период были выявлены участки со значительными вертикальными смещениями по пути следования нефтегазопровода.

Локализация долговременных изменений на основе текстурного анализа. Сравнительный анализ сезонных и двухгодичных изменений текстуры радарных изображений показал возможность выявления долговременных изменений ландшафта с оценкой соответствующей вероятности [6]. По тестовому полигону Васькины дачи, где деформационные и оползневые процессы наблюдаются в течение последних 20–30 лет, были выбраны четыре снимка ALOS PALSAR в L-диапазоне (HH) 2007–2009 гг. с разрешением 15 м/пс. По тестовому участку распределение разности сезонных и двухгодичных изменений (РСДИ) оказалось близко к распределению Гаусса. Таким образом, для каждого пикселя изображения РСДИ можно вычислить вероятность того, что сезонные изменения превышают долговременные и наоборот. Следовательно, можно локализовать участки, укладывающиеся в рамки статистических вариаций ($1-2-3 \sigma$) с известной вероятностью, а также выявить участки с аномально большой разницей, т. е. с высокой долей вероятности, указывающие на реально произошедшие изменения. Согласно наземным наблюдениям значительных деформационных и оползневых явлений на территории тестового полигона в период между радиолокационными съемками 2007–2009 гг. не происходило, а немногочисленные небольшой площади участки с сильными двухгодичными изменениями располагаются в основном вдоль трасс движения транспорта или соответствуют местам усиленной антропогенной нагрузки.

В результате обработки радиолокационных данных по тестовым полигонам полуострова Ямал и Ямало-

Ненецкого автономного округа: методами дифференциальной интерферометрии построены карты вертикальных смещений; локализованы стабильные области и участки со значительными смещениями; на основе радиолокационных данных высокого разрешения построена высокоточная ЦМР с 10 м разрешением; создана методика выявления наиболее вероятных участков с деформациями поверхности на основе сравнительного анализа сезонных и долговременных изменений текстуры радиолокационных изображений.

Библиографические ссылки

1. Брыксин В. М., Филатов А. В., Евтюшкин А. В. Использование радарных изображений и DINSAR-PSINSAR технологии для мониторинга Западной Сибири и Арктики // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 1.
2. Дарижапов Д. Д., Кирбижекова И. И., Леонов А. С. Обработка интерферометрических данных, полученных с японского спутника ALOS SAR (радар с синтезированной апертурой) // Вестник ВСГТУ. 2010. № 3. С. 5–9.
3. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М. : Тип. Россельхозакадемии, 2007.
4. Применение спутниковой радарной интерферометрии ALOS PALSAR для картирования ареалов распространения и измерения интенсивности криогенного пучения грунтов / Г. И. Татьков, Т. Н. Чимитдоржиев, М. Е. Быков [и др.] // Инженерные изыскания. 2012. № 9. С. 28–34.
5. Исследование криогенных деформаций грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой РСА-интерферометрии и наземного георадарного зондирования / Т. Н. Чимитдоржиев, А. И. Захаров, Г. И. Татьков [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2011. № 5. С. 58–63.
6. Возможности мониторинга ландшафтных изменений тестовых участков полуострова Ямал на основе текстуры радарных изображений / И. И. Кирбижекова,

Т. Н. Чимитдоржиев, М. О. Лейбман, М. Е. Быков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы X Всерос. конф. (12–16 ноября 2012, г. Москва). С. 396–396.

References

1. Briskin V. M., Philatov A. V., Evtushkin A. V. Journal of Radio electronics, 2012, no.6, pp. 1.
2. Darizhapov D. D., Kirbizhekova I. I., Leonov A. S. Bulletin ESSTU, 2010, no. 3, pp. 5–9.

3. Leibman M. O., Kizyakov A. I. Cryogenic landslides Yamal Peninsula and the Ugra. Typography Rosselkhozacademia, Moscow, 2007, 206 p.

4. Tatkov G. I., Chimitdorzhiev T. N., Bikov M. E. [etc.] Engineering survey, 2012, no. 9, pp. 28–34.

5. Chimitdorzhiev T. N., Zakharov T. I., Tatkov G. I. [etc.] Issledovaniya Zemli iz kosmosa, 2011, no. 5, pp. 58–63.

6. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Leibman M. O., Bikov M. E. All-Russian X Conference «Modern problems of remote sensing of the earth from space», Moscow, IKI RAS, 2012, pp. 396–396.

© Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Лейбман М. О., Дагуров П. Н., Кирбижекова И. И., Дворников Ю. А., Бердников Н. М., 2013

УДК 551.24.03

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОЙ ПОДВИЖНОСТИ (ДИНАМИКИ) ГЕОБЛОКОВ И РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА МЕТОДАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Ц. А. Тубанов¹, Г. И. Татков¹, Т. Н. Чимитдоржиев²

¹Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а. E-mail: gin@gin.bscnet.ru

²Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: tchimit@ipms.bscnet.ru

Рассматриваются интерферометрические изображения, полученные по спутниковым данным. Вертикальные движения земной поверхности сопоставлены с кайнозойскими разломами, системой впадин и горстов сухопутного участка рифтовой ступени Среднего Байкала. Тема работы заключается в изучении косейсмических движений связанных с очаговыми структурами Байкальского рифта и примыкающих территорий.

Ключевые слова: радарные спутниковые изображения, землетрясение, Байкальский рифт, неотектонические движения.

ASSESSMENT OF MODERN MOBILITY (DYNAMICS) OF GEOBLOCKS AND FAULTS OF BAIKAL RIFT BY METHODS OF RADAR INTERFEROMETRY

Ts. A. Tubanov¹, G. I. Tatkov¹, T. N. Chimitdorgiev²

¹Geological Institute of Russian Academy of Science, Siberian Branch
6a Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: gin@gin.bscnet.ru

²Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Science, Siberian Branch
8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: tchimit@ipms.bscnet.ru

Interferometric images obtained on satellite data are considered. Vertical movements of the Earth surface are compared with Cainozoic faults, system of depressions and horsts of onshore of Middle Baikal rift stage. Theme of work is to study the co-seismic movements associated with focal structures of Baikal rift and adjacent areas.

Keywords: radar satellite images, earthquake, Baikal rift, neotectonic movements.

Данные по катастрофическому японскому землетрясению Тохоку (2011 г.) свидетельствуют о том, что спутниковые измерения являются практически единственным источником прямой информации о косейсмических движениях земной поверхности. Оценка современной подвижности геоблоков и разрывных

нарушений методами радиолокационной интерферометрии на территории Байкальской рифтовой зоны осложняется расположением эпицентров землетрясений непосредственно в акватории озера Байкал. Все известные землетрясения в районе Среднего Байкала (26 мая 1939 г. MLH = 6,0, 4 июня 1939 г. MLH = 5,0,

6 мая 1949 г. $MLH = 5,8$, 6 октября 1960 г. $MLH = 5,5$, а также 28 октября 1961 г. $MLH = 5,5$) располагаются в пределах разрывных нарушений замаскированных водой.

16 июля 2011 г. ($M_w = 5,3$) было зарегистрировано сильное землетрясение в горном массиве хр. Улан-Бургасы. Разрывные структуры, с которыми возможно связано сейсмическое событие, расположены в юго-западной части Баргузинской ветви Байкальской рифтовой зоны. Структурно район относится к краевой рифтовой ступени и имеет блоковое строение. Кайнозойская разломная сеть установлена по материалам дешифрирования аэро- и космofотоматериалов, привлечения опубликованных и фотодокументов [1]. Система разрывов района является древней и довольно сложной. Докайнозойские дизъюнктивные нарушения имеют широкое распространение на исследованной площади и сыграли существенную роль в формировании тектонических структур. Несомненно, что многие разрывные нарушения заложились в архей-протерозойское время, обновлялись в последующие эпохи и, особенно, в мезозойское и кайнозойское время. Установлено, что для Баргузинского рифта и его горного обрамления характерна диагональная ориентировка древних главных разломов по отношению к кайнозойским морфоструктурам I порядка [2]. Морфоструктуры II порядка ориентированы субпараллельно древним системам разломов.

Характерной особенностью территории является мелкоблоковое строение. В целом, выделяются два крупных сегмента земной поверхности с разной интенсивностью неотектонических движений, разделенных долиной Турки – северный и южный.

Северный сегмент расположен между Усть-Баргузинской впадиной и долиной Турки. Здесь преобладают разломы северо-восточной ориентировки, ограничивающие узкие протяженные блоки и имеющие в плане «клавишный» рисунок, созданный горными массивами хр. Безымянный, Черная Грива и Голондинский, разделенных Безымянско-Максимихинской, Налимовско-Братской и Пазухо-Левом-Максимихинской впадинами. По данным [3], плоскости сместителей сбросов хр. Черная Грива падают на северо-запад, а в хр. Безымянном – на юго-восток. Рассматриваемые разломы были заложены в раннепалеозойское время и в последующем неоднократно обновлялись. Окончательное оформление их связано, вероятно, с формированием впадин байкальского типа.

Южный сегмент рассматриваемой площади имеет мозаичный рельеф, ступенчато повышающийся в юго-восточном направлении к водоразделу хр. Улан-Бургасы. Мозаичность рельефа обусловлена густой сетью разломов-блокоразделов нескольких направлений, с зонами надразломных опусканий вдоль отдельных из них. Здесь большую рельефообразующую роль играют разломы северо-западной ориентировки. Установлено, что на участках их сближения и в разломных узлах отмечаются блоки земной коры, проявляющие тенденцию к опусканию с амплитудами от 100 до 400 м.

Для вычислений деформаций поверхности рельефа использовались данные со спутника ALOS (Японское аэрокосмическое агентство JAXA), оснащенного радаром L-диапазона (PALSAR). Радар предназначен для круглосуточного и всепогодного наблюдения Земли и позволяет, в зависимости от режима сканирования (FBS, FBD, SkanSAR, PLR и прямая передача данных) получать изображения с пространственным разрешением от 10 до 100 м в полосе съемки шириной от 40–70 км до 250–350 км. Основным преимуществом радара PALSAR перед получаемыми ранее данными с ERS-1,2 является длина зондирующей волны, соответствующая L диапазону, что в большинстве случаев решает проблему временной декорреляции интерферометрических пар изображений, вызванной изменениями растительного и снежного покровов, флуктуацией свойств атмосферы. При этом режим съемки PALSAR PLR (полная поляризация излучения) дополнительно повышает когерентность и оптимизирует интерферограмму за счет использования полной поляризационной матрицы. В свою очередь, данные ALOS PALSAR FBS (однополяризационный – HH или VV режим съемки) характеризуются высоким пространственным разрешением – 7 м, что позволяет получить более точную картину смещений геоблоков. В результате, интерферометрические данные ALOS PALSAR имеют относительно высокую когерентность.

Временной интервал между двумя последовательными съемками составил 414 сут (21.06.2008–09.08.2009) и характеризует динамику земной поверхности между двумя последовательными сейсмическими активизациями в этом районе [4]. Общий размах перемещений составил 5,5 см. Интерферограмма по интенсивности вертикальных движений районирована на четыре зоны, отличающихся направлением и величиной смещений. Зоны подъема амплитудой 3 см расположены в восточной части участка в верховьях р. Турка. Зона, выбранная за условно стабильную (относительный ноль), простирается широкой полосой в северо-восточном направлении, зоны опускания земной поверхности (выделены две зоны –1,5 и 2–2,5 см) приурочены к максимихинско-безымянской системе горстов и впадин.

Библиографические ссылки

1. Будаев Р. Ц., Татков Г. И., Коломиец В. Л. Тектоническое и литологическое строение юго-западной ветви Баргузинского рифта для оценки риска возникновения опасных природных процессов в Восточном Прибайкалье // Известия Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1 (8). С. 2036–2039.
2. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне / Замараев С. М. и др. Новосибирск : Наука, 1979.
3. Геологическая карта СССР. Лист N-49-XXV. Объяснительная записка. Составитель В. И. Давыдов. М., 1983.
4. Особенности развития сейсмических активизаций в районе Среднего Байкала в 2008–2011 гг. /

Н. А. Гилева, В. И. Мельникова, Я. Б. Радзиминович, Ц. А. Тубанов // Современная геодинамика Центральной Азии : материалы Всерос. совещания. 2012. Т. 2. С. 22–25.

References

1. Budaev R. Ts., Tatkov G. I., Kolomiets V. L. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2012, vol. 14, № 1 (8), pp. 2036–2039.
2. Zamaraev S. M. et al. Sootnoshenie drevnei i kainozoiskoi struktur v Baikal'skoi riftovoi zone (The ratio

of the ancient and Cenozoic structures in the Baikal rift zone). Novosibirsk, Nauka, 1979. 126 p.

3. Geologicheskaja karta SSSR. List N-49-XXV (Geological map of the USSR. Sheet N-49-XXV). The explanatory note. Compiler V.I. Davydov. M., 1983. 95 p.
4. Gileva N. A., Melnikova V. I., Radziminovich Ja. B., Tubanov Ts. A. Materialy Vserossiiskogo soveshanija «Sovremennaja geodinamika Central'noi Azii...» (Proceedings of All-Russia. Meeting "Modern geodynamics of Central Asia ..."). 2012, vol. 2, pp. 22–25.

© Тубанов Ц. А., Гатьков Г. И., Чимитдоржиев Т. Н., 2013

УДК 537.871.5 530.1:528.871.6

КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ*

Т. Н. Чимитдоржиев¹, А. М. Гармаев², И. И. Кирбижекова¹,
К. С. Емельянов³, М. А. Гусев³, А. В. Базаров¹

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

²Бурятский филиал ФГУП «Рослесинфорг»
Россия, 670034, Улан-Удэ, ул. Тобольская, 63. E-mail: kingartur@mail.ru

³Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы»
Россия, 127490, г. Москва, ул. Декабристов, 51/25. E-mail: gusev_ma@ntsomz.ru

На базе двух тестовых лесничеств Республики Бурятия разработана методика комбинирования мультиспектральных и радиолокационных данных высокого разрешения для картографирования лесов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радарная поляриметрия, мультиспектральный анализ, картография лесов.

COMBINATION OF METHODS OF SATELLITE RADAR AND SPECTRAL ANALYSIS FOR RESEARCH OF FOREST RESOURCES OF REPUBLIC OF BURYATIA

T. N. Chimitdorzhiev¹, A. M. Garmaev², I. I. Kirbizhekova¹,
K. S. Emelyanov³, M. A. Gusev³, A. V. Bazarov¹

¹Institute of Physics Materials Science of Russian academy of Sciences, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: tchimit@ipms.bscnet.ru

²Buryat Branch of the Federal State Unitary Enterprise "Roslesinform"
63 Tobolskaya st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: kingartur@mail.ru

³Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC "Russian Space Systems"
51/25 Decabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: gusev_ma@ntsomz.ru

On the basis of two test forestry of Republic of Buryatia it was developed a technique combining high-resolution multispectral and radar data for forests mapping.

Keywords: remote sensing, radar polarimetry, multispectral analysis, forests mapping.

* Исследования выполнены в рамках ОКР «Регион В-Архив».

В настоящее время для эффективного решения самого широкого круга задач в сфере лесного хозяйства необходима достоверная информация о распределении, состоянии и динамике лесных ресурсов. Для инвентаризации лесного фонда, планирования развития лесного хозяйства и использования лесных ресурсов необходимы лесные карты [1]. В 2010 г. в России инициирована Государственная программа инвентаризации лесов (ГИЛ) на основе внедрения современных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Использование космических снимков позволяет оперативно обновлять картографические материалы различных масштабов и значительно сократить стоимость их обновления. В настоящее время в ДЗЗ возрастает роль аэрокосмических информационных технологий, основанных на применении радиоволновых систем [2; 3].

В 2012 ИФМ СО РАН, Бурятский филиал ФГУП «Рослесинфорг» и ИЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» провели совместные работы по созданию и верификации базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования. В том числе, решалась задача разработки методики комплексирования оптических мультиспектральных и радиолокационных данных дистанционного зондирования в целях картографирования лесов. Верификация данной методики производилась с использованием наземных данных. В данной статье приведены некоторые результаты упомянутых работ.

Характеристика лесов Республики Бурятия. Республика Бурятия расположена в центре Азиатского континента. Практически на всей территории преобладают сильно расчлененные горы, равнинные поверхности встречаются лишь в тектонических впадинах и долинах крупных рек. Площадь гор более чем в 4 раза превышает площадь, занимаемую низменностями. Для РБ характерна значительная приподнятость над уровнем моря от 456 до 3 491 м. Площадь земель, на которых расположены леса, по состоянию на 1 января 2012 г. составляет 29 638,11 тыс. га. Общая площадь лесов на землях лесного фонда 27 010,40 тыс. га, в том числе: защитных – 34,4 %, эксплуатационных – 33,9 %, резервных лесов – 31,5 %. Фонд лесовосстановления насчитывает 1,5 % от общей площади. В фонде лесовосстановления наибольшую площадь занимают гари – 64,3 %, вырубки – 23,8 %, пустыри и прогалины – 9,7 %, погибшие древостои – 2,1 %. В организационном плане лесной фонд РБ разделен на 37 лесничеств и 88 участковых лесничеств. Расчетная лесосека (ежегодный допустимый объем изъятия древесины) по всем категориям рубок (ликвидная древесина) составляет 10 203,0 тыс. м³, фактическое использование – 25,5 %.

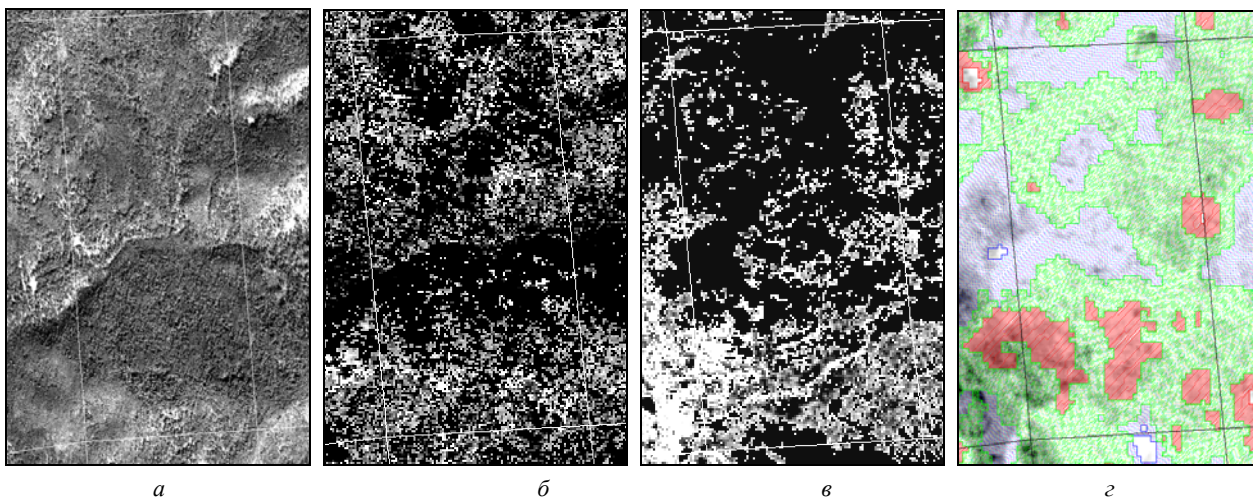
Согласно данным таксации по тестовым лесничествам (Мухоршибирскому и Куналейскому) породный состав отдельных участков леса варьируется от чисто лиственных березово-осиновых (Б-Ос) до хвойных, сосново-лиственничных (С-Лц). В основном на территории РБ произрастают смешанные леса с преобладанием одной из пород: сосны, лиственницы,

березы, осины. Кедр, пихта и др. обычно составляют не более 40 % или отсутствуют. Полнота изменяется от 0,15 до 1. Запасы древесины – от 20 до 330 м³/га.

Распределение лесов по породному составу на основе мультиспектральных данных. Для классификации лесных массивов Мухоршибирского и Куналейского лесничеств были привлечены мультиспектральные и панхроматические снимки с разрешением 10 и 2,5 м, полученных с французского спутника SPOT5 в сентябре 2011 г. На рисунке представлен фрагмент панхроматического изображения для квартала 151 Мухоршибирского лесничества. Наиболее эффективные методы классификации отбирались по совокупности критериев: сходимость процесса кластеризации, контроль совпадения границ лесных кварталов и выделов с границами полученных кластеров, соответствие данным таксации отдельных лесных кварталов и панхроматическому снимку. При классификации использовались от 2 до 30 итераций. Наиболее эффективным оказалось комбинирование неконтролируемых методов с привлечением элементов спектрального анализа. Первоначально по каждому снимку было выделено 25 кластеров, но затем произведено слияние 2–3-х групп кластеров близких по спектральным характеристикам, так что общее количество уменьшилось до 13–15 для разных территорий.

В дополнение к классификационной карте методом субпиксельного спектрального анализа были составлены карты распределения некоторых пород лесной растительности. Метод линейного смешивания предполагает, что спектральный профиль каждого пикселя мультиспектрального изображения формируется за счет суммирования вкладов нескольких объектов пропорционально своему присутствию на земной поверхности. Метод очень чувствителен к набору эталонных спектров отдельных компонент. Основной критерий при составлении такого комплекса – малые значения ошибок rms. Результаты оказались чувствительны к методу трансформации изображений при геопривязке. Меньше всего искажений привносит метод «ближайшего соседа». Каждая порода или вид определялся по нескольким компонентам: древесине, коре, листьям, шишкам, иголкам. распределение сосны и березы-осины по кварталу 151 представлено на рисунке (б, в). Яркость пикселей пропорциональна вкладу каждой породы в общий спектр.

Проверка результатов классификации осуществлялась в два этапа – во время обработки снимков посредством сверки с данными таксации и завершающая проверка проведена в полевых условиях совместно представителями Бурятского филиала ФГУП «Рослесинфорг», ИФМ СО РАН, лесничеств и арендаторов в сентябре – октябре 2012 г. В результате проверки установлены две характерные для оптического диапазона ошибки: при многоярусной структуре лесного полога на полученной карте отобразился только верхний ярус, а 4–5-летние гари, поросшие густым молодняком, классифицировались как полноценные участки леса.



Панхроматическое изображение SPOT5 (а); распределение сосны по данным SPOT5 (б); распределение березы/осины (в); биомасса по данным ALOS PALSAR (более плотная штриховка соответствует большей биомассе) (з) для 151-го квартала Мухоршибирского лесничества

Оценка биомассы по радиолокационным данным.

Радиоволны сантиметрового и дециметрового диапазона обладают большой проникающей способностью, благодаря которой можно изучать скелетную структуру лесного полога (стволы, крупные ветви и т. п.) [4, 5]. При недостаточно густом лесном покрове (для лесов РБ средняя сомкнутость 0,6) радарный сигнал проникает вплоть до почвенного покрова. Исследование перспектив использования спутниковой радиолокационной информации на примере радарных данных L-диапазона ALOS PALSAR 2006–2010 гг. и C-диапазона Radarsat-2 2012 г. показало, что большинство поляриметрических характеристик могут служить индикаторами лесной и нелесной территорий, но многие из них коррелируют с гористым рельефом местности и зависят от геометрии радиолокации.

В результате качественного анализа выделены поляриметрические характеристики, мало зависящие от топографии, такие как радарный вегетационный индекс, поляризационное отношение, отношение интенсивностей радарного отражения на кросс и согласованной поляризации. Все они в определенной степени зависят от «плотности» рассеивающей среды или биомассы лесной растительности и были применены для предварительной оценки распределения биомассы, запасов древесины и уточнения классификационных карт, полученных на основе оптических данных. На рисунке (з) представлено распределение биомассы лесной растительности, полученное на основе данных ALOS PALSAR. Большей биомассе соответствует более густая штриховка.

Очевидно, что для определения точных количественных биометрических показателей лесной среды необходимы фундаментальные исследования закономерностей процессов отражения и рассеяния радиолокационного сигнала в сложных условиях гористой местности.

На примере Куналейского и Мухоршибирского лесничеств Республики Бурятия разработана, верифицирована и апробирована методика комплексирова-

ния оптических мультиспектральных и радиолокационных данных ДЗЗ высокого разрешения для картирования леса. Отобраны наиболее эффективные для решения поставленных задач методы обработки данных ДЗЗ; определена структура картографической продукции, которую можно получить при использовании радиолокационных и мультиспектральных данных. Для тестовых лесничеств составлены карты топографических особенностей местностей, лесных и нелесных территорий, оценочного распределения запасов древесины и биомассы, классификационные карты кластеров в соответствии со спектральными характеристиками и карты распределения хвойного и лиственного леса.

Библиографические ссылки

1. Сухих В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве : учебник. Йошкар-Ола : МарГТУ. 2005.
2. О возможностях совместной обработки радиолокационных изображений L-диапазона и спектральных снимков оптического диапазона для классификации лесных массивов / Н. А. Арманд, Т. Н. Чимитдоржиев, В. В. Ефременко [и др.] // Радиотехника и Электроника. 1998. Т. 43, № 9. С. 1070–1075.
3. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
4. Кирбижекова И. И., Батуева Е. В., Дарижапов Д. Д. Поляриметрические свойства природных объектов на радарных изображениях Байкальского региона // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 10. С. 85–94.
5. Чимитдоржиев Т. Н., Архинчиев В. Е., Дмитриев А. В. Поляриметрическая оценка пространственных флуктуаций радарных изображений для восстановления структуры лесного полога // Исследование Земли из космоса. 2007. № 5. С. 80–82.

References

1. Sukhikh V. I. Aerokosmicheskie metody v lesnom khozystve I landshaftnom stroitelstve (Aerospace methods in forestry and landscape construction). Yoshkar-Ola, MarGTU, 2005, 392 p.
2. Armand N. A., Chimitdorzhiev T. N., Efremenko V. V. [etc.] Radiotekhnika I Elektronika. 1998, vol. 43, no. 9, pp. 1070–1075.
3. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N. Izvestia visschih uchebnykh zavedeniy. Geodeziya I aerofotos'emka. 2008, no. 6, pp. 64–73.
4. Kirbizhekova I. I., Batueva E. V., Darizhapov D. D. Journal Radioelektroniki. 2010, no. 10, pp. 85–94.
5. Chimitdorzhiev T. N., Arkhincheev V. V., Dmitriev A. V. Isledovaniya zemli iz kosmosa. 2007, no. 5, pp. 80–82.

© Чимитдоржиев Т. Н., Гармаев А. М., Кирбижекова И. И., Емельянов К. С., Гусев М. А., Базаров А. В., 2013

УДК 537.871.5 530.1:528.871.6

КАРТИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ РАДАРНЫХ ДАННЫХ ПО БАЙКАЛЬСКОМУ РЕГИОНУ*

И. И. Кирбижекова, Е. В. Батуева

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

Для исследования состояния и мониторинга динамики лесных сред актуально развитие и применение методов радарной поляриметрии. Проведен статистический анализ сезонных изменений объемной компоненты разложения Клода-Поттье по Улан-Удэ и его окрестностям на основе данных ALOS PALSAR 2007–2009 гг. Результаты могут быть использованы для картирования лесных массивов.

Ключевые слова: радарная поляриметрия, декомпозиционные методы, лесная среда.

MAPPING AND MONITORING OF FOREST ENVIRONMENTS ON THE BASIS OF POLARIMETRIC RADAR DATA ON BAIKAL REGION

I. I. Kirbizhekova, E. V. Batueva

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Science, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: kirbizhekova@bk.ru

For study and monitoring of the state and changes of forest environment it is actual to develop and apply radar polarimetry. We performed a statistical analysis of seasonal changes in the volume components of the Claude-Pottier decomposition for the city Ulan-Ude and its surroundings on the basis of ALOS PALSAR 2007–2009. Results can be used for forest mapping.

Keywords: radar polarimetry, decomposition methods, forest medium.

Благодаря уникальной проникающей способности электромагнитных волн сантиметрового и дециметрового диапазона радиолокационные методы обладают определенными преимуществами и возможностями исследования физических свойств и состояния объектов исследования [1]. При отражении и рассеянии радиолокационных волн происходит преобразование их поляризации в зависимости от физических свойств среды, таких как диэлектрическая проницаемость, проводимость, температура, влажность и т. п., а также от геометрических свойств рельефа, шероховатости поверхности и др. [2; 3]. Базовые аспекты теории и поляриметрические

методы решения многочисленных прикладных задач хорошо известны. В настоящее время наиболее распространены методы классификации природных и искусственных объектов основанные на поляриметрической декомпозиции разделяющей объекты по типам механизмов рассеяния [4–6]. Декомпозиция методом Клода-Поттье и визуальное сравнение разносезонных изображений ALOS PALSAR по территории дельта реки Селенга выявило значительные изменения процессов рассеяния по исследуемой территории, причем наиболее сильные изменения связаны с зимним периодом с отрицательными температурами [7].

* Исследования выполнены при частичной поддержке гранта РФФИ 13-08-01132 «Создание системы дистанционного мониторинга состояния и изменений объектов биосферы на основе данных радарной поляриметрической интерферометрии».

Сезонные изменения результатов поляриметрической декомпозиции. Ранее проведенный нами статистический анализ результатов классификации осенне-зимних поляриметрических данных ALOS PALSAR по территории горного массива Хамар-Дабан, долины и дельты реки Селенга выявил значительное снижение в зимний период (на 20 %) доминирующей роли объемного рассеяния высокой и средней энтропии и рост доминирования поверхностного рассеяния средней и низкой энтропии [8]. Сравнительный анализ поляриметрических характеристик также указывает на сезонные изменения процессов рассеяния. В частности, для лесных массивов в зимний период установлены изменения радарного вегетационного индекса gvi , степени поляризации и др., свидетельствующих о снижении доли объемного рассеяния. Подобные изменения отчасти обусловлены общим уменьшением биомассы смешанных лесов и кустарниковой растительности при смене сезонов осень-зима. Дополнительное исследование сезонных изменений объемной F_{vol} , нечетной F_{odd} и четной F_{dbl} компонент Фримана на небольшом чисто сосновом тестовом участке Кударинского лесхоза показало снижение объемной и двукратной компонент в среднем на 3÷3.5 дБ и стабильность поверхностной ком-

поненты. Таким образом, изменения объемной составляющей в радиолокационном отклике от лесной среды также связано с изменением диэлектрической проницаемости и проводящих свойств среды.

Аналогичный статистический анализ проведен на паре весенних снимков г. Улан-Удэ и его окрестностей, полученных ALOS PALSAR 17 апреля 2009 г. и 28 мая 2007 г. (начало и конец весны). Изображения интенсивности и трех компонент Фримана на 2009 г. представлены на рис. 1. На территории ровные участки поверхности располагаются в долине р. Уда (рис. 1, б), преобладает гористая местность, покрытая лесами (рис. 1, в). Породный состав варьируется, в основном смешанный с преобладанием сосны и лиственницы (87 %). В долине р. Уда располагаются городские кварталы, дачные поселки, пригороды (рис. 1, г).

Визуальное сравнение результатов Н-А- α -классификации, компонент Фримана, gvi и других показало локальные малозаметные изменения. Гистограммы gvi для снимка в целом и двух полигонов, демонстрирующих небольшой рост gvi лесной растительности к концу весны (см. рис. 1, а) представлены на рис. 2. Для третьего полигона графики практически дублируют рис. 2, а.

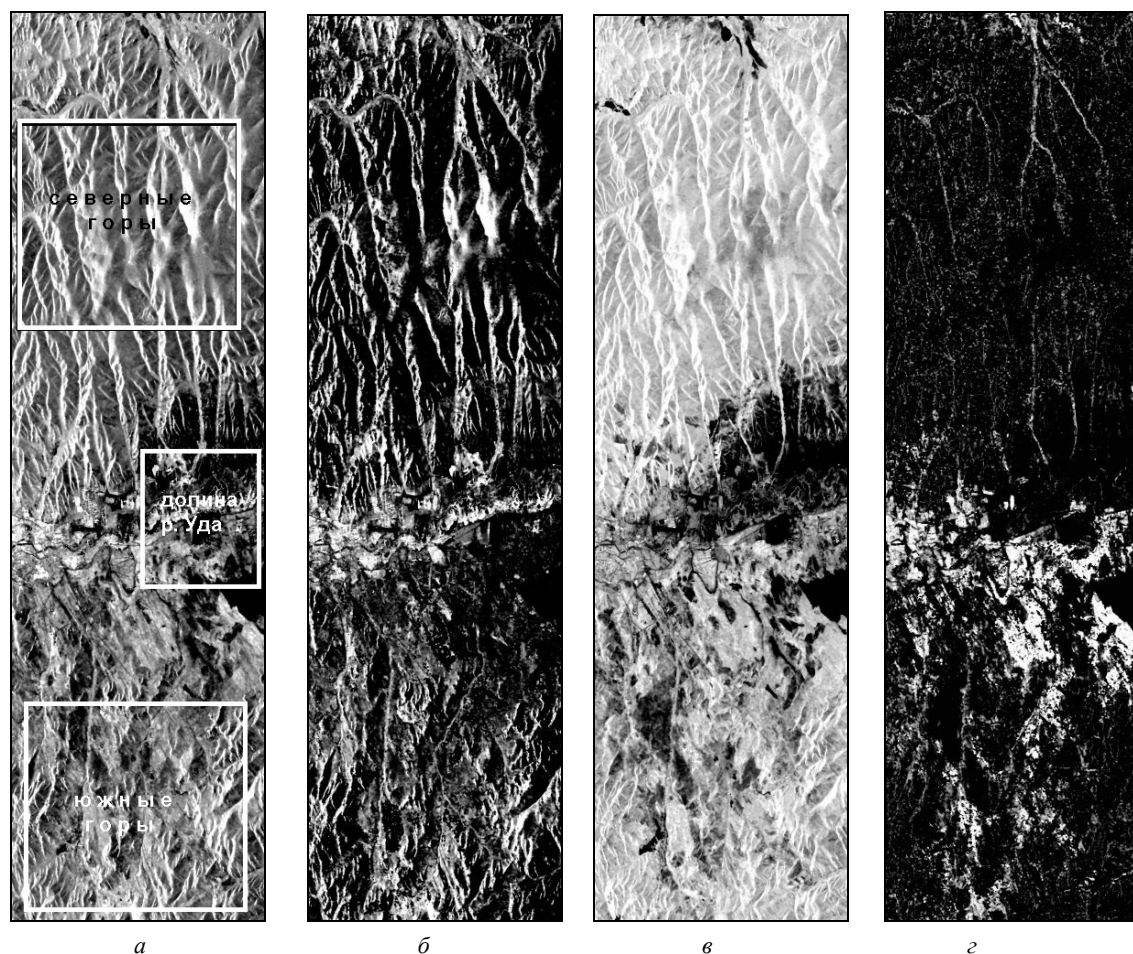


Рис. 1. Интенсивность (а) радиолокационного изображения г. Улан-Удэ и его окрестностей по данным ALOS PALSAR 17/04/2009 и компоненты разложения Фримана: F_{odd} (б); F_{vol} (в); F_{dbl} (г)

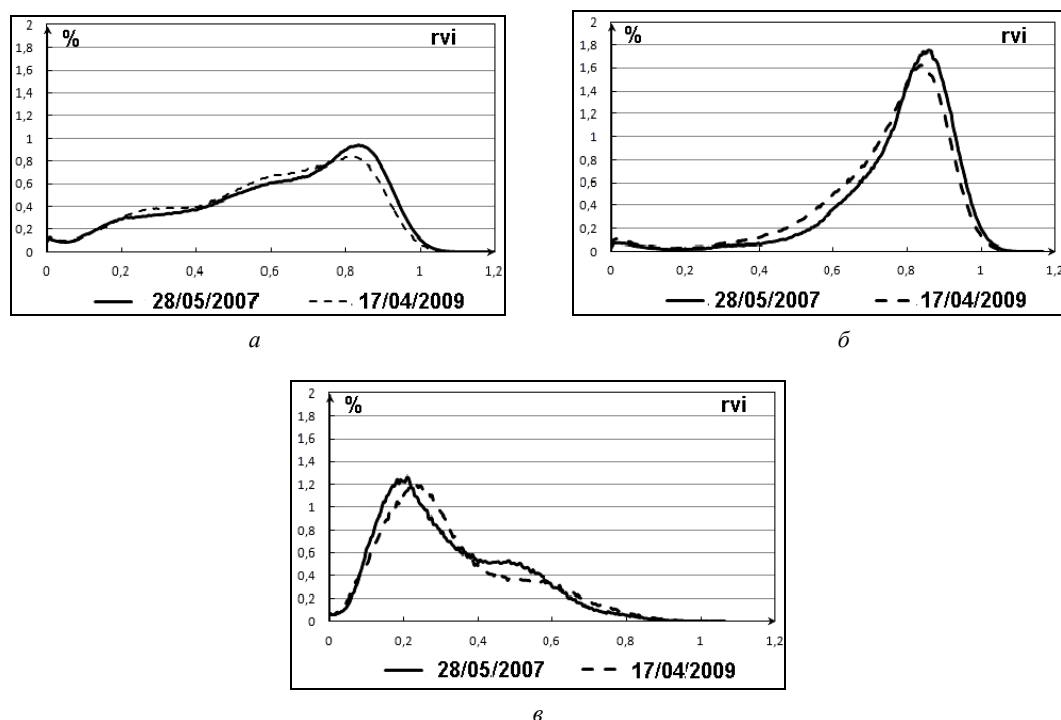


Рис. 2. Гистограммы распределения радарного вегетационного индекса на основе данных ALOS PALSAR: а – снимки в целом и два тестовых участка; б – северные горы; в – долина р. Уда

Статистика классов Н-α-классификации на 28/05/2007 и изменения Δ к 17/04/2009

Класс	Снимок в целом, %		Тестовый полигон 1 «Северные горы», %		Тестовый полигон 2 «Южные горы», %		Тестовый полигон 3 «Долина р. Уда», %	
	2007	Δ	2007	Δ	2007	Δ	2007	Δ
<i>Четное (в основном двукратное) рассеяние (Dbl)</i>								
1 (высокой энтропии)	0	+0	0	+0	0	+0	0	+0
4 (средней энтропии)	1,99	−0,17	0,20	−0,02	3,28	−0,10	3,75	−1,62
7 (низкой энтропии)	0,12	+0,03	0,03	+0,03	0,08	+0,05	0,22	−0,09
<i>Объемное рассеяние (Vol)</i>								
2 (высокой энтропии)	33,27	−5,97	61,59	−10,63	10,70	−1,73	1,67	+0,88
5 (средней энтропии)	24,42	+1,03	14,52	+2,39	39,90	−1,90	16,29	−2,09
8 (низкой энтропии)	0,05	+0	0,03	+0	0,03	+0	0,06	−0,03
<i>Нечетное (в основном поверхностное) рассеяние (Odd)</i>								
6 (средней энтропии)	35,32	+4,22	22,26	+7,49	42,64	+3,84	59,09	+1,27
9 (низкой энтропии)	4,81	+0,87	1,36	+0,78	3,36	−0,06	18,92	−1,68

Статистика населенности классов для 28 мая 2007 г. и ее изменение к 28.05.2009 г. представлены в таблице. Как видно из таблицы, в целом по снимку объемное рассеяние доминирует на 58 % территории, поверхностное на 40 %, а двукратное – на 2 %. В горах (полигон 1) иное распределение – 76, 23 и 1 % соответственно, и в долине р. Уда (полигон 3) – 18, 78 и 4 %. Объемное рассеяние высокой энтропии в целом

по снимку в начале весны на 5,97 % ниже, причем изменения в основном связаны с лесной растительностью на горах (10,63 %), что вероятнее всего, обусловлено вкладом лиственных пород на стадии роспуска листвы. В долине р. Уда изменения имеют противоположное направление, скорее всего, вследствие более долговременных причин (застройки, прирост насаждений на дачных участках и в пригородах).

Таким образом, сезонные изменения процессов рассеяния в лесной среде в зависимости от породного состава леса отражаются на изменениях поляриметрических характеристик, а также доминировании объемной и поверхностной компонент рассеяния на радиолокационных снимках L-диапазона. Сохранение или смена доминирующей роли объемной и поверхностной компонент в совокупности с другими поляриметрическими характеристиками может служить индикатором хвойных и лиственных пород и возможности их картографирования на основе радарных данных.

Библиографические ссылки

1. Manual of Remote Sensing. Principles and Applications of Imaging radar Manual / by ed. R. A. Ryerson. Vol. 2. 1998. P. 865.
2. Кирбижекова И. И., Батуева Е. В., Дарижапов Д. Д. Поляриметрические свойства природных объектов на радарных изображениях Байкальского региона // Журнал радиоэлектроники. № 10. С. 85–94.
3. Козлов А. Л., Логвинов А. И., Сарычев В. А. Радиолокационная поляриметрия. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника. 2007.
4. Чимитдоржиев Т. Н. Некоторые результаты анализа гибридной поляриметрии ALOS PALSAR // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 59–62.
5. Cloude S. R., Pottier E. An Entropy-Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR // IEEE Trans GRS. 1997. Vol. 35 (1). P. 68–78.
6. Freeman A., Durden S. T. A Three-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Data // IEEE Trans. GRS. 1998. Vol. 36 (3). P. 963–973.

7. Захарова Л. Н., Захаров А. И. Динамика поляриметрических свойств естественных покровов на разнотемпературных данных ALOS PALSAR // Журнал радиоэлектроники. № 10. С. 39–45.

8. Кирбижекова И. И., Батуева Е. В. Исследования сезонных изменений лесных массивов по данным ALOS PALSAR // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 270–271.

References

1. Manual of Remote Sensing. Principles and Applications of Imaging radar Manual. R. A. Ryerson editor-in-chief. USA. Vol. 2. 1998. P. 865.
2. Kirbizhekova I. I., Batueva E. V., Darizhapov D. D. Journal Radioelectronici, 2010, no. 10, pp. 85–94.
3. Kozlov A. L., Logvinov A. I., Sarichev V. A. Radiolokatsionnaya polyarimetriya. Polyarizatsionnaya struktura radiolokatsionnykh signalov (Radar polarimetry. Polarization structure of radiolocation signals). Moscow, Radiotekhnika, 2007, 640 p.
4. Chimitdorzhiev T.N. Issledovaniya Zemli iz kosmosa, 2010, no 6, pp. 59–62.
5. Cloude S. R. and Pottier E. An Entropy-Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR//IEEE Trans GRS. 1997. Vol. 35 (1). P. 68–78.
6. Freeman A. and Durden S.T. IEEE Trans. GRS, 1998, Vol. 36 (3), pp. 963–973
7. Zakharova L. N., Zakharov A. I. Journal Radioelectronici, 2010, no 10, pp. 39–45.
8. Kirbizhekova I. I., Batueva E. V. Izvestia Vuzov. Physics, 2012, vol.55, no 8/2, pp. 270–271.

© Кирбижекова И. И., Батуева Е. В., 2013

УДК 551.321+550.837.76

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ И МЕТОДАМИ GPS-НАВИГАЦИИ*

Т. Н. Чимитдоржиев¹, Г. И. Татьков², Ц. А. Тубанов², П. Н. Дагуров¹, А. И. Захаров³,
И. И. Кирбижекова¹, А. В. Дмитриев¹, М. Е. Быков¹

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

²Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а. E-mail: gin@gin.bscnet.ru

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова Российской академии наук
Россия, 141190, Фрязино Московской области, площадь им. акад. Б. А. Введенского, 1.
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

Представлены результаты исследований деформаций и динамики ледового покрова озера Байкал на основе радиолокационных данных и наземных GPS-измерений. Методами спекл-интерферометрии определены значения и направления горизонтальных смещений ледовых массивов в южной котловине и в окрестностях п-ва Святой хороши согласующиеся с наземными GPS-измерениями.

Ключевые слова: спекл-интерферометрия, текстурный анализ, GPS-измерения.

* Исследования выполнены при поддержке Междисциплинарного проекта СО РАН № 73 «Изучение закономерностей и механизмов сейсмостектонических процессов в земной коре методами физического моделирования на ледовом покрове озера Байкал». Радарные данные ALOS PALSAR получены по гранту Японского аэрокосмического агентства 09/JAXA/AEO № 0223001 «Study of topography and geology of Baikal region using optical and radar ALOS data».

RESEARCH OF LAKE BAIKAL ICE COVER DYNAMICS ON THE BASIS OF RADAR DATA AND GPS-NAVIGATION METHODS

T. N. Chimitdorzhiev¹, G. I. Tatkov², Zh. A. Tubanov², P. N. Dagurov, A. I. Zakharov³,
I. I. Kirbizhekova¹, A. V. Dmitriev¹, M. E. Bikov¹

¹Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Science, Siberian Branch
8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: tchimit@ipms.bsnet.ru

²Geological Institute of Russian Academy of Science, Siberian Branch
6a Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: gin@gin.bsnet.ru

³Fryazino Branch of the Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Science,
1 Vvedensky square, Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia. E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

The results of studies of deformation and dynamics of the ice cover of Lake Baikal on the basis of radar data and ground-based GPS-measurements. Speckle interferometry method determined the values and directions of the horizontal displacements of ice massifs in the southern basin and around peninsula Svyatoi, which are in good agreement with ground-based GPS-measurements.

Keywords: speckle interferometry method, texture analysis, GPS-measurements.

С 2006 г. ледовый покров озера Байкал стал моделью для исследования закономерностей деформационных и сейсмических процессов в литосфере [1]. В рамках интеграционного научного проекта на льду проводились комплексные экспериментальные и теоретические исследования, включая инструментальный мониторинг абсолютных и относительных перемещений структурных блоков различного ранга, деформаций хрупкого поверхностного слоя фрагментов ледового покрова, а также сейсмической и акустической активности [2]. Основная цель исследований – выявление и статистический анализ взаимосвязи механизмов деформации различного ранга и их дальнейшее использование для обсуждения проблемных вопросов геомеханики, геофизики и тектоники.

Для составления непрерывной, пространственной картины деформаций на основе локальных «наземных» наблюдениях были привлечены радиолокационные данные дециметрового и сантиметрового диапазона ALOS PALSAR 2008–2011 гг. и RADARSAT 2012 г.

Динамика блочной структуры ледового покрова на основе текстурного анализа. Структура трещин, ледовых плит и блоков отчетливо прослеживается на радарных изображениях. Сравнивая текстурные характеристики снимков за последовательные даты можно получить представление о процессах формирования, разрастания и «залечивания» трещин. Для количественного анализа была отработана методика выделения векторных слоев на базе алгоритмов классификации массива текстурных характеристик для каждого снимка с последующим сравнением кластеров со схожими характеристиками. Сравнение блочных структур за разные даты из-за сложного поступательно-вращательного движения отдельных льдин, а также вследствие изменений размеров и формы отдельных блоков вплоть до дефрагментации или наоборот, срастания соседних блоков не позволило провести оценку горизонтальных смещений. Более результативными оказались исследования структурных изменений трещин ледового покрова [3]. Таким обра-

зом методы текстурного анализа эффективны для фиксации отдельных этапов формирования, разрастания или «залечивания» трещин.

Исследование динамики ледового покрова методами радарной интерферометрии. Для оценки горизонтальных и вертикальных подвижек ледовых плит был применен метод дифференциальной интерферометрии [4; 5]. Вследствие низкой когерентности, вероятно вызванной значительным временным интервалом между съемками (46 дней для ALOS PALSAR и 24 дня для RADARSAT) и сильного изменения ледовой обстановки по тестовым участкам ожидаемые результаты не были получены [3].

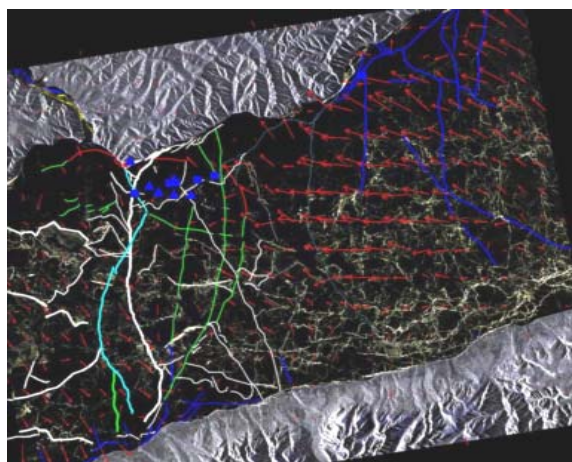
При смещениях льда зачастую происходит некогерентное смещение соседних рассеивателей в пределах одного пикселя и относительно других пикселей – элементов пространственного разрешения радара. Вследствие чего когерентность радарной интерферометрической пары снижается и использование метода дифференциальной интерферометрии может привести к большой погрешности измерений. В подобных случаях принято использовать метод спекл-интерферометрии, часто именуемый в иностранной литературе «offset-tracking procedure» или «speckle-tracking method», заключающийся в расчете кросс-корреляции малых фрагментов радарных изображений поверхности льда. Установленные направления и амплитуды перемещений отдельных фрагментов ледового покрова, вычисленных методом спекл-интерферометрии парам радарных снимков 2009–2011 гг. представлены на рис. 1, 2.

Субширотная область хрупких деформаций шириной от мыса Лиственничного до Больших Котов на северном берегу и от пос. Выдрино до пос. Танхой на южном берегу приурочена в 2010 г. к зоне конвергенции двух крупных ледовых массивов, один из которых, «Восточный» дрейфует с востока на запад (возможно под действием ветра Баргузина или подледного течения от р. Селенги к р. Ангаре). Другой, «Западный» смещается в юго-восточном направлении (рис. 1, а). Во фронтальной части Западного блока, вдоль южного побережья озера образовалась протяженная

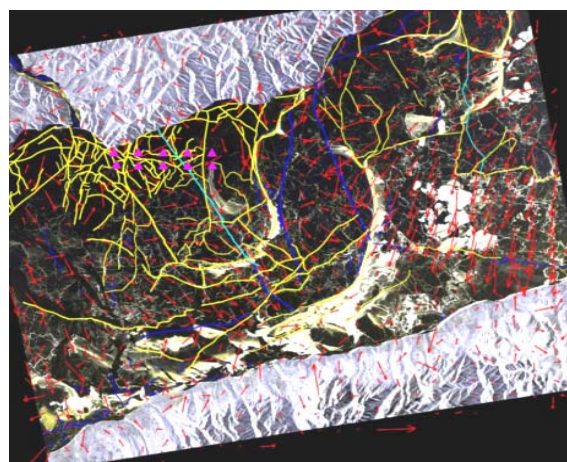
система станковых трещин. Амплитуды перемещений внутри ледового массива «Западный» нарастают в северо-восточном направлении и резко затухают в прибрежной части. Для массива «Восточный» характерно нарастание амплитуд подвижек в западном направлении. В тыловой части массива образовались многочисленные трещины растяжения. В пределах выделенной зоны конвергенции субширотного направления, ограниченной серией станковых трещин, амплитуды перемещений резко снижаются, распределение направлений близко к хаотическому, что свидетельствует о сложно-напряженном состоянии зоны конвергенции. В 2011 г. вследствие более теплой зимы и формирования более тонкого ледового панциря возникли отличия деформаций ледового поля в целом по тестовому участку и отличий направлений и амплитуд смещений (рис. 1, б).

Оценка горизонтальных подвижек наземными GPS-измерениями. В марте 2010–2012 гг. были проведены наземных GPS измерения перемещений опор-

ных точек, жестко закрепленных на ледовом покрове в районе п. Листвянка и п. Боярск. Несмотря на достаточно высокие суточные смещения амплитудами до 2–3 м, наблюдаемые в отдельных точках ледового покрова, общие перемещения отдельных точек за период наблюдений (7–10 дней) оказались менее 1 м. При анализе траекторий смещений всех пунктов GPS во многих случаях в течение одного дня наблюдался возврат реперных точек к почти исходному положению. Вектор движения после 12 ч нередко менялся на обратный. Возможно, что ледяные поля, слегка изогнутые деформациями в результате термических напряжений, распрямляются; при этом GPS измерения фиксируют обратные деформации. Эти особенности траекторий движений относительно базовой береговой точки можно вслед за предшественниками интерпретировать как проявление некоей квазиупругой отдачи ледяной пластины после предшествующего «регионального» сжатия и порожденного им смещения

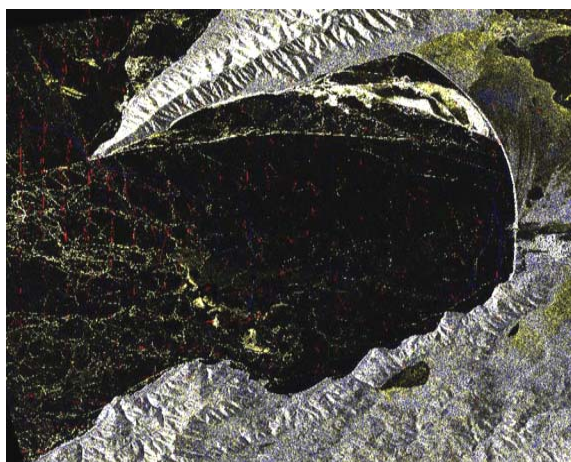


а

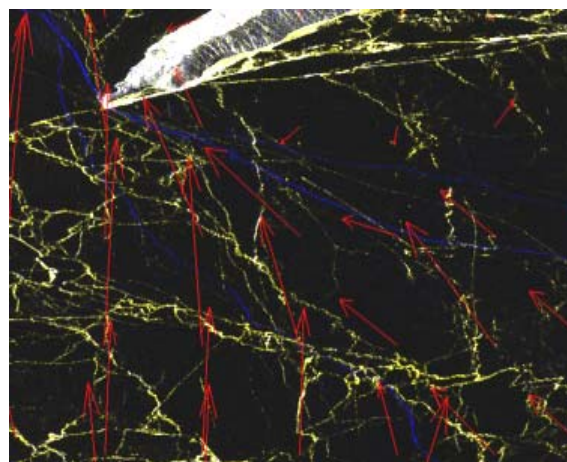


б

Рис. 1. Динамика ледового покрова для тестового участка Листвянка по результатам спекл-интерферометрии данных ALOS PALSAR:
а – 21.01.2010–08.03.2010; б – 24.01.2011–11.03.2011.



а



б

Рис. 2. Динамика ледового покрова для тестового участка Максимиха по результатам спекл-интерферометрии данных ALOS PALSAR:
а – 20.01.2009–07.03.2009; б – фрагмент

с последующей релаксацией напряжений. Выполненные GPS наблюдения подтверждают сделанные ранее выводы о преимущественно термальном механизме инициации деформирования ледового покрова Байкала. Для полевых измерений использовались спутниковые геодезические приемники HiPer Topcon и Trimble R3.

В целом, оценки перемещений – дрейфа ледового покрова, интерферометрическими методами хорошо согласуются с данными подспутниковых GPS измерений. Сравнение наземных наблюдений со спутниковыми данными показало, что активные деформационные процессы происходят не только на границах крупных блокоразделов ледового покрова оз. Байкал, но и во всем его объеме, вследствие внутривблоковой фрагментации ледовых пластин, находящихся в сложном напряженном состоянии.

Библиографические ссылки

1. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре / Н. Л. Добрецов, С. Г. Псахье, В. В. Ружич [и др.] // ДАН. 2007. Т. 412, № 5. С. 656–660.
2. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал / В. В. Ружич, С. Г. Псахье, Е. Н. Черных [и др.] // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289–299.
3. Результаты исследований динамики ледового покрова озера Байкал методами спутниковой радиолокации ALOS PALSAR и GPS-навигации / И. И. Кир-

бижекова, Т. Н. Чимитдоржиев, Ц. А. Тубанов [и др.] // Вестник БНЦ СО РАН. 2012. № 1 (5). С. 42–59.

4. Использование данных PALSAR при выполнении геодинамического мониторинга нефтегазовых месторождений / А. В. Евтюшкин, А. В. Филатов, Ю. В. Васильев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 2. С. 122–128.

5. Использование данных радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR и георадарного зондирования для исследования криогенных деформаций грунтов / Т. Н. Чимитдоржиев, В. Б. Хаптанов, А. И. Захаров [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 4. С. 172–181.

References

1. Dobretsov N. L., Psakhie S. G., Rugich V. V. [etc.] DAN, 2007, Vol. 412, no. 5, pp. 656–660.
2. Rugich V. V., Psakhie S. G., Shernikh E. N. [etc.] Geologiya i geophisika. 2009, Vol. 50, no. 3, pp. 289–299.
3. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Tubanov T. A. [etc.]. Vestnik BNS SO RAN, 2012, no. 1 (5), pp. 42–59.
4. Evtuchkin A. V., Philatov A. V., Vasilev U. V. [etc.] Sovremennye problemi distanzhinnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2010, Vol. 7, no. 2, pp. 122–128.
5. Chimitdorzhiev T. N., Haptanov V. B., Zakharov A. I. [etc.] Gurnal radioelektroniki. 2010, no. 4, pp. 172–181.

© Чимитдоржиев Т. Н., Татьяков Г. И., Тубанов Ц. А., Дагуров П. Н., Захаров А. И., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В., Быков М. Е., 2013

УДК 528.85

МОНИТОРИНГ АГРАРНЫХ РЕСУРСОВ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ ERS-2\ SAR*

А. В. Евтюшкин¹, В. М. Брыксин¹, Н. В. Рычкова²

¹Балтийский федеральный университет имени И. Канта
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14. E-mail: AYEvtuyushkin@kantiana.ru

²Барнаульский юридический институт
Россия, 656038, Барнаул, ул. Чкалова, 49. E-mail: polkovnik@buiimvd.ru

Показаны особенности распознавания видового состава зерновых культур при анализе многовременных радарных изображений ERS-2. Архитектура растений и проективное покрытие почвы существенно отличаются для различных культур, как в период активного роста, так и во время увядания листьев, что повышает возможность разделения культур на радарных снимках. Для устранения погрешностей динамического моделирования продуктивности культур предлагается выполнять коррекцию листового индекса по спутниковым данным.

Ключевые слова: ERS-2, SAR, радар, MODIS, посевы культур, LAI, EPIC.

* Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ по гранту 13-07-00419.

MONITORING OF AGRICULTURAL RESOURCES ON MULTITEMPORAL ERS-2/SAR

A. V. Yevtyushkin¹, V. M. Bryksin¹, N. V. Rychkova²¹Baltic Federal University named after I. Kant
14 Nevskiy st., Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: AYEvytyushkin@kantiana.ru²Barnaul Institute of Law
49 Chkalov st., Barnaul, 656038, Russia. E-mail: polkovnik@buimvd.ru

The features of the recognition of the species composition of crops in the analysis of multi-temporal radar images ERS-2. Architecture of plants and projective covering of the soil significantly differ for various crops, both during active growth, and during withering of leaves that raises possibility of division of types of crops on radar images. To correct the errors of the dynamic modeling crop productivity it is offered to undertake correction of leaf area index according to satellite data.

Keywords: ERS-2, SAR, radar, MODIS, crop, LAI, EPIC.

Разработка методов применения оптических и радарных данных ДЗЗ для мониторинга состояния аграрных ресурсов в период вегетации, использования этих данных для коррекции имитационной модели биопроductивности является актуальной проблемой [1–5]. Необходимо разработать высокоточную методику оценки по радарным изображениям листового индекса (LAI) пропашных культур, самовосстанавливающихся степных агроценозов и мелколесий на заброшенных землях. Достаточно изучена связь листового индекса с коэффициентом обратного рассеяния радаров для лесных территорий [6]. Однако, для полей с зерновыми культурами с небольшим проективным покрытием значительный вклад в обратное радарное рассеяние вносит неоднородность механического состава, влажности и диэлектрической проницаемости верхнего слоя почвы [4; 7].

Оценка по всепогодным радарным изображениям листового индекса LAI в границах пропашных полей также позволит выполнять прогнозирование урожайности зерновых культур на основе модели биопроductивности EPIC [5]. Листовой индекс, оцененный по спутниковым данным, необходим для корректировки расчетов листового индекса по математической модели, накапливающей погрешности вследствие недостоверных данных по агрофизическим свойствам почвы и ежедневным метеоданным. Для растительных покровов диапазон LAI, может изменяться от менее 1 для пустынь, до 8 для дождевых тропических лесов.

В модели EPIC потенциальное ежедневное изменение в сухой биомассе зависит от листового индекса (LAI) и солнечной радиации (RA):

$$dB_p = 0,0005 \cdot BE \cdot RA \cdot (1 - e^{-0,65 \cdot LAI}),$$

где BE – коэффициент преобразования энергии к биомассе.

Ежедневное приращение листового индекса (dLAI) ограничивается коэффициентом стресса (Reg), который определяется как минимальная величина из водного, температурного или азотного стресса:

$$dLAI = dLAI_T(LAI_{mx}, LAI, HU) \cdot Reg,$$

где dLAI_T – теоретическая функция приращения исходя из максимально возможного листового индекса

(LAI_{max}), текущего индекса (LAI) и накопленной суммы температур за период роста (HU).

Листовой индекс LAI рассчитывается как функция суммы эффективных температур, стрессов и стадий развития культуры. От появления до начала увядания листьев, LAI оценивается по формуле

$$LAI_j = LAI_{j-1} + dLAI,$$

где j – день прогноза; j–1 – предыдущий день.

Урожайность зерна (YLD) рассчитывается пропорционально итоговой биомассе наземной части:

$$YLD = HI \cdot \max(BIOM),$$

где HI – индекс урожайности, определяемый экспериментально.

Возможно наземное подспутниковое инструментальное измерение и спутниковая оценка индекса LAI [5]. Наиболее достоверным считается алгоритм MOD15 для обработки данных радиометра MODIS. В нем предлагается кусочно-линейная зависимость LAI от NDVI. Индекс NDVI рассчитывается по алгоритму MOD13.

При прогнозировании урожайности выполняются ежедневные расчеты биопроductивности зерновых культур по модифицированной методике EPIC с корректировкой расчетных значений листового индекса на основе спутниковой оценки вегетационного и листового индексов [5]. Периодичность коррекции должна составлять не менее двух раз с учетом разреженной облачности на период до начала спада листового индекса связанного с естественным увяданием листового покрова зерновых культур. На основании расчетов по модели прогнозируются биологическая урожайность культур и оптимальные сроки начала уборки в разрезе районов или субъекта федерации.

