

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ВЫСОТЫ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS**В. Л. Миронов, М. И. Михайлов, К. В. Музалевский, А. В. Сорокин,
С. В. Фомин, А. Ю. КаравайскийИнститут физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, Академгородок, 50/38
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

Проведены теоретические и экспериментальные исследования возможности измерения влажности и высоты растительного покрова сельскохозяйственных полей с помощью приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Измерение интерференционной картины (интерферограмм) сигналов ГНСС проводилось в августе 2013 г. в пригороде Красноярска на сельскохозяйственных полях, засеянных рапсом, рожью, пшеницей и ячменем. Запись сигналов ГЛОНАСС и GPS производилась на стандартный, промышленно выпускаемый приемник МРК-32Р (ФГУП НПП «Радиосвязь», город Красноярск). Синхронно с измерением интерферограмм проводились контактные измерения гранулометрического состава и объемной влажности почвы на глубине 5 и 10 см, высоты, объемной влажности и плотности растительности. Кроме того, были проведены диэлектрические измерения ржи и построена диэлектрическая модель, которая позволила рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость растительности в зависимости от ее влажности. Метод восстановления объемной влажности и высоты растительности основан на решении обратной задачи путем минимизации нормы невязки между измеренной и теоритически рассчитанной интерферограммами сигналов ГНСС. Теоретическая модель интерферограмм учитывала лишь когерентную составляющую поля отраженной волны от неровной поверхности почвы со слоем растительности. При этом объемная влажность и гранулометрический состав почвы считались известными.

В результате показано удовлетворительное соответствие между экспериментально измеренными интерферограммами и рассчитанными на основе предложенной теоретической модели интерферограмм сигналов ГНСС. В ходе экспериментов для различных культур рапса, ржи, пшеницы и ячменя показана принципиальная возможность измерения высоты и объемной влажности растительного покрова сельскохозяйственных полей. Восстановленные значения высоты и влажности растительного покрова тестовых участков в среднем с погрешностью 0,17 м и 0,21 кг/м² соответствуют значениям, измеренным контактным методом. Для внедрения предложенного метода измерения влажности и высоты растительности с помощью сигналов ГНСС необходима дальнейшая валидация в полевых условиях.

Ключевые слова: навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, GPS, дистанционное зондирование Земли, спутниковый мониторинг сельхозугодий, влажность посевов, высота посевов, биомасса посевов.

**MEASUREMENT OF HEIGHT AND MOISTURE OF AN AGRICULTURAL VEGETATION
USING GPS/GLONASS RECEIVER**V. L. Mironov, M. I. Mikhaylov, K. V. Muzalevskiy, A. V. Sorokin,
S. V. Fomin, A. U. KaravayskiyThe Institute of Physics of the Academy of Sciences
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

In this paper, possibility of measuring of moisture and heights of vegetation at agricultural fields using receiver of global navigation satellite systems (GNSS) signals is theoretically and experimentally studied. Measurement of GNSS interference pattern (interferogram) was held in August 2013 at suburb of Krasnoyarsk on agricultural fields planted with rape, rye, wheat and barley. Signals of GLONASS and GPS were recorded on a standard receiver MRK-32P ("Radiosvayz", Krasnoyarsk). Measurements of texture, bulk density and volumetric moisture of soil at the depth of 5 cm and 10 cm, height, volumetric moisture and bulk density of the vegetation were carried out synchronously with the measurement of interferograms. In addition, the dielectric measurements of rye were carried out based on which dielectric model was built, that is allowed to calculate the complex permittivity of vegetation, depending on its

volumetric moisture content. The method of retrieving of volumetric moisture and heights of vegetation is based on solving the inverse problem by minimizing the norm of the residual between the measured and theoretically calculated interferogram. The theoretical model of interferogram takes into account only the coherent component of field of reflected wave from the rough soil surface covered with a vegetation. At the same time, the volumetric moisture and texture of soil were assumed as known parameters.