В 2005–2007 гг. в период с мая по октябрь Европейским космическим агентством (ESA) планировались витки ERS-2 для съемки сельскохозяйственной зоны Западной Сибири для обеспечения проекта Cat-1 ID-3158. В 2008 и 2010 гг. ESA проводило миссии по кросс-интерферометрической тандемной съемке Земли на основе ERS-2/SAR и ENVISAT/ASAR. При тандемной съемке спутники сканируют одну и ту же территорию земной поверхности с интервалом в 30 мин, что позволяет исключить временную декорреляцию

и строить точные ЦМР. Во время этой миссии увеличивалось число повторных пролетов ERS-2 на зерносеющие регионы Западной Сибири и юга европейской части России. За 2005–11 гг. накоплен архив из 76 тыс. кадров ERS-2/SAR на территорию России с числом повторных съемок на отдельные территории 40–50. Данные ERS-2/SAR и MODIS принимались Центре ДЗЗ ЮНИИИТ на антенные комплексы ОПТЭКС и ТНА-9 на всю зону радиовидимости. Переобработка накопленных архивных данных ERS-2/SAR и MODIS за 2005–2010 гг. позволит разработать методику оценки LAI зерновых культур по калиброванным радарным данным аналогично модели STEP [7].

Многовременной мониторинг развития посевов зерновых культур требует разработку методов проведения синхронных подспутниковых измерений биометрических параметров в течение быстротекущих фенологических периодов развития посевов с учетом разрешающей способности спутниковых сенсоров, наземных спектрофотометров, измерителей листового индекса, метеоусловий на момент съемки. В связи с разнообразием агроклиматического потенциала зерносеющих регионов и обширностью сельскохозяйственных угодий становится актуальной задача разработки методов мониторинга и прогнозирования урожайности зерновых культур с использованием данных метеорологических и радарных спутников с учетом агрофизических особенностей почв и развития растений.

Полевые наблюдения зерновых культур для дешифрирования данных ERS-2 с точной геопривязкой проводились в 2006–2010 гг. на полях Кулундинской опытной станции и опытных полях АНИИСХ СО РАСХН [8]. Цветовой RGB синтез из амплитудных кадров ERS-2/SAR, выполненных в июне, июле и августе на одну и ту же территорию позволяет визуально разделять следующие культуры: подсолнечник, пшеница, кукуруза, просо. Не разделяются пшеница и овес, что связано с совпадением фенофаз развития культур. При включении в цветовой синтез снимков за май и сентябрь, достоверно выделяются паровые поля, стерня и естественная нераспаханная степь, используемая под пастбище. Снимки за октябрь позволяют контролировать осеннюю вспашку почвы и ход уборки подсолнечника, убираемого по агротехнике возделывания культуры в Западной Сибири при наступлении заморозков с целью повышения масличности. Локально выпавшие на сухую почву осадки при сильном ветре вносят искажение в снимки ERS-2 в виде светлых полос. Сильнее этот эффект проявляется на засоленных почвах и наблюдался на убранных полях с минимальным проективным покрытием и однородной структурой шероховатостей на всей площади полей в 2005–2008 гг. на осенних снимках ERS-2 в регионах Восточного Зауралья, Северного Казахстана и Степного Алтая

Цветосинтезированные изображения MODIS с разрешением 250 м и ERS-2/SAR за разные даты съемки отображают многообразие фенофаз развития зерновых культур в различных агроклиматических зонах

юга Западной Сибири. Различия связаны с различными сроками сева, неравномерностью выпадения осадков по территории в летние месяцы, плодородием почвы, соблюдения агротехники и севооборотов, засоренностью полей. Достоверно выделяются группы полей засеянных одной культурой и паровые поля. Разновременные данные всепогодного космического радара ERS-2/SAR среднего разрешения позволяют определить видовой состав культур с точностью до поля в дождливые годы с большим числом облачных дней. Для различных агроклиматических зон требуется привлечение информации с тестовых полей и экспертных оценок по размещению возделываемых культур.

Применение модифицированной динамической модели биологической продуктивности растений EPIC в сочетании с космическими снимками позволяют достоверно оценивать урожайность основных зерновых культур на региональном уровне. Технология предполагает использование архивных оптических и радарных космоснимков за предыдущие годы для определения в различных агроклиматических зонах региона тестовых полей достаточной площади и конфигурации для расчета на период вегетации зерновых культур в текущий год вегетационного и листового индексов. Перспективно развитие данной технологии с использованием радаров SENTINEL-1A/B, с периодичностью обзора 12 сут для одного спутника и 6 суток при двух спутниках.

Данные ERS-2 получены по проекту ESA Cat-1 ID 3158 «Agricultural applications of remote sensing in West Siberia».

Библиографические ссылки

1. Bouman B. A. M., Uenk D. Crop classification possibilities with radar in ERS-1 and JERS-1 configuration // Remote Sensing of Environment. 1992. Vol. 40, iss. 1. P. 1–13.
2. Blaes X., Vanhalle L., Defourny P. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series // Remote Sensing of Environment. 2005ю Vol. 96. Issue 3–4, pp. 352–365.
3. Ulaby F., Allen C., Eger G., Kanemasu E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index // Remote Sensing of Environment. 1984, V.14, iss. 1–3. P. 113–133.
4. An Agroecological Modeling Approach to Explain ERS SAR Radar Backscatter of Agricultural Crops / B. A. M. Bouman, D. W. G. van Kraalingen, W. Stol, H. J. C. van Leeuwen // Remote Sensing of Environment. 1999. Vol. 67, iss. 2. P. 137–146.
5. Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Рычкова Н. В. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // Известия Алтай. гос. ун-та. 2010. № 1/2 (65). С. 89–93.
6. Boreal forest LAI retrieval using both optical and microwave data of ENVISAT / T. Manninen, P. Stenberg, M. Rautiainen // Proc. of the IGARSS'05 Symp. 2005. Vol. 7. P. 5033–5036.

7. Evolutionary bi-objective optimization of a semi-arid vegetation dynamics model with NDVI and σ^0 satellite data / S. Mangiarotti, P. Mazzega, L. Jarlan // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112, iss. 4. P. 1365–1380.

8. Мониторинг зерновых культур на юге Западной Сибири по данным MODIS и ERS-2 / В. М. Брыксин, А. В. Евтюшкин, Г. А. Кочергин, Н. В. Рычкова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 2. С. 183–188.

References

1. Bouman B. A. M., Uenk D. Crop classification possibilities with radar in ERS-1 and JERS-1 configuration. Remote Sensing of Environment. 1992, vol. 40, Issue 1, pp. 1–13.

2. Blaes X., Vanhalle L., Defourny P. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. Remote Sensing of Environment. 2005, vol. 96, Issue 3–4, pp. 352–365.

3. Ulaby F., Allen C., Eger G., Kanemasu E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area in-

dex. Remote Sensing of Environment. 1984, vol. 14, Issue 1–3, pp. 113–133.

4. B. A. M. Bouman, D. W. G. van Kraalingen, W. Stol and H. J. C. van Leeuwen. An Agroecological Modeling Approach to Explain ERS SAR Radar Backscatter of Agricultural Crops. Remote Sensing of Environment. 1999, Vol. 67, Issue 2, pp. 137–146.

5. Bryksin V. M., Yevtyushkin A. V., Rychkova N. V. Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010, no. 1/2(65), pp. 89–93.

6. Manninen T., Stenberg P., Rautiainen M., Smolander H., Voipio P., Ahola H. Boreal forest LAI retrieval using both optical and microwave data of ENVISAT. Proceedings IGARSS'05 Symposium. Florence, Italy. 2005, Vol. 7, pp. 5033–5036.

7. Mangiarotti S., Mazzega P., Jarlan L., Mougin E., Baup F., Demarty J. Evolutionary bi-objective optimization of a semi-arid vegetation dynamics model with NDVI and σ^0 satellite data. Remote Sensing of Environment. 2008, V.112. Issue 4, pp.1365–1380.

8. Bryksin V. M., Yevtyushkin A. V., Kochergin G. A., Rychkova N. V. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2007, Vol. 4, no. 2, pp. 183–188.

© Евтюшкин А. В., Брыксин В. М., Рычкова Н. В., 2013

УДК 004

БАЗОВЫЕ ПРОДУКТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

М. А. Гусев¹, П. В. Денисов¹, И. И. Кирбижекова², А. В. Дмитриев²

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы» Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51/25. E-mail: gusev_ma@ntsomz.ru

²Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. E-mail: kirbizhekova@bk.ru

Представлены результаты работ по созданию в НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» Банка базовых продуктов ДЗЗ в части радиолокационной информации. Приведены примеры продуктов, технологический цикл создания которых реализован в 2012 г. Представлены планы по дальнейшему развитию технологий.

Ключевые слова: банк базовых продуктов, дистанционное зондирование, потоковая обработка данных, РСА.

EARTH OBSERVATION ON SAR-DATA BASIC PRODUCTS

M. A. Gusev¹, P. V. Denisov¹, I. I. Kirbizhekova², A. V. Dmitriev²

¹Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems” 51/25 Dekabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: gusev_ma@ntsomz.ru

²Institute of Physical Material Science of Russian academy of Science, Siberian Branch 8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: kirbizhekova@bk.ru

This article presents the results of work on the creation of the data bank of basic products on SAR-data in Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”. The article contains examples of products with technological cycle of production implemented in 2012, and plans for the further development of technologies.

Keywords: Basic products, data bank, remote sensing, stream processing, SAR.

В рамках реализации Федеральной космической программы России на период 2006–2015 гг. в НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» осуществляется разработка технологий формирования и ведения банка базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования (Банка БП). Основная задача нового сервиса Оператора – обеспечение российских потребителей информационными продуктами ДЗЗ – решается путем автоматизированного потокового создания, хранения и распространения БП.

БП предназначены для решения тематических задач природно-ресурсного и экологического мониторинга в ведомственных и региональных информационно-аналитических центрах. В качестве исходной информации для создания БП выступают как данные оптического диапазона, так и данные радиолокационного наблюдения.

В силу особенностей метеобстановки и условий освещенности на значительной части территории Российской Федерации затруднительно использование оптических систем для создания большинства видов информационных продуктов ДЗЗ. Возможность проведения радиолокационной съемки вне зависимости от указанных факторов позволяет получать информацию о состоянии подстилающей поверхности и ее изменениях в пространстве и времени с высокой оперативностью по всей территории и делает БП на основе радиолокационной информации (БПР) незаменимым инструментом для организации всепогодного и круглосуточного мониторинга.

С 2011 г. в НЦ ОМЗ проводятся работы по созданию опережающего задела в области обработки информации с перспективных российских космических комплексов радиолокационного наблюдения. В сотрудничестве с ведущими научными и производст-

венными организациями разработаны пилотные технологии автоматизированного создания БП на основе радиолокационной информации (БПР).

Номенклатура БПР отвечает следующим направлениям целевого применения – сельское и лесное хозяйство, морская среда, чрезвычайные ситуации, экология. Отработка технологий проводится с использованием данных зарубежных систем ДЗЗ, в их числе ENVISAT, RADASAT-1/2, ALOS.

БПР, отражающие состояние подстилающей поверхности. Одной из типичных задач ДЗЗ является получение информации о состоянии подстилающей поверхности в заданный момент времени. Для этого предназначены карты типов поверхности на основе радиолокационных данных, полученных в режиме одновременной регистрации двух поляризаций (НН, НV) отраженного сигнала. К настоящему времени реализованы технологии получения трех разновидностей данного БПР в виде композитных изображений, имеющих разную изобразительную способность. Их отличие – в составе RGB-каналов. В двух каналах располагаются амплитудные НН- и НV-радиолокационные изображения, третий канал формируется по одной из трех схем: а) $\arctg (НН/НV)$; б) $(НН - НV) / (НН + НV)$; в) НН-НV. Выбор конкретного типа осуществляется экспертом в зависимости от поставленных задач дальнейшей тематической обработки.

На данном виде БПР уверенно дешифрируются границы залесенных территорий, различные по составу участки леса, безлесные территории с различной степенью шероховатости поверхности, разнородные сельскохозяйственные угодья. В качестве примера на рис. 1 представлена карта типов поверхности на основе данных Radarsat-2 по территории республики Бурятия.



Рис. 1. Карта типов поверхности на основе данных Radarsat-2

БПР, отражающие изменение подстилающей поверхности во времени. Важным достоинством радиолокационных изображений является возможность автоматизированного выделения по ним изменений подстилающей поверхности, произошедших между двумя съемками. Соответствующий вид БПР – карты изменений – позволяют дешифровать изменения, связанные с появлением/ликвидацией или изменением размеров полигонов ТБО, вырубок леса, лесными пожарами, проведением строительных работ, природным и техногенным воздействием на подстилающую поверхность, в том числе в результате чрезвычайных ситуаций, осуществлением сельскохозяйственной деятельности и вегетацией растений. Карты изменений создаются на основе двух амплитудных радиолокационных изображений, полученных на одной поляризации излучения, в виде композитного RGB-изображения со следующим составом каналов – $R:A2$, $G:(A1/A2)^2$, $B:A1$, где $A1$, $A2$ – амплитуды радиолокационных изображений за предпоследнюю и последнюю даты, соответственно.

БПР, отражающие состояние водной поверхности. Целесообразно выделить БПР, которые являются наиболее информативными при мониторинге состояния водной поверхности – карты сликов (плечных загрязнений), карты подтоплений и карты состояния ледяного покрова.

При проведении мониторинга районов судоходства с использованием периодически получаемых карт сликов появляется, например, возможность оперативного выявления нефтеналивных судов, производящих нелегальную промывку танков и сброс загрязняющих веществ в воду. Карта сликов представляет из себя радиолокационное изображение водной поверхности с выделенными цветом областями минимального от-

ражения радиолокационного сигнала (вероятные плечные загрязнения) и бинарной маски, в которой данным областям соответствуют максимальные, а окружающему фону – минимальные значения яркости пикселей.

Карты подтоплений являются четвертой разновидностью карт изменений и создаются на основе тех же исходных данных в виде RGB-изображения – $R:A2$, $G:A2$, $B:A1$, где $A1$, $A2$ – амплитуды радиолокационных изображений за предпоследнюю и последнюю даты, соответственно. Особенностью данного алгоритма формирования композитного изображения является отображение водных поверхностей на результирующем изображении оттенками синего цвета, что облегчает визуальное восприятие и дальнейшее дешифрирование специалистом предметной области. На рис. 2 представлена карта изменений, полученная на основе данных ASAR/ENVISAT по территории Алтайского края (г. Бийск). На данном БПР отчетливо дешифрируются территории, подтопленные в результате сильного паводка на реке Бия в мае 2006 г.

Карты состояния ледяного покрова представлены в виде RGB-изображений, в каналах которых размещены амплитудные радиолокационные изображения за последние 3 даты съемок. Данный вид БПР позволяет получать информацию о границах, характеристиках (возраст, сплоченность и т. д.) и динамике ледяного покрова. Это свойство крайне важно для обеспечения безопасности при навигации речных и морских судов, особенно, по Северному морскому пути. В виду зависимости проникающей способности радиоволн от их длины наибольшую информативность в данном случае имеют БПР, созданные на основе данных длинноволновых радиолокаторов (S-, L-, P-диапазонов).



Рис. 2. Карта подтоплений на основе данных ASAR/ENVISAT

В 2013 г. планируется провести работы по расширению номенклатуры БПР за счет автоматизации процесса классификации методом Клода-Поттье (Н-а-а-классификация). В настоящее время это один из наиболее эффективных методов классификации природных и искусственных объектов, использующий поляриметрические данные. Также принято решение о доработке технологий создания БПР на основе данных итальянской системы Cosmo-SkyMed как ближайшего аналога перспективного российского комплекса радиолокационного наблюдения «Обзор-Р» [1–5].

Библиографические ссылки

1. Банк базовых продуктов наблюдения Земли – геоинформационный сервис для регионов России / Селин В.А. [и др.] // Инноватор : межрегиональный журн. 2012. № 3 (13). С. 24–25.
2. Урличич Ю., Селин В., Емельянов К. О приоритетах практической реализации развития космической системы дистанционного зондирования Земли // Аэро-космический курьер: информ.-аналит. журн. 2012. № 6 (78). С. 15–21.
3. Костюк Е. А., Веремчук Ю. А., Денисов П. В. Перспективные технологии обработки космической радиолокационной информации в НКПОР оператора КС ДЗЗ / Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий : тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. (15–17 июня 2011). 2012. С. 152–156.

4. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М. : КРАСАНД, 2012.

5. Кирбижекова И. И., Батуева Е. В., Дарижапов Д. Д. Н-А-а-классификация данных ALOS по дельте реки Селенга / Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. № 9/2.

References

1. Selin V. A. [i dr.]. Jurnal «Innovator». Ulan-Ude, 2012, № 3 (13), pp. 24-25
2. Urlichich Yu., Selin V., Emelyanov K. Jurnal «Aerokosmichesky kuryer», Moscow, 2012, № 6 (78), pp. 15-21.
3. Kostyuk E. A., Veremchuk Yu. A., Denisov P. V. Trudy IV Vserossyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Aktualnye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnology” (Proceedings of the 4th International Scientific Conference "Actual problems of missile-kosmieskogo instrumentation and information technology"). 15-17 July 2011. Moscow, 2012, pp. 152-156.
4. Zakharov A. I., Yakovlev O. I., Smirnov V. M. Sputnikovy monitoring Zemli: Radiolokatsionnoye zondirovaniye poverkhnosti (Satellite monitoring of the Earth: the radar sensing surface). Moscow, 2012, p. 248.
5. Kirbizhekova I. I., Batuyeva Ye.V., Darizhapov D. D. Jurnal “Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Fizika” Tomsk, 2010.

© Гусев М. А., Денисов П. В., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В., 2013

УДК 629.78; 630.52:587/588

ЗОНДИРОВАНИЕ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЛАЗЕРАМИ И ЦИФРОВЫМИ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИМИ ФОТОАППАРАТАМИ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В СИБИРИ

А. И. Данилин¹, И. М. Данилин^{1,2}, Д. А. Свищев³

¹Институт леса имени В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50/28. E-mail: danil_kr@mail.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: danilin@ksc.krasn.ru

³Восточно-Сибирский филиал Федерального государственного
унитарного предприятия «Рослесинфорг» «Востсиблеспроект»
Россия, 660062, Красноярск, ул. Н. К. Крупской, 42. E-mail: lespres@post.kts.ru

Обсуждаются результаты исследований по использованию данных высокочастотной импульсной лазерной локации и цифровой аэро- и космической съемки сверхвысокого разрешения для целей таксации и мониторинга лесов в Красноярском крае в 2012 г. По данным воздушного лазерного сканирования, аэро- и космической съемки сверхвысокого разрешения и наземных измерений на пробных площадях, составлен цифровой план лесных насаждений опытного полигона. Разработаны и переданы в ФГУП «Рослесинфорг» для расширенной производственной апробации методические рекомендации по использованию воздушной лазерной и цифровой аэро- и космической съемки для целей таксации и мониторинга лесов в лесном фонде Российской Федерации. Обоснована необходимость продолжения исследований в части изучения возможностей интегрирования данных оптических сенсоров с радарами с синтезированной апертурой, разработки программных модулей автоматизированной обработки мультисенсорных данных дистанционного зондирования леса.

Ключевые слова: высокочастотная импульсная лазерная локация, цифровая аэро- и космическая съемка сверхвысокого разрешения, таксация и мониторинг лесов, Красноярский край.

REMOTE SENSING OF FOREST COVER BY HIGH-FREQUENCY PULSE LASERS AND DIGITAL ULTRA-HIGH RESOLUTION AERIAL- AND SPACE CAMERAS: EXPERIENCE OF APPLICATION IN SIBERIA

A. I. Danilin, I. M. Danilin, D. A. Svishev

¹V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/28 Academgorodok, 660036, Russia. E-mail: danil_kr@mail.ru

²The Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31prospekt "Krasnoyarskii Rabochii", Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: danilin@ksc.krasn.ru

³The East-Siberian Branch of the State Forest Inventory Federal State
Unitary Enterprise "Roslesinform" "Vostsiblesproekt"
42 N. K. Krupskaya st., Krasnoyarsk, 660062, Russia. E-mail: lespres@post.kts.ru

The results of studies on the use of high-frequency pulse laser location and digital ultra-high resolution aerial- and space photography data applied to forest inventory and monitoring at Krasnoyarsk territory in 2012 are discussed. Based on airborne laser scanning, extra high resolution aerial and satellite imagery and surface measurements on sample plots a digital forest map has been made for the testing grounds. The methodical guidelines on the use of aerial laser scanning and high resolution digital aerial and satellite imagery for inventory and monitoring in the forests of the Russian Federation are developed and transferred to the Federal State Unitary Enterprise «Roslesinform» for the expanded practical testing. The necessity to continue research in the study of integrating optical sensors' data with synthetic aperture radar, the development of software modules for automatic processing of multisensor remote sensing data of forests is proved.

Keywords: high-frequency pulse laser location, digital ultra-high resolution aerial- and space photography, forest inventory and monitoring, Krasnoyarsk territory.

Зондирование лесного покрова высокочастотными импульсными лазерами и цифровыми аэро- и космическими фотоаппаратами сверхвысокого разрешения представляется перспективным направлением дистанционного мониторинга лесов при комплексировании данных радаров с синтезированной апертурой (РСА) с данными оптического диапазона [1–11].

В 2012 г., в продолжение и развитие ранее выполненных работ [2–6], в Красноярском крае были выполнены исследования по использованию данных высокочастотной импульсной лазерной локации и цифровой аэро- и космической съемки сверхвысокого разрешения для целей таксации и мониторинга лесов. Исследования проводились на общей площади 110 км², на опытном полигоне Погорельского лесного стационара Института леса СО РАН. Примерные географические координаты центра опытного полигона – 56°22' с. ш., 92°55' в. д.

Основными целями исследований явилось совершенствование алгоритмов дешифрирования таксационных показателей лесных насаждений на основе данных лазерной и цифровой аэро- и космической съемки, а также разработка и адаптация программного обеспечения, позволяющего обрабатывать данные съемки и получать таксационные характеристики насаждений в автоматизированном режиме.

Аэросъемочные работы выполнялись с борта самолета АН-2, воздушным лазерным сканером RIEGL Q560, совместно с цифровым аэросъемочным комплексом IGI DigiCAM, включающим цифровую камеру Hasselblad H39/mp и фазовый GPS-приемник Novatel OEM 4/5.

Основой для планирования и трассирования маршрутов аэрофотосъемки и контурного дешифрирования лесных участков служили космические циф-

ровые снимки ближнего инфракрасного диапазона, геометрическим разрешением 50 см на пиксель, выполненные в системе World View-2 в июне 2012 г. (рис. 1).

Дешифрирование аэро- и космических снимков производилось в интерактивном режиме с использованием компьютерной программы ArcGis и функции пространственного анализа «Spatial Analyst» [12], с доработанными лесотаксационными модулями. На аэро- и космических снимках и лазерных сканах выполнялось наложение и совмещение границ таксационно-дешифровочных пробных площадей, с опознаванием и контролем на местности (рис. 2).

Дешифровочные данные сопоставлялись с наземными инструментальными измерениями на таксационно-дешифровочных пробных площадях, заложенных в границах опытного полигона.

В результате выполненной работы были выявлены взаимосвязи таксационно-дешифровочных признаков лесных насаждений, по которым в автоматическом режиме актуализировались средние высоты, средние диаметры, суммы площадей поперечных сечений стволов, средние возрасты, полноты и запасы составляющих древесных пород. Построены гистограммы распределений по таксационным признакам древостоев. При расчете уравнений взаимосвязей и статистических показателей использовался программный комплекс StatSoft [13] (рис. 3).

Сопоставление результатов дешифровочных и наземных измерений характеризуется достаточно высокими индексами детерминации ($R^2 = 0.8999-0.9195$). Наибольшая случайная ошибка определения средней высоты древостоя по данным лазерной съемки не превысила 7,0 %. Случайная ошибка для всех наблюдений находится в пределах 59,4 см или 2,1 %.

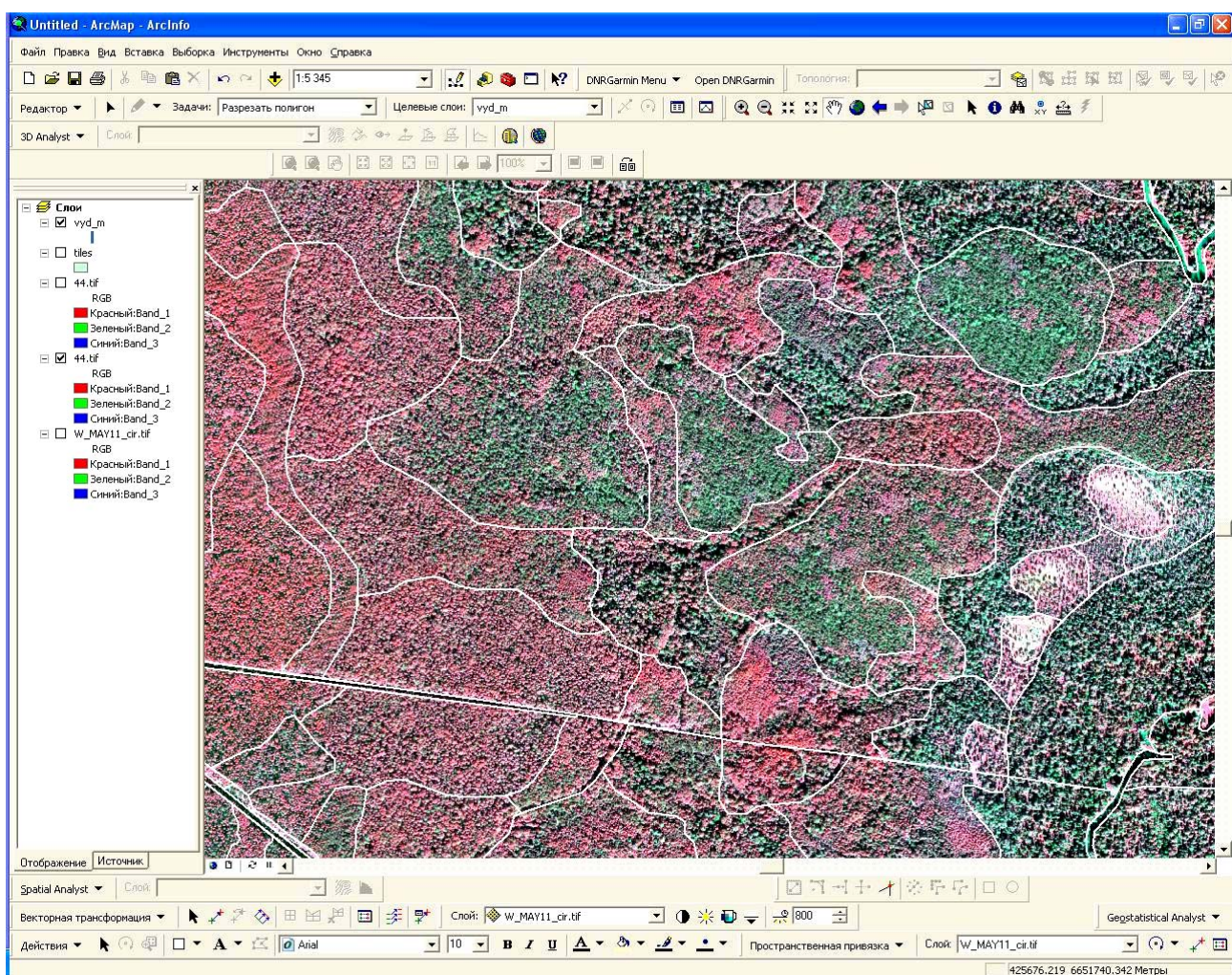


Рис. 1. Контурное дешифрирование таксационных выделов, выполненное специалистом таксатором по цифровому космическому снимку сверхвысокого разрешения WorldView-2 (NIR, ближний инфракрасный диапазон, геометрическое разрешение 50 см на пиксель)

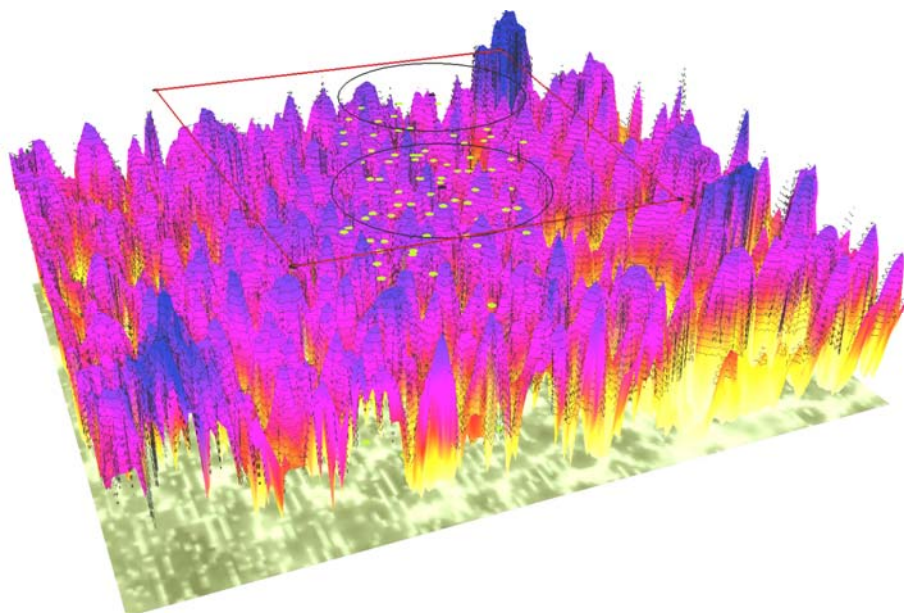


Рис. 2. Трехмерное лазерно-локационное отображение древостоя с наложением границ таксационно-дешифровочной пробной площади и инвентаризационных кругов постоянного радиуса системы наземной таксации FieldMap

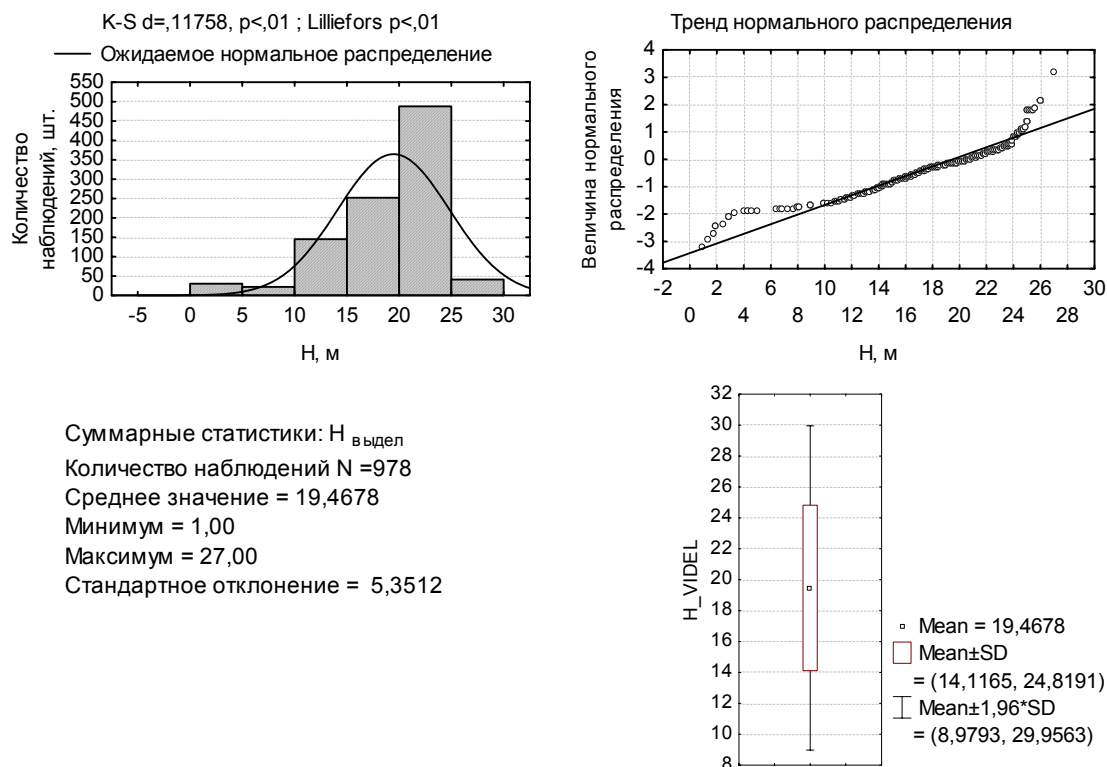


Рис. 3. Гистограмма и основные статистики распределения высот деревьев, определенных при таксации на опытном полигоне

По данным дистанционного зондирования и наземных измерений составлен цифровой план лесонасаждений опытного полигона. Разработаны и переданы в ФГУП «Рослесинфорг» для расширенной производственной апробации методические рекомендации по использованию воздушной лазерной и цифровой аэро- и космической съемки для целей таксации и мониторинга лесов в лесном фонде РФ.

Обоснована необходимость продолжения исследований в части изучения возможностей интегрирования данных оптических сенсоров с РСА, разработки программных модулей автоматизированной обработки мультисенсорных данных дистанционного зондирования леса.

Библиографические ссылки

1. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н. Дистанционное зондирование растительности с использованием космических радиолокационных и многоспектральных оптических изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 112–121.
2. Данилин И. М., Данилин А. И., Свищев Д. А. Лазерная локация и цифровая аэросъемка – подспутниковый компонент в системе информационного обеспечения инвентаризации, мониторинга и кадастра лесных земель // Вестник СибГАУ. 2010. № 3 (29). С. 55–59.
3. Данилин И. М., Медведев Е. М. Некоторые результаты международного проекта по исследованию возможностей лазерной, радарной и цифровой аэросъемки лесов // Известия вузов. Лесной журнал. 2008. № 1. С. 15–23.

4. Данилин И. М., Медведев Е. М. Технология мониторинга и инвентаризации лесных ресурсов на основе лазерной локации, цифровой аэрофотосъемки и спутникового геопозиционирования // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2011. Т. 4, № 3. С. 326–336.

5. Данилин И. М., Фаворская М. Н. Описание программных модулей использования данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки лесных территорий // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 62–73.

6. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Геокосмос ; Красноярск : ИЛ СО РАН, 2007.

7. Сухих В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учеб. для вузов. Йошкар-Ола : Изд-во МарГТУ, 2005.

8. Чимитдоржиев Т. Н. Оптико-микроволновые методы дистанционного контроля лесных ресурсов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск : СФУ, 2008.

9. Using airborne laser scanner data and CIR orthophotos to estimate the stem volume of forest stands / C. Straub, M. Dees, H. Weinacker, B. Koch // Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation. 2009. № 3. P. 277–287.

10. Suvanto A., Maltamo M. Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas // Silva Fennica. 2010. Vol. 44, № 1. P. 91–107.

11. Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110. P. 123–137.

12. ArcGis [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esri.com/software/arcgis>.

13. StatSoft. Statistica 8.0 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.statsoft.com/#>.

References

1. Bondur V. G., Chimitdorziev T. N. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2008, no. 6, pp. 112–121.

2. Danilin A. I., Danilin I. M., Svischev D. A. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 3 (29), pp. 55–59.

3. Danilin I. M., Medvedev E. M. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zurnal*, 2008, no. 1, pp. 15–23.

4. Danilin I. M., Medvedev E. M. *Zurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya «Tekhnika i tekhnologii»* (Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies), 2011, Vol. 4, no. 3, pp. 326–336.

5. Danilin I. M., Favoskaya M. N. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, no. 2, pp. 62–73.

6. Medvedev E. M., Danilin I. M., Mel'nikov S. R. *Lazernaya lokatsiya zemli i lesa: uchebnoe posobie, 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe* (Laser location of earth and forest: textbook, 2-nd edition, revised and enlarged). Moscow, Geokosmos; Krasnoyarsk, V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, 2007. 229 p.

7. Sukhikh V. I. *Aerokosmicheskie metody v lesnom khozyaistve: uchebnik dlya vuzov* (Aerospace methods in

forest management and landscape building) / M. Wulder, T. Han, C. White et al.. Ioshkar-Ola : Mari State Technical University Publ., 2005.

8. Chimitdorziev T. N. *Optiko-mikrovolnovye metody distantsionnogo kontrolya lesnykh resursov: avtoreferat dissertatsii ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.11.13* (Optical-microwave methods for remote control of forest resources): thesis of doctor of technical sciences dissertation. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2008. 29 p.

9. Straub C., Dees M., Weinacker H., Koch B. Using airborne laser scanner data and CIR orthophotos to estimate the stem volume of forest stands. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, 2009, no. 3, pp. 277–287.

10. Suvanto A., Maltamo M. Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas. *Silva Fennica*, 2010, Vol. 44, no. 1, pp. 91–107.

11. Wulder M., Han T., White C., Sweda T., Tsuzuki H. Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization. *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 110, pp. 123–137.

12. ArcGis (2013), Available at: <http://www.esri.com/software/arcgis> (accessed 5 February 2013).

13. StatSoft. Statistica 8.0 (2013), Available at: <http://www.statsoft.com/#> (accessed 5 February 2013).

© Данилин А. И., Данилин И. М., Свищев Д. А., 2013

РАЗДЕЛ
2



РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.
АЛГОРИТМЫ, ИНСТРУМЕНТЫ
И РЕЗУЛЬТАТЫ



УДК 537.226.1 + 631.437.226.2

ИЗМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В ПОЧВАХ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЕЕ КОЛИЧЕСТВА

Т. А. Беляева, П. П. Бобров, О. В. Кондратьева

Омский государственный педагогический университет
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: bobrov@omgpu.ru

Выполнены измерения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) малоувлажненных почв в диапазоне частот 1 МГц – 4 ГГц. Показано, что КДП связанной воды на частотах ниже 1–1,5 ГГц зависит от ее количества в почве. Создана модель зависимости КДП от частоты и влажности, включающая три частотные области релаксации. Показано, что учет зависимости КДП связанной воды от ее количества позволяет существенно повысить точность рефракционной модели почв при малых влажностях. Обнаружено, что в почвах с большим содержанием глины на частотах ниже 20 МГц наблюдаются отклонения от монотонности в зависимости КДП связанной воды от влажности. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности дистанционного определения влажности малоувлажненных почв микроволновыми методами.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, связанная вода, дисперсия, малоувлажненные почвы.

CHANGES OF THE BOUND WATER DIELECTRIC PROPERTIES IN SOILS AT INCREASE OF ITS QUANTITY

T. A. Belyaeva, P. P. Bobrov, O. V. Kondratieva

Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: bobrov@omgpu.ru

The measurements of the complex dielectric constant (CDC) of soils with low water content at the frequencies 1 MHz – 4 GHz are performed. It is shown that the CDC of bound water at frequencies below 1–1.5 GHz depends on its quantity in the soil. A model of the frequency and moisture dependence, including three frequency areas of relaxation, is created. It is shown that account of the dependence of CDC of bound water on its quantity can significantly improve the accuracy of the refractive soil models at low moisture. It is revealed that in soils with large clay content at frequencies below 20 MHz deviations from monotonic bound water CDC dependence on moisture are observed. The results can be used for improving the accuracy of soil moisture remote determination by microwave methods.

Keywords: dielectric permittivity, bound water, dispersion, low moisturized soils.

Комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ (КДП) влажных почв и грунтов удовлетворительно описывается рефракционной моделью. В первоначальном варианте рефракционной модели [1] предполагалось, что связанная вода имеет одну область релаксации, обусловленную ориентационной поляризацией молекул воды. Эта модель давала хорошее согласие с экспериментом на частотах выше 1–1,5 ГГц [2; 3]. В поздней версии модели [4] за счет учета еще одной области релаксации удалось довести нижнюю частотную границу справедливости модели до 40 МГц. В этих моделях КДП связанной воды считают не зависящей от ее количества в почве [1–4]. Первые исследования, показавшие зависимость КДП связанной воды от ее количества, были проведены с использованием не очень точной аппаратуры и на частотах от 0,3 до 10 ГГц [5].

Выводы настоящей работы основаны на измерениях, проведенных в широком частотном диапазоне. В диапазоне частот 42 Гц – 5 МГц использовался измеритель LCR 3532-50 фирмы HIOKI, а в диапазоне

частот от 0,3 МГц до 4–8,5 ГГц – векторные анализаторы параметров цепей ZVRE и ZNB8 фирмы Роде и Шварц. При этом во всем диапазоне частот измерялся один и тот же образец, помещенный в коаксиальную ячейку. Методика измерений приведена в [6]. Применяемые измерительные приборы имеют низкую погрешность измерения в широком диапазоне частот, поэтому погрешность измерения КДП почв, рассчитанная по паспортным данным прибора, во всем диапазоне частот не превышала 4 %.

Для определения зависимости КДП связанной воды от влажности использовались экспериментальные данные КДП почв, измеренные при влажностях, меньших максимально возможного количества связанной воды. Комплексный показатель преломления почвы

$$n^* = n - ik = \sqrt{\epsilon^*}$$

для таких влажностей может быть представлен в виде

$$n = n_d + (n_b - 1)W, \quad (1)$$

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-05-98082-п_сибирь_a.

$$\kappa = \kappa_d + \kappa_b W, \quad (2)$$

где n_d , κ_d , n_b , κ_b – показатели преломления и показатели поглощения сухой почвы и связанной воды, соответственно, W – объемная влажность.

В первом приближении можно считать, что плотность сухого сложения ρ измеряемых образцов влияет на показатели преломления и поглощения только сухой почвы. Из экспериментальных измерений найдено, что и для бентонита и для лугово-черноземной почвы $n_d = 1 + 0,46\rho$ и $\kappa_b = 0,0097\rho$. Тогда по найденным из формул (1) и (2) значениям n_b и κ_b для каждой влажности можно определить значения мнимой и действительной части КДП связанной воды: $\varepsilon'_b = n_b^2 - \kappa_b^2$, $\varepsilon''_b = 2n_b \cdot \kappa_b$. Соответствующие частотные зависимости приведены на рис. 1 и 2.

При моделировании КДП связанной воды в частотном диапазоне 100 кГц – 4 ГГц были выделены три области релаксации – в первой, высокочастотной области (10^9 – 10^{10} Гц) КДП связанной воды была выражена через параметры модели Дебая, поскольку здесь преобладает ориентационно-дипольная поляризация; во второй (10^9 – 10^8 Гц) и третьей (10^8 – 10^5 Гц) областях использовалась модель Коула–Коула.

КДП $\varepsilon_b = \varepsilon'_b - \varepsilon''_b$ связанной воды определялась как сумма вкладов всех областей:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\varepsilon_{s2}}{(1 + i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\varepsilon_{s3}}{(1 + i\omega\tau_3)^{1-\alpha_3}} + i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, значение которой принималось равным 4,9; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; ε_{s1} , ε_{s2} , ε_{s3} – статические диэлектрические проницаемости; τ_1 , τ_2 , τ_3 – времена релаксации для 1, 2, 3-й областей релаксации, соответственно; α_2 , α_3 – коэффициенты распределения времен релаксации для 2-й и 3-й областей; σ_3 – ионная удельная проводимость; ω – циклическая частота; i – мнимая единица.

Параметры первой области релаксации принимались независимыми от влажности, так как на частотах выше 1–2 ГГц КДП связанной воды от влажности зависит слабо, и выбирались равными для бентонита $\varepsilon_{s1} = 25,7$; $\tau_1 = 12,6$ пс, а для лугово-черноземной почвы $\varepsilon_{s1} = 35,5$; $\tau_1 = 12,1$ пс.

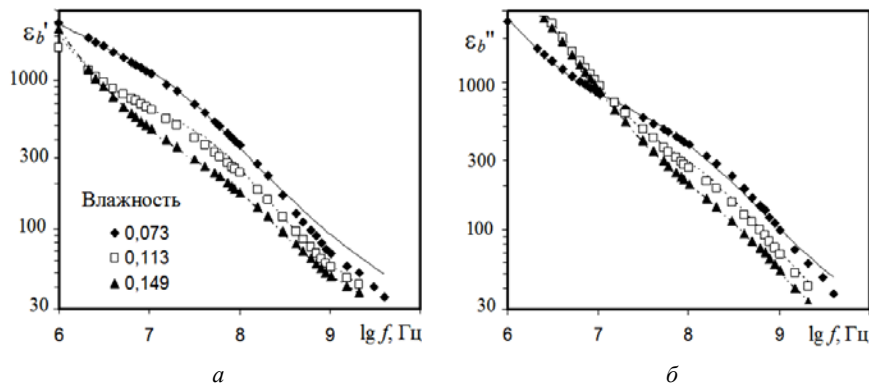


Рис. 1. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей КДП связанной воды в бентоните (линиями показаны результаты расчета по модели)

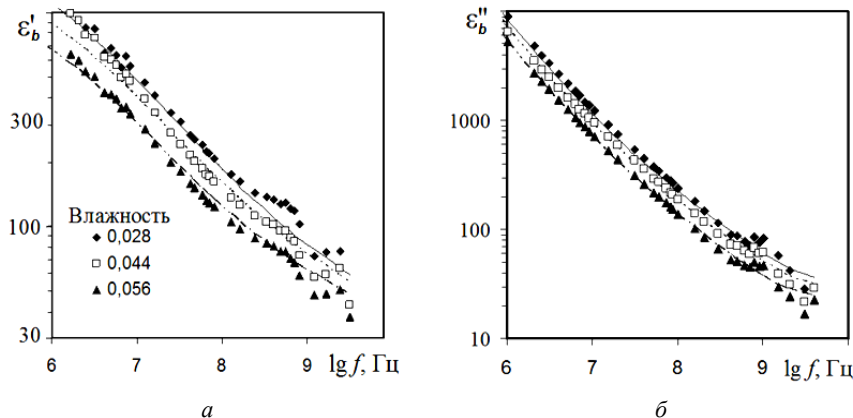


Рис. 2. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей КДП связанной воды в лугово-черноземной почве (линиями показаны результаты расчета)

Таблица 1

Параметры модели диэлектрической проницаемости связанной в бентоните воды

W	ρ , г/см	$\varepsilon_{s2} \cdot 10$	τ_2 , нс	α_2	$\varepsilon_{s3} \cdot 10$	τ_3 , мкс	α_3	σ , См/м
0,073	1,18	10,9	3,4	0,233	6,64	222	0,250	4,4 · 10
0,076	1,18	8,88	4,5	0,284	4,73	265	0,327	0
0,094	1,16	7,10	3,9	0,277	2,86	25,7	0,203	0
0,113	1,15	6,16	3,7	0,307	1,86	5,93	0,091	6,0 · 10
0,140	1,13	2,87	1,9	0,253	1,72	0,78	0,194	0
0,149	1,07	1,96	1,3	0,205	0,967	4,44	0,174	0

Таблица 2

Регрессионные уравнения для параметров модели для второй и третьей областей релаксации

Образец	Область	ε_s	τ , с	α
Бентонит	2-я	$-9477W + 1\,670$	$-3,06 \cdot 10^{-8} W + 6,47 \cdot 10^{-9}$	$-0,175 \cdot W + 0,283$
	3-я	$1,21 \cdot 10^8 W - 3,38 \cdot 10^7 W + 2,42 \cdot 10^6$	$0,012 \exp(-59,49W)$	$-1,6 \cdot W + 0,376$
Лугово-черноземная почва	2-я	$-29\,620W + 2\,830$	$-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot W + 1,40 \cdot 10^{-7}$	$0,092W + 0,495$
	3-я	$1,24 \cdot 10^9 W - 1,43 \cdot 10^8 W + 6,92 \cdot 10^6$	$-3,38 \cdot 10^{-4} \cdot W + 8,61 \cdot 10^{-5}$	$-0,032W + 0,003$

Найденные путем фиттирования параметры для 2-й и 3-й областей релаксации для бентонита приведены в табл. 1. С использованием этих данных построены регрессионные уравнения зависимостей параметров модели (3) от объемной влажности. Эти уравнения приведены в табл. 2.

Результаты модельных расчетов с использованием значений параметров, найденных по регрессионным уравнениям, показаны на рис. 1 и 2 линиями. Видно, что с увеличением влажности действительная и мнимая части КДП уменьшаются, то есть в уравнениях (1) и (2) n_b и κ_b не являются константами. Кроме того, зависимость от влажности мнимой части КДП связанной воды в бентоните (рис. 1, а) на частотах ниже 20 МГц изменяется на противоположную.

Расчеты показывают, что если КДП связанной воды считать не зависящей от влажности, то погрешность модели (отклонение от экспериментальных значений КДП почв) при малых влажностях в диапазоне частот 1–100 МГц как для ε' , так и для ε'' у бентонита может достигать 35–40 %, а у лугово-черноземной почвы 11–12 %. Учет зависимости КДП связанной воды от влажности позволяет уменьшить погрешность до 5–10 %.

Таким образом, КДП связанной воды в малоувлажненных почвах в широком диапазоне частот имеет три области дисперсии, причем параметры модели КДП для каждой области дисперсии зависят от влажности почв. Учет этой зависимости приводит к существенному уменьшению погрешности модели КДП почвы при малой влажности, особенно в диапазоне частот от 10^6 до 10^8 Гц.

Библиографические ссылки

1. Generalized Refractive Mixing Dielectric Mode 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.

2. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости различных форм почвенной влаги в мик-

роволновом диапазоне / В. Л. Миронов, П. П. Бобров, О. В. Кондратьева, А. В. Репин // Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой: материалы Рос. науч. конф. (6–10 сент. 2010, г. Улан-Удэ). С. 344–355.

3. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1–20 ГГц / Т. А. Беляева, А. П. Бобров, П. П. Бобров // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. P. 28–34.

4. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. Multi-Relaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soil // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 10, № 3. P. 603–606.

5. Зависимость диэлектрической проницаемости связанной воды в почвах от ее количества / Т. А. Беляева, П. П. Бобров, О. А. Ивченко, В. Н. Мандрыгина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. ст. 2006. Вып. 3. Т. II. С. 281–286.

6. Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23–26.

References

1. Mironov V. L., Dobson M. C., Kaupp V. H., Komarov S. A., Kleshchenko V. N. Generalized refractive mixing dielectric mode for moist soils. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004, vol. 42, no. 4, pp. 773–785.

2. Mironov V. L., Bobrov P. P., Kondratieva O. V., Repin A. V. Russian scientific conference “Sensing of Earth covers by synthetic aperture radars”, Ulan-Ude, 06.09–10.09.2010, Elektronnyy sbornik dokladov, pp. 344–355.

3. Belyaeva T. A., Bobrov A. P., Bobrov P. P., Galeev O. V., Mandrygina V. N. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2003, no.5, pp. 28–34.

4. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013, vol. 10, no. 3, pp. 603–606.

5. Belyaeva T. A., Bobrov P. P., Ivchenko O. A., Mandrygina V. N. Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Fizicheskiye osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob'yektov (Modern

problems of remote sensing of the Earth from space: Physical principles, methods and technologies for monitoring the environment, potentially hazardous events and objects). A collection of scientific articles. Issue 3, vol. II. Moscow, IKI RAN, OOO "Azbuka-2000", 2006, pp. 281–286.

6. Bobrov P. P., Kondrat'yeva O. V., Repin A. V. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 23–26.

© Беляева Т. А., Бобров П. П., Кондратьева О. В., 2013

УДК 537.226.1 + 631.437.226.2

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВАХ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 10 кГц – 8,5 ГГц

П. П. Бобров, О. В. Кондратьева, М. М. Мустакова

Омский государственный педагогический университет
644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: bobrov@omgpu.ru

Приведены результаты измерений диэлектрической проницаемости почв и грунтов с различным содержанием глины и органического вещества (гумуса). Показано, что увеличение содержания гумуса, как и содержания глины, приводит к увеличению максимального количества связанной воды. На частотах выше 1 ГГц это приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости почвы при больших влажностях. На частотах 10–100 МГц наличие глины приводит к возрастанию диэлектрической проницаемости почвы, а наличие гумуса – к ее уменьшению. Показано также, что диэлектрическая проницаемость переходной воды зависит от частоты и резко возрастает на частотах ниже 100 МГц. Полученные результаты могут быть использованы при построении диэлектрических моделей почв.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажные почвы, гумус, связанная вода.

EFFECT OF SOIL ORGANIC MATTER ON THE DIELECTRIC PERMITTIVITY AT THE FREQUENCIES 10 kHz – 8.5 GHz

P. P. Bobrov, O. V. Kondratieva, M. M. Mustakova

Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: bobrov@omgpu.ru

The results of measurements of the soils dielectric constant with different amounts of clay and organic matter (humus) are presented. It is shown that the growth of humus and the clay content increases the maximum amount of bound water. At frequencies above 1 GHz this leads to a decrease in the soil dielectric constant at high moistures. At frequencies 10–100 MHz the presence of clay leads to an increase of the soil dielectric constant, and the presence of humus leads to its reduction. It is also shown that the dielectric constant of transitional water depends on the frequency and increases rapidly at frequencies below 100 MHz. The results can be used to construct models of dielectric soil.

Keywords: dielectric permittivity, moist soils, humus, bound water.

Одним из важных показателей качества почвы является содержание гумуса. Его наличие в почвах необходимо учитывать при обработке данных дистанционного микроволнового зондирования. В работах [1; 2] показано, что присутствие гумуса проявляется в разной динамике коэффициента излучения почв в процессе высыхания.

Для прогнозирования диэлектрических характеристик разрабатываются диэлектрические модели, вход-

ными параметрами которых являются физические и гидрологические характеристики почв [3; 4]. Благодаря развитию методики измерений [5] появилась возможность измерять спектры КДП в широком диапазоне частот. При этом диэлектрическая модель почвы может быть построена с использованием спектров, найденных для ограниченного числа значений влажности [6]. Для распространения моделей на широкий класс почв необходимо выяснить влияние гумуса на КДП.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки в части проведения НИР.

Физические характеристики исследованных почв и грунтов

Наименование	Массовая доля физической глины	Содержание гумуса, %	ρ	M_t
Бентонит	0,72	0	1,1	0,22
Чернозем слабогумусный	0,60	4,2	1,33	0,15
Лугово-черноземная почва (г. А)	0,36	6,6	1,35	0,09
Лугово-черноземная почва (г. С)	0,44	0,6	1,67	0,05
Смесь песка с бентонитом	0,26	0	1,28	0,07
Кварцевые гранулы	0,08	0	1,5	0,0016

По методике, изложенной в [5], нами были проведены измерения спектров КДП почв, характеристики которых приведены в таблице, в диапазоне частот 10 кГц – 8,5 ГГц. Было установлено, что на частотах ниже 20–25 МГц при возрастании влажности может наблюдаться уменьшение действительной части КДП. Рефракционная модель на этих частотах не работает, поэтому для выявления влияния гумуса мы сравнивали диэлектрические характеристики почв на частотах выше 10 Гц.

В соответствии с моделью [4] действительную n (показатель преломления) и мнимую κ (показатель поглощения) части комплексного показателя преломления влажной почвы

$$n_S^* = n_S + i\kappa_S = \sqrt{\varepsilon^*}$$

можно представить в виде

$$n_S = n_d + (n_b - 1)M_t\rho + (n_u - 1)(M - M_t)\rho, \quad (1)$$

$$\kappa_S = \kappa_d + \kappa_b M_t\rho + \kappa_u (M - M_t)\rho, \quad (2)$$

где n_d , κ_d , n_b , κ_b , n_u , κ_u – показатели преломления и поглощения сухой почвы, связанной и переходной воды, соответственно; M_t – максимальное количество связанной воды (массовая доля); M – общая влажность почвы (массовая доля); ρ – отношение плотности сухого сложения почвы к плотности воды. Формулы (1), (2) справедливы при влажностях $M > M_t$. Параметры n_b , κ_b , n_u , κ_u являются частотно-зависимыми, а n_d и κ_d от частоты практически не зависят. Связь показателя преломления сухой почвы с плотностью сухого сложения можно представить в виде $n_d = 1 + A\rho$, где A – коэффициент, принимающий

значения 0,42–0,55 в зависимости от диэлектрической проницаемости и плотности монокристаллического минерала.

С учетом вышесказанного из (1) и (2) можно получить параметры Δn и $\Delta \kappa$, не зависящие от влажности и в первом приближении – от плотности:

$$\Delta n = (n_b - 1)M_t = \frac{n'_S - 1}{\rho} - (n_u - 1)(M - M_t) - A,$$

$$\Delta \kappa = \kappa_b M_t + \frac{\kappa_d}{\rho} = \frac{\kappa'_S}{\rho} - \kappa_u (M - M_t),$$

где n'_S и κ'_S – экспериментально измеренные значения при $M > M_t$. Для определения частотных зависимостей Δn и $\Delta \kappa$ достаточно произвести измерения n'_S и κ'_S при 3-х или 4-х значениях влажности, так чтобы максимальные значения M не выходили бы за пределы диапазона влажностей переходной воды. Поскольку в этом диапазоне влажностей значения n_u и κ_u не зависят от влажности, последние можно найти путем фиттирования так, чтобы частотные зависимости Δn и $\Delta \kappa$ были бы одинаковыми для всех значений M , для которых произведены измерения n'_S и κ'_S .

Частотные зависимости подобранных таким образом значений n_u и κ_u для почв, указанных в таблице под номерами 1, 2, 4, приведены на рис. 1. Видно, что для образцов 2 и 4 значения n_u в диапазоне частот 0,1–4 ГГц остаются практически постоянными, а на частотах ниже 0,1 ГГц возрастают. При этом значения κ_u около 1 ГГц имеют минимум, тогда как для бентонита значения n_u и κ_u непрерывно возрастают при уменьшении частоты. Частотные зависимости величины $\Delta n = (n_b - 1)M_t$ для почв, приведенных в таблице под номерами 1–6, приведены на рис. 2.

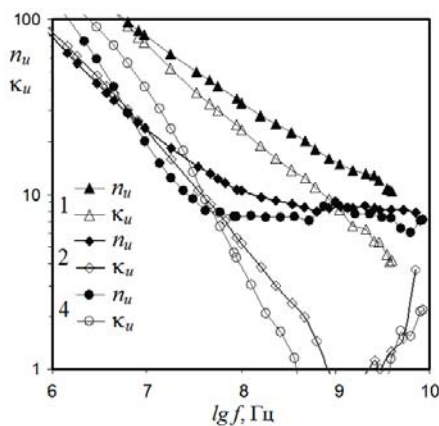


Рис. 1

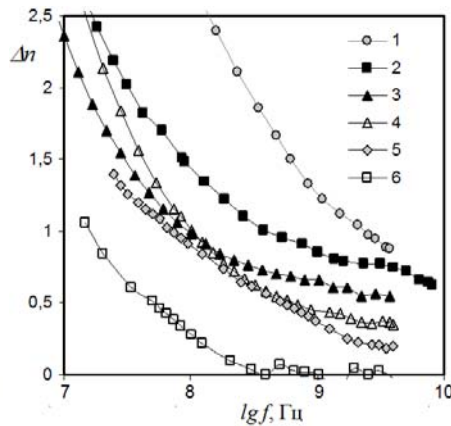


Рис. 2

Визуально заметно, что на частоте около 4 ГГц значение Δn тем больше, чем выше в почве содержание глины и гумуса. Также заметно, что в почвах, содержащих гумус, при понижении частоты значение Δn возрастает медленнее. Это отражается в следующих регрессионных уравнениях связи значений Δn с содержанием глины C и гумуса H .

На частоте 3,75 ГГц $\Delta n = 1,36 \cdot C + 3,57 \cdot H$ при квадрате коэффициента корреляции 0,945.

На частоте 0,25 ГГц $\Delta n = 2,71 \cdot C - 3,64 \cdot H$ при квадрате коэффициента корреляции 0,80.

Если в первом уравнении знак коэффициента регрессии при H положителен, то во втором – отрицателен.

Таким образом, в результате проведенного исследования показано, что показатель преломления переходной воды зависит от частоты и в среднеглинистых почвах резко возрастает на частотах ниже 100 МГц. На частотах 10–100 МГц наличие глины приводит к возрастанию диэлектрической проницаемости почвы, а наличие гумуса – к ее уменьшению.

Библиографические ссылки

1. Бобров П. П., Галеев О. В. Динамика радиояростной температуры почв с различным содержанием гумуса // Исследование Земли из космоса. 2001. № 4. С. 74–80.
2. Bobrov P. P., Galeyev O. W. Observed Effects of Soil Humus & Salt Contents on the Microwave Emissivity of Soils // Proceedings of the 2001 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, NSW. 2001. P. 2085–2087.
3. Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели / П. П. Бобров, В. Л. Миронов, О. А. Ивченко, В. Н. Красноухова // Исследование Земли из космоса. 2008. № 1. С. 15–23.
4. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Di-

electric Model for Moist Soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. Vol. 47, № 7. Part 1. P. 2059–2070.

5. Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия Вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23–26.
6. Data Processing Technique for Deriving Soil Water Spectroscopic Parameters in Microwave / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, L. G. Kosolapova // Proc. of the 2006 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symp. 2006. Vol. 6. P. 2957–2961.

References

1. Bobrov P. P., Galeyev O. V. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2001, no. 4, pp. 74–80.
2. Bobrov P. P., Galeyev O. W. Observed Effects of Soil Humus & Salt Contents on the Microwave Emissivity of Soils. Proceedings of the 2001 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Sydney, NSW. 2001, pp. 2085–2087.
3. Bobrov P. P., Mironov V. L., Ivchenko O. A., Krasnoukhova V. N. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2008, no. 1, pp. 15–23.
4. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. vol. 47, no. 7, Part 1, pp. 2059–2070.
5. Bobrov P. P., Kondrat'yeva O. V., Repin A. V. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 23–26.
6. Mironov V. L., Bobrov P. P., Kosolapova L. G., Mandrygina V. N., Fomin S. V. Data Processing Technique for Deriving Soil Water Spectroscopic Parameters in Microwave. Proceedings of the 2006 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, USA. 2006, vol. 6, pp. 2957–2961.

© Бобров П. П., Кондратьева О. В., Мустакова М. М., 2013

УДК 621.371.3/205.2

ПРИМЕНИМОСТЬ КОНЦЕПЦИИ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕРЗЛЫХ ПОЧВ

В. Л. Миронов^{1, 2}, А. Ю. Каравайский^{1, 2}, Ю. И. Лукин²

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

²Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

На основе измерений спектров комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) влажной почвы показано, что применение модели Добсона–Жанга в мерзлой почве дает погрешности до 100 %. Показано, что такая существенная ошибка возникает за счет присутствия в почве различных типов незамерзшей воды.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость.

THE APPLICABILITY OF UNFROZEN WATER CONCEPTION FOR MODELLING OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF FROZEN SOILS

V. L. Mironov^{1,2}, A. Yu. Karawaysky^{1,2}, Yu. I. Lukin²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia

²Institute of Physics named after L. V. Kirenskiy of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

From measurements of the spectra of the complex permittivity of the moist soil it is shown that the application of the concept of freezing of unfrozen water in the frozen ground gives the error of 100 % for the calculation of the index. The authors point out that such a considerable error appears because of the presence of different types of unfrozen water in the soil.

Keywords: permittivity, complex dielectric constant.

Проблема создания диэлектрической модели для мерзлых почв актуальна в связи с развитием работ по дистанционному зондированию. При этом, в ряде работ, где учитываются характеристики мерзлых почв, используется модель Добсона [1], развитая Жангом [2] для диэлектрической проницаемости (ДП) мерзлых почв. Тем не менее, точность описания модели в полной мере не изучена.

Для использования модели Добсона [1] при отрицательных температура Жанг преобразовал формулу к виду

$$\epsilon_m^{\alpha} = 1 + (\rho_b / \rho_s)(\epsilon_s^{\alpha} - 1) + m_{vu}^{\beta'} \epsilon_{fw}^{\alpha} - m_{vi} + m_{vi} \epsilon_i^{\alpha}, \quad (1)$$

$$t < t_f C$$

$$\epsilon_m^{\alpha} = m_{vu}^{\beta''} \epsilon_{fw}^{\alpha}, \quad t < t_f C \quad (2)$$

где m_{vu} – объемная масса незамерзшей воды; m_{vi} – объемная масса льда, ϵ_i – ДП льда.

В формуле (1) учитывается количество незамерзшей воды m_{vu} , которое выражается как

$$m_{vu} = A |t|^{-B} \rho_b / \rho_w \quad (3)$$

где ρ_w – плотность воды. Параметры A и B в формуле (3) определяются структурой почвы.

Таким образом, для того чтобы вычислить КДП в соответствии с данной модели на любой частоте, при любой влажности и температуре достаточно знать минералогический состав почвы, что является неоспоримым преимуществом модели. Однако модель не учитывает диэлектрическую проницаемость разных типов воды в почве, а также изменение соотношения между этими типами воды в процессе замораживания или оттаивания. Кроме того, для отрицательных температур предлагается использовать формулы для расчета спектроскопических параметров незамерзшей воды, полученные на основе измерений при положительных температурах, что физически не обосновано.

Экспериментальные результаты. Ранее, в работе [3], проводились расчеты КДП как для талых, так и для мерзлых почв, было определено количество незамерзшей воды различных типов. Для определения комплексной диэлектрической проницаемости применялась методика, описанная в [4]. Данная методика дает погрешность наших измерений порядка 3 %.

В качестве первой почвы для тестирования диэлектрической модели Жанга–Добсона (Ж–Д) был выбран образец бентонитовой глины. Выбор был сделан главным образом в силу того, что для него существует рефракционная модель, где учитываются присутствие связанной, переходной и свободной воды, а также диэлектрические свойства каждого типа воды [3].

Корреляция между измеренными значениями КДП и рассчитанными в соответствии с моделью Ж–Д для образцов бентонита в диапазоне температур от –10 до –30 °С приведена на рис. 1. Очевидно, что для ϵ' модель Ж–Д в целом дает завышенные значения, тогда как для ϵ'' наблюдается существенное занижение прогнозируемых значений. Интересно, отметить, что модель Ж–Д лучше описывает экспериментальные значения ϵ' образцов с большей влажностью, тогда как для ϵ'' наблюдается наибольшая ошибка.

Корреляция между измеренными значениями КДП и рассчитанными в соответствии с моделью ОРДМС для тех же образцов бентонита показана на рис. 2. Очевидно, что подход, примененный в ОРДМС, предполагающий описание диэлектрических свойств каждого типа воды в почве, позволяет разработать более адекватную модель для описания КДП влажных почв при отрицательных температурах.

По мимо бентонитовой глины, для проверки модели Ж–Д в области отрицательных температур, была рассмотрена почва «Чернозем выщелоченный слабогумусный сверхмощный среднеглинистый на лессовидных глинах». Это необходимо было чтобы сравнить, как модель Ж–Д будет описывать почвы с различным гранулометрическим составом. Измерения проводились в диапазоне температур от –30 до 0 °С для процессов заморзания и оттаивания, так как оказалось, что момент заморзания и оттаивания происходит при различных температурах.

Если мы рассмотрим соотношение между модельными данными КДП и измеренными (рис. 3) для процесса заморзания, то мы увидим, что для более высоких температур имеется неплохое соответствие между измеренными данными и смоделированными, но в остальных случаях модель Ж–Д завышает значения для ϵ' . Для ϵ'' ситуация является такой же критичной, мы видим занижение прогнозируемых значений и погрешность достигает 100 %.

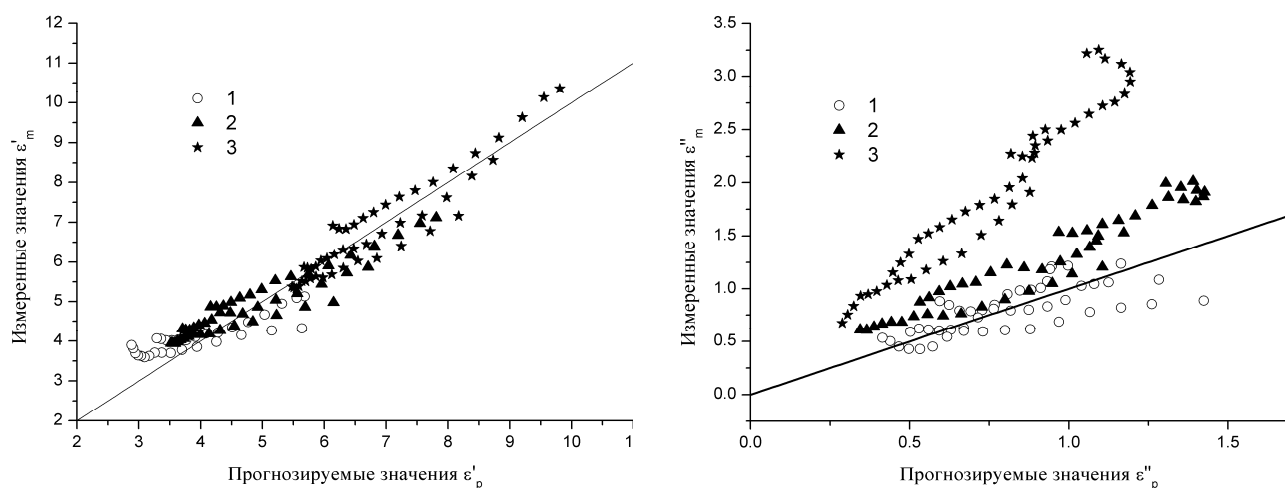


Рис. 1. Корреляция между данными КДП модели Жанга и измеренными для образцов бентонитовой глины при температурах в диапазоне от -10 до -30 °С с влажностями: 1 – $m = 0,13$ м/м; 2 – $m = 0,29$ м/м; 3 – $m = 0,64$ м/м. Сплошной линией изображена биссектриса

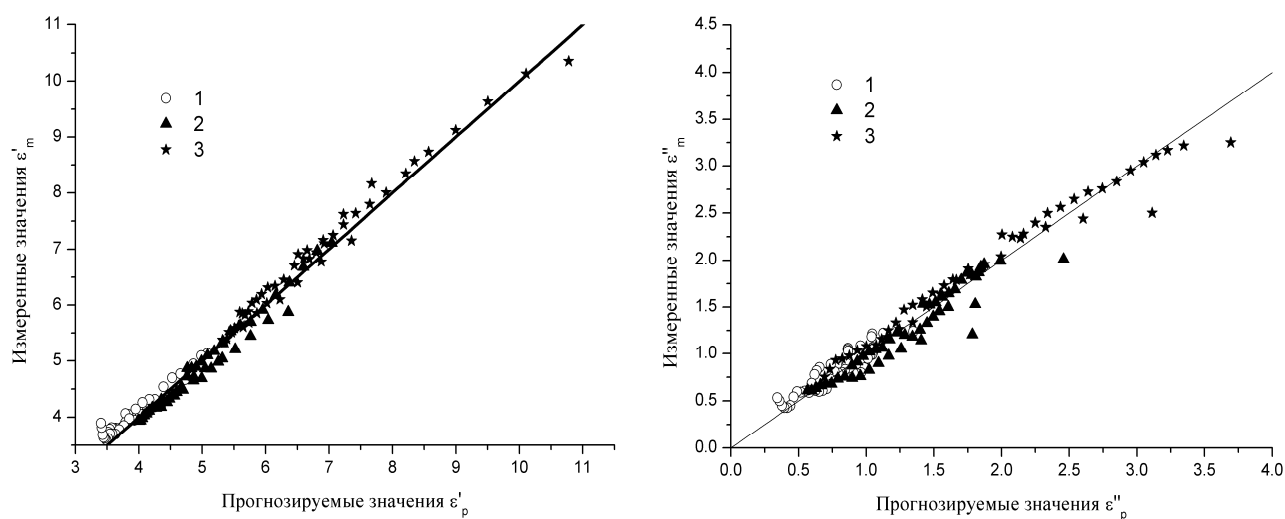


Рис. 2. Корреляция между модельными данными ОРДМС КДП и измеренными для образцов бентонитовой глины при температурах в диапазоне от -10 до -30 °С с влажностями: 1 – $m = 0,64$ м/м; 2 – $m = 0,29$ м/м; 3 – $m = 0,13$ м/м. Сплошной линией изображена биссектриса

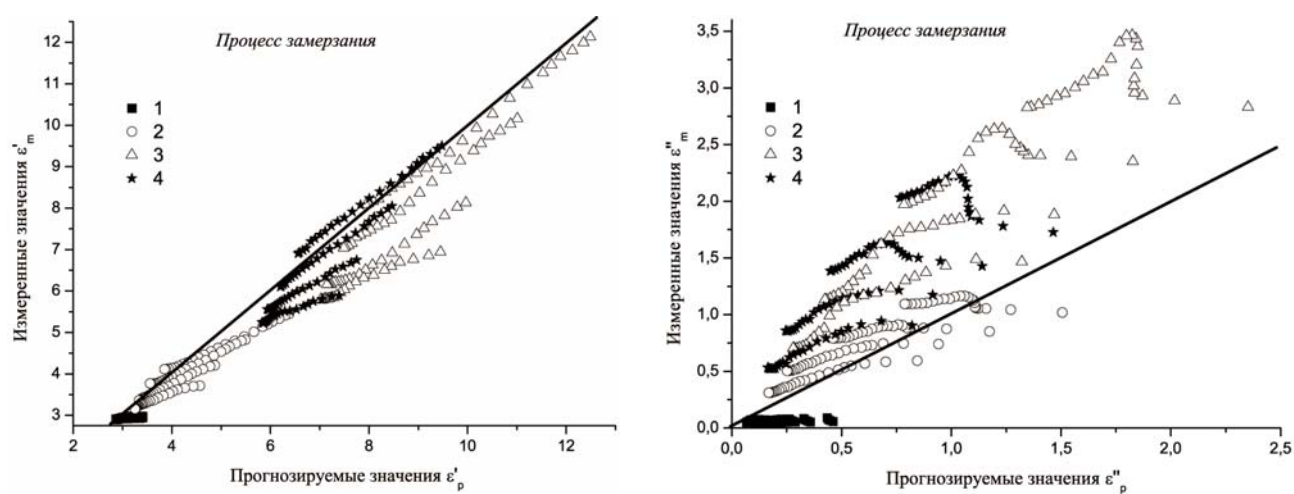


Рис. 3. Корреляция между модельными данными КДП и измеренными для процесса заморзания: 1 – $m_g = 0,021$ г/г; 2 – $m_g = 0,121$ г/г; 3 – $m_g = 0,264$ г/г; 4 – $m_g = 0,429$ г/г. Сплошная линия – биссектриса

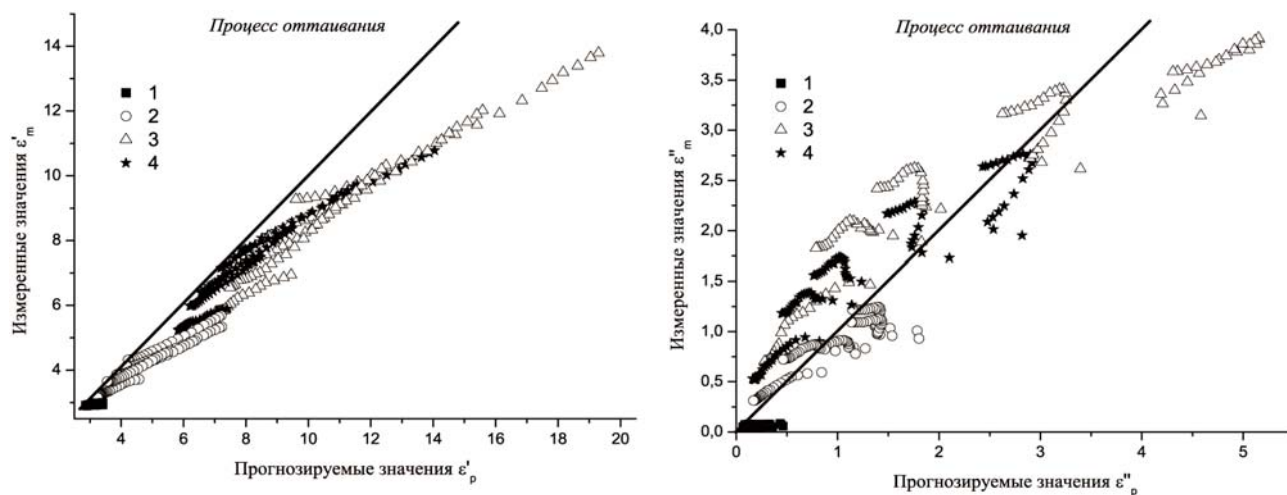


Рис. 4. Корреляция между модельными данными КДП и измеренными для процесса оттаивания:
 1 – $m_g = 0,021$ г/г; 2 – $m_g = 0,121$ г/г; 3 – $m_g = 0,264$ г/г;
 4 – $m_g = 0,429$ г/г. Сплошная линия – биссектриса

Во время процесса оттаивания (рис. 4) ситуация немного иная. Для действительной части КДП значительное отклонение от биссектрисы с повышением температуры образца. Данное отклонение показывает что с повышением температуры и влажности, а также с уменьшением частоты погрешность модельных данных увеличивается. Это может происходить из-за того, что во время оттаивания количество незамерзшей воды остается постоянным до температуры $T = 0$ °C. Концепция незамерзшей воды, во время оттаивания, немного лучше работает для мнимой части КДП. Здесь мы видим также большую погрешность, но при этом ближе к биссектрисе.

Таким образом, сравнивая концепцию незамерзшей воды с измеренными данными бентонитовой глины и среднеглинистого чернозема можно сказать, что концепция Ж-Д описывает реальные измерения с большой погрешностью. Максимальная погрешность для действительной КДП во время процесса заморозки достигает 28 %, а для мнимой части КДП 100 %. Во время процесса оттаивания 42 и 70 % для действительной и мнимой КДП соответственно. Сравнение модели Ж-Д и ОРДМС на примере бентонитовой глины показало, что большие погрешности концепции незамерзшей воды могут быть связаны с тем, что в почве присутствуют различные типы воды и ДП каждого типа воды отличается от ДП воды в незамерзшей почве. Кроме того, модель Ж-Д не учитывает то, что фазовые переходы различных типов воды в почве могут быть разными.

Для постройки модели можно воспользоваться моделями предложенными в [3]. Наши дальнейшие исследования будут направлены на изучение почв в области отрицательных температур и на создание адекватных, для описания мерзлых почв, моделей.

Библиографический список

1. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil. Part II: Dielectric Mixing Models / M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, El- M. A. Rayes IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1985. Vol. 23, № 1. P. 35–45.
2. The Estimation of Dielectric Constant of Frozen Soil-water Mixture at Microwave Bands[J] / L. X. Zhang, J. C. Shi, Z. J. Zhang, K. G. Zhao // Proc. of IGRASS'03. Toulouse, France, 2003.
3. Mironov V. L., Lukin Yu. I. A Physical Model of Dielectric Spectra of Thawed and Frozen Bentonitic Clay within the Frequency Range from 1 to 15 GHz // Russian Physics J. 2011. Vol. 53, № 9. P. 956–963.
4. Komarov S. A., Mironov V. L., Lukin Yu. I. Spectral investigations of complex dielectric permittivity of moist soils // Russian Physics J. 2006. Vol. 49, № 9. P. 934–939.

References

1. Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-Rayes M. A. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1985. Vol. 23. No. 1. P. 35–45.
2. Zhang L. X., Shi J. C., Zhang Z. J., Zhao K. G. The Estimation of Dielectric Constant of Frozen Soil-water Mixture at Microwave Bands[J], In Proceedings of IGRASS'03, Toulouse, France, 2003.
3. Mironov V. L., and Lukin Yu. I. “A Physical Model of Dielectric Spectra of Thawed and Frozen Bentonitic Clay within the Frequency Range from 1 to 15 GHz”. Russian Physics Journal, Vol. 53, No. 9, pp. 956–963, 2011.
4. Komarov S. A., Mironov V. L., Lukin Yu. I. “Spectral investigations of complex dielectric permittivity of moist soils Russian Physics Journal”. 2006. Vol. 49. № 9. Pp. 934–939.

© Миронов В. Л., Каравайский А. Ю., Лукин Ю. И., 2013

УДК 537.226; 621.372

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ХВОЙНЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 3–12 ГГц

Т. Д. Кочеткова, В. И. Суслеяев, С. И. Волчков

Томский государственный университет
Россия, 634050, Томск, просп. им. Ленина, 36. E-mail: tdk_tomsk@mail2000.ru

Рассмотрены диэлектрические свойства древесины хвойных пород (ель, сосна, кедр, пихта). Измерения проводились в прямоугольных резонаторах в диапазоне 3–12 ГГц. Приведено сравнение с диэлектрической проницаемостью березы из разных мест произрастания, как представителя лиственных деревьев. Экспериментально исследовано влияние весовой влажности на диэлектрические свойства древесины. Результаты могут быть использованы для определения характеристик лесных массивов методами дистанционного зондирования.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость древесины, дистанционное зондирование лесных покровов.

THE DIELECTRIC CONSTANT OF CONIFEROUS WOOD IN THE FREQUENCY RANGE 3–12 GHz

T. D. Kochetkova, V. I. Suslyayev, S. I. Volchkov

Tomsk State University
36 Lenin prospect, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: tdk_tomsk@mail2000.ru

The dielectric properties of softwood (spruce, pine, cedar, fir) are observed. Measurements were performed in rectangular resonators in the 3–12 GHz. The comparison with the dielectric constant of birch of different backgrounds, as a representative of deciduous trees, is made. The effect of weight moisture on the dielectric properties of wood was researched. Results can be used for characterization of forest massifs by means of remote sensing techniques.

Keywords: dielectric constant of wood, remote sensing of forest cover.

Мониторинг состояния лесов средствами дистанционного зондирования (ДЗ) в настоящее время остается актуальной задачей, как для российских исследователей, так и для мирового научного сообщества. Обзор международных программ, посвященных этой проблеме, проведен в работе [1]. Авторы отмечают, что вместе с достигнутыми успехами в вопросах выявления вырубок и координат пожарниц остаются нерешенными задачи лесоинвентаризационных работ, оценки с заданной точностью геометрических размеров вырубки, а также состояния сохранившегося древостоя. Перспективными в этом отношении являются новые системы гиперспектрального зондирования, которые открывают возможность диагностировать стрессовые состояния растительности из-за недостатка влаги или негативного техногенного влияния. В работе [2] по результатам самолетного эксперимента показано, что отражательная способность соснового леса в L и P диапазонах согласуется с сезонным изменением водного режима хвои и тонких веток деревьев.

Основной характеристикой среды, исследуемой в микроволновом диапазоне, является диэлектрическая проницаемость. Даже самый быстрый обзор литературы показывает, что экспериментальное изучение диэлектрических свойств древесины не прекращается и по сей день, не смотря на многие десятиле-

тия истории таких измерений. Привлекаются разнообразные модели для описания диэлектрической проницаемости древесины в зависимости от влажности, температуры, частоты электромагнитного излучения: формулы теории композиционных смесей [3], рефракционная модель [4], аппроксимации экспериментальных данных [2; 5].

Методы измерения диэлектрической проницаемости влажных органических объектов, применяемые на практике, также разнообразны: по коэффициенту отражения зонда в виде открытого конца коаксиала [3], в коаксиальной линии [4], по КСВ дипольной антенны, расположенной в стволе дерева [5], методом нерегулярного микрополоскового резонатора [6–8], методом диэлектрической фурье-спектроскопии [9], в емкостной ячейке с плоскими электродами [10]. Авторы работы [11] предложили способ определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога по прямым наземным измерениям ослабления поля.

Выявлены многие особенности в измерении диэлектрических свойств дерева. В работе [3] отмечается тензорный характер диэлектрической проницаемости древесины, обусловленный наличием четко выраженной анизотропии. В последние годы заметна тенденция исследовать именно «живое» дерево, так как выявлено количественное отличие влажностных зависимостей свежесрезанного образца древесины и под-

вергнутого предварительной сушке [4]. В работе [10] подробно исследована погрешность измерения диэлектрической проницаемости дисперсных сред на примере песка и древесины сосны на низких частотах в процессе замерзания.

Целью данной работы была попытка применить резонансную методику измерений для получения спектров диэлектрической проницаемости древесины и получить влажностные зависимости для различных хвойных пород.

Объект и метод исследования. Для изготовления образцов были взяты средние части стволов дерева. Древесина не подвергалась термообработке, но была выдержана в естественных условиях в течение нескольких лет. Образцы представляли собой тонкие стержни сечением 2×2 мм, древесные волокна располагались вдоль длины стержней.

Для каждой породы дерева (береза, ель, кедр, пихта, сосна) было исследовано по 5 образцов. Для увлажнения использовалась дистиллированная вода. Увлажненные образцы выдерживались в герметичных контейнерах 1–2 сут для равномерного распределения влаги. Перед началом измерения определялись размеры сечения образцов с помощью штангенциркуля (погрешность $\pm 0,01$ мм) и масса на весах Shimadzu AUX – 320 (погрешность $\pm 0,0005$ г). После измерения образцы увлажнялись в большей степени. При достижении увлажнения порядка 60 %, образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 75°C до постоянства массы. Влажность в этом состоянии была принята за нулевую, а остальные значения влажности были рассчитаны относительно нее в весовых долях как $W = (m_{\text{вл. обр}} - m_{\text{сух. обр}}) / m_{\text{сух. обр}}$, где $m_{\text{вл. обр}}$ и $m_{\text{сух. обр}}$ – массы влажного и сухого образцов, соответственно.

Измерения диэлектрической проницаемости проводились стандартным резонаторным методом. В качестве измерительной ячейки использовались прямоугольные многомодовые резонаторы трех размеров $58 \times 25 \times 480$ мм³, $35 \times 15 \times 450$ мм³ и $23 \times 10 \times 250$ мм³, охватывающие диапазон 3–12 ГГц. Резонатор через емкостную диафрагму подключался к сверхвысоко-частотному тракту векторного анализатора цепей Agilent Technologies E8363B. Другой конец резонатора был закорочен. Образец древесины размещался

в отверстие в середине длины и широкой стенки резонатора, волокна древесины были параллельны линиям электрического поля.

Измерения проводились при комнатной температуре $21 \pm 2^\circ\text{C}$.

Результаты измерений. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости древесины пяти пород для двух значений весовой влажности представлены на рис. 1. Видно, что значения для хвойных пород сравнительно близки друг к другу, в отличие от значений для березы. Это может быть связано с различием химического состава и структуры древесины лиственных и хвойных деревьев. Такой результат согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [7].

Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости от весовой влажности для двух экземпляров березы, отличающихся местом произрастания приведена на рис. 2, а. «Береза верховая» – так названо дерево, выросшее на пригорке, на легких суглинистых почвах, ее древесина светлая. «Береза низовая» выросла в низкой болотистой местности, внешне ее древесина имеет темный коричневый оттенок. Это объясняется тем, что в почве низко расположенных мест присутствует множество минеральных солей и органических соединений, которые проникают в древесину, придавая ей характерно темный цвет. Эти различия в происхождении деревьев одного вида оказываются заметны и по значению диэлектрической проницаемости. Результат исследования показывает, что минеральный состав поглощаемой деревом влаги играет большую роль, нежели структура древесины.

Влажностная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости для пяти пород древесины показана на рис 2, б. Хотя в рамках этой работы строгая аппроксимация с целью выделить пороги перехода воды в древесине в разные состояния не проводилась, можно видеть, что скорость нарастания значений диэлектрической проницаемости неодинакова и возрастает по мере увеличения влажности. Причем для лиственной породы – березы – эта зависимость также отличается от группы хвойных пород. Четко отделить хвойные породы между собой на данном этапе не удастся.

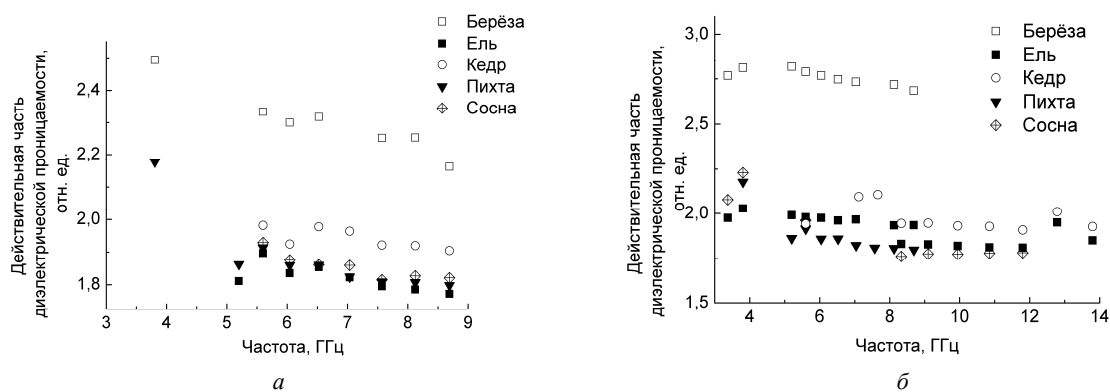


Рис. 1. Весовая влажность 0,01 (а); весовая влажность 0,03 (б). Температура 21°C

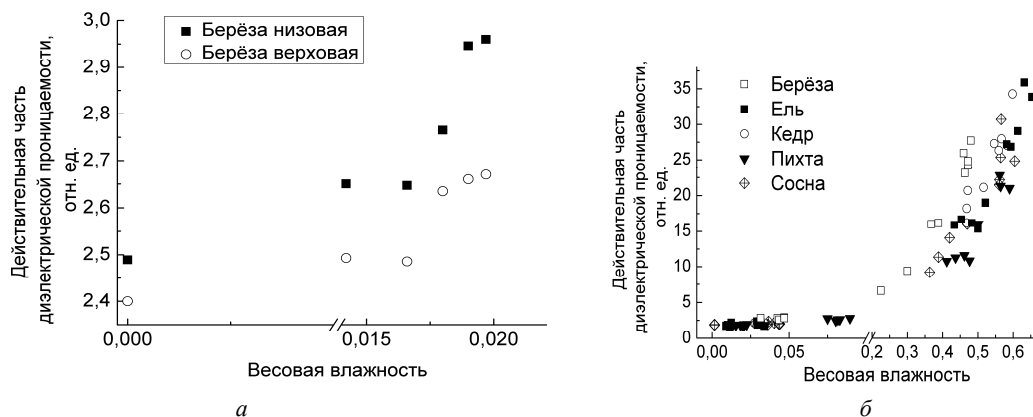


Рис. 2. Частота 3,807 ГГц (а); частота 5,2 ГГц (б). Температура 22 °С

Резонаторный метод измерения диэлектрической проницаемости древесины позволяет получить достоверные результаты, согласующиеся с данными других авторов. Показано существенное различие в диэлектрической проницаемости в зависимости от места произрастания дерева. На частотных и влажностных зависимостях четко видно отличие лиственных и хвойных пород деревьев. Минеральный состав поглощаемой деревом влаги играет большую роль, нежели структура древесины.

Библиографические ссылки

1. Козодеров В. В., Дмитриев Е. В. Аэрокосмическое зондирование почвенно-растительного покрова: модели, алгоритмическое и программное обеспечение, наземная валидация // Исследование Земли из космоса. 2010. № 1. С. 69–86.
2. Исследование взаимосвязи отражательных свойств сосновых лесов и водного режима элементов деревьев / А. А. Калинин, М. С. Крылова, Н. А. Арманд и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 11. С. 1327–1334.
3. Комаров В. В. Тестирование моделей теории смесей применительно к расчету диэлектрической проницаемости влажной древесины в сверхвысоком частотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 11. С. 1346–1352.
4. Романов А. Н. Влияние объемной влажности фазового состава воды на диэлектрические свойства древесины в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 4. С. 461–466.
5. Об измерении диэлектрической проницаемости «живой» древесины дерева в целях микроволнового дистанционного зондирования / А. А. Калинин, Б. Г. Кутуза, М. С. Крылова и др. // Радиолокация и радиосвязь : доклады IV Всерос. науч.-техн. конф. 2010. С. 191–195.
6. Измерение влажности почв с использованием нерегулярного микрополоскового резонатора / Т. Д. Кочеткова, В. И. Сусяев, В. А. Журавлев и др. // Ползуновский вестник. 2012. № 3/2. С. 170–174.
7. Мобильный прибор на основе нерегулярного микрополоскового резонатора для измерения влажности почв / Т. Д. Кочеткова, В. И. Сусяев, Е. Ю. Коро-

вин, В. А. Журавлев // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 1. С. 249–252.

8. Исследование датчика на основе нерегулярного микрополоскового резонатора для измерения влажности почв / Т. Д. Кочеткова, В. А. Журавлев, В. И. Сусяев и др. // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 112–117.

9. Степаниденко М. А., Ковалев А. В., Тарасова О. В. Оценка состояния лиственницы сибирской (*Larix Sibirica* Ledeb.) методом диэлектрической спектроскопии // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. XXVII, № 3–4. С. 275–278.

10. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Филиппова Т. Г. Измерения низкочастотной диэлектрической проницаемости увлажненных дисперсных сред при отрицательных температурах // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 1. С. 66–71.

11. Басанов Б. В., Ветлужский А. Ю., Калашников В. П. Метод определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 4.

References

1. Kozoderov V. V., Dmitriev E. V. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2010, no. 1, pp. 69–86.
2. Kalinkevich A. A., Krylova M. S., Armand N. A., Kakovkina A. Y., Slyusarev V. I., Manakov V. Y., Plushchev V. A. Radiotekhnika i Elektronika, 2010, vol 55, no. 11, pp. 1327–1334.
3. Komarov V. V. Radiotekhnika i Elektronika, 2007, vol. 52, no. 11, pp. 1346–1352.
4. Romahov A. N. Radiotekhnika i Elektronika, 2006, vol. 51, no. 4, pp. 461–466.
5. Kalinkevich A. A., Kutuza B. G., Krylova M. S., Maslyuk V. M., Khromets E. A., Kakovkina A. Y., Lightart L. P. Doklady IV Vserossiyskoy nauchno-technicheskoy konferencii "Radiolokacia i Padiosvyaz" (Proc. IV National Scientific and Technical Conference "Radar and radio communications"). Journal of Radioelectronics, IRE named. V. A. Kotelnikova PAH, Moscow, 2010, PDF, ISSN 1684-1719, pp. 191–195.
6. Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Zhuravlev V. A., Solovyova T. P., Korovin E. Y. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Fizika. 2012. № 8/3. pp. 112–117.

7. Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Zhuravlev V. A., Korovin E. Y., Solovyova T. P. Polzunovskiy vestnik, 2012. – № 3/2. pp. 170–174.

8. Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Korovin E. Y., Zhuravlev V. A. Doklady TUSURa, 2011. №2 (24), Part 1. pp. 249–252.

9. Stepanidenko M. A., Kovalev A. V., Tarasova O. V. Khvoynye borealnoy zony, 2010, vol. XXVII, no. 3–4, pp. 275–278.

10. Bordonskii G. S., Orlov A. O., Filippova T. G. Kriosfera Zemli, 2008, vol. XII, no. 1, pp. 66–71.

11. Basanov B. V., Vetluzhckii A. Y., Kalashnikov V. P. Journal radioelektroniki, 2010.

© Кочеткова Т. Д., Суслеев В. И., Волчков С. И., 2013

УДК 504.064.3

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА*

А. В. Дмитриев, В. В. Дмитриев, И. С. Конишев, В. Н. Тудос

Омский государственный педагогический университет
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: vdmitriev@omgpu.omsk.edu

Описан аппаратно-программный комплекс, позволяющий с минимальными затратами определить пространственное распределение и статистические характеристики параметров микрорельефа подстилающей поверхности. Под микрорельефом в данном случае понимаются неровности размером от единиц миллиметров до единиц дециметров. Величина исследуемого участка поверхности определяется размерами лабораторного стенда и ограничена первым десятком квадратных метров. Определению поддаются горизонтальные и вертикальные размеры неоднородностей микрорельефа: среднее значение, дисперсия, распределение по размерам – его вид и количество мод. Также возможно построение ЦМР в исследуемом масштабе. Экспресс определение размеров производится в рамках модели двумерного случайного процесса, корреляционная функция которого вычисляется с использованием теоремы Винера–Хинчина. Для оценки распределения по размерам используется алгоритм размыкания контуров. Построение цифровой модели микрорельефа происходит с использованием стереофотографий.

Ключевые слова: шероховатость почвы, дистанционное зондирование.

METHODS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE INEQUALITIES OF THE SOIL COVER

A. V. Dmitriev, V. V. Dmitriev, I. S. Konishev, V. N. Tudos

Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: vdmitriev@omgpu.omsk.edu

The hardware-software complex which allows to define, with the minimum expenses, the spatial distribution and statistical characteristics of parameters of a micro relief of the spreading surface is described in the article. The micro relief in this case is understood as inequalities with the size from units of millimeters to units of decimeters. The size of a studied site of a surface is defined by the sizes of the laboratory stand and is limited to the first ten square meters. The horizontal and vertical extent of not uniformity of the micro relief can be defined: average value, dispersion, distribution by the sizes – its look and quantity of fashions. The creation of CMR in studied scale is also possible. The express determination of the sizes is made within model of the two-dimensional casual process which correlation function is calculated with the use of the theorem of Wiener–Hinchina. For the assessment of distribution by the sizes the algorithm of disconnection of contours is used. Creation of digital model of a micro relief proceeds with the use of stereo photos.

Keywords: soil roughness, remote sensing.

подавляющее большинство задач дистанционного зондирования сводятся к взаимодействию волнового поля с исследуемым природным объектом. При теоретическом описании такого взаимодействия существенную роль играют характеристики поверхности, отграничивающей изучаемый природный покров

от воздушной среды. В особую группу таких характеристик обычно выделяют параметры, описывающие степень неровности (шероховатости) подстилающей поверхности.

В данной работе предпринята попытка создания алгоритмов для оценки величины неровностей (шеро-

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-05-98082-р_сибирь_a.

ховатости) верхней границы почвенного покрова по ее фотографическому изображению. Стандартный путь решения нашей задачи первым и обязательным шагом включает в себя этап бинаризации изображения [1; 2]. После проведения бинаризации возможен прямой анализ геометрических характеристик областей изображения, соответствующих исследуемому объекту (объектам). Для проведения однозначного анализа необходимо, чтобы выделенные области были топологически однородными, отсутствовали перекрытия и наложения.

В нашем случае описанный выше путь реализован с использованием стандартной процедуры (операции) размыкания контуров, которая применяется при цифровой обработке изображений [3; 4]. Результаты оценки распределения по размерам почвенных агрегатов приведены на рис. 1. Изображение построено в линейном и логарифмическом масштабе. В первом случае лучше виден общий характер зависимости, во втором – лучше прослеживается «хвост» частиц крупных размеров, которые составляют малую долю от общего количества.

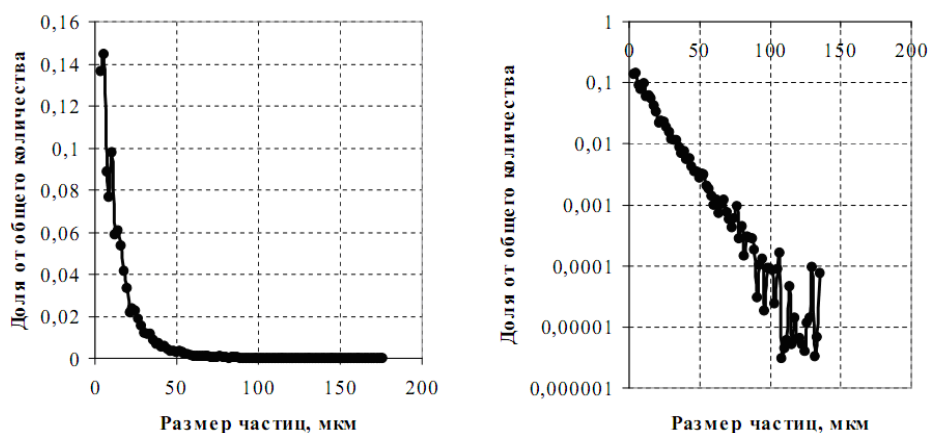


Рис. 1. Распределение по размерам почвенных агрегатов, измеренное по микрофотографиям почвы. Линейное (слева) и логарифмическое (справа) масштабирование вертикальной оси

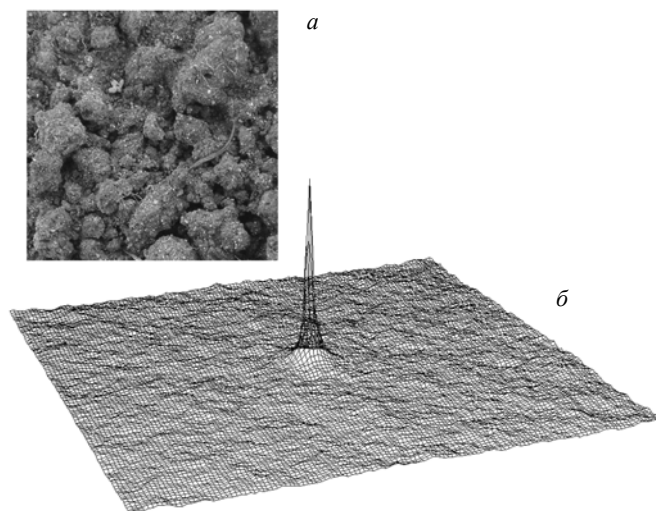


Рис. 2. Фрагмент исходного изображения почвы (а) и представление корреляционной функции данного фрагмента в виде поверхности (б)

В условиях, когда абсолютные значения яркости не могут быть использованы в качестве классификационных, дискриминантных параметров, приходится использовать относительные, градиентные критерии разделения [3; 4]. Для их определения видеоизображение моделируется случайным двухмерным процессом. Наиболее естественной характеристикой описания взаимосвязи двух случайных величин является корреляционная функция [4]. При этом в качестве оценки размеров выделяющихся элементов изображения может быть использован один из параметров корреляционной функции, например, радиус корреляции.

Вычисление корреляционной функции удобнее всего проводить, опираясь на теорему Винера–Хинчина [2; 3; 5]. Задача облегчается еще и тем, что фактически она сводится к стандартной двукратной процедуре – преобразованию Фурье, для которого существует множество алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) и их реализаций практически на всех языках программирования, в многочисленных специализированных программных продуктах и т. д. (рис. 2).

Получение численных оценок размеров (радиуса) частиц из анализа пространственной зависимости корреляционной функции – $R(\tau)$, что в свою очередь требует знания ее аналитического выражения. Для того, чтобы выразить $R(\tau)$ в конечной аналитической форме, необходимо исходить из конкретной модели исходного сигнала, которая в общем случае неизвестна. К счастью, в свое время С.М.Рытовым было показано, что для широкого круга импульсных сигналов корреляционная функция записывается в экспоненциальном виде. В качестве первого приближения может быть использована модель телеграфного сигнала [4; 5], выбор следует из анализа профилей яркости исходного изображения, проведенных по диаметрам отдельных почвенных агрегатов.

Еще один подход к оценке размеров почвенных агрегатов не требует предположений о модели сигнала и основан на анализе пространственной зависимости корреляционной функции. Поскольку на зависимости $R(\tau)$ явно выделяются два участка – аппроксимируем всю зависимость двумя степенными функциями вида $Y = aX$, одна для «сигнальной», другая для «шумовой» части. Выделение граничной точки (точки «перелома») в данном случае не представляет проблемы. В качестве оценки удобно взять точку пересечения двух аппроксимационных выражений, которую легко определить по формулам элементарной математики:

$$T = (a_2 / a_1),$$

где $a_1(a_2)$ и $b_1(b_2)$ – числовые параметры первого (второго) аппроксимационного выражения.

Всего подобным способом было обработано шесть изображений, результаты сведены в таблицу, приведенную ниже.

Результаты оценки среднего размера шероховатости почвы

Порядковый номер снимка	Оценки среднего радиуса почвенных агрегатов (мм)	
	Модель телеграфного сигнала	Аппроксимация двумя функциями
1	5,64	8,55
2	4,51	7,74
3	5,30	9,89
4	4,59	6,51
5	5,14	9,75
6	3,85	4,99

В целом соблюдается соотношение между оценками, полученными двумя описанными методами, а именно, второй метод дает оценки примерно в 1,5 (точнее в 1,62) раза большие, чем в модели телеграфного сигнала. С точки зрения устойчивости решения, метод, использующий модель телеграфного сигнала предпочтительнее, поскольку средний относительный разброс в этом случае составляет 13,37 %, а для второго метода данная величина равна 24,16 %.

Суммируя сказанное, можно сделать следующие выводы. Первое, метод бинаризации с последующим анализом контуров позволяет определить распределение по размерам почвенных агрегатов, требует умеренных машинных затрат, но критичен к величине контраста изображения. Второе, метод анализа корреляционной функции изображения самый быстрый, легко автоматизируется, но определяет только средний размер шероховатости.

Библиографические ссылки

1. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений : в 2 т. М. : Мир, 1982.
2. Методы компьютерной обработки изображений / под. ред. В. А. Сойфера. 2-е изд., испр. М. : Физматлит, 2003.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005.
4. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. М. : Наука, 1966.
5. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб. : Питер, 2003.

References

1. Pratt U. K. Tsiphrovaia obrabotka izobradzenij (Digital processing of images). In 2 v. Moscow, Mir, 1982, 790 p.
2. Metodi kompjuternoy obrabotki izobradzenij (Methods of computer processing of images). Ed. by V. A. Soyfer. The 2nd prod. Moscow, FIZMATLIT, 2003. 784 p.
3. Gonzalez R., Woods R. Tsiphrovaia obrabotka izobradzenij (Digital processing of images). Moscow, Technosphere, 2005. 1072 p.
4. Rytov S. M. Vvedenie v statisticheskuyu radiophysiku (Introduction in statistical radiophysics). Moscow, Nauka, 1966, 404 p.
5. Sergiyenko A. B. Tsiphrovaia obrabotka signalov (Digital processing of signals). SPb., St. Petersburg, 2003. 608 p.

© Дмитриев А. В., Дмитриев В. В.,
Коньшев И. С., Тудос В. Н. 2013

ДИАГНОСТИКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РЕФЛЕКТОГРАММ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS

В. Л. Миронов^{1,2}, А. В. Сорокин^{1,2}, М. И. Михайлов², С. В. Фомин², К. В. Музалевский^{1,2}

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

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

Получены интерференционные рефлектограммы почвы в натурных условиях с использованием регистрации сигналов излучения группировок навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS приемными антеннами с разными поляризационными характеристиками. Разработан и апробирован алгоритм восстановления влажности поверхностного слоя почвы и его геометрических характеристик на основе использования пространственного отбора и статистической обработки временных зависимостей рефлектограмм. Использована обобщенная температурно-минералогически зависящая диэлектрическая модель для влажных почв. Показано, что использование дипольных антенн в методе интерференционной рефлектометрии более эффективно для восстановления почвенной влажности.

Ключевые слова: интерференция, рефлектограмма, поляризация, сигналы навигационных спутников, влажность, поверхностный слой, почва.

DETERMINATION OF SOIL MOISTURE USING POLARIZATION REFLECTOGRAM OF GLONASS- AND GPS-SIGNALS

V. L. Mironov^{1,2}, A.V. Sorokin^{1,2}, M. I. Mihaylov², S. V. Fomin², K.V. Muzalevskiy^{1,2}

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia

²Institute of Physics named after academician L. V. Kirenskiy, Krasnoyarsk Scientific Center
of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: sorav@iph.krasn.ru

The authors present the received interference reflectograms of soil in natural conditions with the use of registration of the signals of radiation of the constellations of navigation satellites GLONASS and GPS by receiving aerials with different polarizing characteristics. The algorithm of restoration of humidity (wet) in the surface soil layer and its geometry is designed and evaluated on the basis of the use of spatial selection and the statistical processing of time dependences of the reflectograms. The generalized refractive dielectric model for wet soils was used. It is shown that the use of dipole aeralis in the method of interferential reflectometry is more efficient for reconditioning of the soils moisture.

Keywords: interference, trace, polarization, the signals of navigation satellites, humidity (wet), surface layer of soil.

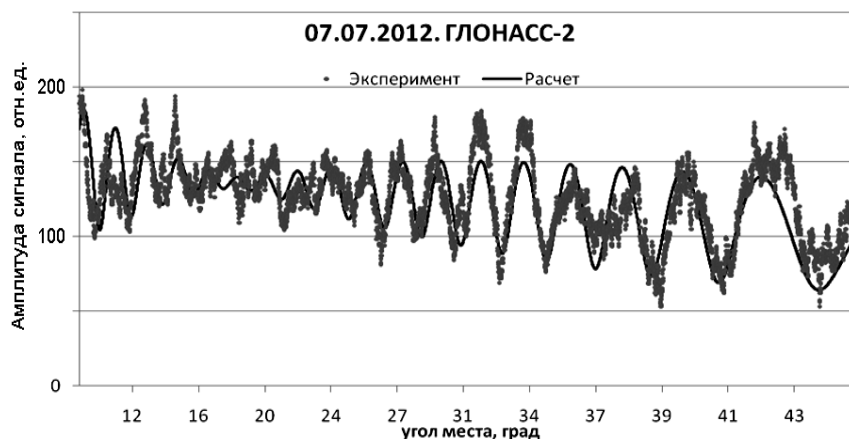
В прошедшее десятилетие активно развиваются методы интерференционной рефлектометрии с использованием сигналов группировок навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС и GPS [1–4]. Исследования в данном направлении определяют реальную перспективу создания эффективных методов непрерывного локального мониторинга приповерхностных характеристик почвы с растительными покровами различного типа.

В данной работе представлены экспериментальные данные по определению влажности почвы на основе регистрации интерференционного рефлектометрического сигнала от поверхности почвы. В экспериментах были использованы селективные по поляризации антенны. Регистрировались интерференционные рефлектограммы для правой круговой и вертикальной

поляризациями, с вариациями высоты расположения приемного модуля над поверхностью почвы.

Эксперимент. В измерениях использовано когерентное радиоизлучение навигационных космических аппаратов (НКА) группировок ГЛОНАСС и GPS. Рабочие частоты сигналов отдельных спутников ГЛОНАСС лежат в диапазоне $1598,0625 < f < 1604,25$ МГц (соответственно длины волн $18,76 > \lambda_r > 18,69$ см, аппараты системы GPS излучают волны на частоте $f = 1575,42$ МГц, $\lambda = 19,03$ см)

В качестве измерительной аппаратуры использовался мобильный радиоприемный комплекс МРК-32. Для регистрации и хранения полученной информации применялся ноутбук. МРК-32 позволяет в реальном времени, круглосуточно, принимать сигналы обеих навигационных систем. Элементарные отсчеты



Интерференционная рефлектограмма сигнала от пашни

амплитуды принимаемого сигнала регистрируются с частотами в интервале 1–2 Гц.

Измерения проведены в северо-западной пригородной зоне города Красноярска 7.07.2012 г. с использованием антенны, принимающей излучение с вертикально поляризованной компонентой напряженности электрического поля. Пашня вспахана и заборонена. Высота подъема антенны над поверхностью почвы 2,8 м. Географические координаты расположения антенны: 56°03'48,25" с. ш., 92°41'20,34" в. д.

Содержание глинистой и песчаной фракций 28 и 72 % соответственно. Характерный параметр поверхностной шероховатости удовлетворяет условию $\sigma / \lambda \leq 1$. Объемная влажность почвы в день измерений снята в 5 точках на расстоянии 12 м от антенны и составляет 0,24, 0,26, 0,18, 0,30 и 0,22. Среднее значение – 0,24.

Зарегистрированы и обработаны сигналы 9 спутников системы ГЛОНАСС и 8 спутников системы GPS. Длительность непрерывных сеансов регистрации составляла 3–5 ч. Характерная интерференционная рефлектограмма, соответствующая измерениям над пашней, представлена на рисунке.

Результаты и обсуждение. Обработка экспериментальных данных для правоциркулярной и дипольной антенн проводилась по методике, представленной в работе [4]. Массивы данных очищались от аппаратных сбояв и приводились к стандартизованному виду. Модельный расчет амплитуды принятого сигнала как функции соответствующих углов места φ проводился по формуле

$$E = KF[1 + S + R + 2SR\cos \Phi]^{0,5}, \quad (1)$$

где K – нормировочный множитель; F – функция диаграммы направленности приемной антенны, S – параметр шероховатости почвенного слоя; $R_r = (r_s + r_p)/2$ и R_v – френелевские коэффициент отражения правоциркулярной или вертикальной поляризации; $\Phi = \delta_v + (4\pi h^{np} / \lambda) \sin \varphi$ – набег фазы за счет разности хода прямой и отраженной волн; h^{np} – высота приемника; λ – длина волны; φ – угол места спутника.

Взаимосвязь между диэлектрической проницаемостью и влажностью почвенного слоя рассчитывалась

по температурно – и минералогически зависимой диэлектрической модели почвы [3]. С помощью нелинейного регрессионного анализа проводилась минимизация целевой функции путем варьирования значений искомых параметров расчетной модели.

В таблице представлены результаты по восстановлению влажности свободного почвенного слоя с использованием вертикально ориентированной дипольной антенны по данным регистрации отдельных спутников. При статистической обработке одного сеанса использованы записи без ограничений по диапазону азимутов, что обеспечивает усреднение влажности по площади зондируемого участка вблизи антенны до 400 м.

Влажность почвенного слоя, определенная с помощью дипольной антенны

№ п/п	Навигационный спутник	Высота приемника h , см	Влажность почвенного слоя W , см /см
1	ГЛОНАСС-1	278,8	0,375
2	ГЛОНАСС-2	288,5	0,211
3	ГЛОНАСС-10	301,0	0,150
4	ГЛОНАСС-11	279,3	0,203
5	ГЛОНАСС-13	292,4	0,140
6	ГЛОНАСС-20	285,4	0,140
7	ГЛОНАСС-21	287,6	0,158
8	ГЛОНАСС-22	271,7	0,081
9	GPS-10	271,7	0,202
10	GPS-11	287,5	0,376
11	GPS-13	282,2	0,249
12	GPS-16	282,8	0,381
13	GPS-19	259,0	0,095
14	GPS-23	266,8	0,162
15	GPS-26	269,8	0,198
16	GPS-28	275,7	0,132
17	GPS-30	282,7	0,363
Среднее		280,2	0,213
Доверительный интервал		±5,3	±0,052
Стандартное отклонение		10,3	0,101
Независимые измерения		285	0,24

Запись рефлектограммы в диапазоне углов, содержащем угол Брюстера, дает возможность проводить устойчивую минимизацию целевой функции и запись рефлекторграммы в диапазоне углов, содержащем угол Брюстера, дает возможность восстановить диэлектрическую проницаемость отражающего слоя и, соответственно, усредненную по площади влажность с большей точностью. На рис. 1 приведены интерференционная рефлектограмма и расчетная кривая для модели почвы с содержанием глины 25 % и объемной влажностью $W = 0,213 \pm 0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Полученные результаты сопоставимы со значениями влажности $W = 0,244 \text{ см}^3/\text{см}^3$, определенной независимо термостатно-весовым методом.

Разработана модель формирования интерференционной рефлектограммы почвенными покровами безлесных территорий с применением правоциркулярной и дипольной антенн.

С помощью этой модели проведено восстановление влажности верхнего слоя почвенного покрова. Показано, что значения влажностей, восстановленных из единичных интерференционных рефлектометрических измерений, испытывают значительные вариации, и сделан вывод о необходимости использования массивов данных с большим количеством элементарных отсчетов для оптимизации статистической обработки.

Сопоставление значений восстановленной влажности и измеренной независимым методом показало эффективность восстановления влажности почвы с использованием антенны, принимающей сигнал с вертикальной поляризацией.

Библиографические ссылки

1. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field / R.-A. Nereida et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47, № 11. P. 3616–3624.
2. Kristine M. Larson et al. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2010. Vol. 3, № 4. Part 2. P. 91–99.
3. Mironov V. L., Kosolapova L. G., and Fomin S. V., Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. Vol. 47, № 7. P. 2059–2070.
4. Восстановление диэлектрической проницаемости почв и лесных покровов при использовании сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS / В. Л. Миронов, С. В. Фомин, А. В. Сорокин и др. // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 99–101.

References

1. Nereida Rodriguez-Alvarez et al., IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, V. 47, N. 11, November 2009, pp. 3616–3624.
2. Kristine M. Larson et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, Vol. 3, No. 4, part 2, pp. 91–99.
3. Mironov V. L., Kosolapova L. G., and Fomin S. V., IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Jul. 2009, Vol. 47, N. 7, pp. 2059–2070.
4. Mironov V. L., Fomin S. V., Sorokin A. V., Muzalevskiy K. V., Mihaylov M. I., Izvestiya VUZov. Fizika, 2012. Vol. 55, No. 9/2, pp. 99–101.

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

УДК 538.956+537.876.42

КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОДНОГО ИЛИ ДВУХ СЛОЕВ*

А. В. Репин, А. С. Яценко

Омский государственный педагогический университет
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: x_rays1@mail.ru

Приведены результаты определения комплексной диэлектрической проницаемости слоистой среды. Описана методика измерения диэлектрических параметров сразу двух образцов с различными диэлектрическими проницаемостями. Проведена проверка возможности определения диэлектрической проницаемости с одновременным использованием коэффициентов отражения и прохождения. Показано, что данный метод применим для измерения в диапазоне частот от 100 МГц до 4 ГГц. Реализован способ автоматического расчета диэлектрических параметров в программной среде MS Excel. Корректное восстановление диэлектрической проницаемостей возможно, если начальные значения отличаются от истинных не более чем на 10 %. Полученные результаты могут быть использованы при проведении диэлектрических измерений.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, слоистая среда.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-05-00502-а).

REFLECTION AND TRANSMISSION COEFFICIENTS OF THE BEDDED MEDIA AND POSSIBILITY OF DETECTION OF COMPLEX PERMITTIVITY OF ONE OR TWO BEDS

A. V. Repin, A. S. Yashchenko

Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevskiy st., 644099, Omsk, Russia. E-mail: x_rays1@mail.ru

The authors present the results of detection of the complex dielectric permittivity of the bedded medium. A technique of measuring the dielectric parameters of two samples together with different dielectric permittivity. The possibility of determining the dielectric constant using both reflection and transmission coefficients is investigated. It is shown that this method can be used for measurements in the frequency range from 100 MHz to 4 GHz. The method for automatic calculating the dielectric parameters with the software MS Excel was implemented. Correct recovery of the dielectric permittivity is possible if the initial values do not differ from the true values by more than 10 %. The results can be used during the dielectric measurements.

Keywords: dielectric permittivity, reflection coefficient, transmission coefficient, layered medium.

При интерпретации данных полученных дистанционными методами необходимо знать комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) среды в широком интервале частот и температур. Для измерения КДП в диапазоне от 100 МГц до 20 ГГц используют ячейки в виде отрезков коаксиальных линий. В качестве измерителей применяют векторные анализаторы цепей, измеряющие матрицу коэффициентов рассеяния. Для восстановления КДП чаще всего используют модуль и фазу коэффициента прохождения, так как он измеряется точнее и процедура калибровки ячейки проще, чем при измерении коэффициента отражения [1–3]. Также применяется метод восстановления КДП с использованием модулей коэффициентов отражения и прохождения [4; 5]. Однако при проведении долгосрочных температурных измерений ячейки приходится подключать к прибору при каждой температурной точке по очереди. Это приводит к возрастанию времени измерения, так как необходимо ждать, пока в термостате снова установится нужная температура. Для повышения скорости проведения температурных измерений рассмотрена возможность определения КДП при подключении в тракт двух измерительных ячеек с различными образцами. При определении параметров нужно будет использовать и модули, и фазы коэффициентов отражения и прохождения, а также знать априорные значения КДП.

Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей ZNB8 фирмы Rohde&Schwarz измеряющего матрицу коэффициентов рассеяния. В качестве термостата применялась климатическая камера JEIO TECH TH-ME-25 с точностью установки температуры 0,3 °С. Измерительные ячейки представляют собой отрезки коаксиальной линии сечением 16/7 длиной 2 и 10,5 см.

Образцы 2 и 6 (рис. 1) размещались между двумя шайбами из фторопласта 1, 3 и 5, 7. Диэлектрическая проницаемость фторопласта $\epsilon = 2,05 \pm 0,05 - j \cdot 6 \cdot 10^{-4}$. Средой 5, как и средами перед границей 1 и после границы 7, является воздух с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1 - j \cdot 0$. Комплексный коэффициент

отражения (параметр S_{11}) данной структуры от границы «воздух–шайба» (0–1) [6]:

$$S_{11} = \frac{Z_{\text{BX}1} - Z_0}{Z_{\text{BX}1} + Z_0} \quad (1)$$

где

$$Z_{\text{BX}1} = \frac{Z_{\text{BX}2} + Z_1 \operatorname{th}(jk_1 d_1)}{Z_1 + Z_{\text{BX}2} \operatorname{th}(jk_1 d_1)} Z_1,$$

$Z_{\text{BX}i}$ вычисляются по аналогичным формулам:

$$Z_{\text{BX}i} = \frac{Z_{\text{BX}(i+1)} + Z_i \operatorname{th}(jk_i d_i)}{Z_i + Z_{\text{BX}(i+1)} \operatorname{th}(jk_i d_i)} Z_i,$$

где i – индекс слоя; $Z_{\text{BX}8} = Z_8 = Z_0$, $Z_0 = 50$ Ом – волновое сопротивление линии; $k_i = k_0 \sqrt{\epsilon_i}$ – комплексное волновое число i -го слоя, где ϵ_i – КДП i -го слоя; $k_0 = 2\pi f/c$ – волновое число в вакууме (f – частота; c – скорость света); d_i – толщина i -го слоя; $Z_i = Z_0 / \sqrt{\epsilon_i}$. Комплексный коэффициент передачи (параметр S_{12}) определяется как обратная величина произведения [6]:

$$\frac{1}{S_{12}} = \prod_{i=0}^i \frac{Z_i + Z_{\text{BX}(i+1)}}{Z_{(i+1)} + Z_{\text{BX}(i+1)}} e^{-jk_i d_i}, \quad (2)$$

где размеры d_i показаны на рис. 1, кроме d_0 и d_8 , значения которых принимаются равными нулю. Действительную ϵ' и мнимую ϵ'' части КДП образца можно определить как из (1), так и из (2) методами оптимизации.

При проведении измерений использовались переходники для подключения разъема ZNB8 типа N к линии сечением 16/7. Для коррекции фазы коэффициента отражения необходимо определить физическую длину переходника, а затем вычислить фазу волны, которая набежит при прохождении волны до первой границы, и вычесть ее удвоенное значение из измеренных данных. Длину отрезка легко рассчитать, поставив перед слоем 1 короткозамыкатель, и измерив параметр S_{11} . Для коррекции фазы коэффициента прохождения нужно определить физические длины переходников, рассчитать набегающую на них фазу и вычесть ее из измеренной фазы.

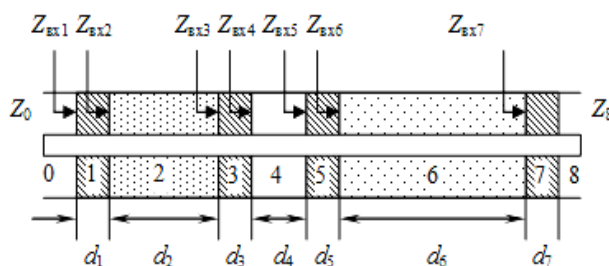


Рис. 1

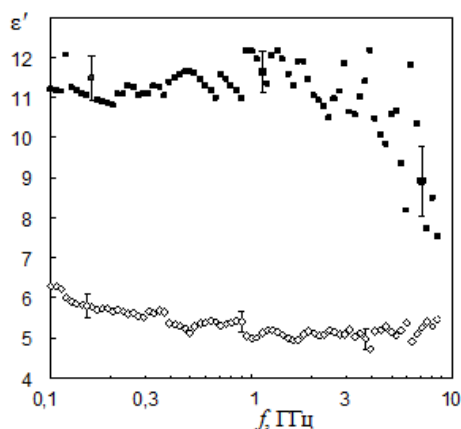


Рис. 2

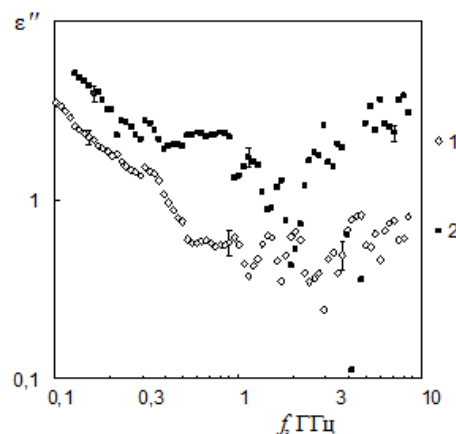


Рис. 3

Методика расчета КДП одного образца аналогична, только нужно учитывать только три первых слоя, а для расчета достаточно взять или коэффициент отражения, или коэффициент прохождения. Априорные значения КДП на частоте 100–150 МГц определяются при помещении ячейки в бокс в разрыв центрального проводника коаксиальной линии. Метод измерения и расчета при таком подключении подробно приведен в [7].