As a result, a good agreement between measured and calculated interferograms was shown. Retrieved vegetation heights and moisture on the test plots with an average error of 0.17 m and 0.21 kg/m² corresponds to values, which are measured by the contact method.

Keywords: global navigation satellite system, GLONASS, GPS, remote sensing, satellite monitoring of farmland, vegetation moisture, vegetation height, vegetation biomass.

Введение. В настоящее время активно развивается метод дистанционного измерения физических характеристик покровов Земли с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1–13]. Сигналы, излучаемые ГНСС в круглосуточном режиме, покрывают поверхность всей Земли и не зависят от погодных условий. Метод измерения основан на регистрации приемником сигналов ГНСС интерференционной картины, возникающей в результате суперпозиции поля прямой волны, распространяющейся от спутника ГНСС к приёмной антенне, расположенной на высоте нескольких метров над поверхностью почвы, с полем отраженной волны от поверхности почвы. Характер интерференционной картины, сформированной многолучевым распространением сигналов ГНСС, зависит от электро-, геофизических характеристик почвенного и надпочвенного покрова (влажность почвы, влажность и высота растительности). В результате эти параметры могут быть восстановлены из измеренной приемником ГНСС интерференционной картины с использованием теоретической модели, описывающей интерференцию амплитуд сигналов в приемнике ГНСС. В работах [1–3; 5; 6] исследовалась принципиальная возможность измерения влажности поверхностного слоя почвенного покрова с использованием сигналов ГНСС. Измерение влажности осуществлялось как с использованием промышленно выпускаемых образцов приемников [1; 4; 6–10], так и с опытными образцами [2; 3]. При этом приемники оснащаются как антеннами с правой круговой [1; 4–10], так и вертикальной поляризацией [2; 3]. В самое последнее время [1] была экспериментально доказана возможность применения для измерения влажности почвенного покрова стандартных приемников сигналов ГНСС, составляющих сеть Earthscope Plate Boundary Observatory, которая создана на территории США для мониторинга смещений тектонических плит в зонах разломов. Предложены методы и проведены эксперименты [12; 13] по одновременному определению влажности почвенного и растительного надпочвенного покрова. Особенностью подхода стало использование специально разработанного приемника и антенн с вертикальной поляризацией.

В России впервые исследования по измерению влажности почвенного покрова с применением сигналов ГНСС были начаты в 2011 г. [4]. В работе [10] проведены измерения интерференционных ГНСС сигналов с использованием стандартного приемника МРК-32 производства ОАО «НПП «Радиосвязь»,

г. Красноярск, оснащенного антенной с правой круговой поляризацией; получены оценки влажности с применением алгоритма, предложенного в [2]. В результате этого исследования установлено, что применение стандартной приемной антенны с правой круговой поляризацией позволяет восстанавливать влажность с погрешностью больше чем 0,04 см³/см³, которая принята предельно допустимой для спутников дистанционного зондирования Земли. В дальнейшем в работе [5] был создан оригинальный алгоритм обработки интерференционного сигнала, позволивший при использовании антенны с линейной вертикальной поляризацией восстановить влажность почвы с погрешностью меньше чем 0,04 см³/см³. При этом в модели интерференционного сигнала была использована модель диэлектрической проницаемости почвы, обладающая существенно меньшей погрешностью по сравнению с моделями, примененными в [2; 3]. Прием на антенну с вертикальной поляризацией подтвердил свою эффективность при тестировании на большом объеме экспериментальных данных [6].

В данной работе проводится анализ экспериментальных данных [7] и исследуются потенциальные возможности сигналов ГНСС, принятых аппаратурой МРК-32Р, оснащенной антенной с правой круговой поляризацией, для измерения влажности почвы, влажности и высоты растительного покрова сельскохозяйственных полей.

Автономный измерительно-регистрационный комплекс на базе серийного приемника сигналов ГЛОНАСС/GPS МРК-32Р и методика измерений.