Образцом был выбран речной песок с различной влажностью. В длинной ячейке находился образец объемной влажностью $W_{об} = 0,06 \text{ см}^3/\text{см}^3$, в короткой ячейке образец с $W_{об} = 0,22 \text{ см}^3/\text{см}^3$.

На рис. 2 приведены частотные зависимости действительной части КДП ϵ' для образцов, восстановленных при одновременном измерении. Видно, что значения для образца в длинной ячейке восстановились лучше, чем для образца в короткой ячейке. Погрешности определения ϵ' составили 5 и 5–10 % соответственно. Наибольший разброс значений наблюдается в области от 0,5 ГГц до 3 ГГц в областях интерференционных максимумов и минимумов, где как отмечено в [8] погрешность измерения существенно возрастает. На рис. 3 приведены частотные зависимости действительной части КДП ϵ'' для этих же образцов. Погрешности восстановления составляют 10–18 и 10–12 % соответственно.

Исследуемые образцы были также измерены по отдельности. Сравнение диэлектрических проницаемостей показало, что значения для более сухого образца совпадают в пределах погрешности до 8,5 ГГц для действительной части КДП и до 4 ГГц для мнимой части КДП. Для более влажного образца удовлетворительное совпадение наблюдается до частоты 4 ГГц.

Многие программные пакеты компьютерной алгебры (например, Maple и Mathcad) и технических вычислений (например, Matlab) имеют встроенные средства оптимизации функций. Табличный процессор Excel не обладает гибкостью применения и широким функционалом как программы компьютерной алгебры, однако его несомненным достоинством является широкое распространение и низкая цена. Расширить возможности Excel, можно с помощью макросов, созданных во встроенной среде VBA, имеющей много общего с VBA.

Основным средством оптимизации в Excel является Solver, применяемый как в «ручном» режиме, так и в макросах VBA [9]. При увеличении числа переменных в оптимизируемой функции, полученный результат во многом зависит от начальных значений переменных. Используя VBA и Solver, была написана программа автоматического расчета диэлектрической проницаемости. Для проверки возможности определения диэлектрической проницаемости применение Solver осуществлялось в широком диапазоне начальных условий. Анализ восстановленных данных показал, что программа корректно восстанавливает значения КДП, если априорные значения отличаются от истинных не более чем на 10 %. Погрешность определения КДП при помещении ячейки в бокс не превышает 10 %, поэтому их можно выбирать как начальные.

Таким образом, показано, что метод восстановления КДП сразу двух образцов с использованием коэффициентов отражения и прохождения применим в диапазоне частот от 0,1 до 4 ГГц. Реализован алгоритм автоматического расчета КДП.

Библиографические ссылки

1. Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23–26.
2. Folgero K. Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1998. Vol. 47, № 4. P. 881–885.
3. Sabburg J., Ball J. A. R., Hancock N. H. Dielectric behavior of moist swelling clay soils at microwave frequencies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. Vol. 35, № 3. P. 784–787.
4. Бобров А. П., Галеев О. В. Исследование метода определения диэлектрической проницаемости почв по модулям коэффициентов отражения и прохождения // Естественные науки и экология. Ежегодник ОмГПУ. 2001. С. 3–10.
5. Curtis J. O., Charles A. W. Jr., Everett J. B. Technical Report EL-95-34. 1995.
6. Бреховских В. Л. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
7. Пат. РФ № 2474830 С1, МПК G01R 27/26 Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких и сыпучих веществ в широком диапазоне частот / Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В.; опубл. 10.02.13, Бюл. № 4.
8. Folgero K. A broad-band and high-sensitivity dielectric spectroscopy measurement system for quality determination of low-permittivity fluids // Measurement Science and Technology. 1995. Vol. 6. P. 995–1008.

9. Создание макросов в Visual Basic с помощью решения Microsoft Excel в Excel 97 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.support.microsoft.com/KB/843304>.

References

1. Bobrov P. P., Kondratyeva O. V., Repin A. V. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 23–26.
2. Folgero K. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1998, vol. 47, no 4, pp. 881–885.
3. Sabburg J., Ball J. A. R., Hancock N. H. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997, vol. 35, no. 3, pp. 784–787.
4. Bobrov A. P., Galeev O. V. Estestvennye nauki i ekologiya. Ezhegodnik OmGPU, 2001, pp. 3–10.
5. Curtis J. O., Charles A. W. Jr., Everett J. B. Technical Report EL-95-34. 1995.
6. Brekhovskikh V. L. Volny v sloistyykh sredakh (Waves in Layered Media). Moscow, Nauka, 1973. 343 p.
7. Pat. 2474830 S1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01R 27/26 Bobrov P. P., Kondratyeva O. V., Repin A. V., zayavitel' i patentoobladatel' FBGOU VPO "OmGPU". № 2011134175/28; zayavl. 12.08.11; opubl. 10.02.13; Byul. № 4. 12 p.
8. Folgero K. Measurement Science and Technology. 1995, vol. 6, pp. 995–1008.
9. Sozdanie makrosov Visual Basic s pomoshch'yu resheniya Microsoft Excel v Excel 97 (Create macros in Visual Basic by using Microsoft Excel solutions in Excel 97). Available at: <http://www.support.microsoft.com/KB/843304> (accessed 28 March 2013).

© Репин А. В., Ященко А. С., 2013

УДК 621.396.968

ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА СОЛЕННЫХ ОЗЕР РАДИОЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ*

Г. С. Бордонский, А. О. Орлов, А. А. Гурулев, К. А. Щегрина

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 672014, Чита, ул. Недорезова, 16а. E-mail: lgc255@mail.ru

Выполнено радиолокационное исследование ледяного покрова содового оз. Доронинского, расположенного в Забайкальском крае. Полученные данные показывают возможность изучения геохимических особенностей водоема после начала процесса таяния, когда возникают заметные пространственные неоднородности электромагнитных свойств снежно-ледяного покрова.

Ключевые слова: содовый лед, радиолокационные измерения.

INVESTIGATION OF SALINE LAKES ICE COVER BY RADAR METHOD

G. S. Bordonskiy, A. O. Orlov, A. A. Gurulev, K. A. Schegrina

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Russian Academy of Sciences Siberian branch
16a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia. E-mail: lgc255@mail.ru

Radar investigation of ice cover of soda lake Doroninskoe, located in Zabaikalskiy Region, was carried out. The measurement data show the possibility of geochemical peculiarities study after the beginning of melting process, when significant spatial inhomogeneities of electromagnetic properties of snow-ice cover start to appear.

Keywords: soda ice, radar measurements.

* Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН №56 и гранта РФФИ №12-02-31237.

Морские льды широко изучаются с использованием спутниковой радиолокации [1; 2]. Этим методом определяются возрастные градации льда, торосы; льды являются индикаторами морских течений и т. д. Высокая пространственная разрешающая способность современных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), порядка одного метра, позволяет изучать объекты небольших размеров, в частности, ледяные покровы соленых озер. Такие объекты представляют определенный интерес в плане определения градаций солености и геохимических процессов, протекающих с участием ледяного покрова.

В настоящей работе выполнено исследование содового оз. Доронинское, расположенного на территории Забайкальского края, с целью определения возможностей радиолокации для определения некоторых параметров неглубоких меромиктических соленых озер.

Методика экспериментов. В эксперименте выполнен анализ радиолокационных изображений в конце зимнего периода времени, а также проведены наземные измерения электромагнитных свойств поверхностного слоя льда и других параметров: минерализации, температуры, структурных особенностей.

Были получены два радиоизображения ледяного покрова озера Доронинское с использованием РСА Cosmo-Sky Med на длине волны 3 см и разрешением 3 м, а также RADARSAT-1 на длине волны 5,6 см с пространственным разрешением 8 м.

При изучении электромагнитных свойств содового льда выполнено измерение погонного затухания излучения на длине волны 3 см с использованием микроволнового радиометра. Измерялось собственное радиотепловое излучение блока льда на фоне холодного неба при этом определена анизотропия электромагнитных потерь в зависимости от пространственной ориентации образца по отношению к вектору

электрического поля, создаваемого излучения на линейных поляризациях.

Использовали блоки льда в виде куба со стороной 23 см. Затухание (потери на прохождение сигнала по мощности L) определяли из следующего соотношения:

$$T_{\text{я}} = T_{\text{н}} \cdot 1/L + T_0 \cdot (1 - 1/L),$$

откуда

$$1/L = 1 - T_{\text{я}}/T_{\text{н}},$$

где $T_{\text{я}}$ – яркостная температура, измеряемая радиометром; $T_{\text{н}}$ – яркостная температура неба (около 3 К для безоблачной атмосферы). Наземные и спутниковые измерения выполнены одновременно.

Результаты исследования. Радиоизображение на длине волны 3 см в марте 2012 г. и на длине волны 5,6 см в феврале 2013 г. представлено на рис. 1 и 2 соответственно. В марте температура воздуха в дневное время повышается до $-5...-10$ °С, что приводит к появлению во льду некоторого количества жидких включений. Измерение затухания в верхнем слое льда дало высокие значения погонного затухания. Это значение составило 70 дБ/м для вертикальной поляризации и 60 дБ/м для горизонтальной поляризации в случае распространения излучения параллельно поверхностям раздела при температуре льда -10 °С и его минерализации ~ 3 г/кг. Разность потерь равна 10 дБ/м. При измерениях в 2011 г на длине волны 2,3 см эта разность составляла 13 дБ/м [3]. При измерениях для направления волнового вектора перпендикулярно границе «лед–воздух» анизотропия затухания практически отсутствовала. Толщина снежного покрова варьировалась от 5 см для западной части ледяного покрова до 30 см в его восточной части, что связано с ветровым переносом снега. В феврале температура воздуха обычно не превышает -20 °С, поэтому процессы таяния и геохимические процессы в это время ослаблены.

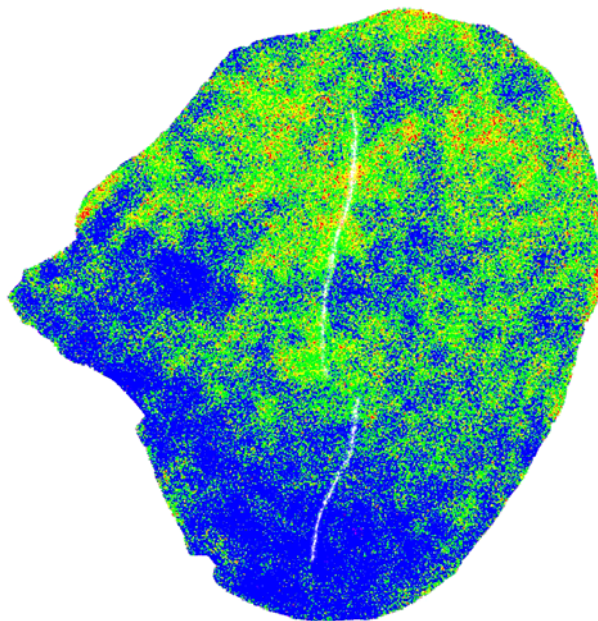


Рис. 1. Радиоизображение ледяного покрова оз. Доронинского, полученное с использованием РСА COSMO-Sky Med 16 марта 2012 г. Длина волны 3 см, пространственное разрешение 3 м, излучение и прием на горизонтальной поляризации

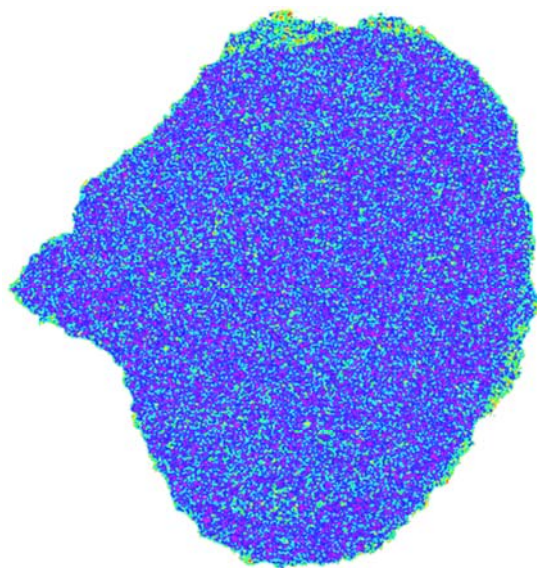


Рис. 2. Радиоизображение ледяного покрова оз. Доронинского 23 февраля 2013 г.
Длина волны 5,6 см, пространственное разрешение 8 м,
излучение и прием на горизонтальной поляризации

Радиолокационные изображения содового озера в зимнее время определяются состоянием верхнего слоя льда порядка нескольких сантиметров и снежным покровом. На рис. 1 видна пятнистая структура радиоизображения, определяемая геохимическими процессами: миграцией солей в поверхностный слой и их криохимическими превращениями [2]. Эта структура проявляется перед началом таяния льда. В более холодный зимний период времени наблюдали однородное по площади объекта обратное рассеяние (см. рис. 2). По этому параметру ледяной покров меромиктического соленого озера существенно отличается от льда пресных озер, где наблюдается пространственная изменчивость из-за рассеивающих падающее излучение внутренних неоднородностей.

Библиографические ссылки

1. Даркин Д. В., Митник Л. М., Митник М. Л. Спектры коэффициентов излучения молодого льда в микроволновом диапазоне по данным измерений со спут-

ника Aqua (на примере Охотского и Японского морей) // Исследования Земли из космоса. 2008. № 1. С. 3–14.

2. Бордонский Г. С., Крылов С. Д. Миграция солевых включений в ледяных покровах озер Забайкалья // Известия РАН. Серия «География». 2000. № 4. С. 98–102.

3. Особенности свойств ледяного покрова содового озера на частоте 13,7 ГГц / А. А. Гурулев, Ю. В. Харин, К. А. Щегрина, П. Ю. Лукьянов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 1. С. 289–293.

References

1. Darkin D. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. Issledovanie Zemli iz Kosmosa, 2008, no. 1, pp. 3–14.

2. Bordonskiy G. S., Krylov S. D. Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya, 2000, no. 4, pp. 98–102.

3. Gurulev A. A., Kharin Y. V., Lukyanov P. Y., Schegrina K. A. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012, no.1, pp. 289–293.

© Бордонский Г. С., Орлов А. О., Гурулев А. А., Щегрина К. А., 2013

УДК 621.396.969

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРЕСНЫХ ОЗЕР

А. А. Гурулев, С. Д. Крылов, С. В. Цыренжапов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 672014, Чита, ул. Недорезова, 16а. E-mail: lgc255@mail.ru

Рассматривается вопрос об определении неоднородностей в ледяном покрове пресных и слабосоленых водоемов с использованием пассивной и активной радиолокации в СВЧ-диапазоне. В работе выполнено обоснование определения солевых неоднородностей во льду. Для определения неоднородностей соизмеримых с длиной волны практическое применение может найти активный радиолокационный метод.

Ключевые слова: ледяной покров, радиометрия, коэффициент обратного рассеяния, микроволновый диапазон.

RADAR DETECTION OF NON-UNIFORMITIES OF THE ICE COVER OF FRESH WATER LAKES

A. A. Gurulev, S. D. Krylov, S. V. Tsyrenzhapov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
16a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia. E-mail: lgc255@mail.ru

The authors consider the question of detection of non-uniformities in the ice cover of fresh and light-salted water basins with the use of passive and active radio-detection in the microwave range. The paper contains ground for detection of salt inclusions in the ice. In the process of detection of non-uniformities comparable to the wavelength, practical application can find an active radar method.

Keywords: ice cover, radiometry, reflection coefficient, microwave range.

В момент становления ледяного покрова из исходных вод происходит захват различного рода примесей, таких как соли, пузыри, зоопланктон и фитопланктон, высшая водная растительность и т. п. Данные включения во льду при пассивной радиолокации (радиометрии) в микроволновом диапазоне влияют на мощность теплового излучения. Так в работах [1; 2] приведены расчеты и измерения радиояркостной температуры (T_j), которая характеризует мощность теплового излучения, ледяных покровов для водоемов с различной степенью минерализации. Исследования показали, что при увеличении содержания солей во льду происходит повышение T_j . Наиболее оптимальными для определения концентрации солей во льду являются длины волн от 2 см до 3 см.

Нами выполнены радиометрические и радиолокационные измерения ледяных покровов двух карьеров в г. Балей (Забайкальский край) с минерализацией исходных вод: Балейский карьер – порядка 1 г/дм³; Тасеевский карьер – 3,5 г/дм³. Измерения в радиометрическом режиме выполнялись на длинах волн 2,3 см и 3 см для двух ортогональных поляризаций – верти-

кальной (ВП) и горизонтальной (ГП). Измерения коэффициентов обратного рассеяния осуществлялись на длине волны 5,6 см, излучение осуществлялось на ГП, прием на ВП и ГП. Вся аппаратура располагалась на автомобиле «Нива» (рис. 1), угол наблюдения составлял 50°.

Измерения были выполнены 19 марта 2013 г. Температура поверхности льда составляла –6 °С, толщина снега составляла 10–15 см, толщина ледяного покрова – 89 см. особенность водоемов в том, что происходит постоянный подток воды по стенкам карьера, что, в свою очередь, приводит к образованию наледей.

Результаты радиометрических измерений следующие: T_j как на вертикальной поляризации, так и на горизонтальной поляризации имеет повышенное значение для Тасеевского карьера. Пример трассовой записи для длины волны 2,3 см на ВП для двух карьеров приведен на рис. 2. Как видно из рисунка, наблюдаются вариации T_j , что можно связать с неравномерным распределением включений в ледяном покрове по акватории водоемов.



Рис. 1. Радиолокационная аппаратура, установленная на автомобиль. Радиометрические приемники: 1 – длина волны 2,3 см; 2 – длина волны 3 см; 3 – радиолокатор длину волны 5,6 см

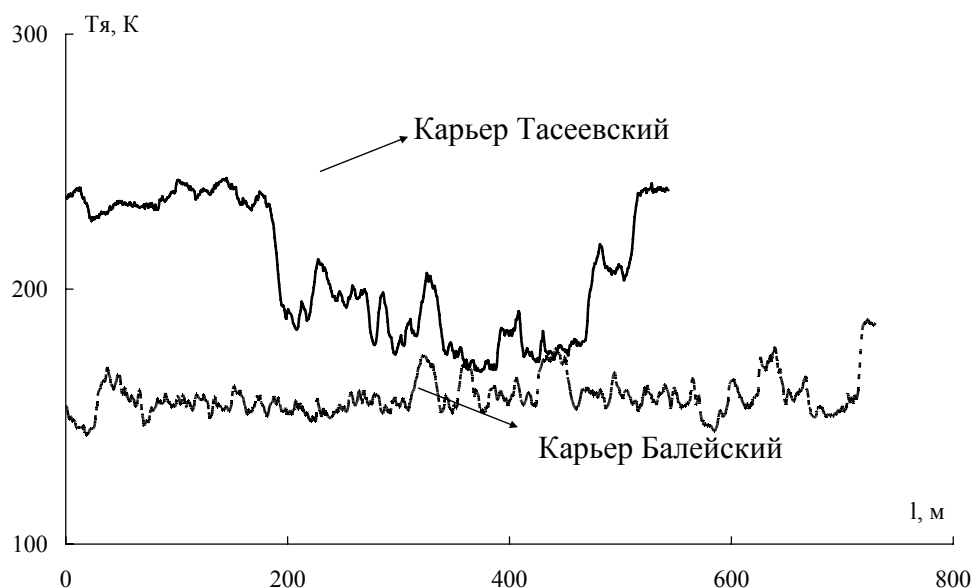


Рис. 2. Трассовая запись радиояркостной температуры ледяного покрова на длине волны 2,3 см. Вертикальная поляризация

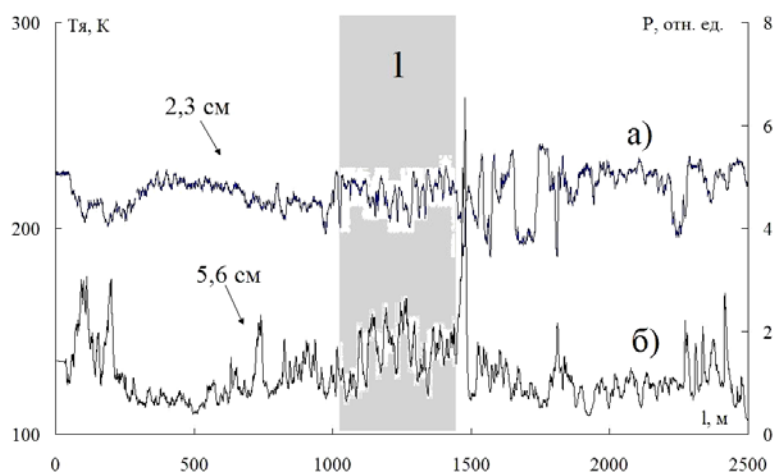


Рис. 3. Трассовая запись по периметру Тасеевского карьера:
а – радиояркостная температура на длине волны 2,3 см (ВП); б – мощность коэффициента обратного рассеяния на длине волны 5,6 см (в относительных единицах)

При радиолокационных измерениях по периметру водоемов (рис. 3) были обнаружены участки, где происходит подток вод, на графике данный участок выделен цифрой 1. Также по результатам измерений в ледяном покрове были обнаружены неоднородности, соизмеримые с длиной волны, что показала активная радиолокация на длине волны 5,6 см.

Таким образом, в ледяном покрове можно определять наличие неоднородностей радиолокационным способом, причем при пассивной радиолокации существует возможность определять и концентрацию солевых включений, при активной радиолокации можно определять неоднородности, сопоставимые с длиной волны.

Библиографические ссылки

1. Бордонский Г. С., Гурулев А. А. Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 210–215.
2. Бордонский Г. С., Крылов С. Д., Гурулев А. А. Оценка минерализации пресных водоемов по радиотепловому излучению ледяного покрова // Исследования Земли из космоса. 2002. № 4. С. 91–96.

References

1. Bordonский G. S., Gurulev A. A. Vodnye resursy. 2008, vol. 35, no. 2, pp. 210–215.
2. Bordonский G. S., Kryilov S. D., Gurulev A. A. Issled. Zemli iz kosmosa. 2002, no. 4, pp. 91–96.

© Гурулев А. А., Крылов С. Д., Цыренжапов С. В., 2013

УДК 535.391.4

ВАРИАЦИИ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ МИКРОВОЛН ОТ ВЛАЖНО-СЛОИСТОЙ ПОЧВЫ

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

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

Проведены численные расчеты зависимостей амплитуды и фазы коэффициента отражения микроволн от влажно-слоистой почвы. Показано, что слоистая структура почвы приводит к существенным вариациям как амплитуды, так и фазы коэффициента отражения.

Ключевые слова: влажная почва, слоистость, коэффициенты отражения Френеля.

VARIATIONS OF AMPLITUDE AND PHASE COEFFICIENT OF MICROWAVES REFLECTION OF THE MOIST BEDDED SOIL

P. N. Dagurov, A. V. Dmitriev, T. N. Chymitdorzhiev,
A. V. Bazarov, A. K. Baltukhaev, Zh. B. Dymbrylov

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

Numerical calculations of the amplitude and phase coefficient of microwave reflection of the moist layered soil were conducted. It is shown that the bedded structure of the soil leads to significant variations in amplitude and phase of the reflection coefficient.

Keywords: moist soil, bedding, Fresnel reflection coefficients.

В настоящее время одним из эффективных методов дистанционного зондирования земной поверхности являются интерферометрические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования, которые позволяют выполнять пространственный мониторинг земной поверхности независимо от времени суток и при любой погоде [1]. Для получения корректных продуктов интерферометрической обработки радиолокационных изображений (РЛИ) необходимо с достаточной точностью восстанавливать изменение фазы отраженного сигнала [2]. Эта фаза, формируемая в результате отражения от земной поверхности, определяется не только длиной пройденного волной пути, но и аргументом (фазой) комплексного коэффициента отражения волны. Однако возможное влияние изменения фазы радиолокационных сигналов за время витками, например, в случае возникновения слоистой структуры влажности почвы, в методе радиолокационной интерферометрии обычно не учитывается. Отметим также, что в микроволновой радиометрии излучательная способность земных покровов в радиодиапазоне, определяется амплитудой коэффициента отражения, на которую, влияет слоистая структура [3].

Целью данной работы является исследование влияния слоистой структуры влажности почвы на вариации амплитуды и фазы отраженного сигнала. В работе [4] было рассмотрено влияние слоистой структуры влажности почвы на фазу коэффициента отражения мик-

роволн в L -диапазоне. В данной работе вариации амплитуды и фазы, вызываемые слоистостью почвы, исследуются и для других используемых в настоящее время радиолокационных диапазонов.

Электрические свойства почвы, от которых характеризуются комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i \cdot \varepsilon_2, \quad (1)$$

где ε_1 – действительная часть ε ; ε_2 – мнимая часть ε .

Коэффициенты отражения от поверхности раздела двух однородных сред определяются известными формулами Френеля. КДП почвы в общем случае является сложной функцией таких параметров как влажность почвы, частота излучения, температура, состав почвы. Для аналитического описания КДП обычно используются эмпирические и полуэмпирические модели. Наиболее существенное влияние на КДП оказывает влажность почвы, что связано с большим различием между диэлектрической проницаемостью сухой почвы ($\varepsilon_1 = 2-3$) и воды ($\varepsilon_1 = 81$). Существует ряд моделей диэлектрической проницаемости, учитывающих частотные зависимости и различные параметры почвы. Наиболее известными в настоящее время являются модели Добсона [5] и Миронова [6], причем последняя, например, принята в качестве базовой для космической миссии SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity).

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (госконтракт № 14.515.11.0030) и грантами РФФИ № 12-05-980622-р_сибирь_a, РФФИ № 13-08-01132.

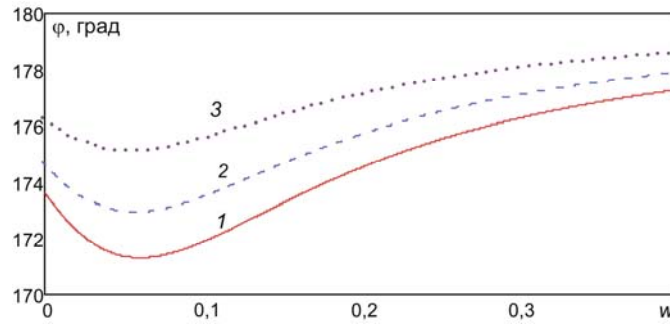


Рис. 1. Зависимости фазы коэффициента отражения от объемной влажности при различных углах падения θ (кривая 1 – $\theta = 0$; 2 – $\theta = 40$; 3 – $\theta = 60$)

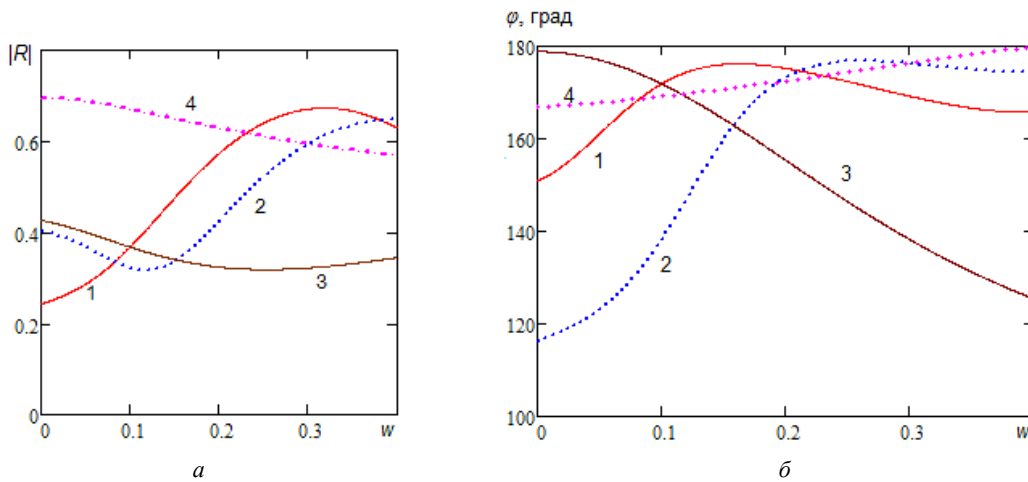


Рис. 2. Зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения волны с частотой 1,4 ГГц от объемной влажности для слоистой почвы при $d = 2$ см (кривые 1 и 2 – изменяется влажность слоя, влажность нижнего полупространства равна 0,1 и 0,3 соответственно; кривые 3 и 4 – изменяется влажность нижнего полупространства, влажность слоя равна 0,1 и 0,3 соответственно)

Используем для оценок эмпирические зависимости, полученные в [7] для различных частот. Например, для частоты 1,4 ГГц

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= (2,862 - 0,012 \cdot S + 0,001 \cdot C) + \\ &+ (3,803 + 0,462 \cdot S - 0,341 \cdot C)w + \\ &+ (119,006 - 0,500 \cdot S + 0,633 \cdot C)w^2, \\ \varepsilon_2 &= (0,356 - 0,003 \cdot S - 0,008 \cdot C) + \\ &+ (5,507 + 0,044 \cdot S - 0,002 \cdot C)w + \\ &+ (17,753 - 0,313 \cdot S + 0,206 \cdot C)w^2,\end{aligned}$$

где C – процентное содержание глины; S – процентное содержание песка. Результаты расчетов фазы комплексного коэффициента отражения приведены на рис. 1.

Френеля φ в зависимости от объемной влажности почвы при различных значениях угла падения волны. Значения C и S слабо влияют на результаты расчетов. Кривые на рис. 1 получены при $C = 0,13$ и $S = 0,51$.

Приведенные зависимости показывают, что увеличение влажности почвы до значения порядка 5 % при-

водит к неглубокому минимуму аргумента коэффициента отражения и при дальнейшем увеличении влажности значение аргумента растет и стремится к 180. Изменения аргумента в зависимости от изменений влажности не превышают 4–6.

В действительности случай однородной почвы является идеализацией. Более общей является ситуация, когда влажность изменяется по глубине и почва является слоистой средой. Слоистость может носить непрерывный или дискретный характер в зависимости от особенностей почвы. Рассмотрим для оценки влияния слоистой структуры влажности почвы на аргумент коэффициента отражения наиболее простой случай двухслойной среды. Пусть на почве, занимающей полупространство с одним значением влажности, лежит слой почвы толщиной d с другим значением влажности. Границы раздела между средами являются плоскими.

На рис. 2 представлены рассчитанные модули и фазы коэффициента отражения от такой двухслойной среды [8] при нормальном падении волны с частотой 1,4 ГГц на слой толщиной 2 см.

Приведенные данные показывают, что слоистость почвы приводит к заметным изменениям фазы коэф-

фициента ослабления, достигающим значений до 54 (кривая 4) в диапазоне изменений объемной влажности от 0 до 0,4. Отметим, что зависимости имеют довольно нерегулярный вид, модули и аргументы коэффициента отражения может, как возрастать с увеличением влажности, так и убывать или иметь немонотонный характер. Эти явления объясняются интерференционным характером формирования отраженной волны. Наименьшие изменения как амплитуды, так и фазы наблюдаются в случае, когда слой имеет постоянную влажность 0,3, а влажность нижележащего полупространства изменяется. Это объясняется тем, что в данной ситуации глубина проникновения в почву оказывается немногим больше 2 см. В случае влажности верхнего слоя, равной 0,1, также наблюдается слабое изменение амплитуды, однако изменения фазы значительны.

На рис. 3 приведены зависимости модуля и фазы коэффициента отражения от влажности почвы для частоты 5,4 ГГц (С-диапазон). Представленные данные также показывают существенные вариации как

амплитуды, так и фазы при изменении влажности почвы для двухслойной структуры. При этом существенным изменениям амплитуды могут соответствовать сравнительно небольшие колебания фазы (кривые 1). Контраст между менее влажным верхним слоем и более влажной нижележащей почвой приводит к значительному отклонению значения фазы от ее значения в случае однородной почвы.

Расчетные зависимости для частоты 9,65 ГГц (Х-диапазон) представлены на рис. 4. Из приведенных зависимостей следует, что они носят такой же качественный характер, как и в С – диапазоне волн. Однако здесь контраст между сухим верхним слоем толщиной всего 5 мм и влажной почвой внизу приводит к еще большим вариациям фазы (больше 100°).

Таким образом, представленные результаты показывают, что при радарной интерферометрии, а особенно при дифференциальной интерферометрии, необходимо учитывать слоистую структуру влажности почвы, поскольку вариации фазы могут превышать 100°.

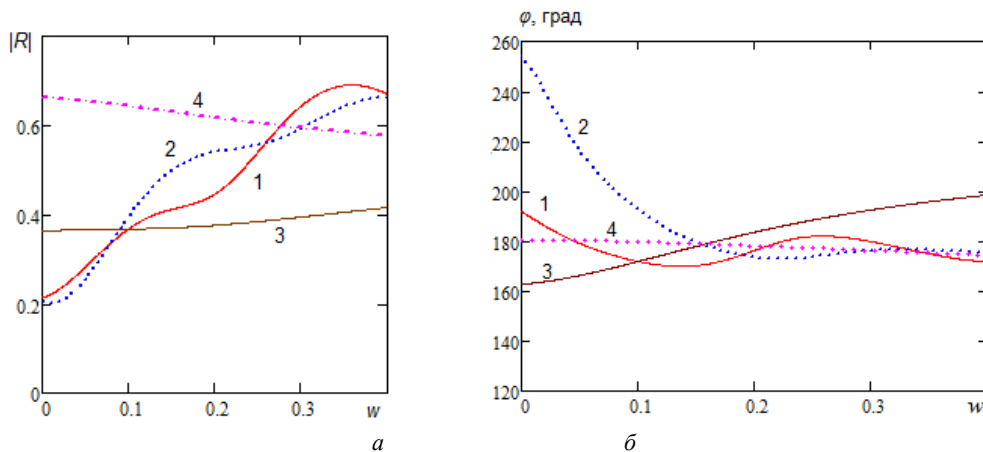


Рис. 3. Зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения волны с частотой 5,4 ГГц от объемной влажности для слоистой почвы при $d = 1$ см (кривые 1 и 2 – изменяется влажность слоя, влажность нижнего полупространства равна 0,1 и 0,3 соответственно; кривые 3 и 4 – изменяется влажность нижнего полупространства, влажность слоя равна 0,1 и 0,3 соответственно)

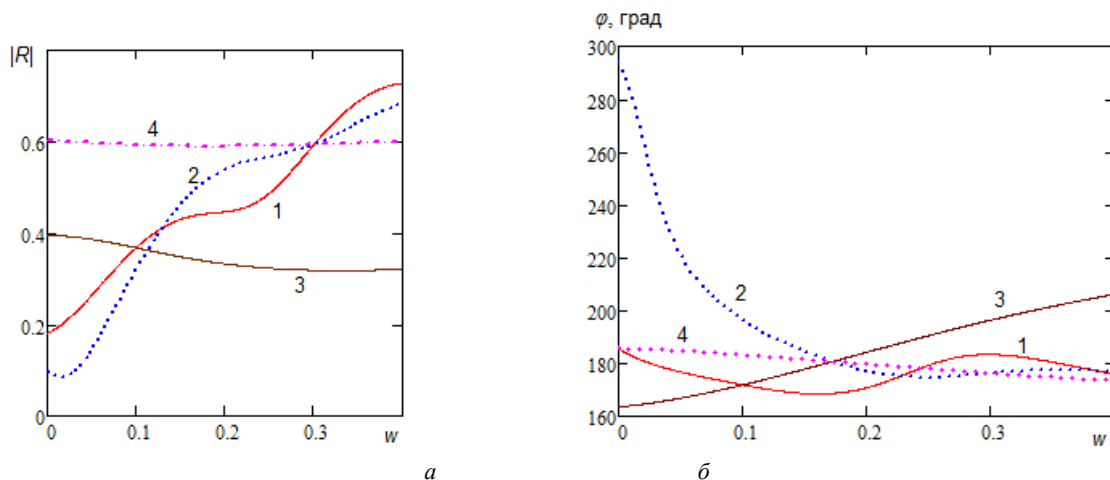


Рис. 4. Зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения волны с частотой 9,65 ГГц от объемной влажности для слоистой почвы при $d = 0,5$ см (кривые 1 и 2 – изменяется влажность слоя, влажность нижнего полупространства равна 0,1 и 0,3 соответственно; кривые 3 и 4 – изменяется влажность нижнего полупространства, влажность слоя равна 0,1 и 0,3 соответственно)

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. Дагуров¹, А. В. Дмитриев¹, С. И. Добрынин¹, Г. И. Татков²,
Т. Н. Чимитдоржиев¹, А. В. Базаров¹, А. К. Балтухаев¹

¹Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: dpn@ipms.bsnet.ru

²Геологический 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. Dagurov¹, A. V. Dmitriev¹, S. I. Dobrynin¹, G. I. Tatkov²,
T. N. Chymitdorzhiev¹, A. V. Bazarov¹, A. K. Baltukhaev¹

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

²Geological 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 ε_1 и ε_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 ρ – плотность снега, г/см³. Значения ρ могут быть заключены в пределах от 0,02–0,25 для свежеснежного снега и 0,3–0,5 перед периодом таяния. Значения ε_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 ± 1 см механическим способом

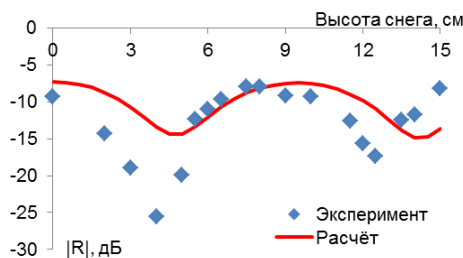


Рис. 1. Зависимости коэффициента отражения от высоты снежного покрова на частоте 1,4 ГГц

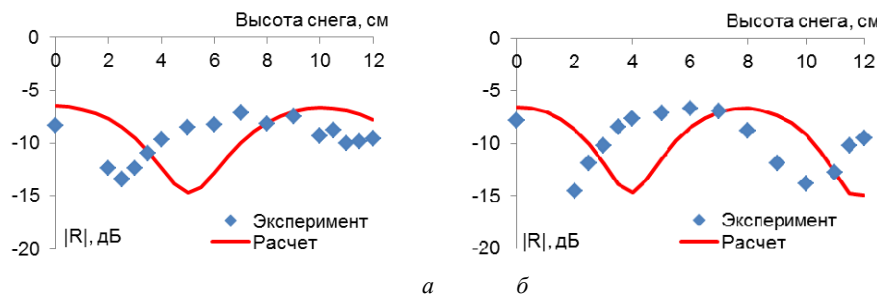


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от высоты снежного покрова на частотах 1,4 ГГц (а) и 1,8 ГГц (б)

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° в E -плоскости и 28° 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°C и температуре снега -5°C . Угол падения составлял 30° , границы облучаемой зоны при этом угле представляют контур размером $1,2 \times 1,2$ м. Развязка по полю, прямо распространяющемуся от излучающей антенны к приемной, составляла 60 дБ.

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

Результаты, полученные 31.03.2013 г. при температуре воздуха -5°C и температуре снега -7°C на частотах 1,4 ГГц и 1,8 ГГц при горизонтальной поляризации и угле падения 40° , 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 sloistyykh 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., Татков 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^{1,2}, М. И. Михайлов², А. В. Сорокин^{1,2}, К. В. Музалевский^{1,2}, С. В. Фомин²

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

²Институт 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^{1,2}, M. I. Mihaylov², A. V. Sorokin^{1,2}, K. V. Muzalevskiy^{1,2}, S. V. Fomin²

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

²Kirensky 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 высотой 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° , 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 – лиственный, 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.

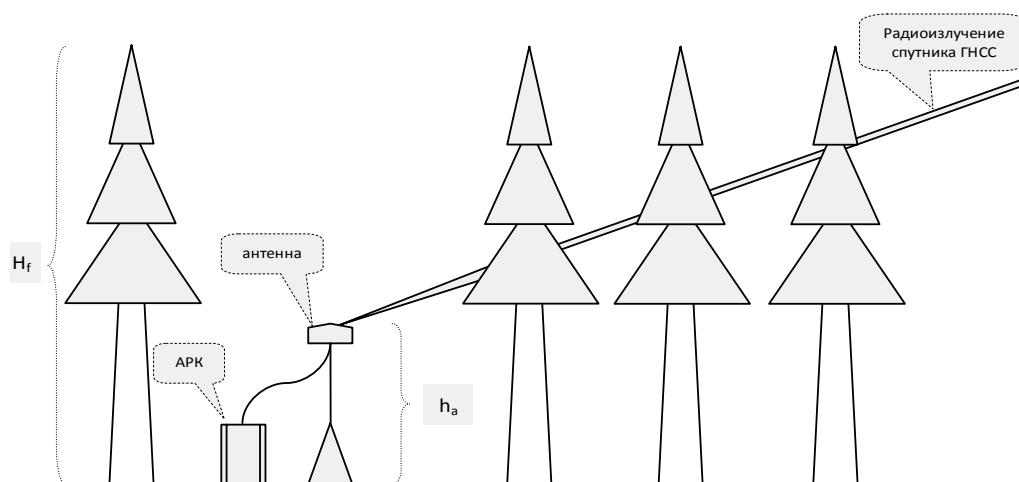


Рис. 1. Схема эксперимента

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 ³ (др)/м ³	Массовая, кг ³ /м ³
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

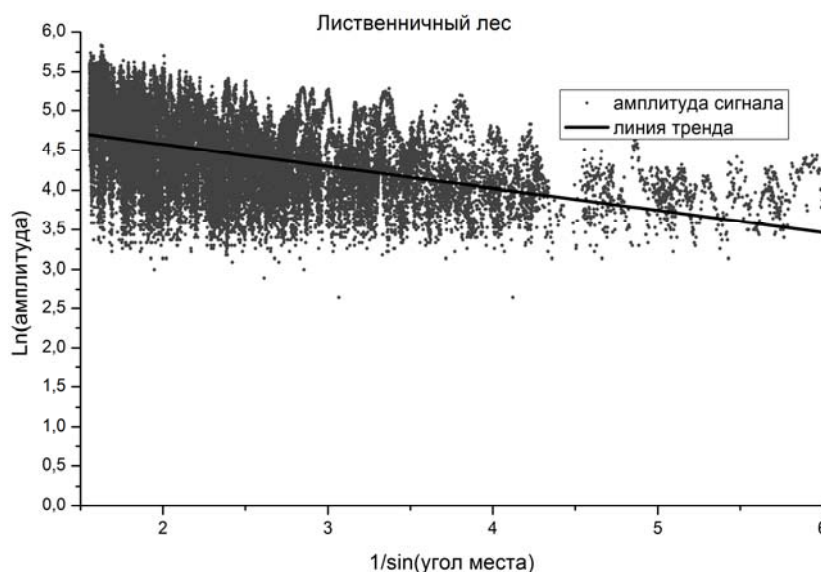


Рис. 2. Амплитуды сигналов НКА по всем азимутам

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 ²	Плотность древостоя, шт/м ²	Объемная плотность древесины м ³ /м ³ · 10 ³
Листоенница	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 $1/\sin \varphi$. 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 φ ; H_f – высота лесного полога; h_a – высота приемной антенны; λ – длина радиоволны; k – мнимая часть показателя преломления; α_0 – величина, определяющая ослабление сигнала при уменьшении угла места над безлесной территорией.

В соответствии с формулой (1), логарифм величины сигнала линейно зависит от значения $1/\sin \varphi$. Параметры линии тренда определяются по методу наименьших квадратов, соответственно, можно определить ослабление сигналов НКА всеми типами лесных полог. 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 листоеннического леса, могут объясняться различием в пространственной структуре древостоя и кроны, различиями в плотности и влажности древесины сосны и листоенницы, 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 пологами 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. Martin-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. Dorzhiev 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.

риментов, являлось изучение влияния видового состава и структуры леса на изменение спектральных характеристик зондирующих сигналов с целью выявления закономерности таких спектральных деформаций и разработки методики восстановления основных структурных характеристик растительности при ее радиопросвечивании.

В измерениях в качестве зондирующих сигналов использовались последовательности видеоимпульсов длительностью 3,3 нс и периодом 40 нс. Выбор параметров определялся тем, что основная часть спектра сигнала в этом случае приходилась на резонансный диапазон частот, в котором длина волны гармонических составляющих оказывалась близка к среднему расстоянию между деревьями в большинстве типов лесов (обычно, 2–4 м). Антенны, представляющие собой полуволновые вибраторы, погружались в лесную среду и располагались на высоте 2 м над землей и на расстоянии 20 м друг от друга. Их ориентация обеспечивала вертикальную поляризацию излучения. Полученные в ходе проведения экспериментов спектрограммы нормировались к уровню фоновых помеховых сигналов. Одна из таких приведенных спектрограмм, описывающая результат радиопросвечивания хвойного (соснового) леса с низкой ($0,08 \text{ м}^{-2}$) плотностью древостоя, представлена на рис. 1. Калибровочная спектрограмма, снятая на открытой местности,

имеющей близкие к лесной характеристики подстилающей поверхности, изображена на рис. 2.

Представленные данные демонстрируют существенную трансформацию спектра исходного сигнала при прохождении через растительность, заключающуюся, в данном случае, в существенном ослаблении низкочастотных гармонических составляющих. Это связано с тем, что в редком лесу на малых дистанциях ослабление сигнала происходит, в основном, за счет рассеяния излучения стволами деревьев, усиливающегося с увеличением длины волны колебаний. Аналогичная спектрограмма, полученная в хвойном лесном массиве значительно большей плотности – $0,15 \text{ м}^{-2}$ приведена на рис. 3, внутренняя структура которого отличалась большим количеством низкорасположенных ветвей и наличием подлеска. Здесь очевидным является ослабление гармоник во всем анализировавшемся диапазоне, свидетельствующее о значительном усилении процессов рассеяния с увеличением плотности растительности, в том числе и на мелкомасштабных неоднородностях. Интересным представляется не убывание, а даже некоторое увеличение амплитуды отдельных спектральных составляющих (170 и 193 МГц), которую можно рассматривать как локализацию излучения в отдельных распространяющихся модах в дискретной случайной среде, указывающую на резонансный характер взаимодействия волн с лесными средами.

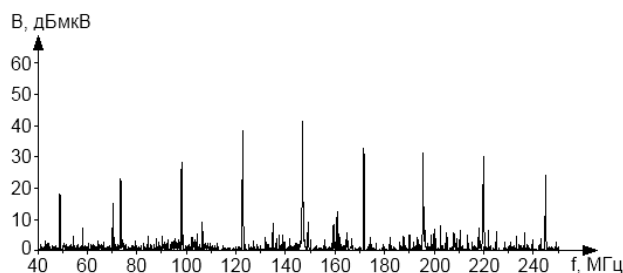


Рис. 1. Спектр сигнала, полученный в сосновом лесу

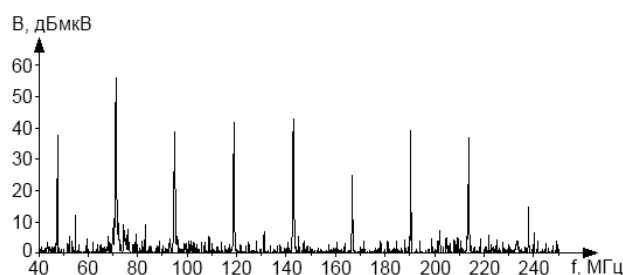


Рис. 2. Спектр сигнала, полученный на открытой местности (в поле)

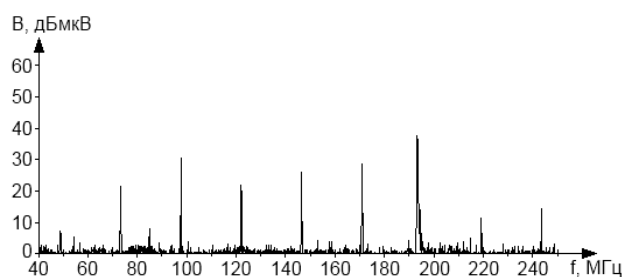


Рис. 3. Спектр сигнала, полученный в плотном хвойном лесу

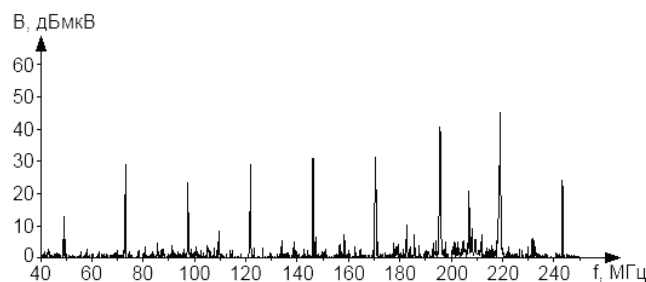


Рис. 4. Спектр сигнала, полученный в лиственном лесу

Результаты радиопросвечивания лиственного леса плотностью 0,11 м, отличительной особенностью которого являлось отсутствие кустарника и молодых деревьев, как в первом из рассмотренных хвойных лесов представлены на рис. 4. При этом, однако, деревья имели значительно большую толщину стволов. По-видимому, эта структурная особенность и определила характер изменения спектрограммы, выражающийся в существенном ослаблении низко- и среднечастотных составляющих сигнала. Понижение амплитуды последних, особенно очевидно из сравнения рис. 1 и 4, может быть объяснено большей плотностью растительности, а практически полное прохождение через лес высокочастотных гармоник – отсутствием мелких элементов растительности на линии связи антенн.

Таким образом, описанные результаты экспериментов демонстрируют существенные различия в изменении спектров импульсных сигналов при распространении в различных типах лесной растительности. Этот факт, на наш взгляд, может быть использован для разработки методов радиопросвечивания лесных покровов для выявления их внутренней структуры.

Библиографические ссылки

1. Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами / Н. А. Арманд,

Ю. В. А. Л. Гуляев, Гаврик и др. // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 34–40.

2. Ground Penetrating Radar: Theory And Applications / Edited by Harry M. Elsevier, Amsterdam, 2009.

3. Бордонский Г. С. Диэлектрические потери пресного льда на СВЧ // Радиотехника и электроника. 1995. № 11. С. 1620–1625.

4. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / В. Б. Кашкин, В. И. Кокорин, В. Л. Миронов, С. В. Сизасов // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 7. С. 825–830.

References

1. Armand N. A., Gulyaev Yu. V., Gavrik A. L. and other. Uspekhi fizicheskikh nauk. 2010. Vol. 180, № 5, pp. 34–40.

2. Ground Penetrating Radar: Theory And Applications. Edited by Harry M. Elsevier, Amsterdam, 2009.

3. Bordonskiy G. S. Radiotekhnika i elektronika. 1995, № 11, pp. 1620–1625.

4. Kashkin V. B., Kokorin V. I., Mironov V. L., Sizasov S. V. Radiotekhnika i elektronika. 2006. Vol. 51, № 7, pp. 825–830.

© Ветлужский А. Ю., Калашников В. П., 2013

УДК 621.396.96.01

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ VHF–UHF-ДИАПАЗОНОВ В ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников

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

Исследуются особенности распространения излучения VHF–UHF-диапазонов в лесах различного видового и структурного состава при малых пространственных разностях антенн. Показано, что существование боковой волны, распространяющейся над верхней кромкой растительности, может быть установлено из анализа дистанционных зависимостей уровня поля в лесной среде.

Ключевые слова: распространение радиоволн, боковая волна.

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

STUDY OF THE MECHANISMS OF TRANSFER OF VHF–UHF BAND RADIO EMISSION IN THE FOREST VEGETATION

A. Yu. Vetluzhsky, V. P. Kalashnikov

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

Features of propagation of radiation of VHF, UHF bands in the forests of different species and structural compositions are investigated at small spread in space of aeriels. It is shown that the existence of a lateral wave propagating over the upper edge of the vegetation can be revealed from the analysis of remote dependence of the electromagnetic field level in the forest environment.

Keywords: propagation of radio waves, the lateral wave.

Актуальность исследования влияния лесных покровов на распространение радиоволн в последние несколько десятилетий связана с развитием алгоритмов интерпретации данных дистанционного зондирования и применением, преимущественно в силовых структурах, наземных средств связи, работающих на небольших дистанциях в растительности, например, при ведении боевых действий. Лесной покров является многокомпонентной неоднородной средой, которая не оказывает существенного влияния на распространение электромагнитных волн, длина которых много больше характерных размеров объектов растительности. Однако, при прохождении УКВ через лес это влияние оказывается существенным, при этом преобладают преимущественно два основных механизма переноса излучения [1–3]. Первый связан с непосредственным прохождением радиоволн через толщу леса, при этом они рассеиваются и поглощаются растительностью. Данный механизм имеет существенное значение только при небольших пространственных разностях антенн, так как при этом мощность излучения быстро убывает. Второй связан с формированием боковых волн, распространяющихся над верхней кромкой леса и практически не ослабляющихся из-за влияния растительности, за счет чего на больших дистанциях такой способ распространения сигнала в присутствии лесного покрова является преобладающим. Говоря о втором механизме, следует отметить, что до сих пор остаются мало изученными вопросы о полосе частот, в которой возможно возникновение боковых волн, а также о минимальных дистанциях, т. е. расстояниях между корреспондирующими антеннами, на которых уровень ослабления боковой волны становится меньше ослабления излучения, непосредственно распространяющегося сквозь толщу лесной растительности. Эти вопросы, на наш взгляд, являются принципиальными, поскольку смена механизмов распространения влечет за собой изменение дистанционного поведения поля в лесной среде: экспоненциальный закон затухания, обусловленный эффектами поглощения и рассеяния элементами растительности и характерный для волн прямого прохождения, должен сменяться обратно пропорциональной квадрату расстояния зависимостью, типичной для боковых волн.

Целью настоящей работы является представление и анализ экспериментальных данных по радиопросве-

чиванию леса различного видового и структурного состава волнами метрового и дециметрового диапазонов, при малых пространственных разностях антенн.

В качестве объектов исследования были выбраны несколько типов лесной растительности, значительно отличающейся по видовому и структурному составу. Лес первого типа был хвойным – сосновым. Основной особенностью являлось отсутствие, как подлеска, так и низкорасположенных ветвей, а также вертикальная ориентация стволов относительно земли. Измерения проводились в двух лесных массивах такого типа с существенно отличающейся плотностью произрастания деревьев. В первом случае она в среднем составила $0,14 \text{ м}^{-2}$, при этом высота и толщина стволов были равны 17 и 0,27 м соответственно. Во втором – лес был более редким, с плотностью $0,07 \text{ м}^{-2}$, высотой порядка 14 м и диаметром стволов 0,21 м.

Также исследовалось влияние на распространение излучения смешанного леса, состоящего из березы, кедра, сосны и лиственницы со следующими параметрами: плотность древостоя $0,21 \text{ м}^{-2}$, высота деревьев 16 м, диаметр стволов деревьев 0,25 м. Имелся редкий кустарник различных пород высотой около 2 м.

Для радиопросвечивания растительности использовалось следующее оборудование: передатчики – генераторы Г4-129, РН12Б; приемная и передающая антенны – полуволновые симметричные вибраторы; приемник – анализатор спектра ИТ-08.

Измерения проводились на частотах 150 и 600 МГц при вертикальной поляризации излучения. Выбор частот был обусловлен тем, что на нижней частоте длина волны оказывалась близкой к среднему расстоянию между деревьями, а на верхней была значительно меньше. Как приемная, так и передающая антенны устанавливались внутри лесной среды на высоте 2 м от земли.

Для достижения достаточной статистической обеспеченности на каждой дистанционной отметке уровень сигнала фиксировался в семи точках, располагавшихся в пределах примерно равного длине волны участка поперек основной трассы распространения излучения. Таким образом, снижалось влияние на получаемые результаты местоположения приемной антенны относительно ближайших деревьев. В итоге полученные значения уровня поля усреднялись.

Результаты измерений, полученные в более густом из сосновых лесов на частоте 150 МГц представлены на рис. 1. Как на этом, так и на последующих рисунках, данные нормированы к нулевому уровню на дистанции 10 м. Из анализа графика следует, что характер дистанционной зависимости поля меняется при расстоянии между антеннами 95–100 м. Здесь же приведены результаты аппроксимации двух участков полученной кривой функциями $\exp(-\alpha R)/R^2$ и β/R^4 , изображенных на графике в полулогарифмическом масштабе штрихпунктирной и штриховой линиями соответственно. В функциях α и β – некоторые постоянные коэффициенты. Знаменатели экспоненциальной

и степенной функций обусловлены соответственно ослаблением мощности сигнала из-за расходимости фронта волны и дифракционного характера распространения боковой волны в растительности.

Измерения, выполненные в редком сосновом лесу на частоте 150 МГц, изображены на рис. 2. Результаты измерений, полученных в смешанном лесу, на частоте 600 МГц показаны на рис. 3. В отличие от результатов, показанных на рис. 1, поведение последних двух зависимостей на всей дистанции проведения измерений не менялось и, как следует из графиков, хорошо аппроксимировалось экспоненциальной функцией.

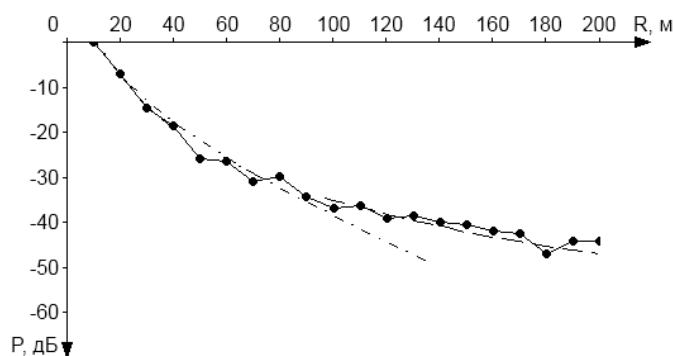


Рис. 1. Дистанционная зависимость уровня поля, полученная в частом сосновом лесу, частота 150 МГц

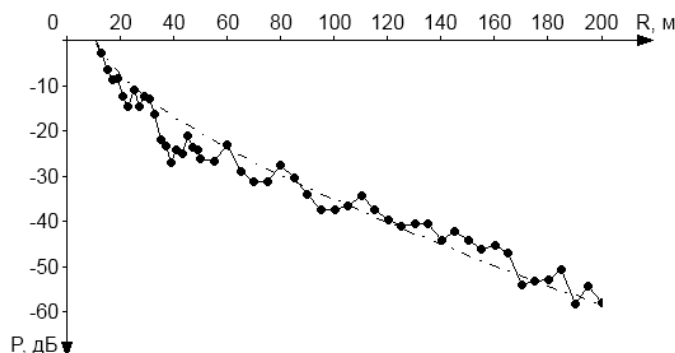


Рис. 2. Дистанционная зависимость уровня поля, полученная в редком сосновом лесу, частота 150 МГц

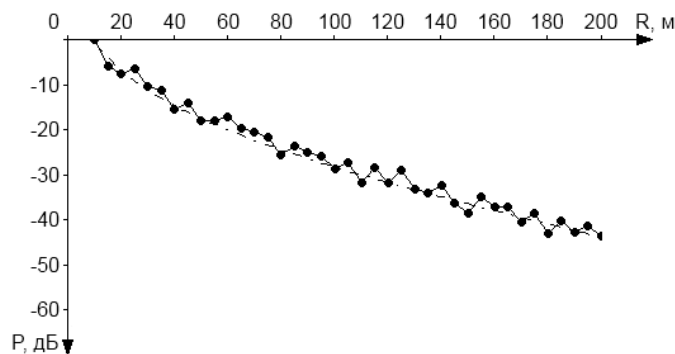


Рис. 3. Дистанционная зависимость уровня поля, полученная в смешанном лесу, частота 600 МГц

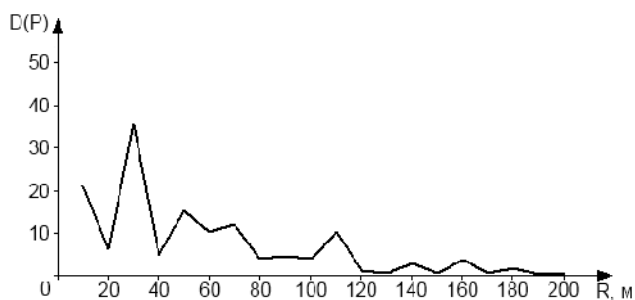


Рис. 4. Дисперсионная зависимость поля для частого соснового леса

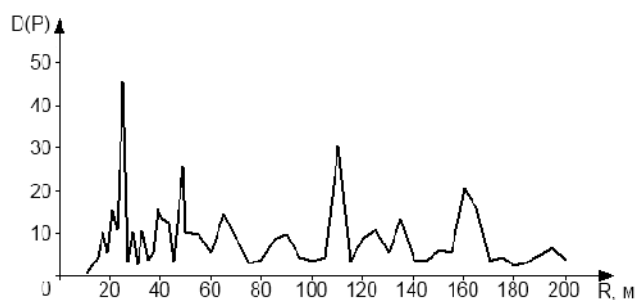


Рис. 5. Дисперсионная зависимость поля для редкого соснового леса

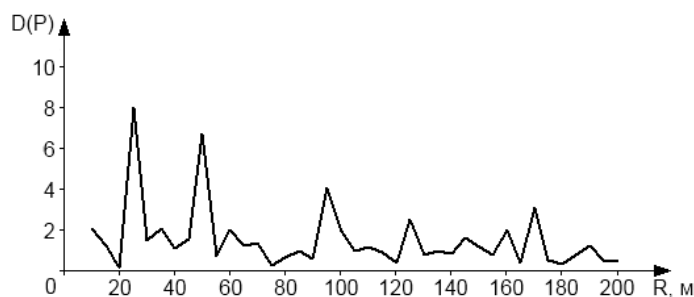


Рис. 6. Дисперсионная зависимость поля для смешанного леса

Из анализа полученных данных, на наш взгляд, можно сделать ряд выводов о взаимодействии излучения с лесной растительностью. Во-первых, из анализа результатов на рис. 1 следует вывод о проявлении боковой волны в частом сосновом лесу на дистанции порядка 100 м. На это указывает сам факт изменения поведения дистанционных зависимостей на этом расстоянии, предполагающий смену механизмов распространения волн, а также вид функции, которой аппроксимирован второй участок полученной кривой. Отметим, что в большинстве работ, касающихся вопросов распространения боковых волн в лесу, даются значительно большие оценки подобных дистанций. Следует подчеркнуть, что речь идет именно об их проявлении, а не формировании, т. е. о дистанциях, на которых их ослабление становится сравнимо с ослаблением прямых волн.

Во-вторых, зависимости, изображенные на рис. 2 и 3, не меняют своего поведения на всей протяженности исследованных участков леса. Это означает, что механизм рассеяния и поглощения прямых волн, определяющий поведение начального участка зависимости на рис. 1, здесь является основным и, по-видимому, единственным на всей протяженности трассы. Отсутствие боковых волн в таких лесах обусловлено тем, что среднее расстояние между деревьями значительно превышает длину волны, т. е. лесную среду нельзя считать сплошной слоистой структурой и излучение быстро затухает из-за рассеяния на стволах деревьев. Таким образом, только при определенных соотношениях среднего расстояния между деревьями и длины волны возможно возникновение боковых волн.

Подтверждением вышеописанных предположений является статистический анализ эксперимен-

тальных данных. Так на рис. 4–6 представлены зависимости дисперсии уровня поля $D(P) = \langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2$, где символ $\langle \rangle$ означает усреднение по 7 измерениям.

График на рис. 4 демонстрирует уменьшение флуктуаций уровня поля, начиная с дистанций порядка 100–110 м, что объясняется преимущественно однолучевым распространением излучения на дальние расстояния, т. е. посредством боковой волны. С другой стороны, многолучевой характер распространения, наблюдающийся при непосредственном прохождении излучения сквозь растительность, обуславливает значительные уровни дисперсии вследствие интерференции волн, отраженных преимущественно от деревьев, на протяжении всей трассы проведения измерений, что и демонстрируют графики на рис. 5 и 6. Следует отметить, что уменьшение дисперсии по абсолютному уровню в густом смешанном лесу (рис. 6), относительно дисперсии в хвойном, объясняется увеличением количества интерферирующих волн, вследствие чего общий уровень флуктуаций уровня поля уменьшается.

Таким образом, проявление боковой волны, распространяющейся над верхней кромкой леса и испытывающей меньшее ослабление по сравнению с прямой волной, проходящей через лес, возможно, когда среднее расстояние между деревьями существенно не превышает длину волны, т. е. в ситуации, когда лесную среду можно считать сплошной слоистой структурой. Существование боковой волны может быть установлено из анализа дистанционных зависимостей и флуктуационных характеристик уровня поля в лесной среде.

Библиографические ссылки

References

1. Tamir T. Radio waves propagation along mixed paths in forest environments // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1977. Vol. 25. P. 471–477.
2. Analysis of radio wave propagation in a four-layered anisotropic forest environment / L. W. Li, J. H. Koh, T. S. Yeo et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1999. Vol. 37. P. 1967–1979.
3. Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. P. 1461–1468.

1. Tamir T. Radio waves propagation along mixed paths in forest environments. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 25, Jul. 1977, pp. 471–477.
2. Li L. W., Koh J. H., Yeo T. S., Leong M. S., Kooi P. S. Analysis of radio wave propagation in a four-layered anisotropic forest environment. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 37, Jul. 1999, pp. 1967–1979.
3. Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 57, May 2009, pp. 1461–1468.

© Ветлужский А. Ю., Калашников В. П., 2013

УДК 550.837

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЛЕСНОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДАРА «ОКО-2»

В. Б. Хаптанов, Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, Улан-Удэ, ул. М. Сахьяновой, 6. E-mail: valery433210@rambler.ru

Рассмотрены результаты исследования характеристик лесной среды с использованием георадара «Око-2». Предложена методика оперативного дистанционного определения плотности лесного массива на основе георадарной технологии с погрешностью 5 %.

Ключевые слова: георадар, плотность лесной среды.

DETERMINATION OF THE FOREST ENVIRONMENT DENSITY WITH THE USE OF GPR “EYE-2”

V. B. Khaptanov, Yu. B. Bashkuev, M. G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch Russian Academy of Sciences
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, Russia. E-mail: valery433210@rambler.ru

In the report the author present results of studies of the forest environment characteristics with the use of GPR “Eye-2”. The technique of operational remote determination of the forest environment density, based on GPR technology with accuracy of 5 %, is proposed.

Keywords: GPR, forest environment density.

Известно, что на территории России леса покрывают площадь свыше 7 млн км², из них в Предбайкалье и Забайкалье – 960 тыс. км² (60 % территории). Главную роль в Сибири играют хвойные леса – сосна, лиственница, ель, кедр. Из лиственных пород наиболее широко распространены береза и осина. Сосновые леса, преобладающие в регионе, обычно растут на сухих песчаных грунтах и южных склонах гор. Высота деревьев изменяется от 5 до 30 м, в среднем 10–20 м; диаметр ствола – от 0,1 до 0,8 м, в среднем 0,15–0,35 м. На открытых местах высота деревьев ниже, чем в густом лесу. Для прогнозирования распространения радиоволн вдоль земной поверхности, покрытой лесом, необходимо знать как

электрические параметры лесной растительности (σ_d и ε_d), так и плотность (густоту) лесной среды. В литературе имеется ограниченное количество экспериментальных данных [1], полученных в различных физико-географических условиях (субтропики, европейская часть России, Северная Америка). Существует определенная связь между типом деревьев и геоэлектрическим разрезом подстилающей среды. Например, для песчаных грунтов, на которых растут сосновые леса, характерны геоэлектрические разрезы типа $\sigma_1 < \sigma_2$, где $\sigma_1 = 0,4\text{--}3,3$; $\sigma_2 = 3,7\text{--}24$ мСм/м; $h_1 = 5\text{--}38$ м. Горные породы хребтов, покрытых лесом, имеют обычно геоэлектрический разрез типа $\sigma_1 > \sigma_2$, где $\sigma_1 \leq 1\text{--}3$ мСм/м.

Методика и результаты. Для исследования характеристик лесной среды (хвойного леса) использовался георадар «Око-2» с антенными блоками АБ-250, АБ-400 и АБ-1700 производства ООО «Логис» (Москва). Центральные частоты антенных блоков 250, 400 и 1 700 МГц, которым соответствуют длины волн 1,2, 0,75 и 0,18 м. Лес облучается георадаром, установленным на движущемся вдоль лесной дороги автомобиле. Участок леса с видом со спутника и по ходу движения автомобиля представлен на рис. 1. Стрелкой показана траектория движения.

Ствол дерева представляет собой вертикальный цилиндрический переизлучатель, имеющий существенно отличные от приземного воздуха электродинамические параметры: удельную электрическую проводимость $\sigma_{\text{д}} = 10^{-2} - 10^{-3}$ См/м и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{д}} = 4 - 30$. На радарограммах 100 м профиля зондирования лесного массива тремя антенными блоками с вертикальной поляризацией (рис. 2) четко выделяются отражения от стволов деревьев в виде гипербол. На радарограмме с антенным блоком АБ-1700 при наилучшем пространственном разреше-

нии не хватает временной развертки для охвата лесного массива на глубину более 10 м (рис. 2, а). Радарограмма с наиболее низкочастотным антенным блоком АБ-250 демонстрирует нехватку пространственного разрешения близко стоящих деревьев в правой части и недостаточное соотношение «сигнал/шум» с увеличением расстояния более 10 м в глубину лесного массива (рис. 2, б). Радарограмма с антенным блоком АБ-400 показывает наилучшее соотношение сигнал/шум, что позволяет идентифицировать гиперболы (отражения) от отдельных стволов деревьев вплоть до 30 м в глубину лесного массива. В большой степени это обусловлено оптоэлектронной (гальванической) развязкой антенного блока АБ-400 и блоком управления георадара, которой нет у антенных блоков АБ-1700 и АБ-250. Горизонтальная поляризация зондирующего сигнала дает менее четкую радарограмму лесного массива (рис. 2, в). Этот эффект обусловлен тем, что при параллельной стволу дерева поляризации зондирующего электромагнитного импульсного поля (Е-компонента) эффективная площадь рассеяния дерева будет выше.

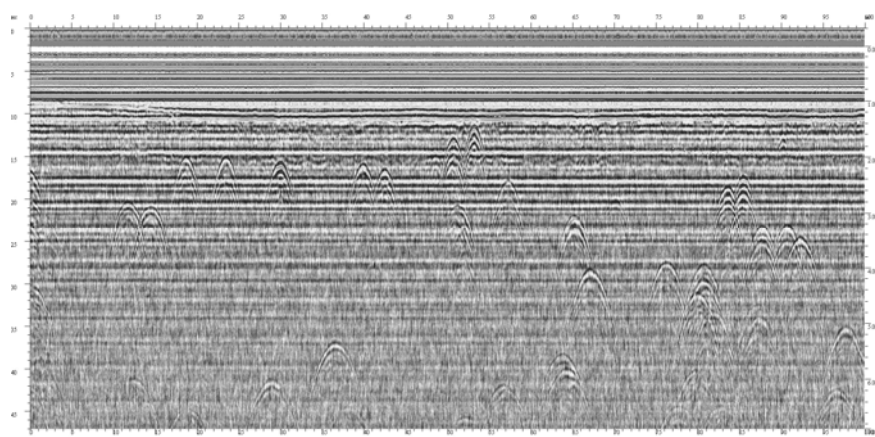


а

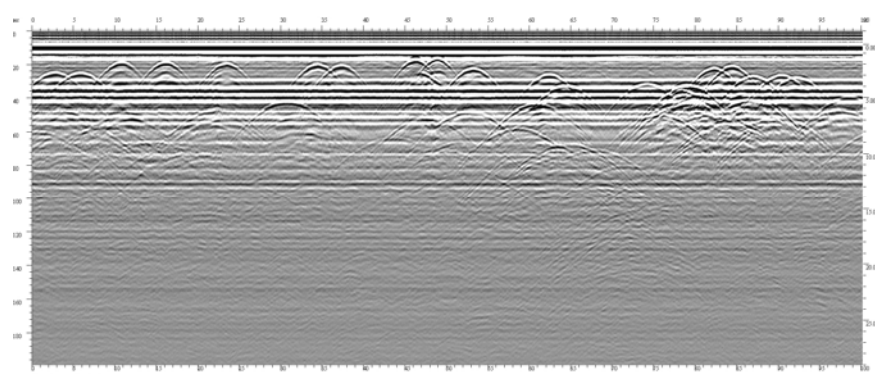


б

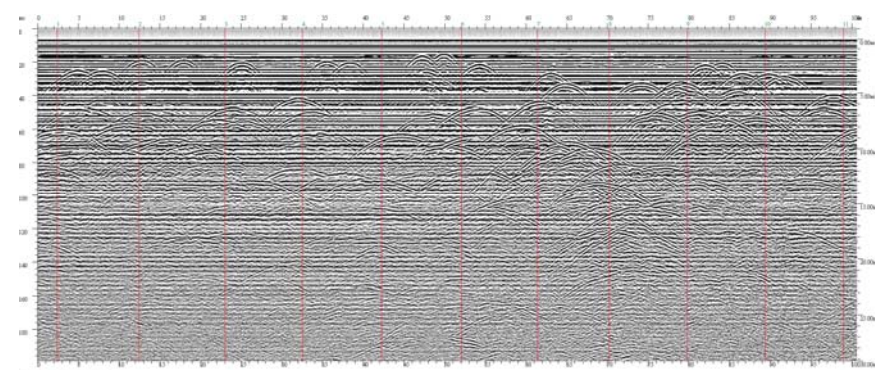
Рис. 1. Вид участка с карты Google (а) и тестовый участок лесного массива (б). Стрелкой показана траектория движения автомобиля с георадаром «Око-2» с антенным блоком АБ-400



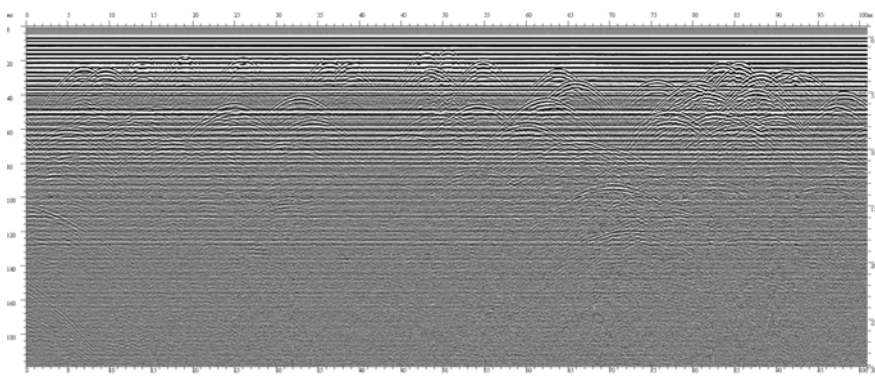
a



б



в



г

Рис. 2. Радарограммы лесного массива. Георадар «Око-2»:
a – АБ-1700 (вертикальная поляризация); *б* – АБ-250 (вертикальная поляризация);
в – АБ-400 (вертикальная поляризация); *г* – АБ-400 (горизонтальная поляризация)

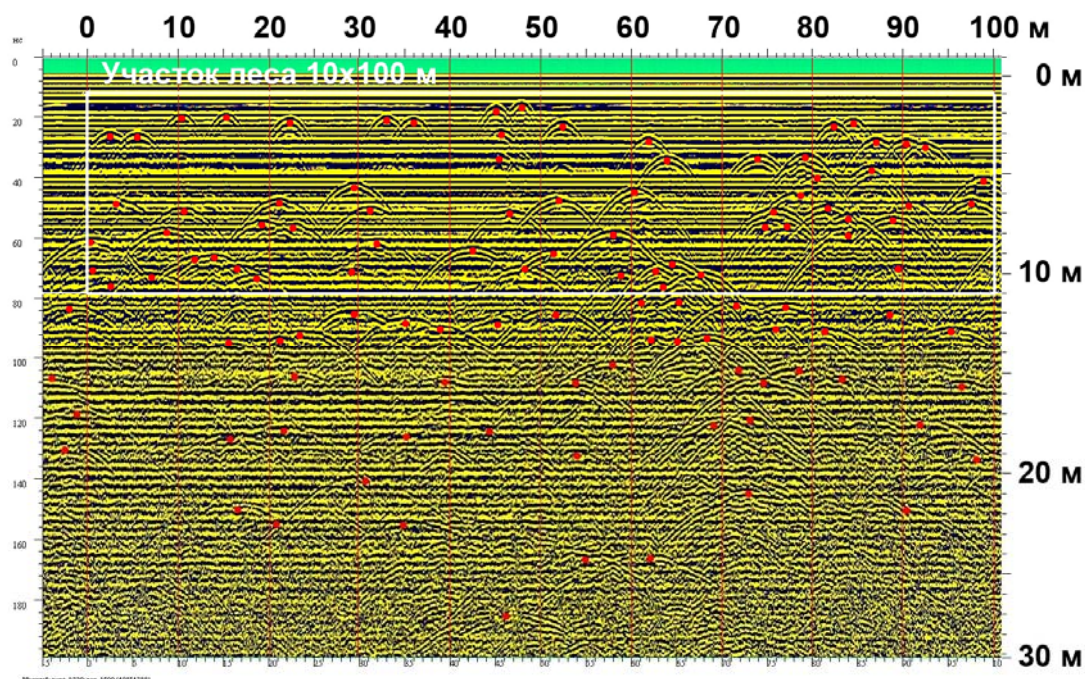


Рис. 3. Радарограмма лесного массива. Расположение стволов деревьев обозначено точками. Белым прямоугольником выделен тестовый участок 10 × 100 м

Подсчет количества гиперболических отражений на заданной площади дает возможность оперативно и производительно определить плотность лесного массива (рис. 3). В эксперименте, выполненном георадаром «Око-2» с антенным блоком АБ-400 на центральной частоте 400 МГц ($\lambda = 75$ см) на тестовом участке леса 10×100 м [10 ар] выделено 64 гиперболических отражения от стволов хвойных (сосновых) деревьев, обозначенных на рис. 3 точками. Сравнение с фактическим количеством деревьев показало 3 пропуска из-за эффекта затенения при близком расположении стволов, что составляет 95,5 % от истинного количества деревьев.

В результате исследования лесного массива георадаром «Око-2» с различными антенными блоками

предложена методика оперативного дистанционного определения плотности лесного массива на основе георадарной технологии с погрешностью 5 %.

Библиографическая ссылка

1. Башкуев Ю. Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1996.

Reference

1. Bashkuev Yu. B. Electrical properties of natural layered media. Novosibirsk, publishing house of the Russian Academy of Sciences, 1996. 207 p.

© Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г., 2013

УДК 621.396.94

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ СВЕРХКОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Б. Ч. Доржиев, О. Н. Очиров, Б. В. Содномов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: 1_2_z@mail.ru

Представлены результаты радиолокации березового леса с расположенным внутри него уголковым отражателем. Приведено краткое описание измерительного комплекса, использованного при измерениях. Выявлен эффект значительного увеличения отраженного сигнала и оценен относительный контраст между уровнем отраженного сигнала от леса и цели. Данный эффект дает возможность определения местоположения цели в лесной среде.

Ключевые слова: сверхкороткоимпульсная радиолокация, лесная среда.

SOME RESULTS ON THE DETECTION OF HIDDEN OBJECTS BY MEANS OF ULTRA-SHORT PULSE RADIOLOCATION

B. Ch. Dorzhiev, O. N. Ochirov, B. V. Sodnomov

Institute of Physical Material Science of Russian Academy of Sciences Siberian Branch
6 Sakhyanovoy st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: 1_2_z@mail.ru

The results of radar location of birch forest with the corner reflector inside the forest are presented. A brief description of the measurement system used in the measurements is given. The effect of significant increase in the reflected signal is revealed, and the relative contrast between the level of the signal, reflected from the forest and from the target, is accessed. This effect allows to detect the location of target in a forest.

Keywords: ultra-short pulse radiolocation, forest.

Одной из актуальных проблем радиолокации является разработка эффективных методов обнаружения и распознавания скрытых объектов, в том числе и под пологом леса. Об этом свидетельствуют исследования как отечественных авторов, так и данные по зарубежным программам. В целом отмечается перспективность ДМ-диапазона, а также освоение более длинноволнового диапазона, что обусловлено большей проникающей способностью. Однако еще не до конца использованы возможности СМ-диапазона, особенно при использовании современных технологий генерации сверхкоротких импульсов. Развитие техники сверхкороткоимпульсной радиолокации (СКИРЛ), обладающей специфическими особенностями и свойствами [1], вызывает растущий интерес к рассмотрению особенностей взаимодействия такого излучения с различными средами и совершенствованию методов расчета процессов, вызванных сверхкороткими импульсами. В работе приведены результаты экспериментов по зондированию лесных сред при наличии искусственных целей.

Экспериментальные исследования проводились с использованием измерительного комплекса, в состав которого входят наносекундный радар с длительностью импульса 10 нс и рабочей частотой 10 ГГц пара-

болическая антенна с диаметром зеркала 600 мм, цифровой осциллограф TDS1012, ноутбук, электрогенератор на 220 В. Номинальная пиковая мощность излучения составляет 40 Вт, динамический диапазон приемника – 70 дБ, полоса частот входного сигнала – 100 МГц. В качестве искусственной цели использован трехгранный уголкового отражатель (УО) с размером ребра 0,9 м.

Для оценки возможностей обнаружения металлоподобных целей проведен ряд экспериментов как при горизонтальной локации, так и при облучении сверху. В последнем случае использовалась топография местности. Общий вид местности в одном из экспериментов показан на рис. 1. Радар был установлен на склоне горы на отметке 630 м, ниже на высоте 580 м расположены березовый лес и открытая поляна.

Для определения ЭПР поверхности используем следующее соотношение:

$$\sigma^0(\theta), \text{дБ} = 10 \lg[S_{\text{пр}}(\theta) / \sigma_m \cdot P_{\text{пр}}(\theta) / P_m],$$

где $S_{\text{пр}}(\theta)$ – площадь облучаемого участка поверхности; σ_m – ЭПР УО; $P_{\text{пр}}$ – усредненная мощность принятого сигнала от участка поверхности; P_m – мощность принятого сигнала, отраженного от УО.



Рис. 1. Общий вид исследуемой поверхности

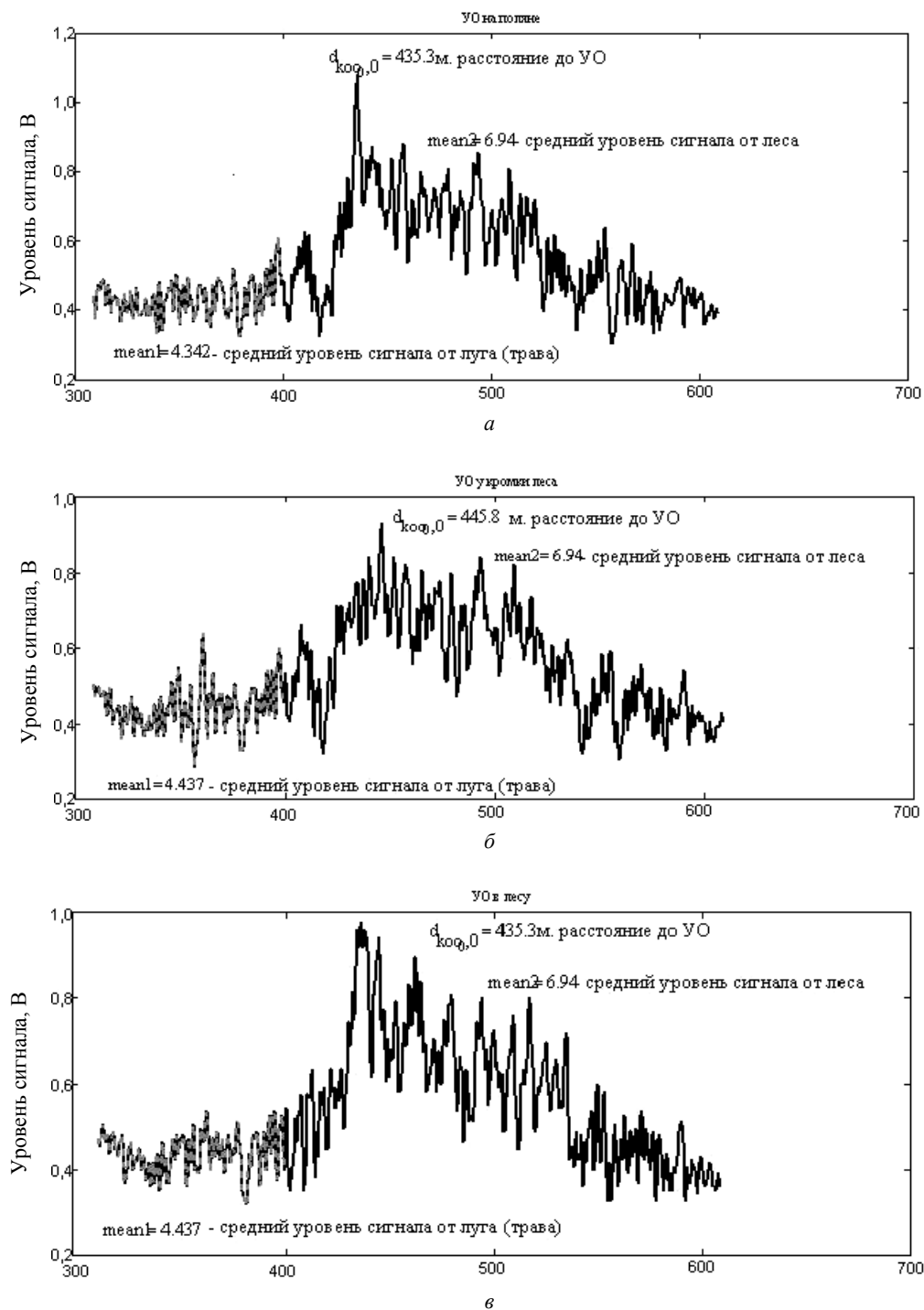


Рис. 2. Графики отраженных сигналов
(обозначения см. в тексте)

Позиции установки УО следующие: первая – на открытой поляне, вторая – у края леса, третья – в глубине леса на расстоянии порядка 15 м от края леса. Графики отражения сигналов для соответствующих позиций представлены на рис. 2.

До расстояний порядка 420 м регистрируется отраженный сигнал от открытой земной поверхности, далее сигнал от УО, имеющий свою характерную форму, а за ним – отраженные сигналы от других деревьев, которые наглядно демонстрируют особенно-

сти СКИРЛ (рис. 2, а). Это контрастная картина отраженных сигналов от отдельных объектов, где каждый пик соответствует отражению от отдельного дерева, высокое пространственное разрешение по дальности (теоретически равное $\sigma_{\tau_u} / 2 = 1,5$ м). Картина пространственного распределения сигнала при установке УО на краю леса отображена на рис. 2, б. Сигнал от УО сохраняет свою форму и превышает по своему значению сигналы от деревьев. Сигналы перед УО

объясняются отражением от границы леса, расположенного с другого края поляны, ближе склону горы.

Наиболее интересный эффект выявлен при третьей позиции УО, когда он располагался непосредственно в самом лесу. На рис. 2, в также отчетливо выделяется сигнал от УО, который практически не изменил свою форму и величину, но отражения от слоя леса, стоящего перед УО значительно возросли и превысили уровень сигнала от самого УО. В продольном направлении эта область совпадает с расстоянием от края леса до места установки УО, а в поперечном направлении с учетом диаграммы направленности антенны составляет порядка 40 м.

Здесь необходимо отметить, что данные измерения были проведены в осеннее время, когда деревья находились без листьев. В этом случае отдельные ветви деревьев можно рассматривать как отдельные вибраторы различной длины, где локальные центры рассеяния совпадают с концами вибраторов. Таким образом, они действуют как вторичные излучатели, вызывающие «эффект резонанса» и значительное усиление суммарного отраженного сигнала. В целом данный эффект свидетельствует о наличии в лесу сосредоточенной цели и выявляет возможность определения ее положения в пределах области возбуждения.

Следует заметить, что ЭПР данной цели (УО) достаточно велика. Для реальных целей, например, автомобилей, ЭПР будет заметно ниже. Тем не менее, и в этом случае, т. е. при сосредоточении целей в ле-

су, будет наблюдаться аналогичный эффект. Для оценки возможности обнаружения таких объектов можно использовать соотношение ЭПР объекта к ЭПР окружающей его фоновой поверхности.

Для определения величины относительного контраста необходимо дополнительные измерения ЭПР различных целей на открытом пространстве. Для представленных в работе результатов (рис. 2, в) измеренный уровень контраста между откликами от УО, расположенного в лесу, и уровнем отраженного сигнала от самого леса составил 14 дБ. При изменении угла ориентации УО и состояния леса эти значения могут существенно меняться. Тем не менее, выявленный эффект свидетельствует о наличии цели в лесной среде и выявляет возможность определения ее местоположения.

Библиографическая ссылка

1. Скосырев В. И., Осипов М. Л. Особенности и свойства сверхкороткоимпульсной радиолокации // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия «Приборостроение». 1999. № 4. Спецвыпуск «Радиоэлектроника».

Reference

1. Skosyrev V. I., Osipov M. L. Vestnik MGTU im. Bauman, serija Priborostroenie. 1999. № 4. Specvypusk "Radioelektronika".

© Доржиев Б. Ч., Очиров О. Н., Содномов Б. В., 2013

УДК 519.2

ИЗМЕРЕНИЕ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ РУПОРНЫМИ АНТЕННАМИ С ДИФРАКТОРНОЙ РАЗВЯЗКОЙ

Ю. Л. Ломухин, Е. Б. Атутов, Б. В. Басанов, В. П. Бутуханов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. E-mail: lom@pres.bscnet.ru, vbut1951@gmail.com

Предлагается метод измерения обратного отражения. Получены значения коэффициента обратного рассеяния реальной почвы. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: коэффициент обратного рассеяния, границы раздела сред, поляризация, комплексная диэлектрическая проницаемость, предельная глубина погружения волн, обращенная волна, диаграмма направленности антенн.

MEASUREMENT OF THE BACKS REFLECTION WITH THE HORN ANTENNA IN DIFFRACTION ISOLATION

Y. L. Lomuhin, E. B. Atutov, B. V. Basanov, V. P. Butukhanov

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: lom@pres.bscnet.ru, vbut1951@gmail.com

The authors propose a method of measurement of back reflection. The values of the back reflection coefficient in reality soil are obtained. The comparison between the calculated and experimental data is made.

Keywords: backs reflection coefficient, the medias interfaces, polarization, complex dielectric constant, the maximum depth of waves, backward wave, antenna directivity diagram.

Коэффициент обратного рассеяния является основным параметром, содержащим информацию о зондируемом объекте, в частности почвенно-растительных средах.

В настоящее время разработано много моделей в основном в эмпирических или полумэмпирических видах [1–4]. Объясняется это большой сложностью и многофакторностью земных покровов. Однако во многих случаях, например, при небольших значениях глубины проникновения поля в среду, почвенный покров можно считать однородным. В этом случае можно получить строгое выражение для коэффициента обратного рассеяния и обобщить его на случай неровной поверхности.

Если в плоскости падения электромагнитной волны лежит вектор **E** (ТМ-мода), то коэффициент обратного рассеяния имеет вид

$$\sigma_{VV}(\varphi_1) = 20 \lg \left\{ \alpha_{\parallel} \left[V_{\parallel}^2(\varphi) e^{-2ik_1 h_1 / \cos \varphi} + \left[1 - V_{\parallel}^2(\varphi) \right] e^{-2ik_2 h_2 / \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 \sin^2 \varphi}} \sqrt{\left(1 + \sin^2 \varphi \right)^2 + \frac{1}{4} \sin^2 2\varphi} \right] \cos \varphi \right\}, \quad (1)$$

$$\alpha_{\parallel} = 1 + \frac{GF(\varphi_1) V_{\parallel}(0)}{V_{\parallel}^2(0) e^{-2ik_1 h_1} + \left[1 - V_{\parallel}^2(0) \right] e^{-2ik_2 h_2}},$$

и если вектор **H** лежит в плоскости падения (ТЕ-мода), то

$$\sigma_{HH}(\varphi_1) = 20 \lg \left\{ \alpha_{\perp} \left[V_{\perp}^2(\varphi) e^{-2ik_1 h_1 / \cos \varphi_1} + \left[1 - V_{\perp}^2(\varphi_1) \right] e^{-2ik_2 h_2 / \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 \sin^2 \varphi}} \right] \cos^2 \varphi \right\} \quad (2)$$

$$\alpha_{\perp} = 1 + \frac{GF(\varphi_1) V_{\perp}(0)}{V_{\perp}^2(0) e^{-2ik_1 h_1} + \left[1 - V_{\perp}^2(0) \right] e^{-2ik_2 h_2}},$$

где $F(\varphi_1)$ – диаграмма направленности; G – коэффициент усиления антенны радара; $V_{\perp}(\varphi), V_{\parallel}(\varphi)$ – коэффициенты Френеля:

$$V_{\perp}(\varphi_1) = \frac{Z_1^{\perp} \cos \varphi_1 - Z_2^{\perp} \cos \varphi_2}{Z_1^{\perp} \cos \varphi_1 + Z_2^{\perp} \cos \varphi_2},$$

$$Z_1^{\perp} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}}, Z_2^{\perp} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}};$$

$$V_{\parallel}(\varphi_1) = \frac{Z_1^{\parallel} \cos \varphi_1 - Z_2^{\parallel} \cos \varphi_2}{Z_1^{\parallel} \cos \varphi_1 + Z_2^{\parallel} \cos \varphi_2},$$

$$Z_1^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}, Z_2^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}},$$

$$k_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_1}, k_2 = k_0 \sqrt{\varepsilon_2}, k_0 = \frac{\omega}{c},$$

где φ – угол падения на поверхность раздела сред (угол между осью диаграммы направленности и нормалью к поверхности; φ_2 – угол преломления. Параметры h_1 и h_2 в формулах (1), (2) – это границы излучающих объемов в средах 1 и 2. Они определяются из уравнений энергетического баланса в первой и второй средах. Приближенно, при $2 < \varepsilon'_{1,2} < 10$

$h_{1,2} \cong \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sqrt{\varepsilon'_{1,2}{}^2 + \varepsilon''_{1,2}{}^2} - \varepsilon'_{1,2}}}$. Здесь $\varepsilon'_{1,2}$ и $\varepsilon''_{1,2}$ действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости; λ – длина волны в вакууме. Формулы (1) и (2) приближенно обобщаются на случай неровной границы раздела сред, умножив коэффициенты Френеля на $\exp(-k \Delta \cos \varphi_2)$; Δ – СКО неровностей.

Для пояснения физического механизма, лежащего в основе получения формул (1) и (2), приведем рис. 1.

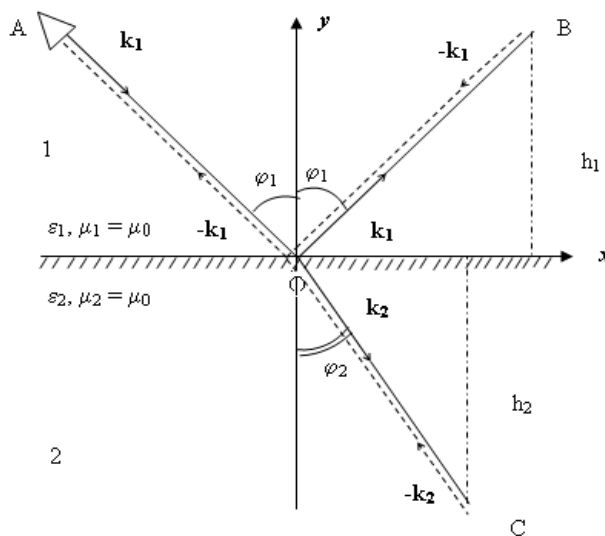


Рис. 1. Схема формирования радиолокационного отражения

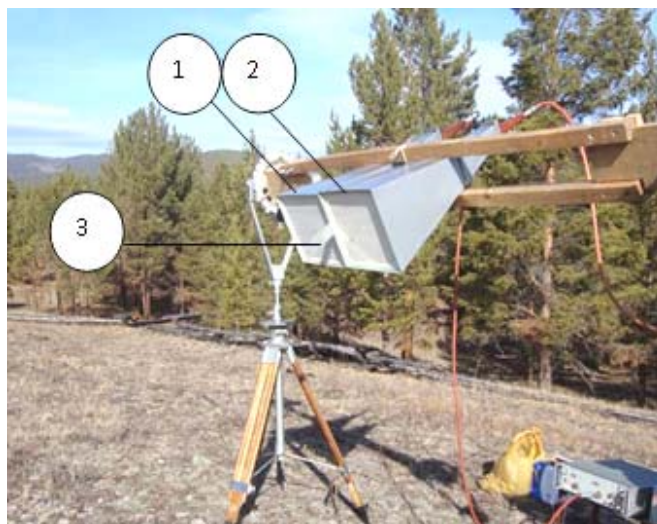


Рис. 2. Установка для измерения обратного отражения почвенного покрова

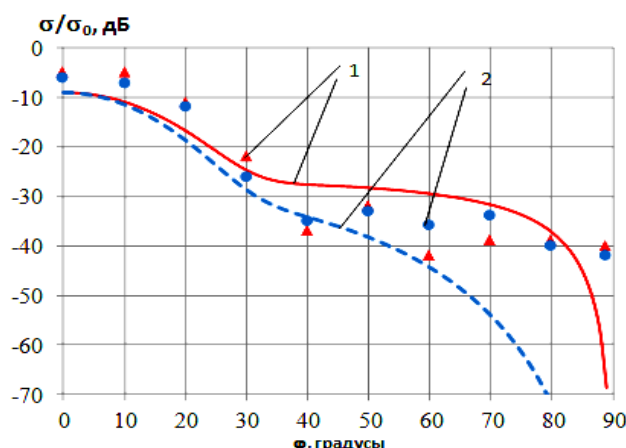


Рис. 3. Зависимость коэффициента обратного рассеяния почвенного покрова от угла падения

В соответствии с рис. 1, волна, излученная радаром А, падает в направлении АО на границу хОу. В точке О одновременно возбуждаются волны, отраженные в направлении ОВ и преломленные в направлении ОС. Своим полем эти волны возбуждают (поляризуют) среды 1 и 2, в результате образуются переизлученные (встречные) волны, распространяющиеся по тем же траекториям, только в обратном направлении. Таким образом, в сторону радара А приходят две обращенные волны, которые и образуют обратное или радиолокационное отражение.

В данной работе проведено измерение коэффициента обратного рассеяния реальной почвы. Общий вид установки приведен на рис. 2.

Измерения проводились с помощью рупорных антенн П6-23 шириной диаграммы направленности $\Delta\theta = 27^\circ$, коэффициентом усиления $G = 13$ дБ. Раскрыты апертуры антенн 1 и 2 лежат в одной плоскости и для дополнительной электромагнитной развязки применен дифракционный элемент в виде прямоугольной проводящей пластины 3, размеры которой выбирались в соответствии с размерами апертуры

и длины волны. Одна из антенн подключалась к генератору, другая к приемному устройству. Измерения проведены при частоте сигнала $f = 1,5$ ГГц.

При расчетах коэффициента обратного рассеяния по (1) и (2) диэлектрическая проницаемость почвы принималась как $\epsilon = 16,5 - i0,099$, что соответствует смеси содержанием 50 % песка влажностью 15 и 50 % глины влажностью 15 %. Поверхность раздела сред считается шероховатой со среднеквадратическим отклонением неровностей $\Delta = 0,0016$ м.

Теоретические (сплошные и штрихпунктирные линии) и измеренные (треугольные и точечные символы) значения коэффициентов обратного рассеяния показаны на рис. 3. Здесь по оси ординат отложены относительные значения коэффициента обратного рассеяния σ/σ_0 , дБ, где σ_0 соответствует обратному отражению от металлической поверхности при $\varphi = 0$. По оси абсцисс отложены значения углов падения φ в градусах.

Данные 1 относятся к вертикальной поляризации, данные 2 – к горизонтальной поляризации. Из рис. 3 следует, что при $0^\circ < \varphi < 30^\circ$ экспериментальные

и расчетные данные согласуются, при $\varphi > 30^\circ$ наблюдаются расхождения. Данное расхождение связано с недостаточным динамическим потенциалом аппаратуры.

Библиографические ссылки

1. Родионова Н. В. Оценка параметров почвы по радарным данным с использованием эмпирической модели и декомпозиции по механизмам рассеяния // Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 3–8.
2. Nashashibi A., Ulaby F. T., Sarabandi K. Measurement and Modeling of the Millimeters-Wave Backscatter Response of Soil Surfaces // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 1996. Vol. 34, № 2.
3. Characterization of Radar Backscatter Response of Sand-Covered Surfaces at Millimeters-Wave Frequencies / A. Y. Nashashibi, K. Sarabandi, F. A. Al-Zaid, S. Alhumaidi // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 50, № 6, 345–2354, June 2012.
4. Ulaby F. T., Allen C. T., Fung A. K. Method for Retrieving the True Backscattering Coefficient from

Measurements with a real Antenna // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1983. Vol. GE-21, № 3. P. 308–313.

References

1. Rodionova N. V. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2009, no. 1, pp. 3–8.
2. Adib Nashashibi, Fawwar T. Ulaby and Kamal Sarabandi. Measurement and Modeling of the Millimeters-Wave Backscatter Response of Soil Surfaces. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 34, № 2, March 1996.
3. Nashashibi A. Y., Sarabandi K., Al-Zaid F. A., Alhumaidi S. Characterization of Radar Backscatter Response of Sand-Covered Surfaces at Millimeters-Wave Frequencies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 50, № 6, 345–2354, June 2012.
4. Fawwar T. Ulaby, Christopher T. Allen and Adrian K. Fung. Method for Retrieving the True Backscattering Coefficient from Measurements with a real Antenna. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21, № 3, 308–313, July 1983.

© Ломухин Ю. Л., Атутов Е. Б., Басанов Б. В.,
Бутуханов В. П., 2013

УДК 519.2

РАДИОЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Ю. Л. Ломухин

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. E-mail: lom@pres.bscnet.ru

Показана связь между коэффициентом обратного рассеяния и радиояркостью температурой.

Ключевые слова: лемма Лоренца, радиояркость, температура, коэффициент обратного рассеяния.

THE BRIGHTNESS TEMPERATURE AND THE BACKSCATTERING COEFFICIENT

Yu. L. Lomuhin

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: lom@pres.bscnet.ru

A relationship between the backscattering coefficient and brightness temperature is shown.

Keywords: Lorentz lemma, brightness temperature, backscattering coefficient.

Тепловое излучение содержит информацию о физических, геометрических и других свойствах нагретых тел. Измерение радиотеплового излучения радиометром основано на стремлении к равновесному состоянию тел с разными температурами. При этом между радиометром и измеряемым телом, в частности, земной поверхностью, существует электромагнитное

взаимодействие. Оба тела (радиометр и измеряемый объект), как излучают, так и поглощают электромагнитное излучение в соответствии с законами теплового излучения.

Рассмотрим механизм распространения волн от радиометра до земной поверхности и обратно, рис. 1.

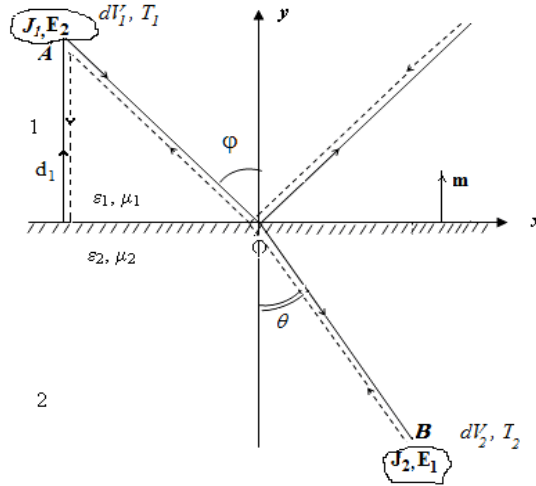


Рис. 1. Схема формирования радиометрического сигнала

Область V_1 содержит радиометр, область V_2 – это область в среде 2, куда поступает поле от V_1 (см. рис. 1). Для анализа удобно воспользоваться леммой Лоренца:

$$\int_{V_1} (\overline{J_1} \overline{E_1}) dV = \int_{V_2} (\overline{J_2} \overline{E_1}) dV$$

Пусть $V_1 = V_2$, тогда

$$\overline{J_1} \overline{E_2} = \overline{J_2} \overline{E_1} \quad (1)$$

Сторонний ток J_1 – это ток на поверхности антенны радиометра, ток J_2 – это ток возбужденный в среде 2 полем E_1 , источником которого является J_1 . При монохроматическом излучении наибольший вклад в ток J_2 вносят поляризационные токи, т. е. диполи, излучение которых распространяется по различным направлениям, в том числе, в сторону источника, последние поступают в V_1 , как E_2 . Учитывая, что

$$\overline{J_2} = \frac{d\overline{P}}{dt} \text{ и } \overline{P} = \alpha \overline{E_1},$$

в соответствии с геометрической оптикой, запишем

$$\overline{E_2}(\beta) = \overline{E_0} \left\{ \left[e^{-2i(k_1 r_1 + k_2 r_2)} T_{1,2}(\beta) T_{2,1}(\theta) + e^{-2i r_1 r_1'} V_{1,2}^2(\beta) \right] + e^{-2i k_1 d_1} V_{1,2}(0) \right\}. \quad (2)$$

Здесь $k_1 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_1}$, $k_2 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_2}$, $\epsilon_{1,2} = \epsilon_{1,2} - i\epsilon_{1,2}$, $\epsilon_{1,2} = \text{Re}\epsilon_{1,2}$,

$\epsilon_{1,2} = \text{Im}\epsilon_{1,2}$; $T_{1,2}(\beta)$, $T_{1,2}(\theta)$ – коэффициенты прохождения, соответственно, из среды 1 в среду 2 и из среды 2 в среду 1; $V_{1,2}(\beta)$ – коэффициенты Френеля; $r_1 = h_1/\cos\beta$, $r_2 = h_2/\cos\beta$, h_1 и h_2 – границы рассеивающих объемов в первой и второй средах.

Поле $\overline{E_2}(\beta)$ записано как суперпозиция полей из трех слагаемых: поля из объема среды 2, поля из объема среды 1 и поля, отраженного от границы раздела сред по нормали.

В формуле (2) следует учесть, что только при $\beta = 0$ подключается третье слагаемое, а при $\beta \neq 0$ оно исчезает. Этот факт мы учтем следующим образом:

$$\overline{E_2}(\beta) = \alpha(\beta) \overline{E_0} \left\{ \left[e^{-2i(k_1 r_1 + k_2 r_2)} T_{1,2}(\beta) T_{2,1}(\theta) + e^{-2i k_1 r_1'} V_{1,2}^2(\beta) \right], \beta \neq 0, \right. \quad (3)$$

$$\left. \overline{E_2}(0) = \overline{E_0} \left\{ \left[e^{-2i(k_1 d_1 + k_2 h_2)} T_{1,2}(0) T_{2,1}(0) + e^{-2i k_1 h_1'} V_{1,2}^2(0) \right] + \delta(\beta - \varphi) \varphi F(\beta) e^{-2i k_1 d_1} V_{1,2}(0) \right\}, \beta = 0. \right. \quad (4)$$

Положим в формулу (3) $\beta = 0$ и, приравняв выражения (3) и (4) определим $\alpha(\beta)$, d_1 – расстояние радара от поверхности.

$$\alpha(\beta) = 1 + \frac{G\delta(\varphi - \beta) F(\beta) V_{1,2}(0)}{\left[T_{1,2}(0) T_{2,1}(0) e^{-2i(k_2 h_2)} + V_{1,2}^2(0) e^{-2i k_1 h_1'} \right]}. \quad (5)$$

В выражении (5) введены диаграмма направленности и коэффициент усиления антенны радиометра.

Поля, поступающие в радиометр со всех направлений в пределах диаграммы направленности, рассчитаем с помощью представления Стреттона-Чу для двумерного случая:

$$\overline{E}(P) = \frac{A}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ -i\omega\mu_1 \Psi[\overline{mH}] + [\overline{mE}] \nabla \Psi + (\overline{mE}) \nabla \Psi \right\} \cos \beta dx, \quad (6)$$

$$\overline{H}(P) = \frac{A}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ i\omega\epsilon_1 \Psi[\overline{mE}] + [\overline{mH}] \nabla \Psi + (\overline{mH}) \nabla \Psi \right\} \cos \beta dx, \quad (7)$$

Положим $\Psi = \frac{e^{-ik_1\eta}}{r_1}$, и в качестве $\bar{E}$ в соответствии с (3) и (5) принимаем

$$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-ik_1 r_1} \alpha(\beta) \left\{ \left[e^{-2ik_2 r_2} T_{1,2}(\beta) T_{2,1}(\beta) + e^{-2ik_1 \eta} V_{1,2}^2(\beta) \right] \right\}, \quad \bar{H} = \frac{1}{\omega \mu_1} [\bar{K}_1 \bar{E}]$$

и подставляя в (6) и (7), и учитывая, что диаграмма направленности узкая, интегрирование проводим приближенно, затем определяем мощность поля, поступающего в радиометр:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\bar{E}(P) \bar{H}^*(P)]$$

Интегральная светимость Земли равна

$$P_{uc} = \int_0^\infty r(\omega) P d\omega \quad (8)$$

где $r(\omega) = \frac{\omega}{c^2 \pi} \frac{h\omega}{e^{kT} - 1}$ – формула Планка. В приближении Релея–Джинса

$$r(\omega) \cong \frac{2kT}{\lambda^2},$$

поэтому (8) есть

$$P_{uc} = \frac{2k}{4\pi^2 c^2} T_{ря},$$

$$T_{ря}^{\parallel\perp} = T_0 \int_0^\infty \omega^2 \sigma^{\parallel\perp}(\varphi) \sigma^{\parallel\perp}(\varphi)^* d\omega,$$

где $T_{ря}$ – так называемая радиояркостная температура, если полоса пропускания прибора $\Delta\omega$, то

$$T_{ря}^{\parallel\perp} = \int_\omega^{\omega+\Delta\omega} \omega^2 \sigma^{\parallel\perp}(\varphi) \sigma^{\parallel\perp}(\varphi)^* d\omega$$

и $\sigma(\varphi)$ – коэффициент обратного рассеяния:

$$\sigma^{\parallel\perp}(\varphi) = \alpha^{\parallel\perp}(\varphi) \left\{ \left[1 - V_{1,2}^{\parallel\perp}(\varphi) \right] e^{-2ik_2 r_2} + V_{1,2}^{\parallel\perp}(\varphi) e^{-2ik_1 r_1} \right\} \Phi^{\parallel\perp}(\varphi), \quad (9)$$

$$\alpha^{\parallel\perp}(\varphi) = 1 + \frac{GF^{\parallel\perp}(\varphi) V_{1,2}^{\parallel\perp}(0)}{\left[1 - V_{1,2}^{\parallel\perp}(0) \right] e^{-2ik_2 h_2} + V_{1,2}^{\parallel\perp}(0) e^{-2ik_1 h_1}},$$

$$\Phi^{\parallel\perp}(\varphi) = \begin{cases} \cos^2 \varphi & \text{при } TE - \text{поляризации ("⊥"),} \\ \cos \varphi \sqrt{(1 + \sin^2 \varphi)^2 + \frac{1}{4} \sin^2 2\varphi} & \\ \text{при } TM - \text{поляризации ("⊥").} \end{cases}$$

$$V_{1,2}^{\parallel}(\varphi) = \frac{Z_1^{\parallel} \cos \varphi - Z_2^{\parallel} \cos \theta}{Z_1^{\parallel} \cos \varphi + Z_2^{\parallel} \cos \theta}, \quad Z_1^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}, Z_2^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}},$$

$$V_{1,2}^{\perp}(\varphi) = \frac{Z_1^{\perp} \cos \varphi - Z_2^{\perp} \cos \theta}{Z_1^{\perp} \cos \varphi + Z_2^{\perp} \cos \theta}, \quad Z_1^{\perp} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}, Z_2^{\perp} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}},$$

Параметры h_1 и h_2 определяются из уравнений баланса энергии в первой и второй средах, и означают границы излучающих объемов в средах:

$$h_1 \approx \frac{1}{\operatorname{Im} k_1}, h_2 \approx \frac{1}{\operatorname{Im} k_2}.$$

Формулу (9) можно обобщить на случай неровной поверхности путем умножения коэффициентов Френеля на $\exp[-2k_1^2 \Delta^2 \cos^2 \varphi]$, где Δ – СКО неровностей.

Поясним физический смысл выражения (9). Первые слагаемые в фигурных скобках описывают излучение из объема второй среды (земли), второе слагаемое относится к излучению из первой среды (атмосферы). Множитель $\alpha^{\parallel\perp}(\varphi)$ учитывает угловую анизотропию приемной системы радиометра или радара.

Итак, радиояркостная температура и коэффициент обратного рассеяния линейно связаны между собой. Угловые зависимости данных параметров аналогичны.

© Ломухин Ю. Л., 2013

УДК 550.837

СТРУКТУРА ВОДНОЙ ТОЛЩИ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА КОТОКЕЛЬ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В. Б. Хаптанов, Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: valery433210@rambler.ru

Представлены результаты георадарного исследования озера Котокель, на котором в 2008–2009 гг. наблюдалась вспышка «гафской» болезни. С помощью георадара «Око-2» получены убедительные данные о стратификации водной толщи и донных отложений озера. Сделан вывод о преимущественно тектоническом характере возникновения озерной котловины.

Ключевые слова: георадар, стратификация, донные отложения, озерная котловина, сейсмодислокация.

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №12-02-98007, №12-02-98002, №12-05-98051.

STRUCTURE OF THE KOTOKEL LAKE WATER AND BOTTOM SEDIMENTS ACCORDING TO GPR SOUNDING

V. B. Khaptanov, Yu. B. Bashkuev, M. G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch Russian Academy of Sciences
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: valery433210@rambler.ru

The report presents the results of Kotokel lake GPR survey, where an outbreak of “gafskaya” disease occurred in 2008–2009. Convincing data on the stratification of the water column and sediments of the lake were received with the help of GPR “Eye-2”. Conclusion is made on essentially tectonic manner of occurrence of the lake basin.

Keywords: GPR, stratification, bottom sediments, lake basin, seismodislocation.

Озеро Котокель привлекает внимание российских и иностранных ученых как опорный разрез позднеледниковья и голоцена юга Восточной Сибири. На основе детальной палинostrатиграфии отложений котловины оз. Котокель и интерпретации этих изменений в терминах ответственных за них климатических факторов проведена реконструкция динамики растительности котловины [1]. С начала 2000-х гг. на акватории озера проводились исследования российско-японской группой [2]. Отбор проб из пробуренных скважин до глубины 16 м и радиоуглеродная датировка отложений позволили построить стратиграфические колонки и оценить скорость осадконакопления в период позднего плейстоцена-голоцена. Геоморфологические работы проводились Институтом земной коры СО РАН [3]. В связи с экологической катастрофой с 2008 г. по настоящее время действует запрет использования водоема в рекреационных, питьевых и хозяйственно-бытовых целях. Это было связано с ухудшением экологического состояния акватории и «цветением» воды в результате развития одноклеточных синезеленых водорослей (цианобактерий). Проблема обострилась вследствие водной связи озера с Байкалом. Имелась реальная угроза заражения вод оз. Байкал в районе устья р. Турка. Несмотря на проводимые исследования проблема «цветения» водоемов и происхождения «гафской болезни» остается нерешенной в глобальном масштабе. Остаются не исследованными физико-, термогидрологические, климатологические факторы создающие предпосылки возникновения опасной экологической ситуации.

Геолокационное зондирование акватории. Задача исследования озера и его донных отложений является классической со времен становления радиолока-

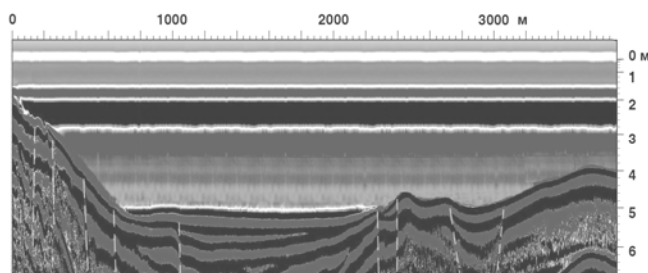
ции как метода подповерхностного зондирования подстилающей среды [4, 5]. Технология георадиолокации на воде предусматривает использование, как правило, низкочастотных антенн, которые располагаются на дне плавсредства или буксируются прямо по воде. Георадарные работы можно проводить с пластиковых или резиновых лодок и при глубинах от метров до десятков метров в зависимости от проводимости воды, определяющей ее поглощающую способность по излучению.

Георадиолокационные работы проводились с целью выявления профиля дна, толщины и строения донных отложений озера с помощью радиотехнического прибора подповерхностного зондирования (георадара) «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» производства ООО «Логис» (Москва) по заранее намеченным на карте профилям.

Профилирование выполнялось на 3 местной моторной лодке типа «Командор». Работа георадара осуществлялась в непрерывном режиме антенным блоком АБДЛ «Тритон» с центральной частотой 50 МГц в режиме буксировки на плаву. Координатная привязка профиля осуществлялась GPS-приемником Garmin GPSmap60CSx. Схемы расположения профилей на акватории озера и полученные радарограммы представлены на рис. 1, 2. Радарограмма поперечного профиля 1 северной части озера длиной 3,8 км, показывает сложный рельеф и слоистость дна озера (рис. 1, б). Максимальные глубины 5 м наблюдаются во впадине, заполненной осадками с выположенным верхним слоем. Смещения слоев в донных отложениях и их несогласное залегание свидетельствуют о наличии сейсмодислокаций, отмеченных на радарограмме пунктирными линиями.



а



б

Рис. 1. Профиль северной части оз. Котокель:

а – схема расположения профиля на фрагменте спутникового изображения Google Earth;

б – радарограмма профиля, полученная с помощью антенного блока «Тритон» с центральной частотой 50 МГц. Пунктирными линиями выделены сейсмодислокации

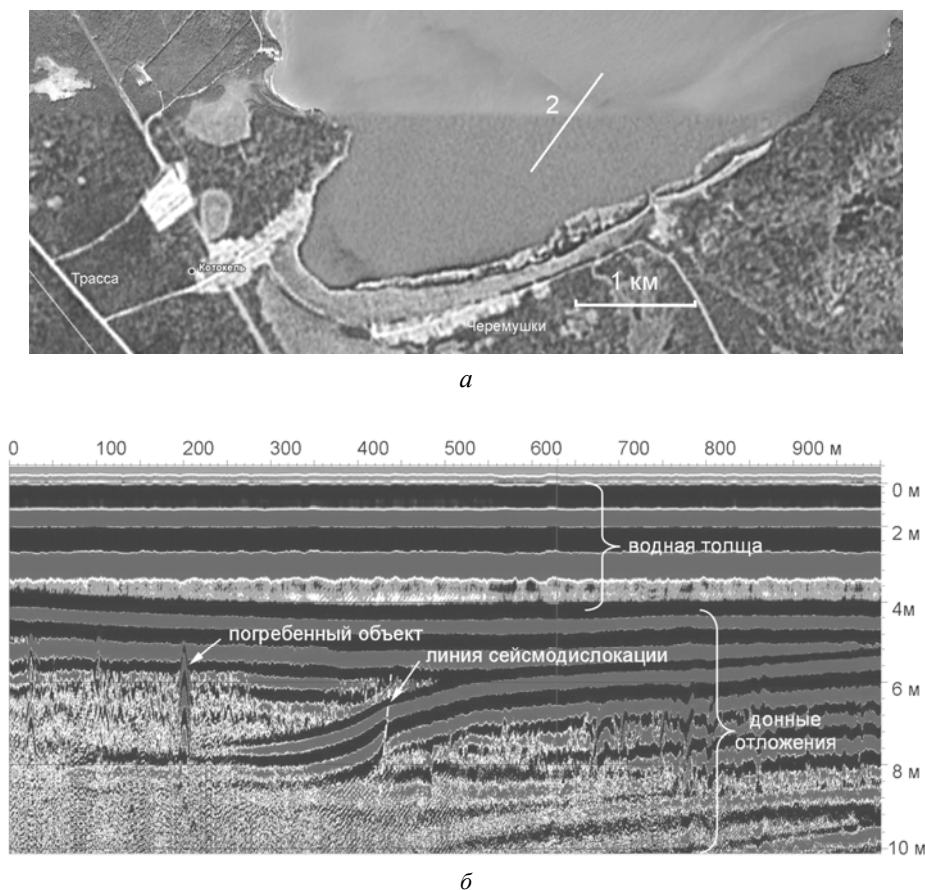


Рис. 2. Радарограмма южной части оз. Котокель.
Георадар «Око-2», АБДЛ «Тритон»

На радарограмме профиля 2 протяженностью 1 км в южной части озера выделяются 3 слоя водной толщи и около десятка слоев донных отложений в ближней к берегу половине профиля (рис. 2). В центральной части профиля выявлена сейсмодислокация, по которой произошло опускание предыдущего участка профиля более чем на 2 м и заполнение образовавшейся ниши более проводящими осадками. О чем свидетельствует большее затухание сигнала, маскирующее слоистость разреза. В толще донных отложений имеются отдельные дифрагирующие объекты, один из которых отмечен как погребенный объект (рис. 2, б). Возможно это погребенный в осадках ствол дерева, произраставшего в данной местности в голоценовое время. По кратным гиперболам можно оценить диаметр ствола дерева около 0,5 м.

Георадарные исследования на акватории оз. Котокель выявили новые данные о строении водной толщи и донных отложений:

1. Установлено явление стратификации водной толщи озера. Выделяются 3 слоя воды с различными электрофизическими свойствами, приводящими к наличию отражения зондирующего сигнала от горизонтов 2 и 3,5 м. Стратификация водной толщи замедляет обменные процессы и может приводить к застойным явлениям и накоплению природных и антропогенных токсинов.

2. Высокое разрешение и проникающая способность сверхширокополосного георадара «Око-2» с центральной частотой 50 МГц позволили выявить около десятка слоев в донных осадочных отложениях с погребенными объектами и следами палеосейсмодислокаций. Погребенными объектами могут быть стволы древних деревьев, произраставших в данной местности в голоцене.

3. Выявлена палеосейсмодислокация в южной части озера Котокель свидетельствующая, возможно, о катастрофическом опускании части дна озера на более чем 2 м (подобном опусканию 200 км суши в результате Цаганского землетрясения 1862 г. в дельте р. Селенги и образовавшем мелководный залив Провал). Это дает инструментальное подтверждение преимущественно тектонического характера формирования озерных котловин Байкальского региона [6].

Полученные новые результаты о стратификации водной толщи и донных осадков озера, строения котловины озера находятся в русле интересов мирового сообщества, особенно в части безопасного использования водоемов.

Библиографические ссылки

1. Озеро Котокель – опорный разрез позднеледникового и голоцена юга Восточной Сибири / Е. В. Безрукова и др. // Доклады Академии наук. 2008. Т. 420, № 2. С. 248–253.

2. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region / K. Shichi, H. Takahara, S. K. Krivonogov et al. // Quaternary International. 2009. Vol. 205. P. 98–110.

3. Науки о Земле. URL: <http://www-sbras.nsc.ru/win/sbras/rep/rep2004/tom2/geo.pdf/>.

4. Зимин Ю. В. Радиолокационный метод исследований отложений торфа и сапропеля : дис. / МГУ им. Ломоносова. 1987.

5. Методические рекомендации по обследованию водоемов и болот с использованием георадара «Око-2» / ООО «Логические системы». 2007.

6. Тулоханов А. К. Колебания уровня озер как индикатор активности современных тектонических движений Забайкалья // Геоморфология. 1990. Вып. 1. С. 91–96.

References

1. Bezrukova E. V. et al. Ozero Kotokel-oporniy razrez pozdnelednikovaya i golotsena yuga Vostochnoy Sibiri.

Doklady Akademii nauk (Proceedings of the Academy of Sciences). 2008. Vol. 420, no. 2, pp. 248–253.

2. Shichi K., Takahara H., Krivonogov S. K. et al. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region. Quaternary International. 205. 2009. p. 98–110. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/quaint.

3. Available at: <http://www-sbras.nsc.ru/win/sbras/rep/rep2004/tom2/geo.pdf/>.

4. Zimin Yu.V. Radiolokatsionnyy metod isledovaniya otlojeniy torfa i sapropelya. Dissertation work. Moscow State University. 1987. 100 p.