Для проведения полевых экспериментов по дистанционному зондированию земных покровов с помощью сигналов ГНСС GPS и ГЛОНАСС был собран автономный измерительно-регистрационный комплекс (АИРК) на базе серийного комплекта МРК-32Р производства НПО «Радиосвязь», г. Красноярск. Блок-схема измерительной установки АИРК представлена на рис. 1. Сигналы ГНСС принимаются с помощью антенн 1, 2, 3, 4 в различных конфигурациях (рис. 1). В данном эксперименте измерения проводились на антенну 1, представляющую собой антенный модуль АМ-7 комплекта МРК-32Р (рис. 2). Антенна размещалась на переносной металлической треноге с удлинительной штангой (рис. 2). Максимальная высота размещения фазового центра антенны в полевых условиях может достигать 3,3 м. Сигналы навигационных спутников, принятые антенной, поступают через смеситель в блок МРК-11 ПрМ-16. Здесь сигналы обрабатываются и через конвертер RS-232/USB2.0

направляются в ноутбук. С помощью специального программного обеспечения обеспечивается визуализация процесса приема и обработки сигналов, а также их запись в бинарный файл. Методика проведения эксперимента включала в себя две стадии: полевые измерения и первичная камеральная обработка данных. При полевых работах на месте проведения сеанса наблюдения производился монтаж антенной системы, выставлялась необходимая высота антенны и ее ориентация по азимуту и углу места. После подключения всех разъемов осуществляется проверка работоспособности аппаратуры, прогрев и настройка в течение 10–15 мин. Затем осуществляется включение на запись принимаемого сигнала на жесткий диск ноутбука. Первичная камеральная обработка заключается в извлечении и преобразовании полученных данных из бинарного файла в серию файлов в формате csv (обработка программой Excel). Для удобства дальнейшей обработки все записи сигналов компонуются стандартным образом в один проект в среде программы OriginLab, куда также добавляется информация о существенных обстоятельствах проведенного сеанса (место, время, характеристики антенной конфигурации, объекта и т. п.). Полученные в таком виде экспериментальные данные проходили дальнейшую обработку и анализ.

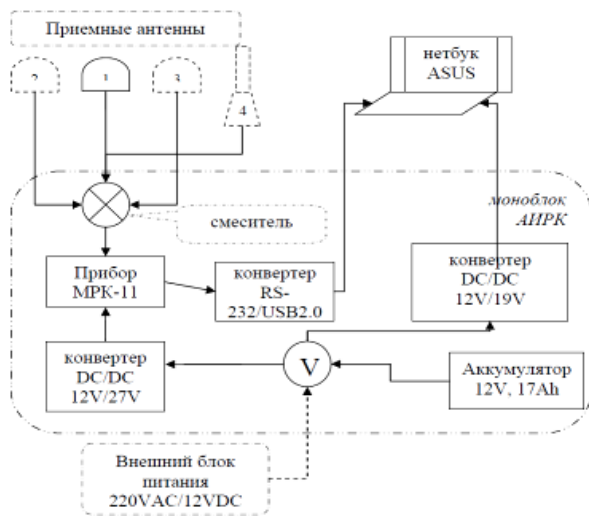


Рис. 1. Блок-схема приемника сигналов ГНСС

В качестве объектов исследования были выбраны поля ФГУП «Минино» Российской академии сельскохозяйственных наук, засеянные рапсом, пшеницей, ячменем и рожью. Во время эксперимента на каждом из полей были проведены измерения высоты растительности, среднее количество стеблей на квадратный метр, отобраны образцы растительности и почвы (с глубины 5 и 10 см) для определения влажности термостатно-весовым методом; проведен гранулометрический анализ образцов почв на содержание глинистой фракции. Результаты гранулометрического анализа почвенных образцов представлены в табл. 1. Как следует из табл. 1, содержание глинистой фракции в почве практически не изменяется для всех тестовых участков. В дальнейших расчетах диэлектрической

проницаемости будем использовать среднее значение глинистой фракции $W_c = 0,312$ г/г.