5. Metodicheskie rekomendatsii po obsledovaniyu vodoemov i bolot s ispolzovaniem georadara Oко-2. (Handbook GPR survey of ponds and marshes). Ltd. “Logical Systems”. 2007.

6. Tulononov A. K. Kolebaniya urovnya ozer kak indikator aktivnosti sovremennih tektonicheskikh dvizheniy Zabaykal'ya (Fluctuations of lakes' levels as an indicator of the recent tectonic movements).

© Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г., 2013

УДК 621.371

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ РЕКИ СЕЛЕНГИ, ЕЕ ПРИТОКОВ И АКВАТОРИИ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, М. Г. Дембелов, Д. Г. Буянова, Л. Х. Ангархаева

Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: buddich@mail.ru

Рассмотрены данные электрометрических исследований водной среды р. Селенга и акватории оз. Байкал. Установлена существенная изменчивость удельного электрического сопротивления (УЭС) в различных пунктах взятия проб воды из-за ее различной минерализации. Отмечено низкое УЭС грунтовых вод, взятых из колодцев, расположенных в районе дельты р. Селенга.

Ключевые слова: электрометрия, удельное электрическое сопротивление.

RESULTS OF ELECTROMETRIC ANALYSIS OF WATER SAMPLES OF THE RIVER SELENGA WITH ITS TRIBUTARIES AND THE LAKE BAIKAL WATER AREA

Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, M. G. Dembelov, D. G. Buyanova, L. Kh. Angarkhaeva

Institute of Physical Materials Science of the Russian Academy of Sciences Siberian branch
6 Sakhyanovoy st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: buddich@mail.ru

The authors consider the data of electrometric analysis of water samples of the r. Selenga and Lake Baikal. Essential variability of specific electric resistance (SER) of different water sampling points due to its different mineralization was revealed, along with the observed low SER of ground waters from wells, located in the area of delta of the river Selenga.

Keywords: electrometric analysis, specific electric resistance.

Данных об электропроводности воды реки Селенги и оз. Байкал в литературе немного [1–5]. Знание этих характеристик необходимо при решении ряда практических задач геофизической электродинамики и физической экологии. В работах [6–8] показана

целесообразность широкого использования удельного электрического сопротивления УЭС (УЭС – величина, обратная удельной электропроводности воды, измеряется в Ом · м.) природных вод р при геофизических, геологических и гидрологических исследованиях. Цель

*Работа подготовлена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №11 и грантов РФФИ № 12-02-98002, №12-02-98007, №12-05-98051, № 12-01-98010.

проведенного исследования – определение радиофизических индикаторов состояния экосистемы дельты р. Селенга. Экспериментальные исследования проводились методами электрометрии и лабораторного анализа проб воды и льда с использованием кондуктометра ММЗЧ-04 с датчиком УК-0.2/1, кондуктометра DIST WP3 фирмы Hanna Instruments и измерителя температуры и минерализации Primo-3.

УЭС проб воды, взятых в дельте р. Селенга, заливе Сор-Запорная губа и других местах Байкальского региона, приведены в табл. 1. Данные таблицы указывают на существенную изменчивость УЭС проб воды в различных точках их взятия как на р. Селенга, так и в других водоемах и грунтовых водах из-за различной минерализации воды. Установлено низкое УЭС грунтовых вод, взятых из колодцев, лежащих в районе дельты р. Селенга. Горные реки Хаим, Горная и некоторые другие имеют более высокие УЭС воды, чем байкальская вода. Сезонные вариации УЭС воды р. Селенга в районе г. Улан-Удэ представлены на рис. 1. Пробы брались ежемесячно, начиная с августа 1998 г. Максимальные значения УЭС наблюдаются в зимние месяцы, когда сток воды минимален. Минимальное УЭС имеет место в весенний период (конец марта – апрель – начало мая), когда происходит интенсивное таяние снега и сток загрязненных поверхностных вод в реку. Сезонный ход УЭС имеет устойчивый характер с годичным ритмом. Летние значения УЭС также достаточно стабильны от года к году. Изменение УЭС воды от лета к зиме находится в интервале от 80 до 170 Ом · м, т. е. более двух раз в сторону увеличения. Следует отметить нелинейность зависимости $\rho(t)$. Для всех проб воды проведена аппроксимация измеренных зависимостей $\rho(t)$ полиномом 2-й степени: $\rho(t) = \rho_{15}[1 + \alpha(t - t_{15}) + \beta(t - t_{15})^2]$ и определены коэффициенты α и β , характеризующие температурный коэффициент УЭС (табл. 1). Для девяти проб воды, взятых в заливе Сор-Запорная губа оз. Байкал, линейный член α изменяется в пределах $-(2,3-2,8) \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}$, а квадратичный член β в пределах $(4,8-8,6) \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$. Некоторые температурные зависимости УЭС проб воды для р. Селенга и других водоемов, а также грунтовых вод, представлены на рис. 2. По данным изме-

рений р. Селенга имеет более низкое УЭС, чем байкальская вода в глубоководных частях акватории. Так, по данным работ [3; 5], приведенное к 18 °С УЭС в верхнем 100-метровом слое воды оз. Байкал изменяется от 83 до 105 Ом · м и в среднем составляет 91 Ом · м. Температура байкальской воды в слое 0–200 м изменяется в течение года от 0,1 до 15–23 °С. На больших глубинах она постоянна в течение года и равна 3,2–3,8 °С. Сезонные изменения температуры воды, достигающие 15–18 °С, приводят к образованию градиентной геоэлектрической среды, обусловленной хорошо выраженной температурной слоистостью водной массы. При этом разница сопротивлений между слоями воды может достигать 35–40 Ом · м. Изучена миграция солевых включений в ледовом покрове оз. Байкал. Концентрация солей изменяется от 18 до 2,5 мг/л (при минерализации воды 120 мг/л). При невысоком снежном покрове лед озера сильно опресняется и в середине зимы при толщине льда около 1 м распределение концентрации солей по высоте имеет минимум 2,5 мг/л в центральной и нижней части керна. Верхний слой 0–4 см имеет концентрацию 18 мг/л (для сравнения дистиллированная вода имеет 10 мг/л). УЭС воды из керна льда при температуре 2 °С изменяется от 1 670 до 8 640 Ом · м в слое 40–50 см (верхний предел значительно выше УЭС бидистиллированной воды).

Данные кондуктометрических исследований водной среды р. Селенга и акватории оз. Байкал показывают существенную изменчивость УЭС в различных пунктах взятия проб воды из-за различной ее минерализации. Установлено низкое УЭС грунтовых вод, взятых из колодцев, расположенных в районе дельты р. Селенга.

В результате ежемесячных измерений УЭС проб воды в р. Селенга в районе г. Улан-Удэ получен сезонный ход УЭС воды с годичным ритмом. Изменение УЭС воды, приведенное к одной температуре (4 °С), от лета к зиме составляет 20–25 % в сторону увеличения. Абсолютные значения естественного хода УЭС воды от лета к зиме составляют 80–170 Ом · м, т. е. увеличиваются более чем в 2 раза.

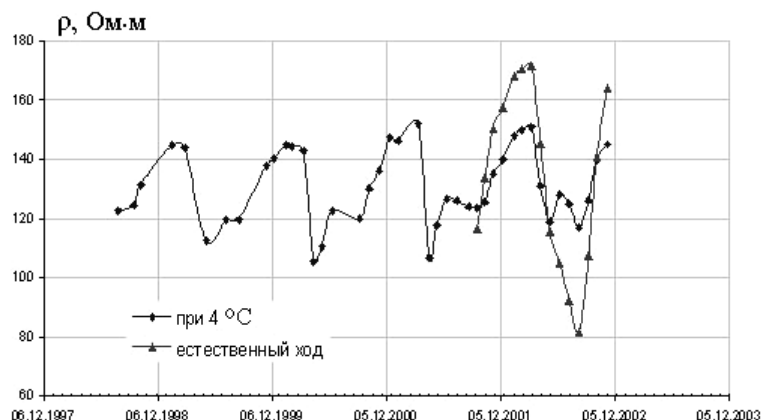


Рис. 1. Сезонные вариации УЭС воды р. Селенга в районе г. Улан-Удэ (дебаркадер Речного порта)

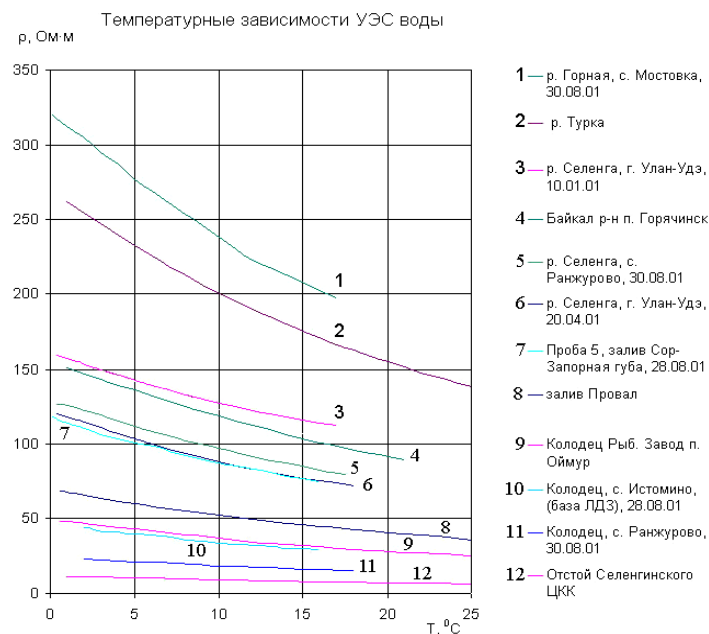


Рис. 2. Температурные зависимости УЭС проб воды, взятых в дельте р. Селенга и других водоемах Байкальского региона

УЭС проб воды

№ пробы	Место взятия пробы воды	ρ_{15} , Ом·м	$\alpha \cdot 10^{-2}$, град $^{-1}$	$\beta \cdot 10^{-4}$, град $^{-1}$
1	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 1, 52°08'33"N, 106 17'28"E, 29.08.01	81	−2,8	5,1
2	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 2, 52°08'55"N, 106 17'08"E, 29.08.01	82,3	−2,6	5,5
3	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 3, 52°09'12"N, 106 16'50"E, 29.08.01	78,5	−2,7	5,1
4	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 4, 52°09'43"N, 106 16'01"E, 29.08.01	84,2	−2,7	4,8
5	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 5, 52°10'15"N, 106 15'34"E, 29.08.01	74,4	−2,4	8,3
6	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 6, 52°10'30"N, 106 15'07"E, 29.08.01	84,4	−2,6	6,3
7	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 8, 52°09'16"N, 106 17'41"E, 29.08.01	82,6	−2,4	8,6
8	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 9, 52°09'34"N, 106 18'33"E, 29.08.01	84,1	−2,3	8,3
9	Байкал, р-он с. Истомино, залив Сор-Запорная губа, проба 10, 52°07'57"N, 106 17'19"E, 29.08.01	73,6	−2,4	8,2
10	р. Селенга, г. Улан-Удэ, 25.08.01	90,3	−2,6	6,9
11	р. Селенга, р-он с. М.Колесово, 30.08.01	82,1	−2,6	5,9
12	р. Селенга, р-он с. Ранжурово, 29.08.01	84,9	−2,2	9,4
13	р. Селенга, с. Фофаново	70,8	−2,1	10,2
14	р. Селенга, с. Красный Яр	67,9	−1,4	18,3
15	р. Селенга, протока Лобаниха	77,2	−2,8	2,6
16	р. Горная, р-он с. Мостовка, 30.08.01	207,7	−2,6	7,3
17	р. Турка, 25.08.02	175	−2,1	14,5
18	р. Хаим, 25.08.02	256	−1,7	6,8
19	Байкал, пирс в с. Истомино, 52°09'12"N, 106°19'25"E	67,9	−2,3	9,4
20	Байкал, р-он п. Горячинск, 25.08.02	106,7	−3,9	7,0
21	Колодец в с. Истомино, $h = 6$ м (база ЛДЗ), 28.08.01	29,9	−2,5	8,2
22	Колодец в с. Истомино, $h = 6$ м, 28.08.01	19,1	−2,4	9,4
23	Колодец в с. Ранжурово, 52°10'41"N, 106°25'30"E, 30.08.01	16,4	−2,2	6,5
24	Колодец с. Оймур, 52°19'14"N, 106°48'41"E, 17.03.02	49	2,4	3,8
25	Озеро у радиостанции РВ-63 вблизи п. Селенгинск, 27.08.01	98,2	−2,1	13,6

Библиографические ссылки

1. Гортиков В. М. Применение электропроводности к исследованию воды р. Ангара и оз. Байкал // Труды зап.-сиб. гос. гидрологич. ин-та. 1936. Т. 15. С. 154–168.
2. Настоящее и будущее Байкальского региона. Ч. 1 // Новосибирск : Студия Дизайн ИНФОЛИО, 1996. С. 33.
3. Электромагнитные характеристики акватории оз. Байкал / Ю. Б. Башкуев, В. Р. Адвокатов, В. Б. Хаптанов и др. // Геология и геофизика. 1993. № 9. С. 118–126.
4. Информационная основа прогноза природных процессов. Новосибирск : Наука, 1980. 183 с.
5. Башкуев Ю. Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1996.
6. Шауб Ю. Б. Кондуктометрия. Владивосток : Дальнаука. 1996.
7. Ершова М. Г., Кисин И. М., Эдельштейн К. К. Электропроводность и плотность пресных вод // Гидрология озер и водохранилищ. Ч. 2. М., 1975. С. 82–89.
8. Рудаков Е. С. Кондуктометрия. Новосибирск : НГУ. 1992.

References

1. Gortikov V. M. Trudy Zap. Sib. Gos. Hidrologicheskogo Inst. 1936, Vol. 15, pp. 154–168.
2. Nastoyashchee i budushchee Baikalskogo regiona (The present and future of the Baikal region). Ch. 1, Novosibirsk, Studiia Dizain INFOLIO, 1996, pp. 33.
3. Bashkuev Yu. B., Khaptanov V. B., Angarkhaeva L. Kh., Buyanova D. G. Geologiya i geophyzyka. 1993, № 9, pp. 118–126.
4. Informatsionnaya osnova prognoza prirodnikh protsessov (Information basis for forecasting natural processes). Novosibirsk, Nauka, 1980, 183 p.
5. Bashkuev Yu. B. Elektricheskiye svoystva prirodnikh sloistyk sred (Electrical properties of natural layered media). Novosibirsk. Izd-vo SO RAN, 1996. 207 s.
6. Shaub Yu. B. Konduktometriya (Conductometry). Vladivostok, Dal'nauka, 1996, 488 p.
7. Ershova M. G., Kisin I. M., Edelshtein K. K. Hidrologia ozer i vodokhranilishch, Ch. 2. Moscow, 1975, pp. 82–89.
8. Rudakov E. S. Konduktometriya (Conductometry). Novosibirsk, NGU, 1992, 45 p.

© Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г.,
Буянова Д. Г., Ангархаева Л. Х., 2013

УДК 621.391.81+550.83

РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОИМПЕДАНСНОГО И ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ СРЕДНЕГО БАЙКАЛА*

В. Б. Хаптанов, Ю. Б. Башкуев, Д. Г. Буянова

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: valery433210@rambler.ru

Рассмотрены результаты радиофизической томографии разломов сейсмоактивной Байкальской рифтовой системы в районе среднего Байкала. Определены электрофизические свойства и строение слоисто-неоднородных горных пород по данным наземных радиоволновых измерений в ОНЧ–НЧ и ОБЧ–УВЧ-диапазонах. Георадарным методом выявлено тектоническое нарушение типа сброс под байкальскими дюнами в районе пляжа на курорте Горячинск.

Ключевые слова: радиофизическая томография, георадар, Байкальские дюны, тектоническое нарушение.

RESULTS OF RADIOIMPEDANCE AND GEO-RADAR SOUNDINGS OF THE COASTAL ZONE OF THE MIDDLE BAYKAL

V. B. Khaptanov, Yu. B. Bashkuev, D. G. Buyanova

Institute of Physical Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: valery433210@rambler.ru

The results of radio-physical tomography of faults of active tectonic Baikal rift system in the zone of the middle Baikal are considered. Electro-physical properties and structure of the stratified-inhomogeneous rocks by surface-wave measurements in VLF–LF and VHF–UHF bands are identified. By the geo-radar method it was revealed the tectonic hade fault under the Baikal dunes, in the area of the resort Goryachinsk beach.

Keywords: radio-physical tomography, geo-radar, Baikal dunes, tectonic fault.

* Доклад подготовлен при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 12-02-98002, № 12-02-98007 и Интеграционного проекта СО РАН № 11.

В последнее время вновь возрос интерес к радиофизическим методам дистанционной диагностики окружающей среды и проблемам электромагнитного окружения Земли, а также использованию данных по электромагнитному полю для изучения процессов в литосфере и выявления неоднородностей ее строения. Последний аспект имеет особое значение в плане разработки новых подходов как к поиску и разведке полезных ископаемых, так и задачам сейсмоэлектромагнетизма [1]. Возникающие при этом некорректные обратные задачи представляют собой обширное поле современного научного поиска. Необходимы и актуальны комплексные экспериментальные и теоретические работы, основанные на современных методах геофизической электродинамики. Применение радиоволновых методов диагностики среды, к которым можно отнести георадарное и радиоимпедансное зондирование позволяет уточнить положение зон тектонических нарушений, определить размеры зоны измененных пород и их электрофизические свойства.

Цель проведенного исследования – разработка радиофизического метода обследования тектонических разломов, перекрытых слоем эоловых песков, основанного на комплексировании радиоимпедансного и георадарного зондирования. Решались следующие задачи: а) определение удельного электрического сопротивления (УЭС) и толщины слоев сухих и увлажненных эоловых песков по частотной зависимости поверхностного импеданса; б) поиск и выделение зоны тектонического нарушения в области перехода «суша–вода» георадарным методом.

Проведено комплексирование методов ОНЧ–НЧ радиоимпедансного и СВЧ георадарного зондирования при изучении зоны перехода «суша–вода» в районе широкого распространения байкальских дюн. Георадарное зондирование выполнено георадаром «Око-2» с антенными блоками АБДЛ «Тритон», АБ-250, АБ-400 и АБ-700, имеющими центральные частоты спектра зондирующего импульса 50, 250, 400 и 700 МГц и глубины зондирования около 30, 7, 5 и 4 м соответственно [2]. Радиоимпедансное зондирование выполнено измерителем поверхностного импеданса ИПИ-300 на частотах радиостанций ОНЧ–НЧ

диапазона, принимаемых в районе исследования. При интерпретации радиоимпедансных зондирований использована программа «Импеданс» [3].

Георадарным методом выявлено тектоническое нарушение типа сброс под байкальскими дюнами в районе пляжа курорта Горячинск (рис. 1). На рис. 2 прерывистой линией обозначена линия сброса. Она определяется на радарограммах сменой характера слоистости разреза. Сброс проходит под острым углом к берегу на расстоянии от 190 (профиль 3) до 250 м (профиль 1). На радарограммах эоловые отложения представлены слоистыми, на отдельных участках с прослоями погребенной почвы, структурами (холмы и гряды) на глубинах от 1 до 5 м. Зона тектонического разлома, почти параллельная береговой линии, представлена слоистой толщей с коленообразным изгибом слоев горных пород в вертикальном направлении. Радарограммы также показывают динамику ветрового переноса эоловых песков и заполнения пониженных мест рельефа (рис. 3).

Определен геоэлектрический разрез байкальских дюн в районе курорта Горячинск. По результатам ОНЧ–НЧ радиоимпедансных зондирований эолово-прибрежно-озерных дюн с использованием полей радиостанций на частотах 22,2, 50, 180, 279 кГц выявлена 2-слойная структура песков: сухих – толщиной 5–7 м с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 3 000–4 300 Ом · м и влажных – толщиной 20–25 м с УЭС 300–600 Ом · м, которые залегают на кристаллических породах с УЭС от 1000 до 1300 Ом · м (рис. 4). Радиоимпедансные зондирования показали трехслойную структуру геоэлектрического разреза типа $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, проявившуюся в сильно-индуктивном поверхностном импедансе на частоте 279 кГц (фаза импеданса достигает 56 град). Наличие верхнего слоя сухих эоловых песков с очень высоким УЭС (от 3 000 до 4 300 Ом · м) очень благоприятно для проведения георадарного зондирования на частотах 50–1700 МГц. Низкая электропроводность сухих эоловых песков в байкальских дюнах (хороший природный сыпучий диэлектрик) может быть использована в бальнеологических целях при лечении пациентов на курорте Горячинск.

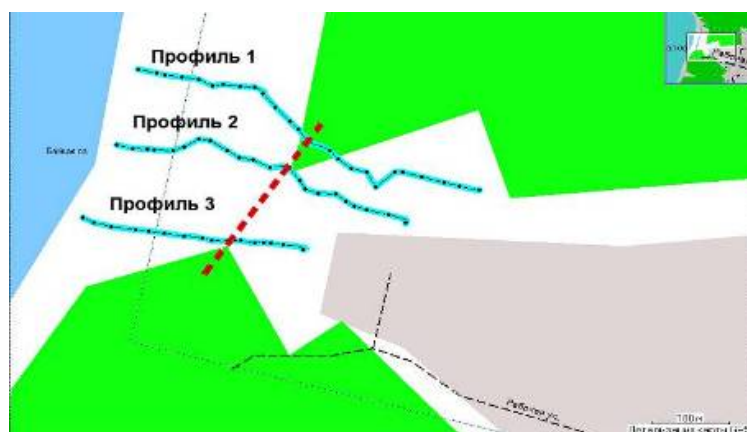


Рис. 1. Георадарные профили 1, 2, 3 на байкальских дюнах. п. Горячинск. Красным пунктиром показано положение выявленного тектонического нарушения

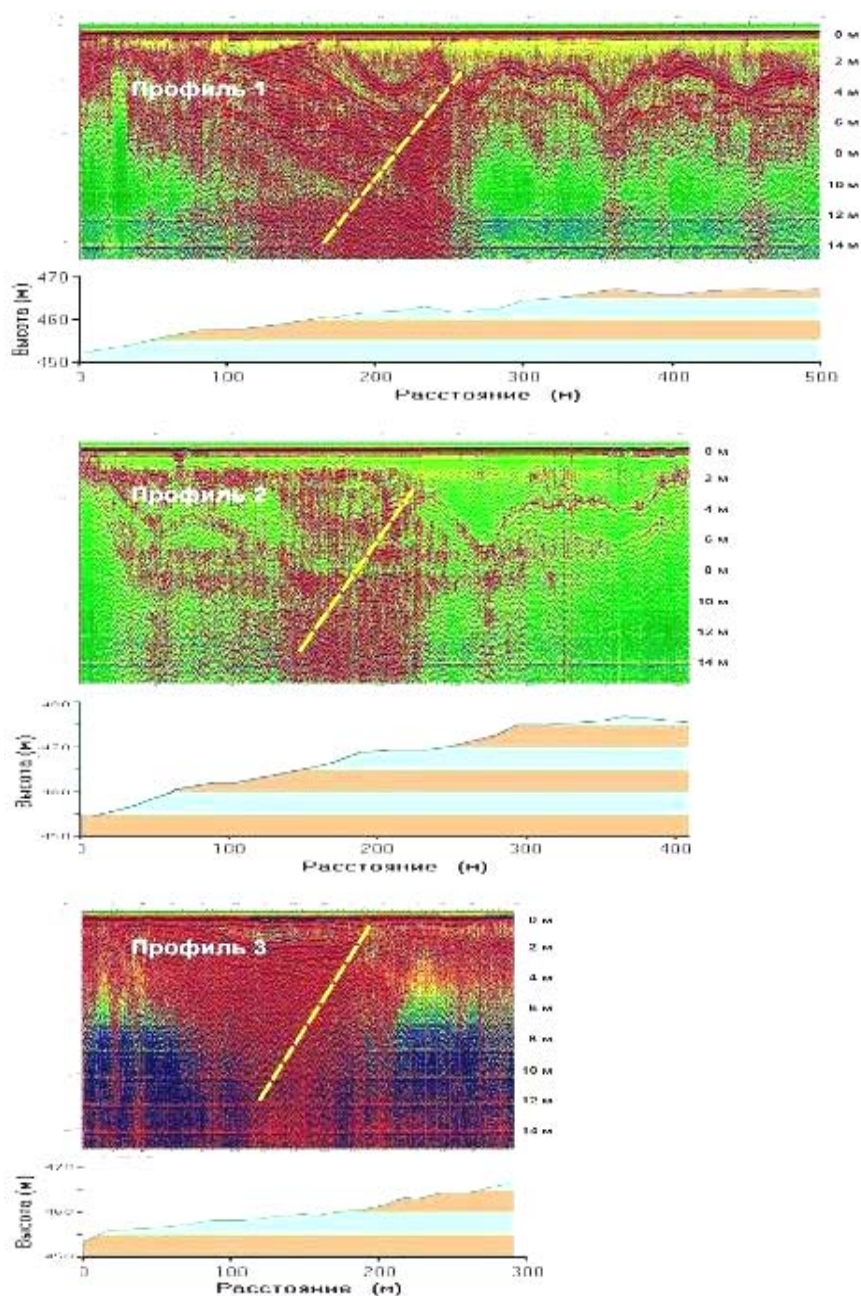


Рис. 2. Радарограммы трех смежных профилей от берега Байкала с рельефом. Георадар «Око-2». Антенный блок АБ-250

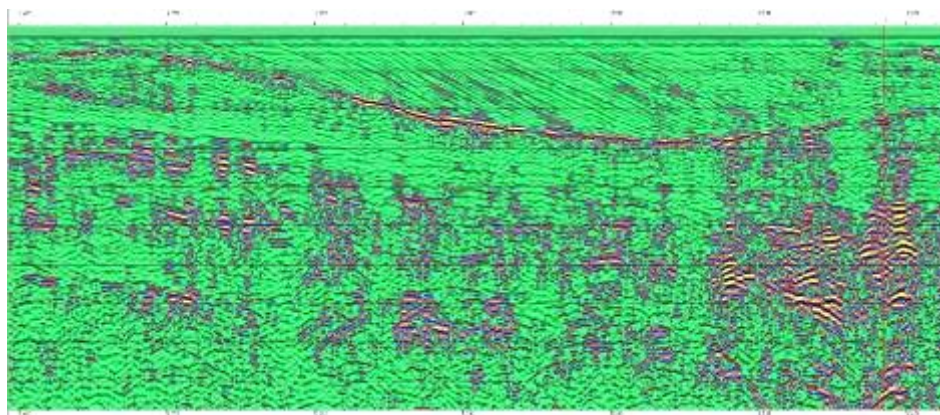


Рис. 3. Фрагмент радарограммы, показывающий динамику изменения рельефа дюн

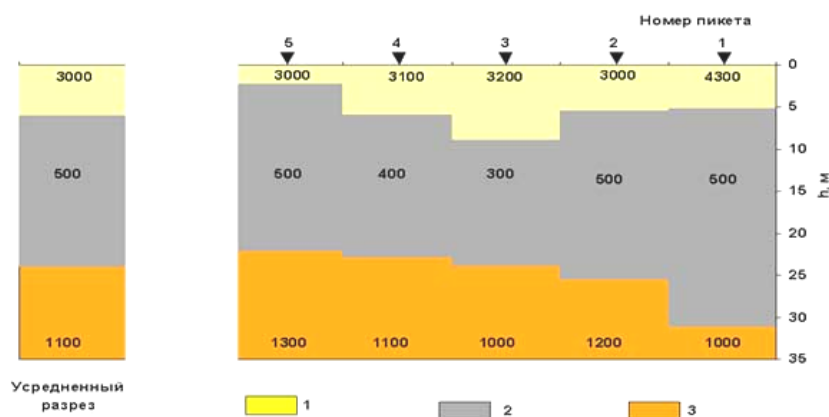


Рис. 4. Результаты радиоимпедансного зондирования байкальских дюн: геоэлектрический разрез, обозначения: 1 – сухой песок; 2 – влажный песок; 3 – кристаллические породы. Слева – усредненный разрез дюн

Предложен радиофизический метод обследования тектонических разломов, перекрытых слоем эоловых песков, основанный на комплексировании радиоимпедансного и георадарного зондирования. На широко распространенных на берегах Среднего Байкала дюнах проведена количественная интерпретация слоисто-неоднородной среды в ОНЧ-НЧ и ОВЧ-УВЧ диапазонах на глубину до 100 м. Определены УЭС и толщины слоев эоловых песков. Комплексная интерпретация георадарного и радиоимпедансного зондирования позволила определить геометрию зоны разлома.

Библиографические ссылки

1. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э. Л. Афраймович и др. ; отв. ред. Г. А. Жеребцов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012.
2. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «Око-2» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.logsys.ru/>.
3. Ангархаева Л. Х. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002620893.

Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования. М. : Роспатент, 2002.

References

1. Afraimovich E. L. et al. Seismoionospheric and seismoelectromagnetic processes in the Baikal rift zone (Seismoionospheric and seismoelectromagnetic processes in the Baikal rift zone). Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2012, 304 p.
2. Radiotekhnicheskii pribor podpoverkhnostnogo zondirovaniya (georadar) OKO-2 (Radio Engineering of subsurface sensing device (GPR) OKO-2). Available at: <http://www.logsys.ru/>.
3. Angarkhaeva L. Kh. Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programmy dlya EVM № 2002620893. Paket programm "Impedans" dlya reshenia zadach radioimpedansnogo zondirovaniya (The certificate of official registration of the computer number 2002620893. The software package "Impedance" to solve problems Radioimpedance sensing). Moscow, Rospatent, 06.06.2002.

© Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г., 2013

УДК 551.507:550.34

ОБНАРУЖЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ И ТРОПОСФЕРНЫХ ОТКЛИКОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

А. С. Григорьев, В. Б. Кашкин

Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: rtcvbk@rambler.ru

Обнаружено проявление акустических и внутренних гравитационных волн в тропосфере в период повышенной сейсмической активности. Проведено сравнение влияния сейсмического события на тропосферу и ионосферу. Результаты могут быть использованы для кратковременных прогнозов землетрясений.

Ключевые слова: тропосфера, волны в тропосфере, профили атмосферы, пассивная локация, зондирование атмосферы, прогноз землетрясений.

DETECTION OF IONOSPHERE AND TROPOSPHERE RESPONSE TO SEISMIC ACTIVITY ACCORDING TO SATELLITE DATA

A. S. Grigoriev, V. B. Kashkin

Siberian Federal University
79 Svobodny prospect, 660041, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: rtcvbk@rambler.ru

The authors present a review of the detected show of the acoustic and inner gravitational waves in troposphere during increased seismic activity. The comparison of seismic impact on the troposphere and ionosphere is made. The results obtained can be used for short-term earthquake prognosis.

Keywords: troposphere waves, atmosphere profiles, passive location, satellite data, earthquake prognosis

Атмосфера является чувствительным индикатором различных возмущений на поверхности и в недрах Земли. Атмосфера имеет слоистую структуру, атмосферное давление и плотность воздуха постепенно убывают с высотой. При подъеме в тропосфере температура уменьшается до высоты 10–12 км, в стратосфере температура, наоборот, увеличивается с высотой. Между тропосферой и стратосферой на высоте 12–18 км лежит слой с практически постоянной температурой – тропопауза. С высоты около 50 км температура уменьшается вновь и достигает минимума в мезосфере. Выше 60 км находится ионосфера [1].

В настоящее время важным методом исследования ионосферы стала радиофизическая технология, использующая сигналы спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS и навигационную аппаратуру потребителей [2]. В Сибирском федеральном университете для приема сигналов используется двухчастотная аппаратура МРК-33 собственной разработки.

В отечественной и зарубежной литературе опубликовано большое число работ по влиянию на ионосферу наземных и подземных взрывов, цунами, изменения давления и температуры в нижней части атмосферы. В сейсмически активных регионах с выраженным блоковым строением земной коры при подготовке и при возникновении землетрясения возбуждаются интенсивные сейсмо-гравитационные колебания, имеющие период до 1–3 ч. Воздействуя на атмосферу в вертикальном направлении подобно поршню большой площади, эти колебания также способны возбуждать акустические гравитационные волны (АГВ) [2].

Возникает и другое явление – генерируются внутренние гравитационные волны (ВГВ). Аналогичные волны встречаются в стратифицированных водах океанов, морей и крупных озер [3]. Описаны и изучены проявления АГВ и ВГВ при землетрясениях в верхней атмосфере – возмущения в ионосфере и серебристые облака в мезосфере [2; 3].

Менее исследовано влияние сейсмических событий на тропосферу. Известны, например, необычные облачные структуры, связанные с землетрясениями [4]. Авторы настоящей статьи по спутниковым данным впервые наблюдали характерные проявления АГВ и ВГВ в тропосфере при сейсмических событиях, результаты опубликованы в [5].

С борта космического аппарата средствами пассивной локации в микроволновом и ИК диапазонах возможно определять вертикальные профили темпе-

ратуры, давления, влажности, направление и скорость геострофического ветра в тропосфере и тропопаузе [4]. Для этого используется аппаратура Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS), установленная на космических аппаратах NOAA и METOP [6] и аналогичная аппаратура на российских спутниках ДЗЗ. Данные ATOVS доступны в реальном времени для станций, принимающих сигналы спутников в режиме HRPT, в СФУ для этого используется станция АЛИСА [7], прием возможен два раза в сутки. При восстановлении профилей решается обратная задача, используется пакет прикладных программ IAPP [8]. По вертикали профили привязаны к уровням давления. Такие же профили тропосферы помещают на сайте NOAA Air Resources Laboratory на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе в виде многомерных временных рядов с глобальным охватом. Ряды содержат выборку данных о температуре, точке росы и геострофическом ветре на 16 изобарических уровнях – от 1000 гПа до 20 гПа с шагом в 3 часа [9]. Пользователям Интернет данные доступны с задержкой в 6 часов относительно времени наблюдения. В настоящей работе использованы оба источника информации.

27 декабря 2011 г. в Восточной Сибири, в Республике Тува (Алтае-Саянская сейсмическая область), произошло землетрясение магнитудой $M = 6,6$, координаты эпицентра $51,86^\circ$ с. ш. и $95,92^\circ$ в. д. 27 и 28 декабря наблюдались афтершоки с $M = 4,6-4,7$ [10]. Следующее сильное землетрясение в том же районе произошло 26 февраля 2012 г. в 06:17 UTC, с $M = 6,5$. Динамика температуры за декабрь 2011 г. – февраль 2012 г. на двух изобарических уровнях 200 и 400 гПа показана на рис. 1.

В событиях конца 2011 г. – начала 2012 г. можно выделить несколько этапов. Первый – это относительно затишье, с 1 по 22 декабря. В этот период коэффициент корреляции между рядами температуры на изобарических уровнях 200 и 400 гПа составил $R = -0,176$, здесь трудно говорить о статистической зависимости между температурными рядами.

Однако уже с 23 декабря по 8 апреля коэффициент корреляции между рядами стал равным $R = -0,695$. С 3 по 29 января графики на рис. 1 почти зеркально отображают друг друга, $R = -0,92$. По-видимому, начиная с 23 декабря, возникли подвижки земной коры, возбуждившие противофазные колебания на двух изобарических уровнях в тропосфере. Объяснить это явление можно на примере из гидрофизики [11].



Рис. 1. Динамика температуры в период Тувинского землетрясения

В океане ветер может возбуждать поверхностную волну. Океан стратифицирован — в нем возникают слои с границами раздела. Пусть поверхностная волна совершает движение вверх и вниз. Там, где расположен гребень поверхностной волны, на границе раздела возникает некоторое избыточное давление, там, где подошва волны, появляется разрежение. Вода слабо сжимаема. Поэтому ниже границы под гребнем давление должно уменьшиться, под подошвой волны — увеличиться. Таким образом, ниже границы возникает колебательное движение частиц воды вверх и вниз, которое противофазно по отношению к поверхностной волне. Это движение представляет собой внутреннюю гравитационную волну в океане.

Колебания температуры при 400 гПа, которые можно видеть на рис. 1, есть результат воздействия акустической гравитационной волны на атмосферу. Такие колебания аналогичны упомянутой поверхностной волне в океане [11]. В нашем случае выше уровня 400 гПа лежит тропопауза — граница раздела. Уровень 200 гПа попадает в тропопаузу, колебания температуры при 200 гПа — не что иное, как проявление внутренней гравитационной волны. Здесь физика явления аналогична рассмотренному выше примеру [11].

Источниками АГВ могут быть процессы при обтекании ветром неровностей земной поверхности, колебания приповерхностной температуры и давления [3]. Волны на рис. 1 получены путем выборки с шагом в 3 ч. Таким образом, рис. 1 — это результат регистрации моды с частотой ниже $2,6 \cdot 10^{-5}$ Гц. Такие частоты могут возбуждаться при длиннопериодных колебаниях поверхности Земли в сейсмически-опасных районах.

Представляет интерес сравнение реакции ионосферы и тропосферы при Тувинском землетрясении 27 декабря 2011 г. График вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере и график изменения температуры на двух изобарических уровнях при землетрясении в Туве, момент основного толчка отмечен вертикальной линией. Исследование реакции ионосферы выполнено в СФУ И. Н. Сушкиным приведен на рис. 2.

Вариации ПЭС возникли за два дня до основного толчка. По сравнению с вариациями ПЭС, изменения

температуры на графике выглядят сильно сглаженными. Вероятнее всего, что реальные изменения температуры также достаточно быстрые, но большой шаг выборки данных по температуре не позволил их заметить.

Катастрофическое землетрясение в Японии в марте 2011 г. магнитудой $M = 9$ является самым разрушительным в XXI в. После главного удара 11 марта с $M = 9$ продолжались афтершоки, наиболее сильный пришелся на 11 апреля с магнитудой $M = 7$ [12].

Нами были использованы спутниковые данные о вертикальных профилях температуры-давления из [10]. Для анализа выбрана точка с координатами 38° с. ш. 142° в. д. вблизи эпицентральной области землетрясения.

На рис. 3 приведен график изменения температуры атмосферы на изобарических уровнях 450 и 200 гПа в период с 1 февраля по 14 апреля 2011 г. Стрелкам отмечены моменты землетрясений 11 марта и афтершока 11 апреля. Было установлено, что уровень 450 гПа лежит ниже тропопаузы, а уровень 200 гПа попадет в тропопаузу. Обращает на себя внимание значительная амплитуда колебаний температуры на каждом уровне. Коэффициент корреляции между рядами температуры на изобарических уровнях 200 и 400 гПа равен $R = -0,76$.

12 февраля появились два кратковременных «выброса» температуры на уровнях 450 и 200 гПа (на рис. 3 показаны в кружке). В 18:00 UTC температура на уровне 400 гПа уменьшилась по сравнению с тем же временем 11 февраля, на $13,3^\circ$, а на 200 гПа — возросла на $9,1^\circ$. По-видимому, 12 февраля, во время подготовки основного толчка, из эпицентральной области в атмосферу поступили ударно-акустические колебания, вызванные подвижками земной коры и возбуждившие АГВ и ВГВ. Эти выбросы можно рассматривать как предвестники главного удара, как и похожие колебания температуры 2, 7 и 10 марта.

Результаты измерений ATOVS привязаны к уровням давления. Как функции давления, на рис. 4 показаны средний профиль температуры за ноябрь 2010 — апрель 2011 гг. над эпицентральной областью землетрясения и профиль 12 февраля 2011 г., 18:00 UTC.

Профиль 12 февраля пересекает уровень -42° дважды, что отвечает двум разнонаправленным пикам в кружке. Усредненный график имеет одну точку пересечения при 295 гПа, для него характерно монотонное убывание температуры на интервале от -0° до -60° С при уменьшении давления. График за 12 февраля

расщепился на две ветви – правая характеризует связь температуры и давления для АГВ, а левая – для ВГВ. АГВ вызвала увеличение давления на 144 ± 5 гПа относительно 295 гПа при -42° . Это привело к возбуждению ВГВ, в которой, наоборот, давление уменьшилось на 115 ± 5 гПа.

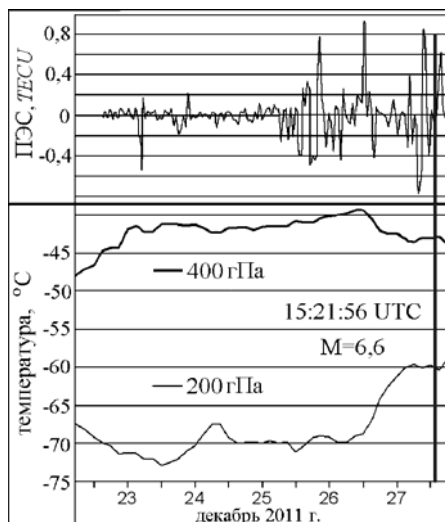


Рис. 2. График вариаций ПЭС и изменения температуры



Рис. 3. Изменение температуры на изобарических уровнях 200 и 450 гПа, землетрясение в Японии, 2011 г.

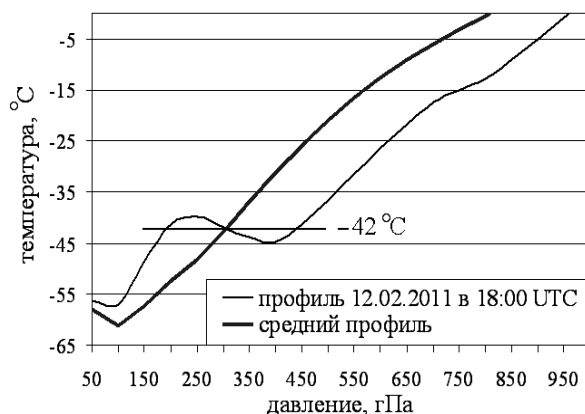


Рис. 4. Профили температуры

Представленные в работе результаты демонстрируют тропосферные эффекты, связанные с сейсмической активностью, которые могут быть использованы для кратковременных прогнозов крупных землетрясений совместно с известными предвестниками сейсмической опасности. Эти результаты показывают также возможность визуализации акустических гравитационных волн и внутренних гравитационных волн в тропосфере с использованием данных зондирования атмосферы с космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1984.
2. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ ЗВХ ВСНЦ СО РАН, 2006.
3. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. М. : Мир, 1978.
4. Кашкин В. Б., Симонов К. С. Космический мониторинг: атмосферные отклики сильных землетрясений, обнаруживаемые космическими средствами дистанционного зондирования Земли // Инженерная экология. 2011. № 2 (98). С. 38–54.
5. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М. : Логос, 2001.
6. Technical Documentation Introduction Page [Electronic resource]. URL: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>.
7. Персональные станции приема, хранения и обработки изображений Земли из космоса – основная продукция Инженерно-технологического центра СканЭкс [Электронный ресурс]. URL: <http://scanex.ru/ru/stations>.
8. Index of /opsats/polar/iapp [Electronic resource]. URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>.

9. READY Current & Forecast Meteorology. Forecast Model Graphics [Electronic resource]. URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html>.

10. The old maps and event pages have been replaced [Electronic resource]. URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0007dax.php>.

11. Шулейкин В.В. Физика моря. М. : Наука, 1968.

12. News & Comment [Electronic resource]. URL: <http://www.nature.com/nature>.

References

1. Matveev L. T. Fizika atmosfery (Physics of the Atmosphere). Leningrad, Hidrometeoizdat, 1984. 752 p.
2. Afromovich E. L., Perevalova N.P. GPS-monitoring verkhney atmosfery (GPS-Monitoring of the earth's Upper Atmosphere). Irkutsk, RAS Institute of Solar-Terrestrial Physics, 2006. 480 p.
3. Gossard E. E., Hooke W. H. Waves in the Atmosphere. Elsevier, Oxford-New York, 1975.
4. Kashkin V. B., Simonov K. S. Inzhenernaya Ekologiya (Engineering Ecology), 2011, № 2, pp. 38–54.
5. Kashkin V. B., Sukhinin A. I. Distantionnoye zondirovanie Zemly iz kosmosa. Cifrovaya obrabotka izobrazheniy (Remote sensing. Image Processing). Moscow, Logos, 2001. 264 p.
6. Available at: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>
7. Available at: <http://scanex.ru/ru/stations>
8. Available at: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>.
9. Available at: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html>
10. Available at: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0007dax.php>
11. Shuleykin V. V. Fizika Morya (Sea Physics). Moscow, Nauka, 1968. 1090 p.
12. Available at: <http://www.nature.com/nature>.

© Григорьев А. С., Кашкин В. Б., 2013

УДК 551.501:537.874.34

ТРОПОСФЕРНАЯ ЗЕНИТНАЯ ЗАДЕРЖКА ПО ДАННЫМ GPS-СТАНЦИЙ ULAZ, IRKT И BADG*

Ю. Б. Башкуев¹, М. Г. Дембелов¹, А. В. Лухнев², В. А. Саньков²

¹Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

²Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128. E-mail: mdembelov@yandex.ru

На основе многолетних измерений радиосигналов на сети постоянно действующих GPS станций ULAZ, IRKT и BADG, разнесенных на расстояние до 230 км, получены оценки тропосферной зенитной задержки (ТЗЗ), определяемой при обработке первичных GPS данных с помощью программного пакета GAMIT. ТЗЗ отражает вариации различных атмосферных процессов. Проведен детальный анализ данных GPS станции ULAZ, полученных за период с 1999 по 2010 гг.

Ключевые слова: GPS, тропосферная зенитная задержка, атмосферные процессы.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ-Сибирь № 12-05-98051 и интеграционного проекта СО РАН № 11.

TROPOSPHERE ZENIT DELAY ACCORDING TO GPS DATA OF ULAZ, IRKT AND BADG STATIONS

Yu. B. Bashkuev¹, M. G. Dembelov¹, A. V. Loukhnev², V. A. Sankov²

¹Institute of Physical Materials Sciences of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia

²Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch Russian Academy of Sciences
12 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: mdembelov@yandex.ru

Estimations of the zenith troposphere delay (ZTD) detected at primary GPS data processing using GAMIT program are received on the base of multiyear measurements of radio signals on a net of regular GPS stations of ULAZ, IRKT and BADG spaced out up to 230 km. ZTD reflects variations of different atmosphere processes. The detailed analysis of GPS data of the ULAZ station for the period of 1999–2011 is presented.

Keywords: GPS, troposphere zenith delay, atmosphere processes.

Развитие радиофизических методов для глобального изучения радиоклимата и условий радиосвязи в атмосфере Земли с помощью высокостабильных сигналов спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и других) является актуальным направлением междисциплинарной темы «Фундаментальные проблемы естественных и искусственных электромагнитных полей Земли». Дистанционное зондирование с использованием GPS и ГЛОНАСС радиосигналов позволяет определить характеристики тропосферы [1]. Возникающие из-за тропосферной рефракции погрешности в РСА данных ограничивают возможности радарной интерферометрии при высокоточных определениях геофизических и геометрических параметров [2].

Цель работы – проанализировать данные GPS станций ULAZ, IRKT и BADG, полученные за период с 1999 по 2011 гг. и показать возможности исследования тропосферы с помощью системы наземных GPS – ГЛОНАСС приемников, разнесенных в пространстве [3]. Совместно с ИЗК СО РАН проведен анализ данных GPS приемника ULAZ в части определения ТЗЗ за 1999–2010 гг. ТЗЗ является одной из наиболее существенных поправок, которые учитываются при высокоточных геодезических расчетах по GPS данным. Определяемая с помощью программного пакета GAMIT ТЗЗ отражает вариации различных атмосферных процессов. ТЗЗ является суммой «сухой» или гидростатической (ТГЗ) и «влажной» (ТВЗ) составляющих. ТЗЗ изменяется примерно от 6 до 8 нс по времени (1,9–2,4 м или 10–12 фазовых циклов на частоте L1 = 1575,42 МГц) в зависимости от метеословий и местоположения. При уменьшении угла возвышения α тропосферная задержка увеличивается как косеканс α этого угла, поэтому задержка на частоте L1 с углом α в 20° может достигать от 30 до 36 циклов. Тропосферная задержка определяется коэффициентом преломления тропосферы $n = \sqrt{\epsilon} \approx 1 + (\epsilon - 1)/2$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость воздуха. При этом восприимчивость $k_3 = (\epsilon - 1)$ смеси сухого воздуха и водяного пара подчиняется закону аддитивности, т. е. равна сумме восприимчивости отдельных газов смеси, пропорциональных их парциальным давлениям. Закону аддитивности соответствует и широко

используемый в радиометеорологии индекс рефракции [4]

$$N = (n - 1) \cdot 10^5 = \frac{77.6}{T} p + \frac{3.73 \cdot 10^6}{T^2} e = N_T + N_e,$$

где N_T – индекс рефракции для сухого воздуха, зависящий от изменений температуры и давления воздуха, N_e – индекс рефракции для водяного пара, T – абсолютная температура, К; p – атмосферное давление, мбар; e – упругость водяного пара, мбар (1 мбар = 10^2 Н/м). Формула для N дает возможность определить индекс рефракции (коэффициент преломления), если известны температура, давление и упругость водяного пара в пункте приема GPS сигналов (рис. 1).

Для средних летних условий в г. Улан-Удэ $T = 290$ К; $p = 950$ мбар; $e = 12$ мбар. Для зимы $T = 253$ К; $p = 965$ мбар; $e = 1$ мбар. В районе г. Улан-Удэ в среднем у поверхности Земли $n = 1,000\,301\,4$ и $N = 301,4$. Из формулы для N следует, что ТЗЗ также является суммой «сухой» (ТГЗ) и «влажной» (ТВЗ) составляющих. Атмосферный водяной пар влияет на скорость распространения GPS сигналов. В целом «влажная» составляющая (ТВЗ) вносит значительно меньший вклад в ТЗЗ, особенно в зимний период. Ее вклад можно оценить отношением N_e / N_T , которое изменяется для г. Улан-Удэ от 0,02 зимой до 0,24 летом. Следовательно, «сухая» задержка ТГЗ составляет определяющую часть ТЗЗ, но исследование ТВЗ очень перспективно в климатологии. Временные ряды ТЗЗ и атмосферного давления на станции ULAZ за 2005–2010 гг. с устойчивым годовым ходом показаны на рис. 2.

Осенью, зимой и весной, когда сезонные параметры показателя преломления обладают значительной устойчивостью (особенно зимой), численные значения ТЗЗ имеют минимумы, примерно равные 2,2 м. Повышение давления зимой относительно лета составляет в среднем 20 мбар. При летнем уменьшении атмосферного давления всегда наблюдается увеличение ТЗЗ из-за относительно высокого влагосодержания воздуха. Летнее увеличение ТЗЗ связано с увеличением атмосферного водяного пара над пунктом GPS измерений, т. е. с увеличением ТВЗ. Однако в целом ТВЗ вносит значительно меньший вклад в ТЗЗ, особенно зимой. Если принять среднее значение ТГЗ равным 2,2 м, то добавка за счет ТВЗ в летнее время

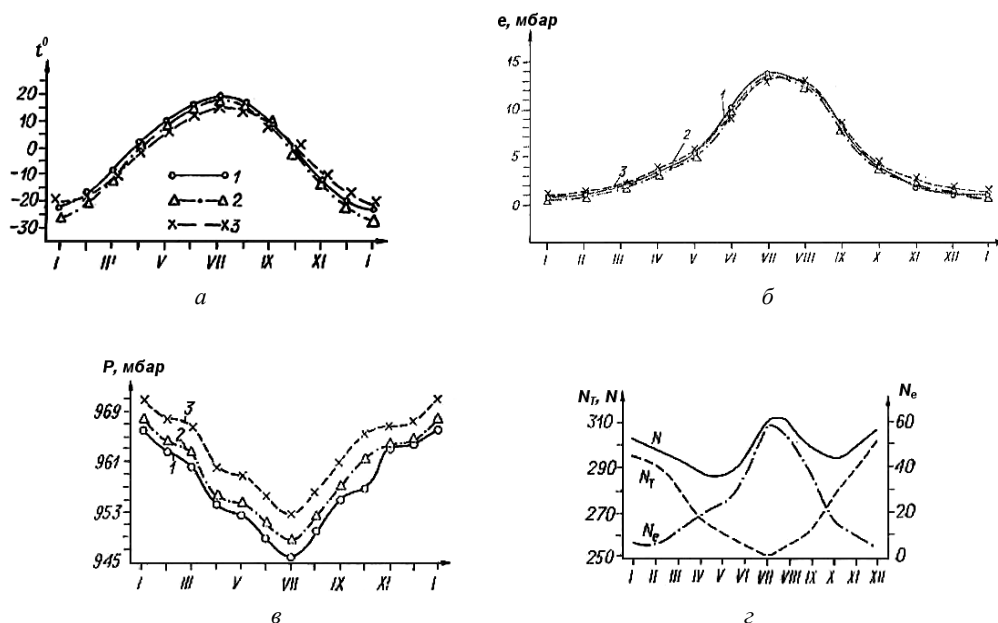


Рис. 1. Годовой ход:
 a – температуры; b – влажности; c – атмосферного давления по данным станций
 Гидрометслужбы Республики Бурятия (1 – ст. Улан-Удэ; 2 – ст. Баргузин;
 3 – ст. Усть-Баргузин); d – N_T и N_e по месяцам для г. Улан-Удэ

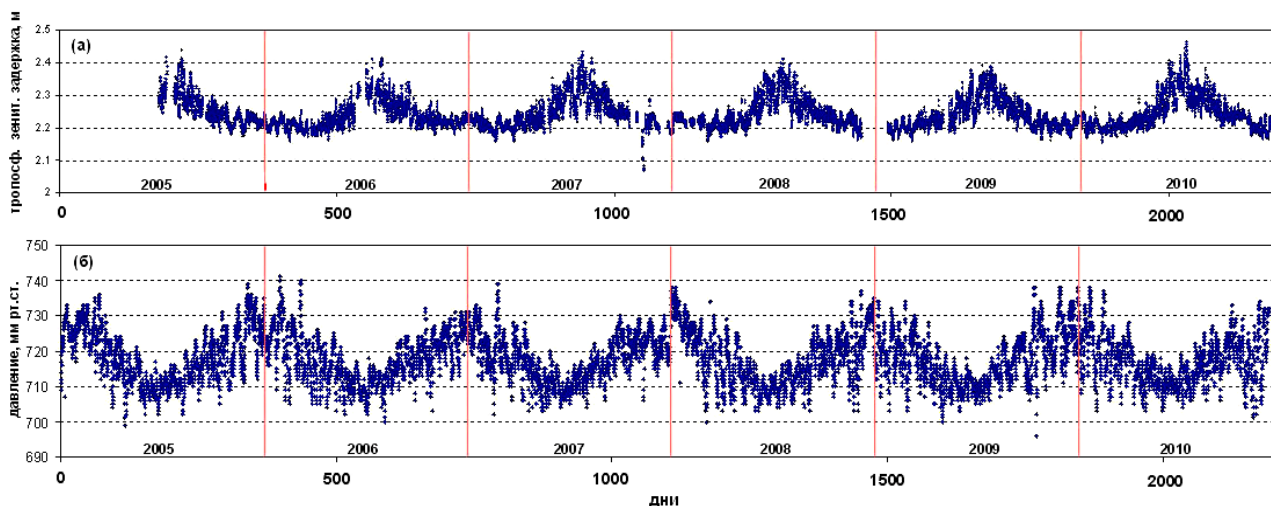


Рис. 2. Временные ряды тропосферной зенитной задержки (a) и приземного атмосферного давления (b) на станции ULAZ за 2005–2010 гг.

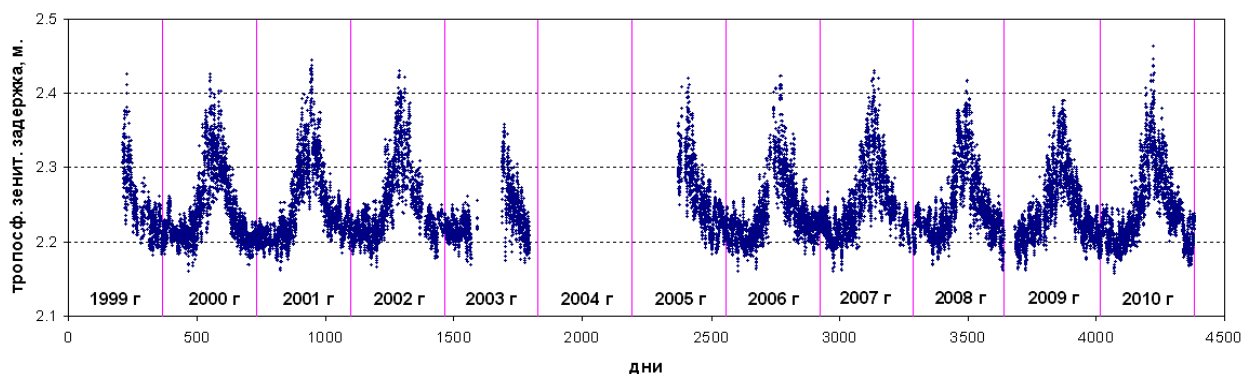


Рис. 3. Годовой ход ТЗЗ GPS станции ULAZ за 1999–2010 гг.

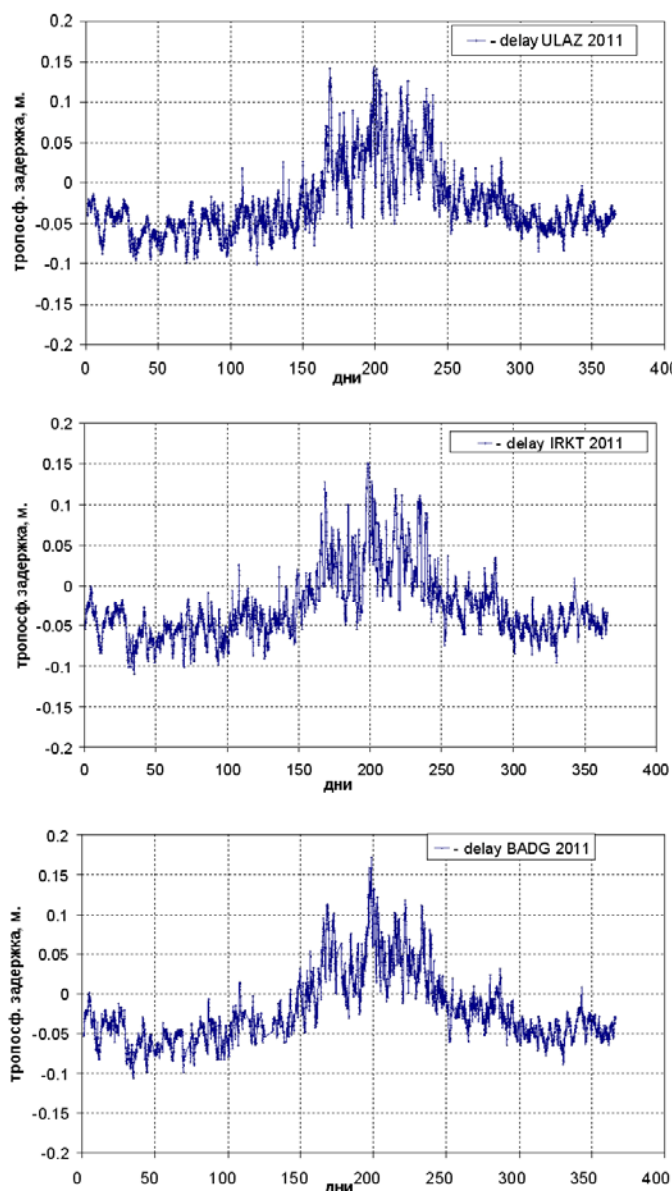


Рис. 4. Сравнение годового хода TB3 для GPS станций ULAZ, IRKT и BADG за 2011 г.

составит 0,2–0,27 м, т. е. не превышает (8–12) % от ТГЗ. Ряд ТЗЗ с июля 1999 г. по декабрь 2010 г. приведен на рис. 3. Сравнение TB3 для GPS станций ULAZ, IRKT и BADG за 2011 г. представлено на рис. 4. Отчетливо видна высокая степень корреляции TB3 между тремя станциями, разнесенными в пространстве до 230 км.

Таким образом, для GPS станции ULAZ на 11-летнем интервале времени определена ТЗЗ, которая изменялась в пределах 2,1–2,47 м. «Влажная» (TB3) составляющая достигает 0,27 м и определяется содержанием водяного пара в тропосфере. Многолетний ход TB3 характеризует климатические явления в регионе. Полученные результаты позволяют построить региональную пространственно-временную модель ТЗЗ и определить вариации трехмерных полей содержания водяного пара с помощью сетей наземных GPS приемников [3].

Библиографические ссылки

1. Калинин В. В., Хуторова О. Г., Тептин Г. М. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 705–713.
2. Atmospheric delay analysis from GPS meteorology and InSAR APS / S. Cheng, D. Perissin, H. Lin, F. Chen // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. Vol. 86. P. 71–82.
3. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э. Л. Афраймович [и др.] ; под ред. Г. А. Жеребцова. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012.
4. Цыдыпов Ч. Ц. Распространение ультракоротких радиоволн в гористой местности. Новосибирск : Наука, 1977.

References

1. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G., Teptin G. M. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2012. Vol. 48, no. 6, p. 705–713.
2. Cheng S., Perissin D., Lin H., Chen F. Atmospheric delay analysis from GPS meteorology and InSAR APS, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, vol. 86, pp.71–82.
3. Afraimovich E. L. [and oth.] Seismoionosfernye i seismoelektromagnitnye processy v Baikal'skoy riftovoy zone (Seismoionosfernye seismoelektromagnitnye and processes in the Baikal Rift Zone). Edited by G. A. Zherebtsov. Russ. Acad. of Sciences, Siberian Div., Inst. of Solar-Terr. Physics. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2012. 304 p.
4. Tsydypov Ch. Ts. Rasprostraneniye ultrakorotkih radiovoln v goristoy mestnosti (Distribution of ultrashort radio waves in the mountainous terrain). Novosibirsk, Nauka, 1977, 208 p.

© Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г.,
Лухнев А. В., Саньков В. А., 2013

УДК 537; 629.784; 533.95

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ПЛАЗМА-ПРОГРЕСС» И «РАДАР-ПРОГРЕСС»*

В. В. Хахинов, А. П. Потехин, В. П. Лебедев, Д. С. Кушнарев, С. С. Алсаткин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а. E-mail: khakhin@iszf.irk.ru

Проведены активные космические эксперименты по исследованию возмущений в ионосфере, генерируемые выхлопными газами двигателей космических аппаратов. Основные результаты, полученные методом некогерентного рассеяния, показали, что небольшие массы выхлопных газов вызывают снижение электронной концентрации до 40 % в областях с размерами десятки километров и временами существования до 20 минут.

Ключевые слова: ионосфера, электронной концентрация, активные космические эксперименты, космические аппараты, Иркутский радар некогерентного рассеяния

SOME RESULTS OF "PLASMA-PROGRESS" AND "RADAR-PROGRESS" ACTIVE SPACE EXPERIMENTS

V. V. Khakhinov, A. P. Potekhin, V. P. Lebedev, D. S. Kushnarev, S. S. Alsatkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Russian Academy of Sciences Siberian branch
126a Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: khakhin@iszf.irk.ru

We carried out active space experiments for studying ionospheric disturbances generated by spacecraft engine exhaust. Incoherent scatter results showed that the small mass of the exhaust gases causes a decrease in the electron density up to 40 % with tens of kilometers in sizes and with up to 20 minutes in lifecycle.

Keywords: ionosphere, electron density, active space experiments, spacecraft, Irkutsk incoherent scatter radar.

Начиная с 2007 г. ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» и Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) проводят активные космические эксперименты (КЭ) «Радар-Прогресс» (до 2010 г. «Плазма-Прогресс») по исследованию пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений, генерируемые высокоскоростной выхлопной струей жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) транспортного грузового корабля (ТГК) серии «Прогресс». ТГК привлекаются к участию в КЭ в режиме автономного полета на высоте ~350–400 км

после отстыковки от международной космической станции. Используется наземный комплекс оптико-электронных и радиофизических инструментов ИСЗФ СО РАН. Основным исследовательским инструментом является Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [1].

Сеансы КЭ проводятся во время нахождения ТГК «Прогресс» в основном лепестке диаграммы направленности (ДН) ИРНР при определенном сочетании известных условий, таких как: гелио-геофизические обстановка, тип ЖРД, координаты ТГК, положение Солнца, направление скорости выхлопной струи ЖРД. К настоящему времени выполнено 12 сессий, в течение которых проведено 63 сеанса.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашения № 8388 и 8699) и РФФИ (гранты № 13-05-00456-а и 13-0200957-а).

Длительность пролета ТГК в основном лепестке ДН составляет 15–20 с. Включались или одновременно 8 двигателей причаливания и ориентации с суммарным расходом топлива 376 г/с или один сближающе-корректирующий двигатель (СКД) с расходом 1 кг/с. Длительность работы варьировалась от 5 до 11 с.

Направления скорости выхлопной струи: по направлению движения ТГК («на торможение»); против направления движения ТГК («на ускорение»); на север в плоскости местного горизонта ТГК («на север»); навстречу радиолучу ИРНР («на РНР»).

С целью восстановления фоновых значений ионосферы ИРНР включается за несколько часов до сеанса КЭ. Для исследования пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений вызванных высокоскоростной выхлопной струей ЖРД измерения на ИРНР продолжаются в течение нескольких часов после пролета ТГК. ИРНР работает в штатном режиме измерений высотного профиля электронной концентрации $Ne(h)$ методом некогерентного рассеяния [1].

Отличительной особенностью КЭ «Плазма-Прогресс» и «Радар-Прогресс» является слабое техногенное воздействие на ионосферную плазму. В одном сеансе сжигается от 2 до 11 кг ракетного топлива. Выхлопная струя инжектируется в ионосферу на дуге орбиты ТГК до 90 км. Исследование отклика ионосферной плазмы на выбросы малых масс выхлопных газов представляет особый интерес. Изучаются процессы образования и эволюции, динамические характеристики искусственно создаваемых ионосферных возмущений в заданном месте и известное время. Результаты КЭ важны для разработки теоретических и математических моделей выхлопной струи ЖРД, процессов взаимодействия ее с ионосферной плазмой, проверки самих ионосферных моделей.

Уже первые сеансы КЭ «Плазма-Прогресс» выявили значимые эффекты воздействия малых масс выхлопных газов на ионосферную плазму [2]. После включения ЖРД в ионосфере образуется область пониженной концентрации электронов, своеобразная

«дыра», которая увеличивается по мере распространения продуктов выброса. Параметры «дыры» зависят от геометрии эксперимента, типа ЖРД, уровня фоновой концентрации электронов и массы инжектированных газов.

Наиболее эффективным для КЭ является направление выхлопной струи «на РНР», практически совпадающее с силовой линией геомагнитного поля. Например, 20.09.2007 г. при включении СКД с направлением выхлопной струи «на РНР» и расходом топлива 5,1 кг образовалась «дыра» с высоты орбиты ТГК (350 км) до 250 км с пониженной (до 40 % от фоновой) электронной концентрацией [2]. Время существования возмущения составило 20 мин.

Первые результаты КЭ показали прямую связь амплитуды возникающих неоднородностей от типа включаемого ЖРД: при включении более мощного СКД масштабы «дыры» были больше. Поэтому начиная с 2009 г. включается только СКД.

Результаты КЭ, полученные в 2008 и 2009 гг. подтвердили зависимость параметров «дыры» от уровня фоновой ионосферы. Это были годы затянувшегося минимума солнечной активности и низкого уровня фоновой $Ne(h)$. После включения ЖРД возникали очень слабые возмущения, регистрация которых затруднена из-за технических возможностей ИРНР.

Несколько неожиданным результатом стал тот факт, что в сеансах со схожими условиями КЭ (тип ЖРД, масса и направление инъекции выхлопных струй, время включения и длительность работы СКД) регистрировались совершенно разные по масштабам ионосферные возмущения. Обсудим это на примере проведенных измерений $Ne(h)$ в сентябре 2010 г., когда во всех сеансах направление выхлопных струй было «на север».

$Ne(h)$ до и после работы СКД представлены на рис. 1. Максимальное снижение электронной концентрации 1.09.2010 г. составило ~40 % (рис. 1, а) и ~30 % 4.09.2010 г. (рис. 1, б).

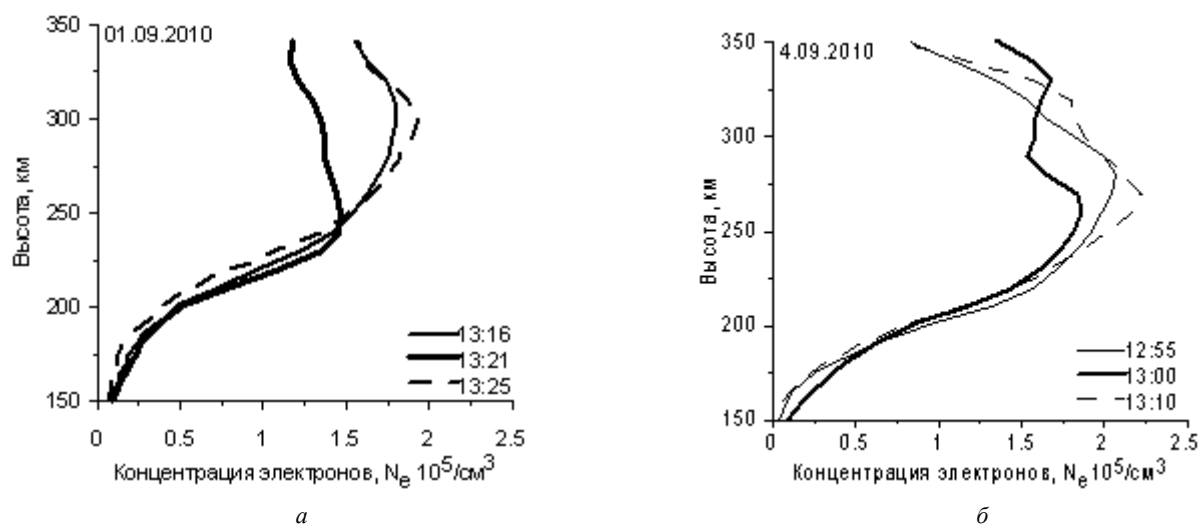


Рис. 1. Динамика $Ne(h)$ при включении СКД «на север»: а – в 13:20:02 UT, расход топлива 7,5 кг; б – в 12:59:30 UT, расход топлива 7,44 кг

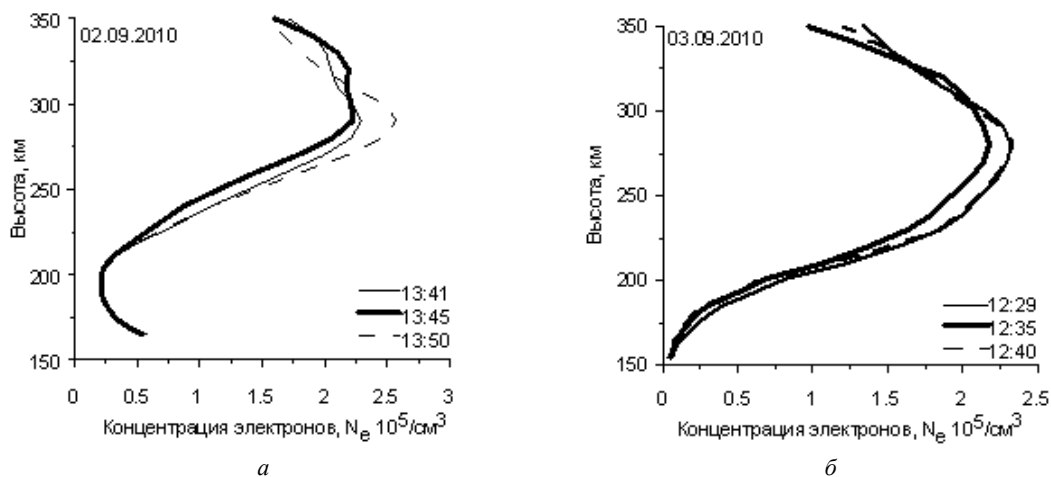


Рис. 2. Динамика $Ne(h)$ при включении СКД «на север»:
а – в 13:44:57 UT, расход топлива 7,0 кг; б – в 12:34:42 UT, расход топлива 7,44 кг

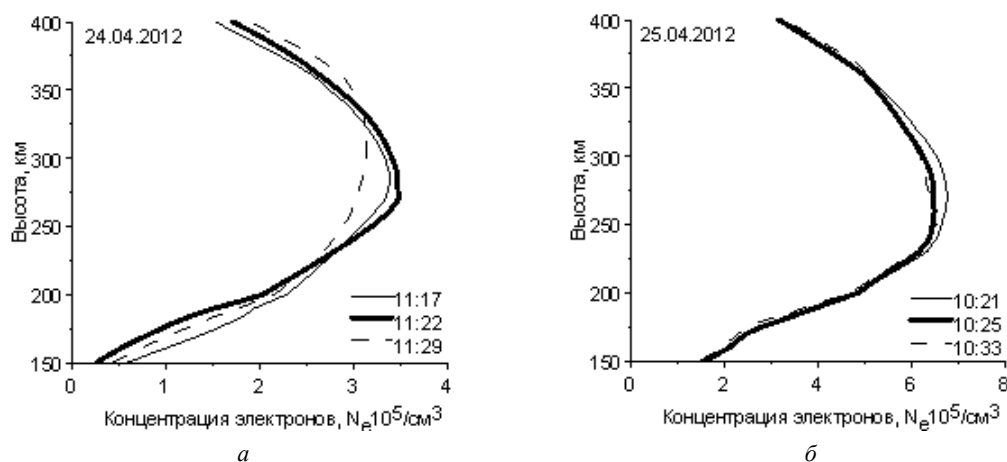


Рис. 3. Динамика $Ne(h)$ при включении СКД «на РНР»:
а – в 11:19:22 UT, расход топлива 9,0 кг; б – в 10:23:55 UT, расход топлива 9,0 кг

На рис. 2 представлены $Ne(h)$ при тех же условиях КЭ, что и на рис. 1. Различия между $Ne(h)$ до и после включения СКД лежат в пределах статистической погрешности измерений.

В последние годы условия проведения КЭ ухудшаются из-за постоянного подъема орбиты МКС, а значит и ТГК «Прогресс». Если в 2007 г. средняя высота орбиты составляла 340 км, то в марте 2013 г. ее подняли до 410,4 км. А высота расположения максимума электронной концентрации располагается на высотах от 250 до 350 км (315 км в сеансе 20.09.2007 г. и 280 км 24.04.2012 г.). Получается, что в последних сеансах КЭ СКД включается на высотах, где электронная концентрация в 1,5–2 раза ниже, чем максимальное значение $Ne(h)$. Вследствие этого регистрируются или слабые ионосферные возмущения, или их не удается диагностировать (рис. 3). По результатам 2012 г. принято решение перед проведением КЭ снижать орбиту ТГК до высот 300–350 км.

Результаты проведенных сеансов КЭ показали, что выбросы небольших масс выхлопных газов могут генерировать отрицательные возмущения электронной концентрации с размерами десятки км и временами

существования от 10 до 20 мин. Амплитуды вариаций параметров ионосферных возмущений достигали от 20 до 40 % от фоновых значений. Наблюдаемость и параметры возмущений зависят от гелио-геофизических условий, ионосферных процессов, массы и направления скорости выхлопных струй. Наибольшие масштабы ионосферных возмущений наблюдались в сеансах при включении более мощного СКД и направлением выхлопных струй «на РНР», почти параллельным магнитным силовым линиям.

Библиографические ссылки

1. Потехин А. П., Медведев А. В., Заворин А. В. и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования, 2008. Т. 46, № 4. С. 356–362.
2. Радиофизические методы диагностики ионосферных возмущений, генерируемые бортовыми двигателями ТГК «Прогресс»: алгоритмы, инструменты и результаты / В. В. Хахинов, А. П. Потехин, В. П. Лебедев и др. // Журнал Радиоэлектроники. 2010. С. 555–571.

References

1. Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V. et al. Kosmicheskie issledovaniya, 2008. Vol. 46, № 4, pp. 356–362.
2. Khakhinov V. V., Potekhin A. P., Lebedev V. P. et al. Zhurnal Radioelektroniki. 2010. P. 555–571. Available at: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/files/s2_35.pdf.

© Хахинов В. В., Потехин А. П., Лебедев В. П., Кушнарев Д. С., Алсаткин С. С., 2012

УДК 621.371.3; 621.376.3; 550.388.2

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ ЛЧМ-ИОНОЗОНДА*

С. Н. Пономарчук, В. П. Грозов, Г. В. Котович, С. Я. Михайлов

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, а/я 291.

E-mail: spon@iszf.irk.ru, grozov@iszf.irk.ru, kotovich@iszf.irk.ru, mikh@iszf.irk.ru

Рассмотрены методики и алгоритмы вторичной обработки и интерпретации ионограмм, получаемых на базе ЛЧМ-ионозонда, работающего в режиме вертикального и наклонного зондирования ионосферы (ВЗ и НЗ). Вторичная обработка экспериментальных ионограмм проводится на основе фильтрации исходных данных с последующим сжатием их методом клеточного автомата. Методика интерпретации ионограмм основана на использовании результатов моделирования частотных зависимостей характеристик распространения в режиме долгосрочного прогноза и результатов обработки экспериментальных данных. Разработан алгоритм восстановления профиля электронной концентрации по выделенным трекам ВЧХ.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, распространение радиоволн.

THE PROCESSING AND INTERPRETATION OF VERTICAL AND OBLIQUE SOUNDING IONOGRAMS FOR IONOSPHERE DIAGNOSTICS ON THE BASE OF CHIRP-IONOSONDE

S. N. Ponomarchuk, V. P. Grozov, G. V. Kotovich, S. Ya. Mikhailov

Institute of Solar-Terrestrial of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
P/O Box 291, Irkutsk, 664033, Russia.

E-mail: spon@iszf.irk.ru, grozov@iszf.irk.ru, kotovich@iszf.irk.ru, mikh@iszf.irk.ru

In the paper the authors consider techniques and algorithms for secondary processing and interpretation of ionograms obtained with the help of chirp ionosonde operating in vertical and oblique sounding mode (VS and OS). The secondary processing of experimental ionograms is carried out on the base of primary data filtering with subsequent compression with a help of cellular automaton technique. Ionogram interpretation methods is based on modeling results for frequency dependences of propagation characteristics in the regime of long-term forecast and on results of experimental data processing. We also develop the algorithm for electron concentration profile restoration on the base of HFC selected tracks.

Keywords: ionosphere, ionogram, radio wave propagation.

Ионосферные линии связи являются составной частью радиотехнических систем передачи информации, использующих для своей работы радиоволны дециметрового диапазона. Одним из эффективных средств исследования диагностических возможностей КВ-радиосредств и влияния космической погоды на условия распространения радиоволн является ЛЧМ-ионозонд [1]. Необходимым элементом системы диагностики и прогнозирования ионосферы и условий распространения радиоволн КВ-диапазона

является высокоэффективное программное обеспечение, использующее современные модели среды, усовершенствованные методы расчета характеристик сигналов и анализа экспериментальных данных в режиме, близком к реальному времени. Принципиальным является автоматизация процесса обработки, которая может быть решена при условии эффективного обнаружения сигнала на фоне помех и выделение его на ионограмме с последующей идентификацией.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашение № 8388) и грантов РФФИ (№ 13-05-00979-а, № 11-05-00892).

Методы и алгоритмы вторичной обработки.

Выделим основные моменты вторичной обработки. По результатам спектрального анализа формируется ионограмма. На ионограмме можно выделить три основных типа объектов: полезный сигнал, фоновый шум, сосредоточенные помехи, одиночные выбросы. Основной проблемой при решении задачи автоматической обработки ионограмм является выделение следов на ионограмме, удовлетворяющих некоторым критериям, с последующим определением точек со значимой амплитудой. Рассматривая ионограмму как сложное изображение, можно воспользоваться методами теории обработки изображений.

Вторичная обработка ионограмм сводится к решению двух самостоятельных задач:

а) проведению предобработки ионограмм для удаления шума с изображения и улучшения амплитудных характеристик;

б) сжатию данных, позволяющих провести существенное сокращение их объема без существенной потери полезной информации.

Предобработка ионограмм заключается в ее очистке от шумовых составляющих [2], т. е. необходимо выделить полезный сигнал на фоне шума и стационарных помех, а также удалить одиночные выбросы, которые имеют интенсивность, сравнимую с полезным сигналом и могут приводить к сбоям в работе алгоритмов определения параметров ионосферы. Анализ фильтров, используемых при обработке ионограмм, показал, что для удаления шума на изображении и восстановления отсчетов сигнала на этапе предобработки можно использовать локальные фильтры, построенных на порядковых и аддитивных статистиках, значения которых связаны с характеристиками обрабатываемого фрагмента.

Методика сжатия данных [2] применяется для выделения точек с значимой амплитудой, физически соответствующих величинам – моментам прихода сигнала по переднему фронту сигнала или максимуму амплитудного рельефа. Для отсева одиночных артефактов, частичного восстановления данных и выявления первичного трека на ионограмме эффективен механизм клеточного автомата. Клеточные автоматы – это дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется локальными взаимными связями элементов этих систем. Все пространство данных делится на элементарные ячейки, которые затем эволюционируют при дискретно идущем времени. Закон динамики такой системы выражается некоторым набором правил, по которым каждая клетка изменяет свое состояние в зависимости от состояния соседних, входящих в некоторую локальную область. Реализованный в программном комплексе алгоритм позволил достигнуть сжатия исходной информации до 5–10 раз в зависимости от уровня шума и диффузности [3].

Методика интерпретации ионограмм ВЗ. Методика интерпретации ионограмм ВЗ основана на использовании результатов моделирования высотно-частот-

ной характеристики (ВЧХ) в режиме долгосрочного прогноза (ДП) и результатов обработки экспериментальных ионограмм. Используя модели ионосферы, например, IRI как стандартный вариант модели ионосферы [4] или полуэмпирическую модель ПЭМИ [5], рассчитывается ВЧХ вертикального распространения.

Полученная вчх накладывается на экспериментальную ионограмму и используется для построения модельной маски. Далее, путем сканирования модельной маски по ионограмме, строится гистограмма совпадений модельных и реальных треков. Затем меняется наклон модельных треков и процесс сканирования повторяется. После завершения процесса, выбирается гистограмма с максимальным значением точек со значимой амплитудой, попадающих в модельную маску. В результате интерпретации ионограммы ВЗ формируется в виде треков высотно-частотная характеристика, по которой рассчитывается профиль электронной концентрации. Реализован вариант восстановления профиля $n(h)$ посредством развития метода Джексона численного решения интегральных уравнений с повышением точности метода в областях максимумов слоев (для критических частот отражения) и долин [6]. Результаты автоматической интерпретации ионограммы ВЗ показаны на рис. 1.

Методика интерпретации ионограмм НЗ. Методика основана на использовании результатов моделирования дистанционной частотной характеристики (ДЧХ) на заданной трассе в режиме долгосрочного прогноза, адиабатических соотношений и результатах обработки экспериментальных ионограмм: матрице точек со значимой амплитудой. $A(f_i, P_j)$.

Для задачи интерпретации ионограмм НЗ можно сформулировать следующие основополагающие предположения [7]. При вариациях параметров ионосферы в пределах погрешности долгосрочного прогноза сохраняются:

- отношение группового пути P_m в точке смыкания нижнего и верхнего лучей какого-либо мода к длине трассы;
- отношение максимальной применимой частоты (МПЧ) модов различных кратностей, распространяющихся в одном из волноводных каналов (нижней стенкой их является поверхность Земли, а верхней слой E, F1 или F2);
- ДЧХ одного мода, кратности l , на относительной сетке частот $\beta = f / f_{m,l}$, где $f_{m,l}$ – МПЧ мода для рассматриваемой дальности.

Алгоритм интерпретации ионограмм НЗ в автоматическом режиме строится следующим образом. Проводятся расчеты ДЧХ НЗ для данной трассы в режиме ДП. Исходя из этого, строится модельная маска для мода минимальной кратности слоя F, включающая в себя две полосы шириной ΔP км (по вертикали) и протяженностью по частоте от μf_m^p до f_m^p , где f_m^p – прогнозная МПЧ опорного мода, для нижнего луча, и протяженностью от νf_m^p до f_m^p – для верхнего луча.

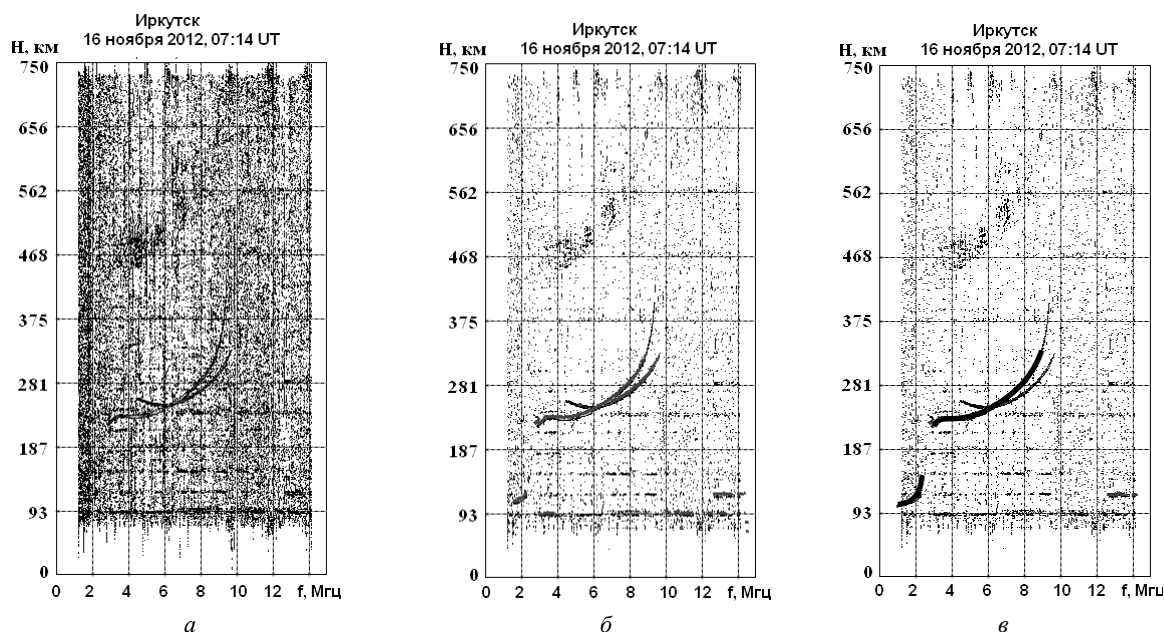


Рис. 1. Ионограмма ВЗ (а) и результаты вторичной обработки (б) и интерпретации (в), 16 ноября 2012 г., 07:14 UT

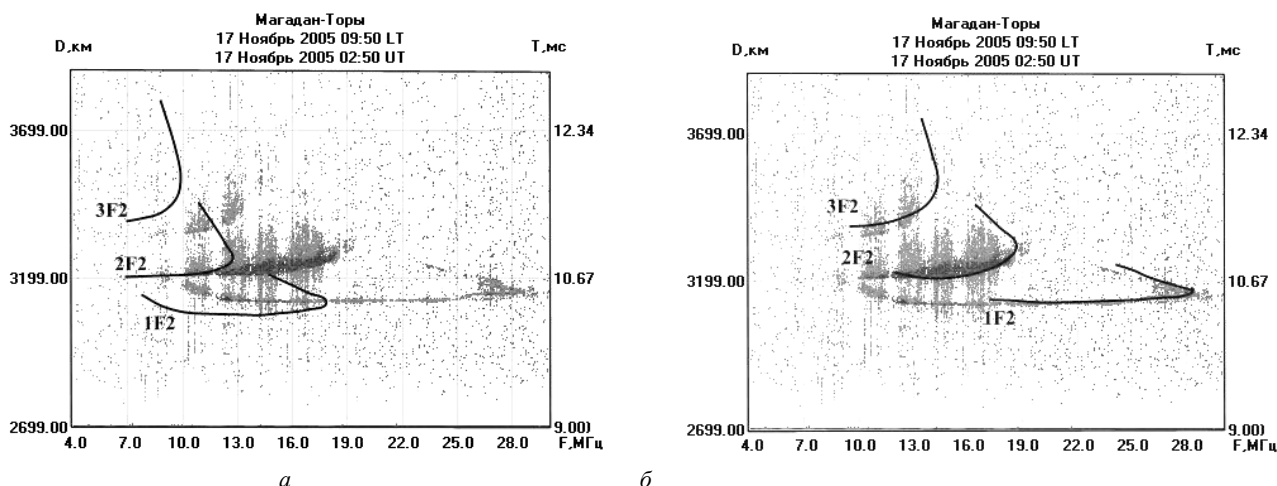


Рис. 2. Ионограмма наклонного зондирования и результаты интерпретации, 17 ноября 2005 г., 02:50 UT

Алгоритм идентификации опорного следа на ионограмме заключается в подсчете числа точек моментов прихода сигналов при движении модельной маски по экспериментальным точкам на относительной сетке частот. Маска движется по точкам матрицы $A(f_i, P_j)$, путем совмещения «носика» с точкой A_{ij} . При передвижении маски подсчитывается число точек $A(f_i, P_j)$, попадающих в маску в пределах прямоугольника $[\Delta f \times \Delta P]$, где Δf и ΔP подбираются, исходя из разрешимости ионозонда по дальности и частоте. Максимальное значение количества экспериментальных точек n_i , запоминаются.

В случае определения f_m^r и P_m^r оставшиеся экспериментальные точки, соответствующие моду первой кратности, идентифицируются путем удлинения по-

лос маски в область низких частот вдоль модельной ДЧХ, масштабированной множителем f_m^r / f_m^p , и поиском элементов P_{ij} , попадающих в эти полосы. Далее проводится линейная интерполяция треков для перехода на равномерную сетку частот. По вышеописанной процедуре проводится идентификация модов большей кратности.

Результаты прогноза и результат автоматической интерпретации ионограммы НЗ, полученной 17 ноября 2005 г. в 02:50 UT на трассе Магадан–Иркутск, показаны на рис. 2.

Статистическая оценка точности автоматической обработки ионограмм ВЗ была проведена по экспериментальным данным вертикального зондирования за 2012–2013 гг. на базе цифрового многофункционального ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН.

Проверка показала, что количественные характеристики качества методики интерпретации ионограмм ВЗ и НЗ не уступают лучшим мировым образцам подобных программ.

Рассмотренные методы и алгоритмы вторичной обработки ионограмм и интерпретации сигналов вертикального и наклонного зондирования ионосферы реализованы в виде программного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме выделять треки на ионограммах и проводить их идентификацию. Для вертикального зондирования по трекам производится отсчет ионосферных параметров и по ВЧХ рассчитывается профиль электронной концентрации $N(h)$. Для наклонного зондирования разработанные методы анализа ионограмм позволяют проводить оперативное определение модового состава, МПЧ каждого мода, строить ДЧХ сигнала и проводить идентификацию модов распространения.

Апробация разработанных методик на большом массиве экспериментальных данных показала, что он способен работать в автоматическом режиме. При этом количественные характеристики качества его работы не уступают лучшим мировым образцам подобных программ.

Библиографические ссылки

1. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях / В. А. Иванов, В. И. Куркин, В. Е. Носов и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919–952.
2. Grozov V. P. Processing of ionograms – statistical approach // Proc. of Intern. Symp. on Radio Propagation (ISRP'97). 1997. P. 225–228.
3. Grozov V. P., Nosov V. E., Ososkov G. A., Zaznobina E. G. Artificial neural networks for computer-aided ionogram analysis // Computer Aided Proc. of Ionograms and Ionosonde Records. 1998. P. 30–34.

4. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science. 2001. Vol. 36, № 2. P. 261–275.

5. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В. М. Поляков, В. Е. Суходольская, М. К. Ивельская и др. М. : МЦД-Б, 1986.

6. Михайлов С. Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере // Известия вузов. Радиофизика. 2000. Т. XLII, № 10. С. 855–872.

7. Метод оперативной диагностики КВ радиоканала / В. И. Куркин, В. Е. Носов, С. Н. Пономарчук и др. // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике солнца. 1993. Вып. 100. С. 168–188.

References

1. Ivanov V. A., Kurkin V. I., Nosov V. E., Uryadov V. P., Shumaev V. V. Radiophysics and Quantum Electronics, 2003, vol. 46, no. 11, pp. 821–851.
2. Grozov V. P. Proceedings of International Symposium on Radio Propagation (ISRP'97), Qingdao, China, 1997, pp. 225–228.
3. Grozov V. P., Nosov V. E., Ososkov G. A., Zaznobina E. G. Computer Aided Processing of Ionograms and Ionosonde Records: Edit by P.J. Wilkinson, Boulder, USA, 1998, pp. 30–34.
4. Bilitza D. Radio Science, 2001, vol. 36, no 2, pp. 261–275.
5. Polyakov V. M., Sukhodol'skaya V. E., Ivel'skaya M. K. et al. MTsDB, Moscow, 1986, p.136.
6. Mikhailov S. Ya. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz, 2000, 42 (10), pp. 855–872.
7. Kurkin V. I., Nosov V. E., Ponomarchuk S. N., Savkov S. S., and Chistyakova L. V. Researches on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics, Novosibirsk, 1993, Issue 100, pp. 168–188.

© Пономарчук С. Н., Грозов В. П.,
Котович Г. В., Михайлов С. Я., 2013

УДК 537; 629.784; 533.95

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ИРКУТСКОМ РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ*

В. П. Лебедев, А. В. Медведев, М. В. Толстиков

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а. E-mail: lebedev@iszf.irk.ru

Представлено описание интерференционных наблюдений ионосферных неоднородностей на ИРНР. Показана возможность использования амплитуды коэффициента когерентности НР-сигнала для анализа волновых возмущений и абсолютной калибровки разности фаз между каналами антенны ИРНР по текущему значению фазы коэффициента когерентности.

Ключевые слова: интерферометрия, иркутский радар некогерентного рассеяния, ионосфера, волновые возмущения.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашения № 8388 и 8699) и РФФИ (гранты № 13-05-00456-а и 13-0200957-а).

INTERFERENTIAL MEASUREMENTS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES ON THE IRKUTSK INCOHERENT SCATTERING RADAR

V. P. Lebedev, A. V. Medvedev, M. V. Tolstikov

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
126a Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: lebedev@iszf.irk.ru

In the work the authors present the description of radar interferential measurements of ionospheric inhomogeneities made with the Irkutsk incoherent scatter radar (IISR). The possibility of use of coefficient of coherence of incoherent scatter signal for the analysis of wave indignations and absolute calibration of difference of phases between IISR channels on current value of a phase is described as well.

Keywords: Interferometry, Irkutsk Incoherent Scattering Radar, Ionosphere, Ionospheric disturbances.

Формирование интерференционной ДН на ИРНР.

ИРНР представляет собой моностатический импульсный радиолокатор с частотным сканированием в направлении Север-Юг в секторе $\pm 30^\circ$ путем изменения несущей частоты в диапазоне 154–162 МГц. Частота следования импульсов – 24,4 Гц [1].

Формирование широкой ДН в угломестной плоскости обеспечивает рупор, разделенный металлической перегородкой на две равные части (два полурупора), каждая из которых связана со своим приемным и передающим трактом и имеющих электрический контакт со щелевой панелью.

Возбужденная щелями волна распространяется в рупоре между разделительной перегородкой и нижней (западной)/верхней (восточной) плоскостью рупора. За счет резкого и несимметричного изменения размеров рупора за перегородкой, кроме основной волны, возникают волны высших типов. Эти волны, распространяясь далее по рупору с разными скоростями, приходят к его раскрытию с разными амплитудами и фазами.

В результате в раскрытии рупора получается несимметричное амплитудное распределение соответствующее нижнему и верхнему полурупору, максимум которого сдвинут соответственно в западном (восточном) направлении.

На излучение оба полурупора работают синфазно, т. е. можно считать, что в раскрытии рупора формируется поле, которое определяется только основной волной, т. е. в данном случае антенну ИРНР можно рассматривать как рупорную антенну без металлической перегородки. Прием и регистрация сигнала ведется отдельно на каждом полурупоре и ДН на прием верхнего и нижнего полурупоров определяются соответственно своим распределением поля. Таким образом, комплексно перемножая сигналы от верхнего и нижнего полурупоров можно сформировать интерференционную диаграмму направленности.

Интерференционные измерения на ИРНР. Основным объектом исследования в интерференционных измерениях, который связывают с характеристиками среды, является нормированный коэффициент корреляции радиолокационных сигналов принятых на двух и более разнесенных антеннах.

В работе [2] показано, что ИРНР может рассматриваться как интерферометр с базой $A = 5$ м, эффек-

тивной шириной гауссовой ДН передатчика и приемников $\gamma_{\Sigma,0.5} = 4,56$ град. Для рассеивающей структуры гауссовой формы шириной σ_γ и положением центра в направлении γ_0 (антенный угол места), получено выражение для коэффициента корреляции η с учетом специфики антенной системы ИРНР:

$$\eta = SN \cdot \exp \left(ik_\phi \gamma_0 \frac{\Sigma^2}{\Sigma^2 + \sigma_\gamma^2} \right) \exp \left(- \frac{\Sigma^2 \sigma_\gamma^2 k_\phi^2}{2(\Sigma^2 + \sigma_\gamma^2)} \right), \quad (1)$$

где $k_\phi = 16^\circ$ – наклон фазо-угломестной характеристики ИРНР; $\Sigma = 0,067447$, SN – отношение «сигнал–шум».

В эксперименте, для каждой задержки (дальности) могут быть определены: модуль коэффициента корреляции $|\eta|$ и его фаза $\arg(\eta)$, на основе выражения (1) могут быть получены: угол места центра тяжести цели γ_0 и характерный размер цели σ_γ вдоль угломестного направления в антенной системе координат ИРНР:

$$\sigma_\gamma^2 = - \frac{2 \ln(|\eta|) \Sigma^2}{2 \ln(|\eta|) + \Sigma^2 k^2}, \quad (2)$$

$$\gamma_0 = \frac{\Sigma^2 + \sigma_\gamma^2}{\Sigma^2} \frac{\arg(\eta)}{k}. \quad (3)$$

Если в выражении (1) для аргумента когерентности $\arg(\eta)$ характерный размер цели σ_γ устремить к бесконечности, тогда $\arg(\eta) = 0$, данный факт используется для абсолютной калибровки разности фаз между антеннами на EISCAT на основе интерференционных наблюдений НР – сигнала [3].

Динамика коэффициента когерентности, полученная в наблюдениях 15 февраля 2011 г. приведена на рис. 1. В измерениях использовался сигнал длительностью 200 мкс, частота 155,5 МГц (длина волны 193 см). На рис. 1 отчетливо видны замеры сигнала, связанные с вращением плоскости поляризации (эффект Фарадея), в выражении для коэффициента когерентности (1) они описываются SN – отношением «сигнал–шум».

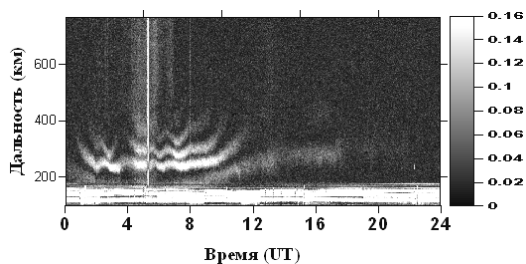


Рис. 1. Динамика амплитуды коэффициента когерентности 15 февраля 2011 г.

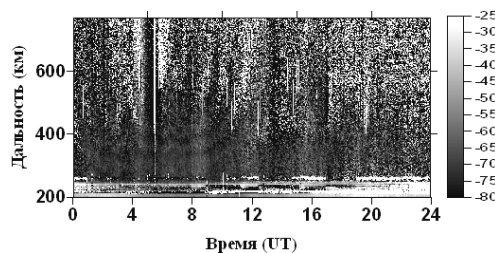


Рис. 2. Динамика разности фаз между полурупорами (кросскорреляционная фаза) 15 февраля 2011 г.

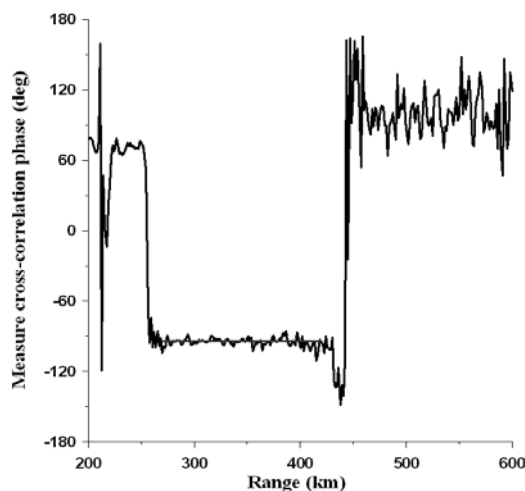


Рис. 3. Высотный профиль кросскорреляционной фазы

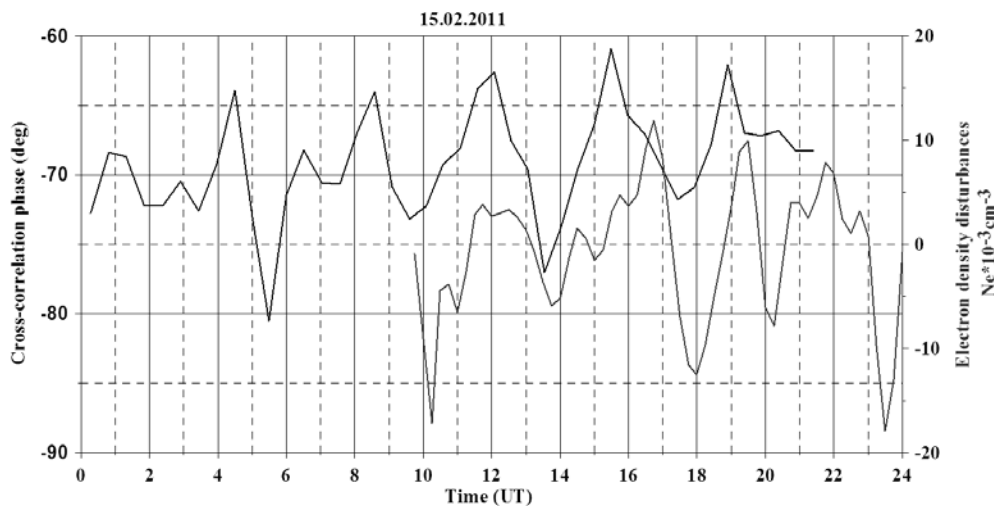


Рис. 4. Динамика кросскорреляционной фазы (черная линия) и вариации плотности электронов (серая линия)

Измеренный модуль коэффициента корреляции 15 февраля 2011 г. согласно выражению (2) соответствовал ширине рассеивателя $\sigma_\gamma \approx 2...3^\circ$ или размеру неоднородности 8–13 км на высоте 250 км.

Динамика разности фаз между полурупорами, полученная в наблюдениях 15 февраля 2011 г., приведена на рис. 2. В измерениях использовался сигнал длительностью 750 мкс, частота 155,5 МГц.

Видно, что в диапазоне высот 300–400 км, кросс-корреляционная фаза сигнала НР практически посто-

янна и может быть использована для абсолютной фазовой калибровки антенн [3]. Высотный профиль кросскорреляционной фазы: уровень до высоты 250 км соответствует отражению от местных гор, 270–420 км кросскорреляционная фаза сигнала НР (может использоваться для калибровки интерферометра), выше 450 км шум, приведен на рис. 3.

Динамика кросскорреляционной фазы сигнала НР и вариации плотности электронов в измерениях 15.02.2011 г. приведена на рис. 4. Из рисунка видно,

что в рассматриваемый день наблюдаются синхронные возмущения как в кросскорреляционной фазе сигнала НР, так и в плотности электронов. Теоретически существует возможность связать скорость изменения фазы со скоростью ветра вдоль угломестного направления в антенной СК. Возможности ИРНР позволяют также исследовать коэффициент корреляции и в азимутальном направлении и получить в итоге размер (в азимутальном и угломестном направлениях) и полный вектор скорости мелкомасштабных неоднородностей пересекающих сектор сканирования ИРНР.

Антенная система ИРНР может рассматриваться как интерферометр с базой 5 м, эффективной полушириной гауссовой ДН передатчика и приемников 4,55 град. Получено выражение, связывающее амплитуду коэффициента когерентности и эффективный размер неоднородности гауссовой формы и аргумент коэффициента когерентности (кросскорреляционная фаза) с положением центра наблюдаемого возмущения. Выражение для коэффициента когерентности получено с учетом особенностей антенной системы ИРНР. Показана возможность использования фазы коэффициента когерентности НР сигнала для абсолютной калибровки разности фаз между каналами антенны.

В результате проведенных измерений 15 февраля 2011 г. получена синхронная динамика вариаций кросскорреляционной фазы и плотности электронной концентрации. Полученная динамика вариаций кросс-корреляционной фазы сигнала НР и модуля коэффи-

циента когерентности может быть вызвана перемещающимися неоднородностями размером примерно 10 км.

Библиографические ссылки

1. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния / А. П. Потехин, А. В. Медведев, А. В. Заворин и др. // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 356–362.
2. Лебедев В. П. Интерференционные наблюдения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Журн. радиоэлектроники. 2010. Спец. вып. С. 555–571.
3. Grydeland Tom and Cesar La Hoz. WP5: Fundamentals of radar interferometry. One baseline. // Stage 2 report. I: April 2006 [Electronic resource]. URL: http://eiscat.se/groups/EISCAT_3D_info/WP5_Interferometry_Stage2_Report_April06.pdf.

References

1. Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V. et al. Kosmicheskie issledovaniya, 2008. Vol. 46. № 4, pp. 356–362.
2. Lebedev V. P. Zhurnal Radioelektroniki. 2010. P. 555–571.
3. Grydeland Tom and Cesar La Hoz. WP5: Fundamentals of radar interferometry. One baseline. Stage 2 report. I: April 2006. Available at: http://eiscat.se/groups/EISCAT_3D_info/WP5_Interferometry_Stage2_Report_April06.pdf.

© Лебедев В. П., Медведев А. В., Толстиков М. В., 2013

УДК 551.501.8

ДВУМЕРНАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ: СУЩЕСТВУЮЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А. А. Романов, С. В. Трусов, А. А. Романов, О. И. Барабошкин, С. А. Бобровский

ОАО «Российские космические системы»

Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53. E-mail: romanov@rniikp.ru

Представлены результаты создания информационной технологии радиотомографии ионосферы и перспективы ее развития, дано описание применяемых подходов и выходных информационных продуктов. В настоящее время технология используется при создании системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ.

Ключевые слова: радиотомография, томография ионосферы, информационная технология.

2-DIMENSIONAL IONOSPHERE RADIOTOMOGRAPHY: THE EXISTING AND PERSPECTIVE TECHNOLOGIES

A. A. Romanov, S. V. Trusov, A. A. Romanov, O. I. Baraboshkin, S. A. Bobrovskij

JSC “Russian Space Systems”

53 Aviamotornaya st., Moscow, 111250, Russia. E-mail: romanov@rniikp.ru

The results of ionosphere radiotomography information technology development are presented and the ways of their evolution are listed. The used algorithms, techniques and output information flows are described. This technology currently using in the construction of Russia geophysical environment monitoring system.

Keywords: radiotomography, ionosphere tomography, information technology.

Начиная с 2008 г. в России Росгидрометом создается система мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ (СМГФО), основной задачей которой является выявление неоднородностей (неоднородных геофизических структур) различного происхождения в верхней атмосфере, ионосфере, околоземном космическом пространстве [1]. В качестве источников информации о состоянии ионосферы в СМГФО, помимо средств вертикального и наклонного радиозондирования входит подсистема радиотомографии ионосферы, которая состоит из сетей двумерной и трехмерной радиотомографии. Двумерная радиотомография является одним из наиболее эффективных способов определения электронной концентрации в ионосфере на высотах 100–1 000 км, благодаря использованию когерентных сигналов низкоорбитальных спутников. Подобный подход [2] используется уже около 20 лет, однако создание СМГФО потребовало значительного пересмотра реализации метода и модернизации программных и аппаратных средств для обеспечения высокой степени автоматизации процесса регистрации и синхронной работы большого количества территориально разнесенной аппаратуры. В результате была разработана информационная технология радиотомографии ионосферы и соответствующее аппаратное обеспечение, описание которых приводится в данной работе.

Разработка технологии двумерной РТ ионосферы.

Основным принципом двумерной радиотомографии ионосферы является синхронная регистрация изменения разности фаз двух когерентных сигналов (150 и 400 МГц), пропорциональная изменению относительного полного электронного содержания, от спутников с приполярной орбитой на сети приемных установок, расположенных в меридиональном направлении, и последующая реконструкция распределения электронной концентрации по полученным измерениям.

Разработанные до 2008 г. аппаратура приема и методика сбора и обработки данных [2] не позволяли оперативно получать карты распределения электронной концентрации, а также имели ограниченный диапазон используемых спутников. За рубежом единственная система радиотомографии ионосферы, работающая в режиме близком к реальному времени, была только в США, где велись наблюдения ионосферы над нагревным стендом HAARP, однако принципы ее работы в литературе описаны не были. В настоящее время эта система не работает.

Таким образом, для реализации двумерной радиотомографии ионосферы в СМГФО возникла необходимость в создании нового приемного оборудования и программного обеспечения, которое позволяло бы осуществлять мониторинг ионосферы с использованием большого количества удаленных приемных станций и обеспечивало бы быстрое формирование карт распределения электронной концентрации.

Для достижения высокой скорости получения и обработки данных, все новое программное и аппаратное обеспечение изначально разрабатывалось для работы в сети Интернет. В итоге были разработаны типовой сетевой радиотомографический приемник для регистрации ионосферной задержки когерентных сиг-

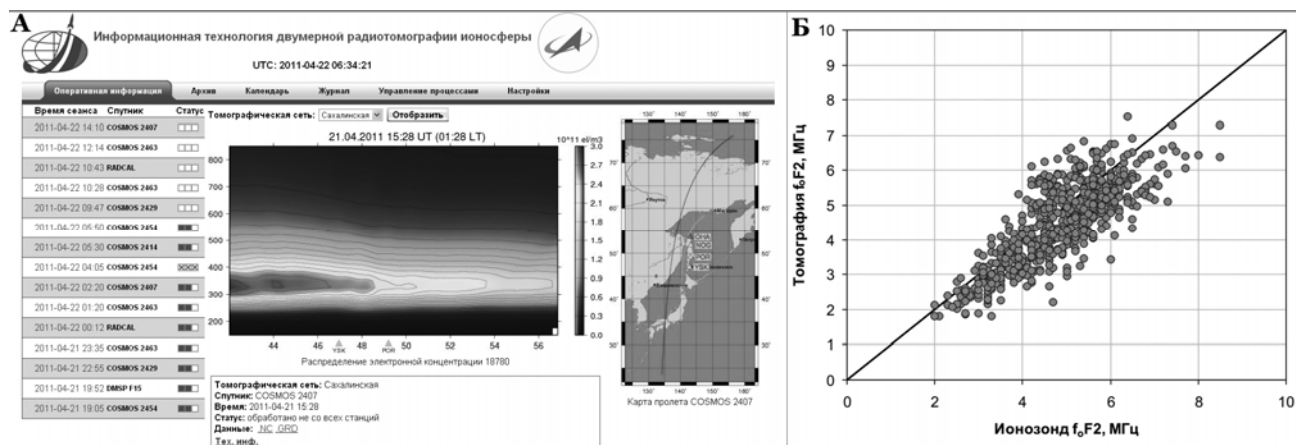
налов и сервер информационной технологии обработки данных от сетей радиотомографических приемников.

Радиотомографический приемник позволяет производить прием и тематическую обработку когерентных сигналов находящихся в диапазоне ± 300 ppm относительно центральных частот 150, 400 МГц, что позволяет осуществлять наблюдение за ионосферой с использованием соответствующих спутников, в частности COSMOS (2407, 2414, 2429, 2454, 2463), OSCAR (23, 25, 31, 32), FORMOSAT-3 FM (1–6), RADCAL, DMSP F15. В число основных функций входят: расчет разностной фазы и относительной интегральной электронной концентрации и ее градиента на линиях визирования спутник-приемник, а также осуществление координатно-временной привязки измерений [3].

Базовыми элементами информационной технологии являются клиентское и серверное программное обеспечение (ПО). Клиентское ПО осуществляет предварительную обработку результатов наблюдений и передачу их на сервер по протоколу HTTP. Серверное ПО в свою очередь осуществляет получение данных, томографическую обработку информации с сети приемных установок. На основе анализа метаданных в поступившем с приемника файле, осуществляется идентификация полученных данных определенному, заранее предрасчитанному сеансу радиопросвечивания. После этого данные проходят процедуру координатно-временной привязки. При наличии более двух файлов наблюдений для одного сеанса запускается модуль решения томографической задачи. Применяемая в серверном ПО методика томографической обработки данных имеет в основе своей метод фазоразностной томографии [2].

В логике и структуре серверного ПО реализована возможность одновременной работы с несколькими сетями приемников. По предварительным оценкам один сервер способен одновременно обслуживать до 10 сетей по 5 приемников в каждой. Количество обслуживаемых приемников определяется, преимущественно, параметрами быстродействия вычислительной машины, используемой в качестве сервера. Информация о распределении электронной концентрации в районе мониторинга доступна через 5 мин после регистрации спутникового сигнала на приемных установках. Подробное описание технологии приводится в работе [4].

Результаты работ. Основным информационным продуктом информационной технологии являются карты высотного распределения электронной концентрации ионосферы (томограммы) над сетями радиотомографических приемников (см. рисунок). Разрешение карт составляет 25 км по высоте и 50 км вдоль сети. Протяженность томограмм определяется размером сети приемных установок. В настоящее время самая протяженная сеть Мурманск–Майкоп (всего 7 приемников) позволяет получать томограммы протяженностью около 3 300 км. С использованием технологии работают еще 3 сети в России, одна из которых расположена в европейской части страны, одна на о. Сахалин и одна на Камчатке. Первые две сети входят в состав СМГФО, вторые – экспериментальный полигон для отработки технологии радиотомографии, развернутый ОАО «Российские космические системы» (<http://tomo.ionospace.ru>).



Карта распределения электронной концентрации в веб-интерфейсе информационной технологии (а) и график сопоставления определения критической частоты с помощью информационной технологии и ионозонда (б)

Оценка точности получаемых томограмм проводится с использованием измерений ионозондов, расположенных в районе наблюдений. Сопоставление двух рядов наблюдений в течение года показывает (около 700 синхронных измерений в точке), что в целом наблюдается хорошее соответствие, коэффициент корреляции 0,8. Средняя невязка равна 0,67 МГц, что составляет 7 % от максимального значения, зарегистрированного ионозондом за год и 14 % от среднего (см. рисунок).

Перспективы. В целях повышения точности реконструкции электронной концентрации ионосферы с помощью описанной технологии, в настоящее время ведутся работы по реализации учета эффекта рефракции при решении задачи томографии, учету наклона зондируемого объема ионосферы, поиску наиболее эффективного способа подбора начального приближения. В идеале необходимо уменьшить ошибку в определении электронной концентрации до 0,1 МГц в терминах критической частоты. Также планируется расширить спектр информационных продуктов за счет наблюдений ионосферных мерцаний амплитуды зондирующих радиосигналов (индекс S4), графиков временной изменчивости полного электронного содержания в точке, а также автоматически выделяемых неоднородностей электронной концентрации.

У описанного выше метода радиотомографии есть одно существенное ограничение – система регистрации привязана к определенной территории Земли. Для того чтобы избавиться от этого недостатка была проведена моделирование системы радиотомографии ионосферы, в которой и приемники и передатчики находятся на малоразмерных космических аппаратах (МКА). В итоге были найдены варианты взаимного расположения МКА, которые в перспективе позволят создать систему глобального мониторинга ионосферы. В частности, для формирования орбитальной группировки МКА был предложен кластерный способ размещения спутников, при котором несколько (4–6) МКА размещаются в пределах взаимной радиовидимости и образуют самодостаточную для последующей реконструкции электронной концентрации ионосферы систему регистрации. Для увеличения частоты сканирова-

ния ионосферы в каждую орбитальную плоскость выводится до четырех кластеров МКА. При кластерном расположении спутников средние ошибки реконструкции составили 32–35 %, при количестве аппаратов не более 20 и времени накопления информации около 20 минут. Исследование показало, что использование результатов работы моделей ионосферы в качестве априорной информации, позволяет уменьшить средние ошибки реконструкции до 5–10 % [5].

В результате проведенных работ создана технология для оперативного получения широтных разрезов электронной концентрации ионосферы. Благодаря высокой скорости обработки томографических измерений (5–10 мин) и доступности результатов по сети Интернет, данная технология может быть с успехом использована как для мониторинга ионосферы в гидрометеорологических целях, так и в целях поиска неоднородностей естественного и искусственного происхождения.

Библиографические ссылки

1. Опыт создания Росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы / В. В. Алпатов, В. Е. Куницын и др. // Гелиогеофизические исследования, 2012. Вып. 2. С. 60–71.
2. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
3. Сетевой программно-аппаратный комплекс двумерной томографии ионосферы / С. В. Трусков, А. А. Романов, А. В. Аджалова и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 142–148.
4. Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы / С. В. Трусков, А. А. Романов, А. В. Новиков, А. А. Романов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2. № 6. С. 317–323.
5. Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИСЗ на основе анализа характеристик когерентного излучения / А. А. Романов и др. // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 111. № 4. С. 37–42.

References

1. Alpatov V. V., Kunitsyn V. E. et al. *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2012, vol. 2, pp. 60–71.
2. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. *Radiotomografiya ionosfery*. Moscow, Fizmatlit, 2007. 336 p.
3. Trusov S. V., Romanov A. A., Adjalova A. V. et al. *Sovr. problem dist. zond. Zemli iz kosmosa*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 142–148.
4. Trusov S. V., Romanov A. A., Novikov A. V., Romanov A. A. *Sovr. problem dist. zond. Zemli iz kosmosa*. No. 6, vol. II, 2009, pp. 317–323.
5. Romanov A. A., Trusov S. V., Novikov A. V. et al. *Voprosy elektromekhaniki*, 2009, vol. 111, no. 4, pp. 37–42.

© Романов А. А., Трусов С. В., Романов А. А., Барабошкин О. И., Бобровский С. А., 2013

УДК 621.396.2.029.5

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОНЧ-ИМПУЛЬСНОГО ПОТОКА В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЕ*

И. Б. Нагуслаева, Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, М. Г. Дембелов

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

Рассмотрены пространственно-временные и частотные характеристики ОНЧ-импульсного потока естественного электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ) в Байкальской рифтовой системе на частотах 2, 7 и 14,5 кГц. Отмечен высокий уровень пространственной корреляции естественного электромагнитного поля.

Ключевые слова: естественное электромагнитное поле, ОНЧ-импульсный поток.

SPACE-TIME VARIATIONS OF INTENSITY OF VLF-PULSE STREAM IN THE BAIKAL RIFT SYSTEM

I. B. Naguslaeva, Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, M. G. Dembelov

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

The article considers the space-time and frequency characteristics of the VLF-pulse stream of the natural electromagnetic field of the Earth in the Baikal rift system on frequencies 2, 7 and 14,5 kHz., along with the revealed high level of space-time correlation of the natural electromagnetic field.

Keywords: natural electromagnetic field, VLF-pulse stream.

В последнее время возрос интерес к проблемам электромагнитного окружения Земли. Электромагнитное поле является важнейшим фактором окружающей среды, тесно взаимосвязанным с другими составляющими природного комплекса планеты и воздействующим на жизнедеятельность человека. Наряду с традиционными проявлениями грозового электричества (выведение из строя систем электронного обеспечения, воздействие на авиацию, пожароопасность) и совершенствованием методов их контроля, все большее внимание привлекают проблемы электромагнитного загрязнения и его воздействия на экосистемы и человека.

Цель работы – провести сравнительный анализ характеристик ОНЧ-импульсного потока в различных пунктах юга Сибири, разнесенных в пространстве до 300 км. Измерения ОНЧ-импульсного потока магнитной компоненты ЕЭМПЗ проведены в Восточных Саянах (пункты наблюдений (ПН) «Толтой», «Торь»),

на берегу средней части озера Байкал (пункт наблюдения «Горячинск») и на стационаре «Верхняя Березовка» вблизи г. Улан-Удэ с помощью многоканальных геофизических регистраторов МГР-01М и МГР-01 [1]. Следует отметить, что при проведении одновременных измерений работа всех каналов регистраторов синхронизировалась, параметры усилительных трактов каналов и режимы регистрации на одинаковых частотах были идентичны. Измерения в ПН «Толтой» проведены с 18 по 22 июля 2011 г. на частотах 2,7 и 14,5 кГц с помощью МГР-01М. Установлен высокий уровень ОНЧ-импульсного потока на частоте 14,5 кГц в ПН «Толтой» относительно базовой станции «Верхняя Березовка», где с 2008 г. непрерывно работает регистратор МГР-01 на частоте 14,5 кГц (рис. 1, а). Так, в минимуме ОНЧ-импульсного потока на частоте 14,5 кГц по направлению приема «север–юг» с 7 до 8 ч утра 19 июля 2011 г. в ПН «Толтой» зарегистри-

* Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 11 «Литосферно-ионосферные взаимодействия в Байкальской рифтовой системе» и гранта РФФИ №12-02-98002 с использованием стационаров «Верхняя Березовка» и «Горячинск».

ровано 2 444 разряда, а на станции «Верхняя Березовка» – 891 разряд, т. е. ОНЧ-импульсный поток в ПН «Толтой» выше почти в 3 раза. В максимуме ОНЧ-импульсного потока 20 июля 2011 г. в период с 16 до 17 ч местного времени в ПН «Толтой» по каналу «север–юг» зарегистрировано 145 749 разрядов, а на станции «Верхняя Березовка» – 11 175 разрядов, то есть отношение числа импульсов составляло ~ 13 . При этом коэффициент взаимной корреляции равен 0,78. Почти такой же коэффициент корреляции был зарегистрирован в июле 2010 г. при одновременных измерениях с помощью МГР-01 в ПН «Торы» (обсерватории ИСЗФ СО РАН) и на станции «Верхняя Березовка» (рис. 1, б). Так, в период с 2 до 3 ч ночи 3 июля по каналу «запад–восток» в «Торах» зарегистрировано 335 780 разрядов, а на станции «Верхняя Березовка» – 13 827 разрядов, т. е. ОНЧ-импульсный поток в «Торах» был выше в 24 раза. По каналу «север–юг» это отношение составляло 15,9. В минимуме ОНЧ-импульсного потока в 10 ч утра 5 июля для канала «запад–восток» отношение составляло 17,9, а по каналу «север–юг» – 8. При этом коэффициент взаимной корреляции по каналам «север–юг» был равен 0,8, по каналам «запад–восток» – 0,88. Следует также отметить заметное превышение компоненты «запад–восток» (вдоль Тункинской впадины) над компонентой «север–юг» (поперек Тункинской впадины).

Причиной существенного превышения ОНЧ-импульсного потока могут быть значительные различия в орографии мест расположения пунктов наблюдения – наличие альпийского рельефа местности в Восточных Саянах и, как следствие, существенно большая электризация приземной атмосферы при турбулентных движениях воздушных потоков в гористой местности.

Отмечен также высокий уровень корреляции магнитной компоненты ЕЭМПЗ по направлению приема «север–юг» на разных частотах (рис. 2, а, б). Так, коэффициент межчастотной корреляции на частотах 2 и 7 кГц составляет для ПН «Толтой» 0,85, а для ПН «Горячинск» – 0,73; на частотах 7 и 14,5 кГц –

0,97 и 0,95, на частотах 2 и 14,5 кГц – 0,86 и 0,9 соответственно. Высокий уровень корреляции магнитной компоненты на разных частотах свидетельствует о том, что основной вклад в аддитивную смесь «атмосферика – литосферика – излучения ионосферы и магнитосферы – техногенные излучения» на входе регистраторов излучений вносят атмосферика, генерируемые молниевыми разрядами. Высокая степень пространственной и частотной корреляции, в целом, говорит о едином локальном механизме формирования естественного импульсного электромагнитного поля Земли.