Рис. 2. Антенна правой круговой поляризации приемника ГНСС, снабженная поворотным устройством

Таблица 1

Содержание глинистой фракции почвы участков полей

№	Наименование поля	Массовое содержание глинистой фракции, г/г
1	Рожь	0,312
2	Пшеница	0,316
3	Рапс	0,309

Поля с различными видами культур находились на достаточно ровной поверхности и имели форму прямоугольника, стороны которого ориентированы по направлениям света. Антенна приемника располагалась на северной границе выбранного поля. Максимум диаграммы направленности антенны ориентировался по горизонту в южном направлении. В результате такой ориентации антенны большая часть зон, существенных для отражения сигналов спутников GPS и ГЛОНАСС, проходили по исследуемому полю. Характеристики исследуемых зерновых культур и условия проведенных сеансов измерений представлены в табл. 2.

Диэлектрическая модель растительного покрова и почвы. Модель комплексной диэлектрической проницаемости посевов была построена на основе измерения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) образцов растительности с поля, засеянного рожью. Измерения проводились с использованием методики, разработанной ранее [14], на частоте 1,51 ГГц и в диапазоне влажностей от 0,11 до 0,52 г/г, при комнатной температуре 25 °С. Для измерений был использован векторный анализатор цепей ZVK, изготовленный фирмой Rohde-Schwarz. Исследуемый образец помещается в измерительный контейнер, который представляет собой отрезок коаксиального волновода, подключенный к векторному анализатору цепей. Срезанные на поле колосья ржи вместе со стеблями в лабораторных условиях были высушены

и размолоты до порошкообразного состояния. Далее образец увлажнялся дистиллированной водой и выдерживался в герметичном состоянии 5 суток. По истечении 5 суток проводились диэлектрические измерения, после которых определялась влажность каждого образца. Образец взвешивался и помещался в тепловой шкаф, в котором при температуре 105 °С он выдерживался в течение 24 ч, далее производилось очередное взвешивание. Таким образом, определялась влажность термостатно-весовым способом. На рис. 3 показана зависимость приведенных коэффициентов преломления $(n_s-1)/\rho_d$ и поглощения κ_s/ρ_d образца растительности, где ρ_d – плотность сухого образца от его весовой влажности m_g .

Зависимости, показанные на рис. 3, можно описать рефракционной моделью смеси сухого органического вещества растений и воды в растениях [14]:

$$n_s = 1 + \frac{n_m - 1}{\rho_m} \rho_d + (n_w - 1)W, \quad (1)$$

$$\kappa_s = \frac{\kappa_m}{\rho_m} \rho_d + \kappa_w W,$$

где n_m , n_w , κ_m , κ_w – показатели преломления и поглощения соответственно; индексы m и w относятся к органическому веществу сухих растений и воде в растениях соответственно; ρ_d – плотность органического вещества сухих растений, которая измерялась в эксперименте. С помощью регрессионного анализа данных, представленных на рис. 3, найдены следующие параметры модели (1):

$$\frac{n_m - 1}{\rho_m} = 0,13, \quad (n_w - 1) = 7,69, \quad \frac{\kappa_m}{\rho_m} = 1,065, \quad \kappa_w = 0. \quad (2)$$

Комплексный показатель преломления для слоя влажной растительности в полевых условиях оценим исходя из рефракционной формулы смеси (1), учитывая долю воды, содержащейся в объеме биомассы.

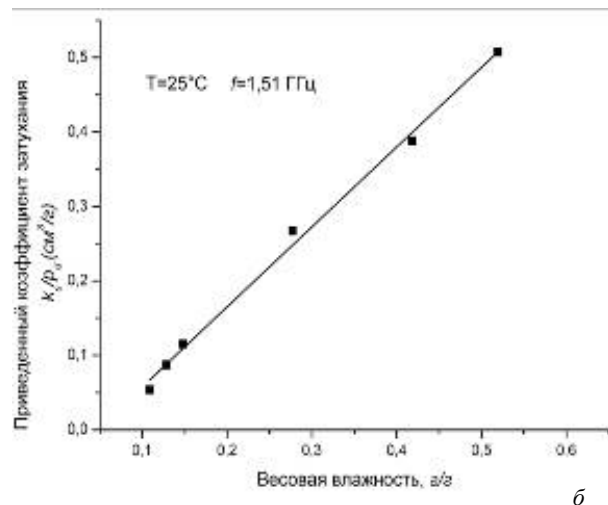
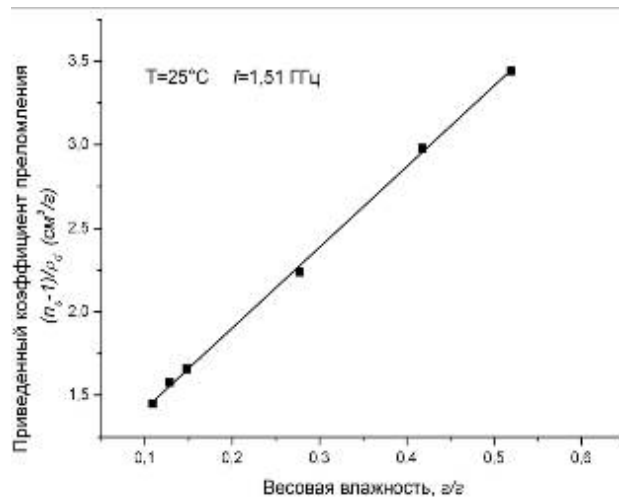


Рис. 3. Зависимость приведенного коэффициента преломления образца $(n_s-1)/\rho_d$ (а) и приведенного коэффициента затухания κ_s/ρ_d (б) от весовой влажности m_g образца растительности

Таблица 2

Характеристики зерновых культур и условия сеанса измерения

Условия сеансов	Ед. изм.	Рожь озимая	Пшеница яровая	Ячмень яровой	Рапс яровой
Дата проведения 1 сеанса	–	20.08.2013	26.08.2013	27.08.2013	28.08.2013
Широта точки измерения	с. ш.	56°04'43".2	56°05'02".8	56°04'38".1	56°04'54".4
Долгота точки измерения	в. д.	92°40'26".5	92°40'35".5	92°40'42".5	92°40'28".6
Высота фазового центра антенны	м	3,08	3,08	3,07	3,06
Ориентация оси антенны	град	197	174	185	175
Средняя высота растительного слоя	м	1,03	0,87	0,77	0,66
Средняя длина растений	м	1,18	0,74	0,81	0,59
Плотность посадки растений	шт/м ²	380	370	340	150
Содержание сухой биомассы в слое	г/см ³ ·10 ⁻³	1,01	0,66	0,66	0,50

Условия сеансов	Ед. изм.	Рожь озимая	Пшеница яровая	Ячмень яровой	Рапс яровой
Объемная влажность растительного слоя	см ³ /см ³ ·10 ⁻³	0,59	0,79	1,49	2,31
Объемная влажность почвы на глубине 5 см	см ³ /см ³	0,27	0,23	0,29	0,19
Объемная влажность почвы на глубине 10 см	см ³ /см ³	0,30	0,33	0,31	0,27

Тогда эффективные показатели преломления n_l и поглощения κ_l растительного покрова могут быть записаны в следующем виде:

$$n_l = 1 + 2 \frac{n_m - 1}{\rho_m} \rho_l + (n_w - 1) W_l, \quad (3)$$

$$\kappa_l = 2 \frac{\kappa_m}{\rho_m} \rho_l + \kappa_w W_l,$$

где ρ_l – эффективная плотность слоя, заполненного сухими растениями. Эффективная плотность слоя была оценена как содержание сухой биомассы в кубическом метре посевов (см. табл. 2). Далее модель (3) будет использоваться при теоретическом расчете интерферограмм сигналов ГНСС.

КДП почв сельскохозяйственных земель как функция частоты электромагнитного поля f , объемной влажности W_s и весового содержания глины W_c в почве рассчитывалась на основе рефракционной диэлектрической модели смеси [15]. Частота электромагнитного поля задается передатчиком ГНСС, объемная влажность W_s почвы задавалась значениями из табл. 2.