С 3 декабря 2010 г. регистратор МГР-01М располагался в здании ИФМ СО РАН (г. Улан-Удэ) и круглосуточно регистрировал аддитивную смесь естественного и антропогенного источников электромагнитного шума, принимаемого на рамочную антенну, ориентированную плоскостью рамки по направлению «север–юг» (рис. 3).

Источниками антропогенного электромагнитного поля в городе являются линии электропередач (ЛЭП) с частотой 50 Гц и их высшие гармоники; электрифицированные железные дороги с питающим напряжением 27,5 кВ; трамвайные электрические цепи; системы сотовой связи и радиотелевизионные передающие центры; компьютерные сети; промышленные предприятия и мощные энергетические установки; другое технологическое оборудование, потребляющее электрическую энергию [2].

Анализ результатов наглядно показывает динамику суточного, недельного и месячного уровня ОНЧ импульсного потока. Отмечен «воскресный» эффект, заключающийся в том, что в субботу, воскресенье и праздничные дни уровень ОНЧ поля уменьшается на 5–6 порядков относительно рабочих дней. Сравнение соотношения естественного и техногенного уровней ОНЧ полей проведено по данным измерений на стационаре «Верхняя Березовка». Соотношение естественного (примерно до 400 импульсов в час) и антропогенного фона (примерно до 2 500 000 импульсов в час) наглядно свидетельствует о сильном техногенном электромагнитном загрязнении территории г. Улан-Удэ.

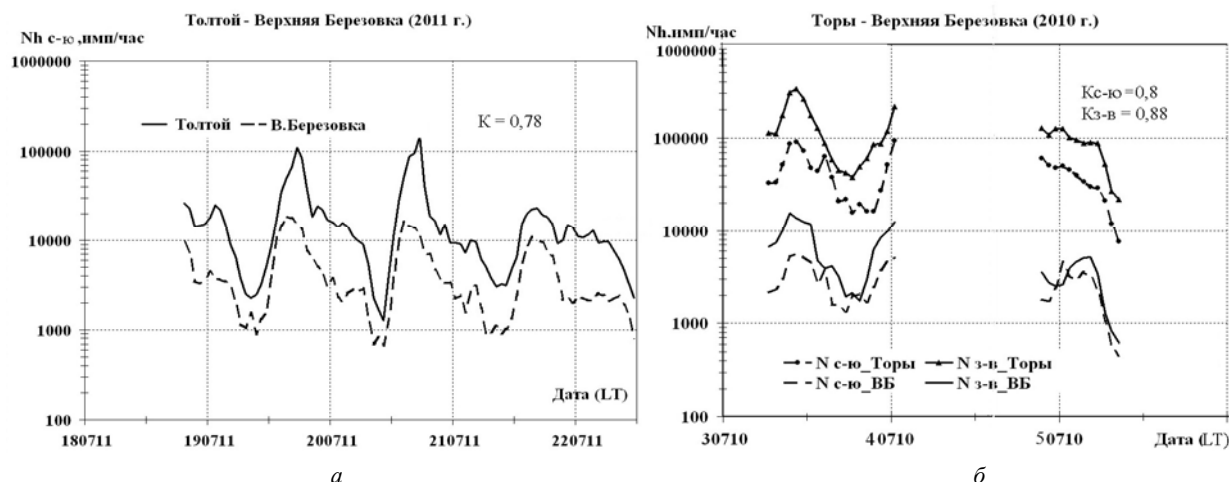


Рис. 1. Результаты регистрации магнитной составляющей ОНЧ-импульсного потока на частоте 14,5 кГц в пунктах наблюдения:

а – «Толтой» и «Верхняя Березовка» 18–22 июля 2011 г.;
б – «Торы» и «Верхняя Березовка» 3–7 июля 2010 г.

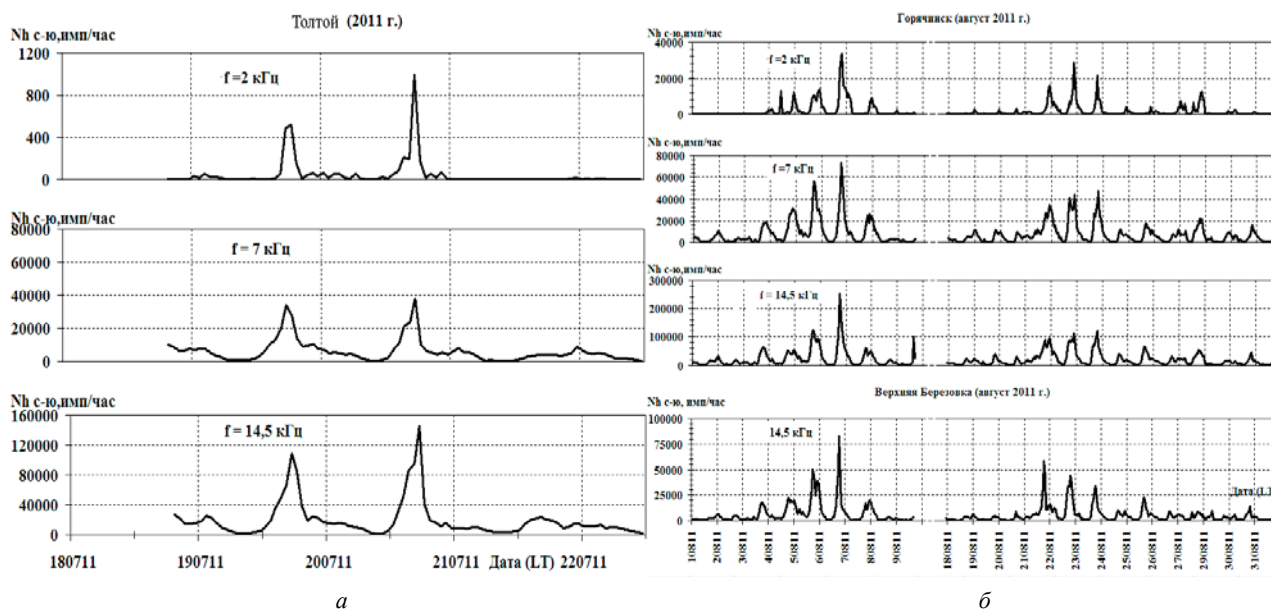


Рис. 2. Результаты регистрации магнитной составляющей ОНЧ-импульсного потока на частотах 2, 7 и 14,5 кГц: *а* – в ПН «Толтой» 18–22 июля 2011 г.; *б* – в ПН «Горячинск» и «Верхняя Березовка» в августе 2011 г.

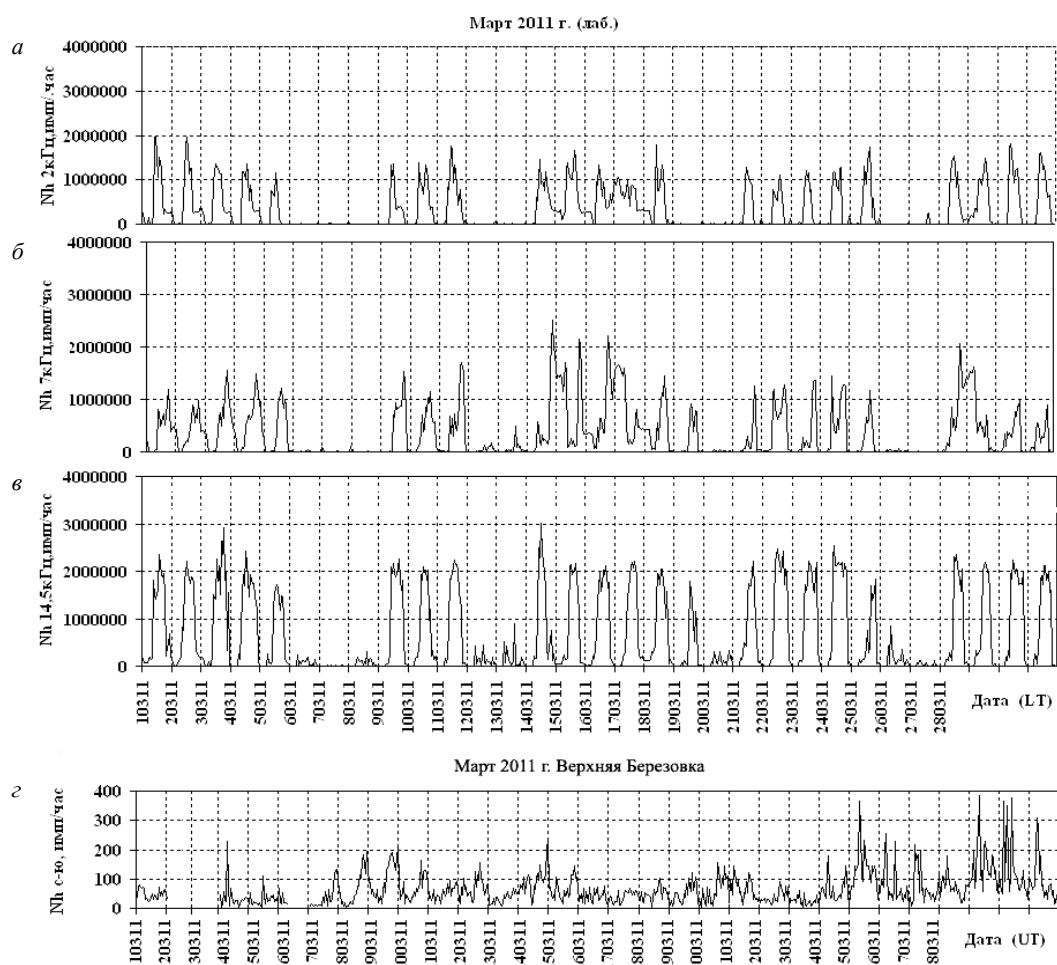


Рис. 3. Суточные вариации аддитивной смеси естественного и антропогенного электромагнитного излучения на частотах 2; 7; 14,5 кГц (здание ИФМ СО РАН) (*а–б*); суточный ход ЕИЭМПЗ на частоте 14,5 кГц (Верхняя Березовка) (*в*)

Полученные экспериментальные результаты требуют дальнейшей физической интерпретации и теоретического объяснения с позиций развития новых тенденций в оценке механизмов и энергетики классического атмосферного электричества. Необходимо также выяснить принципиальную роль тонкой структуры распределения поля и заряда грозовых облаков, электрогазодинамической турбулентности и вклада энергичных частиц.

Библиографические ссылки

1. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э. Л. Афраймович [и др.] ; отв. ред. Г.А. Жеребцов. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2012.

2. Аполлонский С. М., Малаян К. Р. Электромагнитная экология человека. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2008.

References

1. Seismoionosfernye i seismoelektromagnitnye processy v Baikal'skoi riftovoi zone. (Seismoionosfernye seismoelektromagnitnye and processes in the Baikal Rift Zone). Afraimovich E. L. [i dr.]; отв. red. G.A. Zherebtsov; Ros. akad. Nauk, Sib. otd-nie, In-t solnechno-zemnoi fiziki, In-t zemnoi kory, In-t fizicheskogo materialovedeniya. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2012. 304 p. (Integratsionnye proekty SO RAN; vol. 35)

2. Apollonskii S. M., Malayan K. R. Elektromagnitnaya ekologiya cheloveka (Electromagnetic human ecology). St. Petersburg, Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2008, 556 p.

© Нагуслева И. Б., Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г., 2013

УДК 621.391.81+550.83

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ОСАДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ ГОРНЫХ ПОРОД ДЕЛЬТЫ РЕКИ СЕЛЕНГИ*

Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, М. Г. Дембелов, В. Р. Адвокатов, Д. Г. Буянова

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

Рассмотрены результаты подповерхностного радиозондирования осадочных комплексов горных пород в дельте р. Селенги. Определены электрофизические свойства и строение слоисто-неоднородных горных пород по данным наземных радиоволновых измерений в ОНЧ–НЧ-диапазонах. Предложена комплексная методика обследования приповерхностных слоев горных пород методами радиоимпедансного и вертикального электрического зондирования.

Ключевые слова: радиоимпедансное зондирование, осадочные комплексы, дельта Селенги.

GEO-ELECTRIC CROSS-SECTION OF THE SEDIMENTARY ROCKS OF THE DELTA OF THE RIVER SELENGA

Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, M. G. Dembelov, V. R. Advokatov, D. G. Buyanova

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

The results of subsurface radio sounding of the sedimentary rocks complexes in the delta of the river selenga are considered in the article. Electro-physical properties and the structure of the stratified-inhomogeneous rocks according to the surface-wave measurements in vlf-lf bands are identified. Integrated survey methodology of near surface layers of rocks by radioimpedance and vertical electric sounding methods is proposed.

Keywords: radioimpedance sounding, sedimentary complexes, delta of the river selenga.

Методом радиоимпедансного зондирования детально исследованы осадочные комплексы горных пород дельты р. Селенги. Геоэлектрический разрез на профиле «Ранжурово-3» длиной 140 м в зоне развития золотых песков вблизи отметки высоты 468,7 м представлен на рис. 1. Верхний слой сухих песков характеризуется наибольшим удельным сопротивлением в разрезе $\rho_1 = (440 \pm 40)$ Ом · м, при толщине $h_1 = (17 \pm 3)$ м.

Второй слой с параметрами $\rho_2 = (190 \pm 40)$ ом·м, $h_2 = (50 \pm 6)$ м сложен увлажненными гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем. Третий слой с $\rho_3 = (50 \pm 30)$ ом·м представлен обводненными суглинками и песками с содержанием галечникового материала. Границы геоэлектрических слоев хорошо коррелируют с формой рельефа профиля золотого образования.

* Доклад подготовлен при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 12-02-98002, № 12-02-98007 и Интеграционного проекта СО РАН № 11.

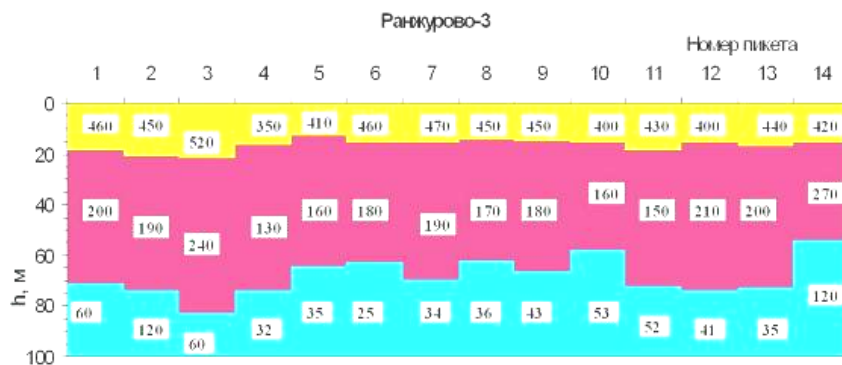


Рис. 1. Геоэлектрический разрез по профилю «Ранжурово-3»

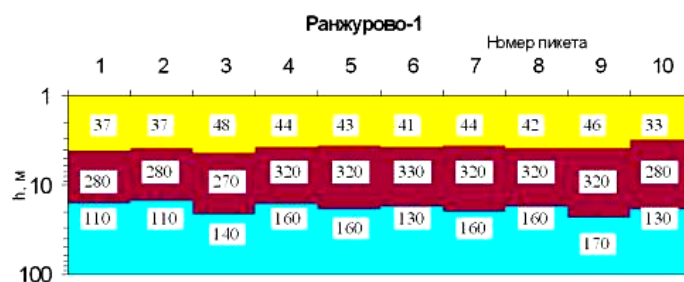


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю «Ранжурово-1»

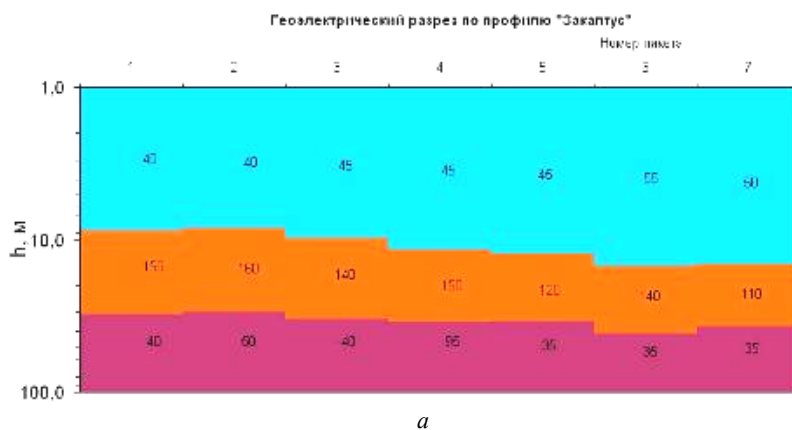
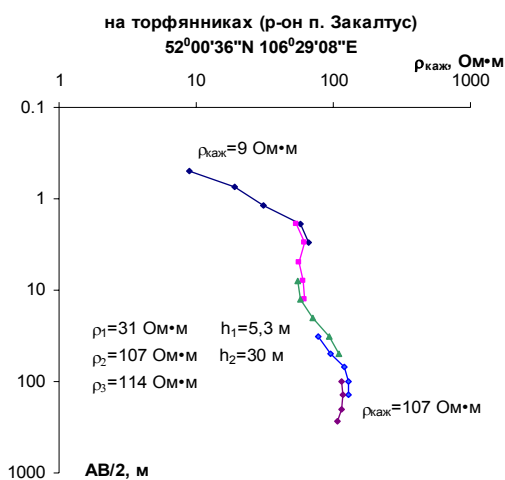


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю «Закалтус» (а) и кривая вертикального электрического зондирования торфяников (б)

Профиль «Ранжурово-1» (рис. 2) расположен на низком, слегка заболоченном берегу протоки р. Селенга и обладает хорошо выдержанным на протяжении 200 м геоэлектрическим разрезом: $\rho_1 = (42 \pm 5) \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = (3,8 \pm 0,3) \text{ м}$; $\rho_2 = (300 \pm 25) \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_2 = (15 \pm 2,6) \text{ м}$; $\rho_3 = (140 \pm 20) \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Верхний слой представлен песками с суглинками. Этот слой близок по электрическим свойствам к третьему слою на профиле «Ранжурово-3».

Второй слой представлен гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем, третий слой представлен песками с гравием и галькой. Геоэлектрический разрез типа ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$). Аналогичный тип разреза имеет и профиль «Закалтус» (рис. 3). Он расположен в средней части Кабанских торфяных болот (Мало-Колесовская группа). Толщина торфа на этом массиве достигает 6–7 и более метров (1 слой с УЭС 40–55 Ом · м). Под торфом залегают суглинки или мелкозернистые глинистые пески (2 слой с УЭС 110–160 Ом · м). Ниже залегают обводненные крупнозернистые пески, часто с примесью гравия (3 слой). Геоэлектрический разрез на острове Хлебный вблизи пос. Селенгинск (рис. 4) при сходном типе разреза имеет существенные отличия в величинах удельного электрического сопротивления (УЭС). В разрезе

выделяется второй слой очень высокого для осадочных пород УЭС (от 740 до 2200 Ом · м, в среднем 1300–1400 Ом · м) толщиной от 15 до 50 м. Он сложен гравийно-галечниковыми отложениями, по-видимому, содержащими очень мало влаги. Этот интересный эффект очень сухих гравийно-галечниковых отложений в долинах рек отмечен нами ранее также на островах р. Чикой. Следует отметить, что УЭС грунтовых и поверхностных вод в долинах Байкальского региона обычно не превышает 50–100 Ом · м (рис. 5). Такое низкое УЭС флюидов, содержащихся в почвах и горных породах, свидетельствует об очень малой влажности гравийно-галечниковых отложений. Вероятно их нахождение в сцементированном состоянии в виде брекчии. По данным радиоимпедансных зондирований на профиле длиной 220 м установлено, что зона фильтрации высокоминерализованных вод очистных сооружений замкнутого цикла водоснабжения Селенгинского ЦКК с удельным электрическим сопротивлением 7 Ом · м и минерализацией 1,2 г/л не превышает 100 м (рис. 6).

По данным интерпретации радиоимпедансных зондирований в ОНЧ–НЧ-диапазонах определены электрические свойства и неоднородно-слоистая структура осадочных горных пород дельты реки селенги, построены их геоэлектрические разрезы [1–2].

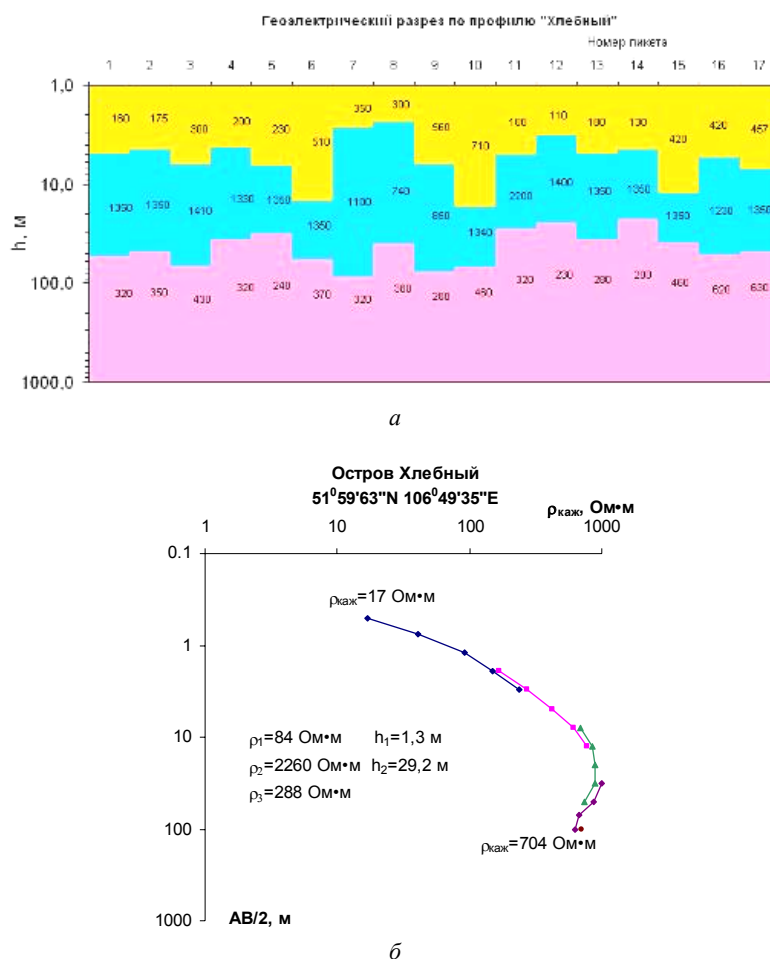


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю «Хлебный» (а) и кривая ВЭЗ на пикете 11 (б)

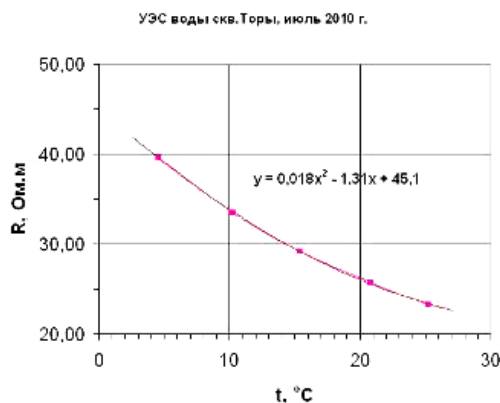


Рис. 5. Температурная зависимость УЭС воды из скважины в обсерватории ИСЗФ СО РАН «Торы»

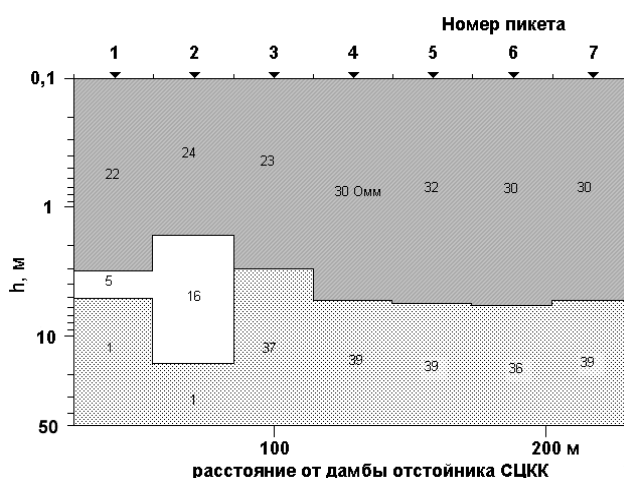


Рис. 6. Геоэлектрический разрез ближайшей окрестности очистных сооружений Селенгинского ЦКК

Библиографические ссылки

1. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э. Л. Афраймович и др. ; отв. ред. Г. А. Жеребцов. Новосибирск : Изд-во СО РАН. 2012. 304 с.
2. Ангархаева Л. Х. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002620893. Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования. М. : Роспатент, 2002.

References

1. Afraimovich E. L. et al. Seismoionospheric and seismoelectromagnetic processes in the Baikal rift zone (Seismoionospheric and seismoelectromagnetic processes in the Baikal rift zone). *Otv. red. G. A. Zherebtsov. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2012, 304 p.*
2. Angarkhaeva L. Kh. Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programmy dlya EVM № 2002620893. Paket programm "Impedans" dlya reshenia zadach radioimpedansnogo zondirovaniya (THE certificate of official registration of the computer number 2002620893. The software package "Impedance" to solve problems radio-impedance sensing). Moscow, Rospatent, 06.06.2002.

© Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г.,
Адвокатов В. Р., Буянова Д. Г., 2013

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА ГОРНЫХ ПОРОД
ВИТИМСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ И БУРЕЙНСКОГО МАССИВА
В СНЧ–ОНЧ-ДИАПАЗОНАХ РАДИОВОЛН**

Д. Г. Буянова, Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, В. Р. Адвокатов

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

Рассмотрены статистические характеристики эффективного сопротивления $\rho_{\sim}$ различных комплексов горных пород Витимского плоскогорья и Буреинского массива в СНЧ–ОНЧ-диапазонах радиоволн, полученные методом радиоимпедансного зондирования.

Ключевые слова: эффективное сопротивление, радиоимпедансное зондирование.

**ELECTROMAGNETIC DIAGNOSTICS OF VITIM PLATEAU
AND BUREYA MASSIF ROCKS IN ELF-VLF RADIO SPECTRUM BANDS**

D. G. Buyanova, Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, V. R. Advokatov

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

Statistical characteristics of the effective resistance of the various rock complexes of Vitim plateau and Bureya massif in ELF–VLF radio spectrum bands, obtained by radioimpedance sounding, is examined.

Keywords: effective resistance, radioimpedance sounding.

В связи с освоением Озернинского рудного узла [1] и началом проектирования рокадной железной дороги от Транссибирской магистрали до Байкало-Амурской железной дороги в районе Озернинского горно-промышленного узла актуальной на востоке России стала задача изучения электрических свойств горных пород Витимского плоскогорья, а также Буреинского массива. Цель исследований – геоэлектрическое картирование двух участков на востоке России со сложным геологическим строением. В докладе дано обобщенное статистическое описание электрических свойств горных пород Витимского плоскогорья и Буреинского массива в СНЧ–ОНЧ-диапазонах радиоволн по данным радиоимпедансного зондирования (РИЗ). Техника эксперимента и методика обработки результатов подробно рассмотрены в работах [2; 3]. На Витимском плоскогорье работы выполнены на участках «Сосновоозерский», «Багдаринский», а также на профиле «оз. Баунт – Багдарин». Результаты статистической обработки эффективного сопротивления $\rho_{\sim}$ горных пород на участках «Сосновоозерский» и «Багдаринский» представлены в табл. 1. На профиле «оз. Баунт – Багдарин» протяженностью 90 км эффективное сопротивление $\rho_{\sim}$ изменяется в широких пределах от 350 до 7 200 Ом · м, в среднем $\rho_{\sim} = 2\,000\text{--}2\,400$ Ом · м, 85 % $\rho_{\sim}$ выше 1 000 Ом · м. Гистограммы распределения гранитоидов и метаморфических пород приведены на рис. 1. На Витимском плоскогорье распространены многолетнемерзлые горные породы.

Интерпретация частотной зависимости модуля и фазы поверхностного импеданса для мерзлоты Витимского плоскогорья приведена на рис. 2. Карта эффективного сопротивления участка «Багдаринский» на частоте 17,4 кГц приведена на рис. 3.

Измерения в СНЧ-диапазоне выполнены в 5 пунктах на частотах 44 и 82 Гц с использованием радиополя установки «Зевс» [4]. Схема расположения пунктов наблюдений приведена на рис. 4. Результаты измерений модуля поверхностного импеданса $|\delta|$, фазы ϕ_{δ} и эффективного сопротивления $\rho_{\sim}$ представлены в табл. 2.

Аэроработы на Буреинском кристаллическом массиве выполнены на 9 маршрутах участка «Ниманский». Общая длина маршрутов – 587 км, при расстоянии между маршрутами 5 км исследованный участок имеет площадь 2 600 км. Схема маршрутов участка «Ниманский» приведена на рис. 5. Гистограммы распределения $\rho_{\sim}$ трех комплексов горных пород, а также всего участка «Ниманский» приведены на рис. 6. Результаты статистической обработки $\rho_{\sim}$ на частоте 17,4 кГц для каждого маршрута и трех основных комплексов горных пород приведены в табл. 3. Как видно из табл. 3, наиболее низкие значения $\rho_{\sim}$ имеют юрские и меловые осадочные отложения, а метаморфические породы протерозоя и синийские образования по величине $\rho_{\sim}$ сходны с разновозрастными гранитоидами.

* Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН №11, гранта РФФИ №12-02-98002.

Таблица 1

Статистическая обработка эффективного сопротивления $\rho_{\text{э}}$ горных пород

Горные породы	f , кГц	N	$\rho_{\text{э}}/\rho_{\text{с.г.}}$, Ом · м	$\sigma_{\rho}/\sigma_{\text{с.г.}}$	$\rho_{\text{макс}}/\rho_{\text{мин}}$	Участок
<i>Кристаллические породы</i>						
Гранитоиды палеозойские	17,4	619	2 900 2 200	2 300 0,33	15 500 300	Багдаринский
Метаморфические породы	17,4	392	3 200 2 700	1 900 0,25	1 300 400	Багдаринский
Гранитоиды палеозойские	22,3	983	1 700 1 400	1 200 0,31	7 200 140	Сосново-озерский
Фельзитпорфиры, ортофи-ры, их туфы	22,3	220	1 300 900	1 000 0,38	100 000 40	Сосново-озерский
Трахибазальты, их туфы, туфобрекчии	22,3	53	770 520	740 0,42	3 300 50	Багдаринский
<i>Осадочные породы</i>						
Конгломераты с прослоями гравелитов юрского возраста	22,3	113	340 270	210 0,35	1 350 16	Еравнинская впадина
Мезокайнозойские песчано-глинистые отложения	22,3	122	280 220	240 0,32	840 25	Еравнинская впадина
Осадочные коры выветривания на гранитоидах	22,3	199	480 380	290 0,33	1 600 20	Еравнинский останец

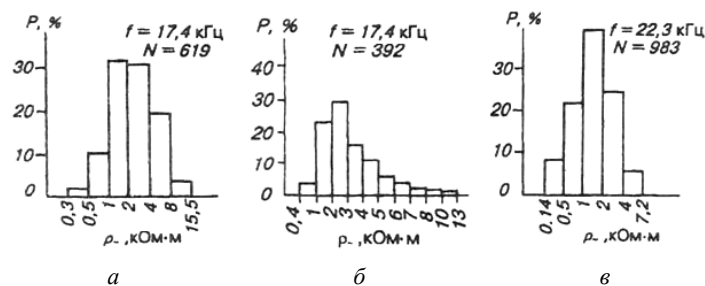


Рис. 1. Гистограммы распределения эффективного сопротивления гранитоидов (а) и метаморфических пород (б) на участке «Багдаринский»; гранитоидов (в) на участке «Сосновоозерский»

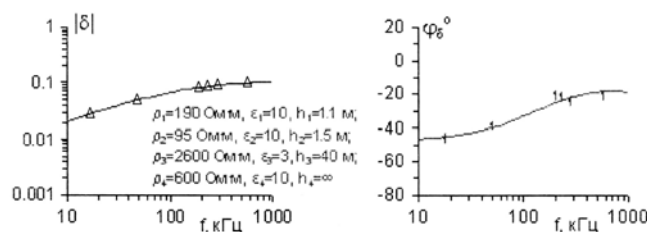


Рис. 2. Результаты интерпретации частотной зависимости модуля и фазы импеданса для мерзлоты Витимского плоскогорья

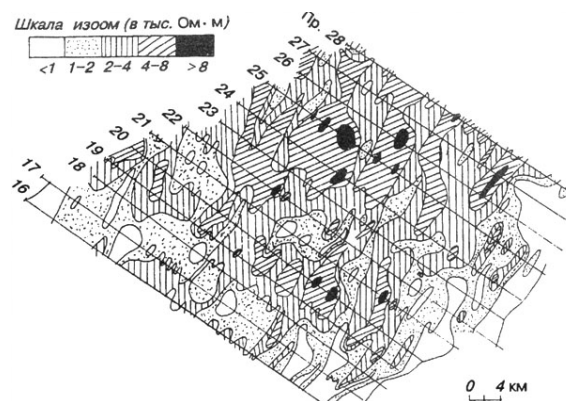


Рис. 3. Карта эффективного сопротивления участка «Багдаринский» на частоте 17,4 кГц

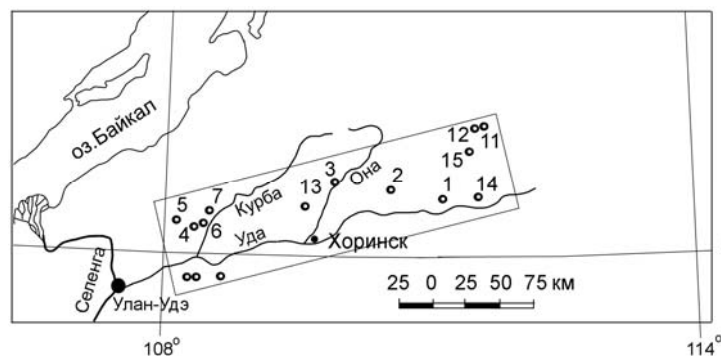


Рис. 4. Схема расположения пунктов наблюдений в СНЧ-диапазоне

Таблица 2

Измерения модуля поверхностного импеданса $|\delta|$, фазы φ_δ
и эффективного сопротивления $\rho_\sim$

Пункт наблюдения	44 Гц			82 Гц		
	$ \delta \cdot 10$	φ_δ , град	$\rho_\sim$, кОм · м	$ \delta \cdot 10$	φ_δ , град	$\rho_\sim$, кОм · м
1 Поповское	—	—	—	8,4	–38	15,9
11 т. 317	4,9	–22	14,2	5,4	–20	10,1
12 Колчеданный	6,2	–8	58	6,1	–11	22
14 Кыргында	1,6	–5	6	1,9	–7	3,4
15 Тулдун	0,42	–19	0,11	0,61	–34	0,09

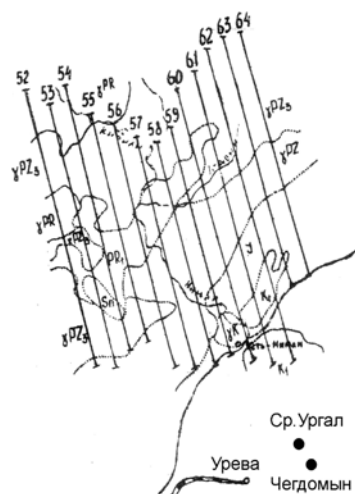


Рис. 5. Схема маршрутов участка «Ниманский»

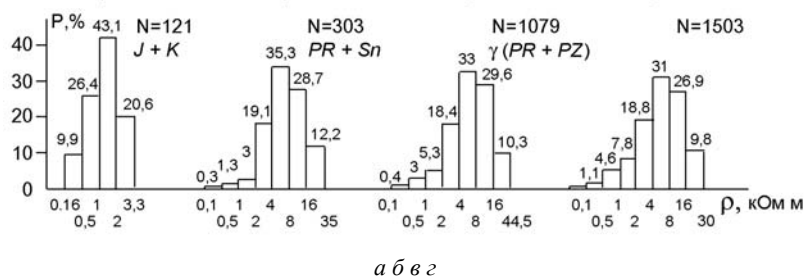


Рис. 6. Гистограммы распределения $\rho_\sim$ на частоте 17,4 кГц различных типов (а–в) и всех комплексов горных пород участка «Ниманский» на Бурейнском массиве (г)

Статистическая обработка $\rho_{\sim}$ на частоте 17,4 кГц

Номер маршрута, комплекс	N	$\rho_{\sim}$, Ом · м					$\sigma_{lg\rho}$
		min	max	с. а.	σ_p	с. г.	
60	185	300	18 500	3 740	3 220	2 750	0,34
59	146	165	28 700	5 200	5 580	2 890	0,49
58	146	225	15 000	5 170	3 420	3 790	0,39
57	153	560	21 400	7 970	4 940	6 230	0,34
56	166	900	19 000	8 780	4 900	7 100	0,31
55	157	1280	32 100	11 000	6 840	8 900	0,3
54	179	115	25 500	5 880	4 220	4 670	0,31
53	182	1 250	44 500	11 800	8 150	9 740	0,27
52	189	115	33 500	8 000	5 940	5 970	0,34
J + K	121	165	3 300	1 400	720	1 180	0,29
PR + Sn	303	115	35 000	8 200	5 890	6 400	0,33
$\gamma(\text{PR}, \text{PZ})$	1 079	115	44 500	7 980	6 080	5 980	0,35

Проведена классификация и получены статистические характеристики эффективного сопротивления для различных комплексов горных пород в районах Витимского плоскогорья и Буреинского массива в СДВ-диапазоне радиоволн. Установлена значительная дифференциация эффективного сопротивления между осадочными и кристаллическими породами, выявлено хорошее совпадение электрических границ различных комплексов горных пород с геологическими границами. Для однотипных пород статистическое распределение $\rho_{\sim}$ соответствует логнормальному закону.

Библиографические ссылки

1. Нефедьев М. А. Объемная модель и оценка перспектив Озернинского рудного узла по геофизическим данным (Западное Забайкалье). Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 184 с.
2. Аэроэлектроразведочная аппаратура РЭМП и результаты ее полевых испытаний / А. В. Вешев и др. // Геофизическая аппаратура. 1981. Вып. 73. С. 77–87.
3. Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г. Электрические свойства горных пород Алдано-Станового нагорья

по данным сверхдлинноволнового радиоимпедансного зондирования с борта самолета // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011, № 1. С. 191–197.

4. Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б. Глубинные радиоимпедансные зондирования земной коры с использованием электромагнитного поля СНЧ радиостановки // Физика Земли. 2001. № 2. С. 75–84.

References

1. Nefed'ev M. A. Obiemnaya model i otsenka perspektiv Ozerinskogo rudnogo uzla po geofizicheskim dannim (Zapadnoye zabaikal'e). Ulan-Ude. Buryat Scientific Center Publishing House. 2009. 184 p.
2. Veshev A. V., Ivochkin V. G., Yakovlev A. V. et al. Geophysic equipment, vol. 73, 1981, pp. 77–87.
3. Bashkuev Yu. B., Buyanova D. G. Mining informational and analytical bulletin, 1, 2011, pp. 191–197.
4. Bashkuev Yu. B. and Khaptanov V. B. Deep Radio Impedance Sounding of the Crust Using the Electromagnetic Field of a VLF Radio Installation. Izvestiya, Physics of the Solid Earth (Fizika zemli), 2001, no. 2, vol. 37, p. 157.

© Буянова Д. Г., Башкуев Ю. Б.,
Хаптанов В. Б., Адвокатов В. Р., 2013

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ И ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ. РАДИОМЕТРИЯ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

Заичко В. А., Селин В. А. Мероприятия Федерального космического агентства России по созданию космических средств радиолокационного наблюдения и технологий комплексной обработки данных	4
Музалевский К. В., Миронов В. Л., Швалева А. А. Измерение температуры деятельного слоя почвы арктической тундры на основе радиометрических наблюдений в L-диапазоне	6
Березин К. Ю., Дмитриев А. В., Дмитриев В. В. Оценка влагозапаса снежного покрова по данным спутниковой радиометрии для степной зоны Западной Сибири	9
Бобров П. П., Миронов В. Л., Яценко А. С. Зависимость радиояростной температуры, измеренной космическим аппаратом SMOS, от азимутального угла зондирования	12
Бобров П. П., Миронов В. Л., Яценко А. С. Особенности яркостных характеристик территории юга Западной Сибири и Северного Казахстана в период таяния снежного покрова, измеряемых космическим аппаратом SMOS	16
Бобров П. П., Ивченко О. А., Кривальцевич С. В. Влияние гидрофизических свойств почв на временную динамику яркостной температуры в микроволновом диапазоне	19
Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Базаров А. В., Раднаева С. Б. Результаты измерений радиояростной температуры на территории Бурятии космическим радиометром SMOS	22
Лепехина Т. А., Николаев В. И., Семенов М. А., И. В. Чарыков, Чикачев В. С. Оборудование радиолокационного полигона для калибровки и валидации космических радиолокаторов с синтезированной апертурой	26
Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М. Опыт создания полигонно-калибровочного комплекса для радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования	30
Лепехина Т. А., Николаев В. И. Проблемные вопросы проверки основных характеристик космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при летных испытаниях	32
Внотченко С. Л., Достовалов М. Ю., Ермаков Р. В., Мусинянц Т. Г., Севалкина Е. П. Основные результаты зондирования земной и водной поверхности многочастотным радиолокационным комплексом радиолокаторов с синтезированной апертурой «КОМПАКТ»	35
Достовалов М. Ю., Коваленко А. И., Костусяк В. М., Римап В. В., Судоргин С. Г. Синтез радиолокационных изображений земной поверхности, получаемых в бортовом радиолокационном комплексе «СЕВЕРЯНИН»	38
Родионова Н. В., Филатов А. В., Евтюшкип А. В. Изменение текстурных параметров ледяного покрова южной части озера Байкал в период ледостава 2010 г. по данным ALOS PALSAR	41
Евтюшкип А. В., Филатов А. В., Брыксин В. М. Сопровождение архива ERS-2\ SAR на территорию России	46
Филатов А. В., Брыксин В. М., Евтюшкип А. В., Васильев Ю. В., Белоносое А. Ю. Использование PSinSAR-технологии на кластере для геодинамического мониторинга нефтегазовых месторождений	49
Кантемиров Ю. И. Космический радарный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности и сооружений. Опыт компании «СОВЗОНД»	52
Кантемиров Ю. И. Применение космических радарных съемок для задач тематического картографирования и мониторинга изменений	54
Хан В. Д. Применение радарной интерферометрии для наблюдений за оползневыми процессами на горном предприятии на примере ОАО «Уртуйский угольный разрез»	57
Феоктистов А. А., Захаров А. И., Денисов П. В., Гусев М. А. Спутниковый радиолокационный мониторинг деформаций земной поверхности в зоне землетрясения с использованием данных наземных GPS-измерений	60
Лебедева М. А., Саньков В. А., Захаров А. И., Захарова Л. Н. Активные деформации в зоне влияния разломов Мондинской впадины по данным PСA-интерферометрии	63
Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Лейбман М. О., Дагуров П. Н., Кирбижекова И. И., Дворников Ю. А., Бердников Н. М. Исследование микродеформаций и оползневых процессов северных территорий Западной Сибири на основе интерферометрических данных	65
Тубанов Ц. А., Татьков Г. И., Чимитдоржиев Т. Н. Оценка современной подвижности (динамики) геоблоков и разрывных нарушений Байкальского рифта методами радиолокационной интерферометрии	68

Чимитдоржиев Т. Н., Гармаев А. М., Кирбижекова И. И., Емельянов К. С., Гусев М. А., Базаров А. В. Комбинирование методов спутниковой радиолокации и спектрального анализа для исследования лесных ресурсов Республики Бурятия	70
Кирбижекова И. И., Батуева Е. В. Картирование и мониторинг лесных сред на основе поляриметрических радарных данных по Байкальскому региону	73
Чимитдоржиев Т. Н., Татков Г. И., Тубанов Ц. А., Дагуров П. Н., Захаров А. И., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В., Быков М. Е. Исследования динамики ледового покрова озера Байкал по радарным данным и методами GPS-навигации	76
Евтюшкин А. В., Брыксин В. М., Рычкова Н. В. Мониторинг аграрных ресурсов по разновременным данным ERS-2\ SAR	79
Гусев М. А., Денисов П. В., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В. Базовые продукты дистанционного зондирования Земли на основе радиолокационных данных	82
Данилин А. И., Данилин И. М., Свищев Д. А. Зондирование лесного покрова высокочастотными импульсными лазерами и цифровыми аэро- и космическими фотоаппаратами сверхвысокого разрешения: опыт применения в Сибири	85

РАЗДЕЛ 2. РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. АЛГОРИТМЫ, ИНСТРУМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Беляева Т. А., Бобров П. П., Кондратьева О. В. Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества	92
Бобров П. П., Кондратьева О. В., Мустакова М. М. Влияние содержания органического вещества в почвах на диэлектрическую проницаемость в диапазоне частот 10 кГц – 8,5 ГГц	95
Миронов В. Л., Каравайский А. Ю., Лукин Ю. И. Применимость концепции незамерзшей воды при моделировании диэлектрической проницаемости мерзлых почв	97
Кочеткова Т. Д., Сусляев В. И., Волчков С. И. Диэлектрическая проницаемость хвойных пород древесины в диапазоне частот 3–12 ГГц	101
Дмитриев А. В., Дмитриев В. В., Конышев И. С., Тудос В. Н. Методы экспериментального определения параметров шероховатости почвенного покрова	104
Миронов В. Л., Сорокин А. В., Михайлов М. И., Фомин С. В., Музалевский К. В. Диагностика влажности почвы с использованием поляризационных рефлектограмм сигналов ГЛОНАСС и GPS	107
Репин А. В., Яценко А. С. Коэффициенты отражения и передачи слоистой среды и возможность определения комплексной диэлектрической проницаемости одного или двух слоев	109
Бордонский Г. С., Орлов А. О., Гурулев А. А., Щегрина К. А. Изучение ледяного покрова соленых озер радиолокационным методом	112
Гурулев А. А., Крылов С. Д., Цыренжапов С. В. Радиолокационное определение неоднородностей ледяного покрова пресных озер	114
Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Базаров А. В., Балтухаев А. К., Дымбрылов Ж. Б. Вариации амплитуды и фазы коэффициента отражения микроволн от влажно-слоистой почвы	117
Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Татков Г. И., Чимитдоржиев Т. Н., Базаров А. В., Балтухаев А. К. Отражение микроволн L-диапазона от снежного покрова	120
Миронов В. Л., Михайлов М. И., Сорокин А. В., Музалевский К. В., Фомин С. В. Метод измерения ослабления микроволнового излучения в лесном пологом с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS	123
Ветлужский А. Ю., Калашников В. П. Широкополосное радиопросвечивание растительных покровов земной поверхности	126
Ветлужский А. Ю., Калашников В. П. Изучение механизмов переноса радиоизлучения VHF–UHF-диапазонов в лесной растительности	128
Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г. Определение плотности лесной среды с использованием радара «ОКО-2»	132
Доржиев Б. Ч., Очиров О. Н., Содномов Б. В. Некоторые результаты по обнаружению скрытых объектов методом сверхкороткоимпульсной радиолокации	135
Ломухин Ю. Л., Атутов Е. Б., Басанов Б. В., Бутуханов В. П. Измерение обратного отражения рупорными антеннами с дифракторной развязкой	138
Ломухин Ю. Л. Радиояркостьная температура и коэффициент обратного рассеяния	141
Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г. Структура водной толщи и донных отложений озера Котокель по данным георадарного зондирования	143

Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г., Буянова Д. Г., Ангархаева Л. Х. Результаты электрометрических исследований водной среды реки Селенги, ее притоков и акватории озера Байкал	146
Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г. Результаты радиоимпедансного и георадарного зондирования прибрежной зоны среднего Байкала	149
Григорьев А. С., Кашкин В. Б. Обнаружение ионосферных и тропосферных откликов сейсмической активности по спутниковым данным	152
Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г., Лухнев А. В., Саньков В. А. Тропосферная зенитная задержка по данным GPS-станций ULAZ, IRKT и BADG	156
Хахинов В. В., Потехин А. П., Лебедев В. П., Кушнарв Д. С., Алсаткин С. С. Некоторые результаты активных космических экспериментов «ПЛАЗМА-ПРОГРЕСС» и «РАДАР-ПРОГРЕСС»	160
Пономарчук С. Н., Грозов В. П., Котович Г. В., Михайлов С. Я. Обработка и интерпретация ионограмм вертикального и наклонного зондирования для диагностики ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда	163
Лебедев В. П., Медведев А. В., Толстиков М. В. Интерференционные измерения ионосферных возмущений на иркутском радаре некогерентного рассеяния	166
Романов А. А., Трусов С. В., Романов А. А., Барабошкин О. И., Бобровский С. А. Двумерная радиотомография ионосферы: существующие и перспективные технологии	169
Нагуслева И. Б., Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г. Пространственно-временные вариации интенсивности ОНЧ-импульсного потока в Байкальской рифтовой системе	172
Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г., Адвокатов В. Р., Буянова Д. Г. Геоэлектрический разрез осадочных комплексов горных пород дельты реки Селенги	175
Буянова Д. Г., Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Адвокатов В. Р. Электромагнитная диагностика горных пород Витимского плоскогорья и Буреинского массива в СНЧ–ОНЧ-диапазонах радиоволн	179

CONTENTS

PART 1. RADAR POLARIMETRY AND INTERFEROMETRY. RADIOMETRY OF TERRESTRIAL COVERS

Zaichko V. A., Selin V. A. Russian Federal space agency activities for the creation of the space radar observation facilities and integrated data processing technologies	4
Muzalevskiy K. V., Mironov V. L., Shvaleva A. A. The active layer of the arctic tundra soils temperature sounding on the basis of L-band radiometric observations	6
Berezin K. Ju., Dmitriev A. V., Dmitriev V. V. Estimation of snow water equivalent by use of satellite radiometry for the steppe zone of Western Siberia	9
Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S. Dependence of brightness temperature sounded with spacecraft SMOS on the azimuth angle of sounding	12
Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S. Features of the brightness characteristics of the south of Western Siberia and Northern Kazakhstan during snow ablation measured by SMOS-satellite	16
Bobrov P. P., Ivchenko O. A., Krivaltsevitsh S. V. Effects of soil hydrophysical properties on temporal dynamics of brightness temperature within microwave range	19
Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Bazarov A. V., Radnaeva S. B. The results of brightness temperature measurements at the territory of Buryatia made with space radiometer SMOS	22
Lepekhina T. A., Nikolaev V. I., Semenov M. A., Charykov. V. I., Chikachev V. S. Test range equipment for spaceborne synthetic aperture radar calibration and validation	26
Atroshenko L. M., Gorobec N. N., Krasnogorskiy M. G., Malukov V. M. Experience of creation of the ground calibration polygon complex for the space synthetic aperture radar testing	30
Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. Some problems of spaceborne synthetic aperture radar principal performance verification in flight tests	32
Vnotchenko S. L., Dostovalov M. Y., Ermakov R. V., Moussiniants T. G., Sevalkina E. P. The results of multifrequency SAR observations with 4-band airborne radar complex "COMPACT"	35
Dostovalov M. J., Kovalenko A. I., Kostusyak V. M., Riman V. V., Sudorgin S. G. Synthesis of earth surface radar images received in "SEVERYANIN" spaceborne radar system	38
Rodionova N. V., Filatov A. V., Evtyushkin A. V. Lake Baikal ice cover texture features change during the freezing period of the year 2010 due to ALOS PALSAR data	41
Yevtyushkin A. V., Filatov A. V., Bryksin V. M. Archiving of ERS-2/SAR in Russia	46
Filatov A. V., Bryksin V. M., Yevtyushkin A. V., Vasiliev Yu. V., Belonosov A. Yu. Use of PSInSAR technique on computing cluster for geodynamic monitoring of oil and gas fields	49
Kantemirov Yu. I. Satellite synthetic aperture radar monitoring of ground and constructions displacements and deformations. "SOVZOND" company experience	52
Kantemirov Yu. I. Satellite SAR data usage for thematic mapping and change detection purposes	54
Khan V. D. Application radar interferometry for monitoring the landslide processes at mining plant at the example of JSC "Urtuyskiy coal mine"	57
Feoktistov A. A., Zakharov A. I., Denisov P. V., Gusev M. A. SAR monitoring of terrestrial surface deformation in the earthquake zone using GPS-data	60
Lebedeva M. A., Sankov V. A., Zakharov A. I., Zakharova L. N. Active deformations in the zone of influence of faults of mondy basin by SAR interferometry data	63
Chimitdorzhiev T. N., Bikov M. E., Leibman M. O., Dagurov P. N., Kirbizhekova I. I., Dvornikov Y. A., Berdnikov N. M. Study of microdeformation and landslides of the northern territories of West Siberia from interferometric data	65
Tubarov Ts. A., Tatkov G. I., Chimitdorgiev T. N. Assessment of modern mobility (dynamics) of geoblocks and faults of Baikal rift by methods of radar interferometry	68
Chimitdorzhiev T. N., Garmaev A. M., Kirbizhekova I. I., Emelyanov K. S., Gusev M. A., Bazarov A. V. Combination of methods of satellite radar and spectral analysis for research of forest resources of Republic of Buryatia	70
Kirbizhekova I. I., Batueva E. V. Mapping and monitoring of forest environments on the basis of polarimetric radar data on Baikal region	73
Chimitdorzhiev T. N., Tatkov G. I., Tubarov Zh. A., Dagurov P. N., Zakharov A. I., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V., Bikov M. E. Research of lake Baikal ice cover dynamics on the basis of radar data and GPS-navigation methods	76

Yevtyushkin A. V., Bryksin V. M., Rychkova N. V. Monitoring of agricultural resources on multitemporal ERS-2\SAR	79
Gusev M. A., Denisov P. V., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V. Earth observation on SAR-data basic products	82
Danilin A. I., Danilin I. M., Svishev D. A. Remote sensing of forest cover by high-frequency pulse lasers and digital ultra-high resolution aerial- and space cameras: experience of application in Siberia	85

PART 2. RADIO PHYSICAL METHODS OF DIAGNOSTICS OF ENVIRONMENT. ALGORITHMS, INSTRUMENTS AND RESULTS

Belyaeva T. A., Bobrov P. P., Kondratieva O. V. Changes of the bound water dielectric properties in soils at increase of its quantity	92
Bobrov P. P., Kondratieva O. V., Mustakova M. M. Effect of soil organic matter on the dielectric permittivity at the frequencies 10 kHz – 8.5 GHz	95
Mironov V. L., Karawaysky A. Yu., Lukin Yu. I. The applicability of unfrozen water conception for modelling of dielectric permittivity of frozen soils	97
Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Volchkov S. I. The dielectric constant of coniferous wood in the frequency range 3–12 GHz	101
Dmitriev A. V., Dmitriev V. V., Konishev I. S., Tudos V. N. Methods of experimental determination of parameters of the inequalities of the soil cover	104
Mironov V. L., Sorokin A. V., Mihaylov M. I., Fomin S. V., Muzalevskiy K. V. Determination of soil moisture using polarization reflectogram of GLONASS- and GPS-signals	107
Repin A. V., Yashchenko A. S. Reflection and transmission coefficients of the bedded media and possibility of detection of complex permittivity of one or two beds	109
Bordonskiy G. S., Orlov A. O., Gurulev A. A., Schegrina K. A. Investigation of saline lakes ice cover by radar method	112
Gurulev A. A., Krylov S. D., Tsyrenzhapov S. V. Radar detection of non-uniformities of the ice cover of fresh water lakes	114
Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Chymitdorzhiev T. N., Bazarov A. V., Baltukhaev A. K., Dymbrylov Zh. B. Variations of amplitude and phase coefficient of microwaves reflection of the moist bedded soil	117
Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Dobrynin S. I., <u>Tatkov G. I.</u>, Chymitdorzhiev T. N., Bazarov A. V., Baltukhaev A. K. L-band microwaves reflection from a snow cover	120
Mironov V. L., Mihaylov M. I., Sorokin A. V., Muzalevskiy K. V., Fomin S. V. Method of measure of microwave radiation at the forest canopy using GLONASS- and GPS-signals	123
Vetluzhsky A. Yu., Kalashnikov V. P. Wideband radio sounding of vegetation covers of the earth surface	126
Vetluzhsky A. Yu., Kalashnikov V. P. Study of the mechanisms of transfer of VHF–UHF band radio emission in the forest vegetation	128
Khaptanov V. B., Bashkuev Yu. B., Dembelov M. G. Determination of the forest environment density with the use of GPR “EYE-2”	132
Dorzhiev B. Ch., Ochirov O. N., Sodnomov B. V. Some results on the detection of hidden objects by means of ultra-short pulse radiolocation	135
Lomuhin Y. L., Atutov E. B., Basanov B. V., Butukhanov V. P. Measurement of the backs reflection with the horn antenna in diffraction isolation	138
Lomuhin Yu. L. The brightness temperature and the backscattering coefficient	141
Khaptanov V. B., Bashkuev Yu. B., Dembelov M. G. Structure of the Kotokel lake water and bottom sediments according to GPR sounding	143
Bashkuev Yu. B., Khaptanov V. B., Dembelov M. G., Buyanova D. G., Angarkhaeva L. Kh. Results of electrometric analysis of water samples of the river Selenga with its tributaries and the lake Baikal water area	146
Khaptanov V. B., Bashkuev Yu. B., Buyanova D. G. Results of radioimpedance and geo-radar soundings of the coastal zone of the Middle Baykal	149
Grigoriev A. S., Kashkin V. B. Detection of ionosphere and troposphere response to seismic activity according to satellite data	152

Bashkuev Yu. B., Dembelov M. G., Loukhnev A. V., Sankov V. A. Troposphere zenith delay according to GPS data of ULAZ, IRKT AND BADG stations	156
Khakhinov V. V., Potekhin A. P., Lebedev V. P., Kushnarev D. S., Alsatkin S. S. Some results of “PLASMA-PROGRESS” and “RADAR-PROGRESS” active space experiments	160
Ponomarchuk S. N., Grozov V. P., Kotovich G. V., Mikhailov S. Ya. The processing and interpretation of vertical and oblique sounding ionograms for ionosphere diagnostics on the base of chirp-ionosonde	163
Lebedev V. P., Medvedev A. V., Tolstikov M. V. Interferential measurements of ionospheric disturbances on the Irkutsk incoherent scattering radar	166
Romanov A. A., Trusov S. V., Romanov A. A., Baraboshkin O. I., Bobrovskij S. A. 2-dimentional ionosphere radiotomography: the existing and perspective technologies	169
Naguslaeva I. B., Bashkuev Yu. B., Khaptanov V. B., Dembelov M. G. Spice-time variations of intensity of VLF-pulse stream in the Baikal rift system	172
Bashkuev Yu. B., Khaptanov V. B., Dembelov M. G., Advokatov V. R., Buyanova D. G. Geo-electric cross-section of the sedimentary rocks of the delta of the river Selenga	175
Buyanova D. G., Bashkuev Yu. B., Khaptanov V. B., Advokatov V. R. Electromagnetic diagnostics of Vitim plateau and Bureya massif rocks in ELF-VLF radio spectrum bands	179

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели:

Миронов В.Л. – чл.-к. РАН, ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск;

Никитов С.А. – чл.-к. РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва;

Потехин А.П. – чл.-к. РАН, ИСЗФ СО РАН, Иркутск.

Члены программного комитета:

Бобров П.П. – д.ф.-м.н., проф., ОмГПУ, Омск;

Бондур В.Г. – академик РАН, НИИ «АЭРОКОСМОС», Москва;

Бордонский Г.С. – д.ф.-м.н., проф., ИПРЭК СО РАН, Чита;

Дагуров П.Н. – д.ф.-м.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Заичко В.А. – советник руководителя Роскосмоса, Москва;

Захаров А.И. – к.т.н., ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино;

Кашкин В.Б. – д.т.н., проф., СФУ, Красноярск;

Кутуза Б.Г. – д.ф.-м.н., проф., ИРЭ РАН, Москва;

Лаврова О.Ю. – к.ф.-м.н., ИКИ РАН, Москва;

Ломухин Ю.Л. – д.ф.-м.н., проф., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Митник Л.М. – д.ф.-м.н., проф., ТОИ ДВО РАН, Владивосток;

Неронский Л.Б. – д.т.н., проф., ОАО «Концерн радиостроения «Вега», Москва;

Романов А.А. – д.т.н., проф., ОАО «Российские космические системы», Москва;

Селин В.А. – к.т.н., ОАО «Российские космические системы», Москва;

Семенов А.П. – д.т.н., проф., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Чимитдоржиев Т.Н. – д.т.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Шарыгин Г.С. – д.т.н., проф., ТУСУР, Томск;

Erdenee B. – PhD, the Remote Sensing Society of Mongolia, Ulanbaatar, Mongolia;

Neumann M. – PhD, JPL, California Institute of Technology, Pasadena, USA;

Sato M. – Dr. Eng., prof., Tohoku University, Sendai, Japan;

Tsolmon R. – PhD, prof., National University of Mongolia, Ulanbaatar, Mongolia.

ОРКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Семенов А.П. – д.т.н., проф., директор ИФМ СО РАН, Улан-Удэ.

Заместители председателя:

Захаров А.И. – к.т.н., ФИРЭ РАН, Фрязино;

Чимитдоржиев Т.Н. – д.т.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ.

Ученый секретарь:

Базаров А.В. – к.т.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ.

Члены Оргкомитета:

Антипов В.А. – к.т.н., ОАО «Российские космические системы», Москва;

Атутов Е.Б. – к.ф.-м.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Балтухаев А.К. – ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Басанов Б.В. – ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Батыева Е.В. – к.ф.-м.н., доц., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Бороноев В.В. – д.т.н., проф., ИФМ СО РАН Улан-Удэ;

Дагуров П.Н. – д. ф.-м.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Дембелов М.Ю. – к.ф.-м.н., доц., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Дмитриев А.В. – к.ф.-м.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Доржиев Б.Ч. – к.ф.-м.н., доц., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Емельянов К.С. – НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы», Москва;

Кирбижекова И.И. – к.ф.-м.н., доц., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Ломухин Ю.Л. – д.ф.-м.н., проф., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ;

Оциров О.Н. – ИФМ СО РАН, Улан-Удэ.