Теоретическая модель интерферограмм сигналов ГЛОНАСС и GPS. Геометрия задачи изображена на рис. 4. Антенна приемника ГНСС расположена на высоте h над поверхностью земли, покрытой растительным слоем толщиной d . Максимум диаграммы направленности антенны ориентирован на горизонт. Излучение ГНСС имеет правую круговую поляризацию. Амплитуда сигнала $U(\theta)$, регистрируемая приемником ГНСС, оснащенный антенной с правой круговой поляризацией, может быть описана следующей формулой [1]:

$$U(\theta) = F(\theta) \cdot \left| 1 + \Gamma(\theta) e^{2ik_0 h_e \cos \theta} \right|^2, \quad (4)$$

где $F(\theta)$ – амплитуда на выходе приемника ГНСС в отсутствие волны, рассеянной растительным и почвенным покровом; $\Gamma(\theta)$ – комплексный коэффициент отражения от почвенного и растительного покрова волны, имеющей правую круговую поляризацию; θ – угол падения волны на поверхность почвенного и растительного покрова; h_e – эффективная высота фазового центра антенны над растительным покровом; $k_0 = \omega / c$ – волновое число свободного пространства; $\omega = 2\pi f$, где f – частота электромагнитного поля, излучаемая спутником ГНСС. Будем пренебрегать явлениями дифракции и рассеяния электромагнитных волн на элементах растительного покрова, представленного зерновыми культурами. В этом случае будем

рассматривать растительный покров в виде однородного диэлектрического слоя, расположенного на почве.

Обозначим через ϵ_s и ϵ_l относительные комплексные диэлектрические проницаемости почвы и растительности соответственно.

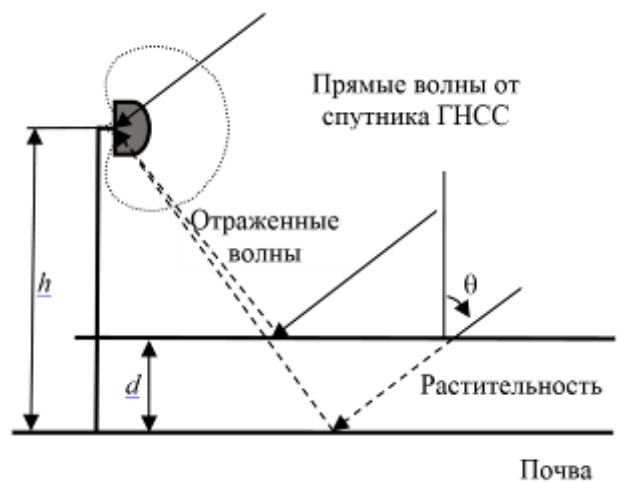


Рис. 4. Многолучевое распространение волн от спутников ГНСС при расположении приемной антенны (ориентированной на горизонт) приемника ГНСС на высоте h над почвой, покрытой слоем растительности толщиной d : θ – угол падения, α – угол возвышения, $\theta = 90^\circ - \alpha$

Комплексный коэффициент отражения от слоистой среды «растительность–почва» для плоских волн с горизонтальной $\Gamma_H(\theta)$ и вертикальной $\Gamma_V(\theta)$ поляризациями можно рассчитать по формуле [2]

$$\Gamma_{H,V}(\theta) = \frac{R_{l,H,V}(\theta) + R_{s,H,V}(\theta) e^S e^{2ik_0 d_e w_l}}{1 + R_{l,H,V}(\theta) R_{s,H,V}(\theta) e^S e^{2ik_0 d_e w_l}}, \quad (5)$$

где $R_{l,H,V}(\theta)$ и $R_{s,H,V}(\theta)$ – коэффициенты отражения Френеля от границы «воздух–растительность» и «растительность–почва»; $S = -2[k_0 \sigma \cos \theta]^2$; σ – среднеквадратичное отклонение высот неровностей поверхности почвы; $w_l = \sqrt{\epsilon_l - \sin^2 \theta}$ – волновое число в слое растительности; d_e – высота слоя растительности. Коэффициенты отражения Френеля $R_{l,H,V}(\theta)$, $R_{s,H,V}(\theta)$ рассчитываются по формулам

$$R_{l,V}(\theta) = \frac{\epsilon_l \cos \theta - \sqrt{\epsilon_l - \sin^2 \theta}}{\epsilon_l \cos \theta + \sqrt{\epsilon_l - \sin^2 \theta}},$$

$$R_{s,V}(\theta_1) = \frac{\varepsilon_s \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_l} \sqrt{\varepsilon_s - \varepsilon_l \sin^2 \theta_1}}{\varepsilon_s \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_l} \sqrt{\varepsilon_s - \varepsilon_l \sin^2 \theta_1}}, \quad (6)$$

$$R_{l,H}(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon_l - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_l - \sin^2 \theta}},$$

$$R_{s,H}(\theta_1) = \frac{\varepsilon_l \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_s - \varepsilon_l \sin^2 \theta_1}}{\varepsilon_l \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_s - \varepsilon_l \sin^2 \theta_1}}, \quad (7)$$

где $\theta_1 = a \sin(\sin \theta / \sqrt{\varepsilon_l})$. Окончательно коэффициент отражения $\Gamma(\theta)$ в формуле (4) рассчитывается с использованием выражений (5)–(7) по формуле

$$\Gamma_R(\theta) = \frac{\Gamma_V(\theta) + \Gamma_H(\theta)}{2}. \quad (8)$$

Частота электромагнитного поля, излучаемого спутниками ГЛОНАСС, рассчитывается по формуле $f = 1\,602 \text{ МГц} + n \cdot 0,5625 \text{ МГц}$, где n – это номер частотного канала ($n = -7, \dots, 6$), спутники GPS излучают электромагнитные волны на фиксированной частоте: $f = 1575,42 \text{ МГц}$.

Чувствительность интерферограмм сигналов ГНСС к вариации влажности и высоте растительного слоя. Проведем расчет интерферограмм сигналов ГНСС на основе формул (4)–(8). Амплитуду на выходе приемника ГНСС в отсутствие волны, рассеянной растительным и почвенным покровом, зададим в виде полинома четвертой степени $F(\theta) = -0,0321 + 0,0149\theta + 0,0001\theta^2 - 0,0106 \cdot 10^{-4}\theta^3 - 0,0108 \cdot 10^{-6}\theta^4$ (полином получен в результате регрессионного анализа экспериментальной интерференционной картины одного из сигнала, принятого от спутника GPS, нормированного на средний уровень сигнала при угле падения 80°). При расчете КДП почвы содержание глины и объемная влажность задавалась равными $0,312 \text{ г/г}$ и $0,25 \text{ см}^3/\text{см}^3$ соответственно. При расчете КДП растительного слоя плотность сухой биомассы задавалась равной $1,01 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$. Высота приемника была задана $3,05 \text{ м}$, а шероховатость поверхности почвы 0 см . На рис. 5 приведены рассчитанные интерферограммы сигналов ГНСС в зависимости от влажности растительного слоя в сравнении с интерферограммами сигналов ГНСС в отсутствие растительного слоя (влажность слоя равна нулю).

Из результатов расчетов, приведенных на рис. 5, видно, что угловые зависимости амплитуд сигналов ГНСС существенно изменяются по величине при увеличении влажности растительного слоя по сравнению с сигналом в отсутствие растительного слоя на поверхности почвы. При фиксированной влажности слоя растительности и увеличении его высоты от $0,1$ до $0,9 \text{ м}$ (рис. 6) угловые зависимости амплитуд сигналов ГНСС испытывают значительные фазовые вариации. Фазовая вариация интерференционной картины в большей степени чувствительна к изменению высоты растительного слоя, амплитудные вариации – к влажности.

Проведенный анализ показывает принципиальную возможность восстановления влажности и высоты растительного слоя на основе измерения угловых амплитудных зависимостей сигналов ГНСС.

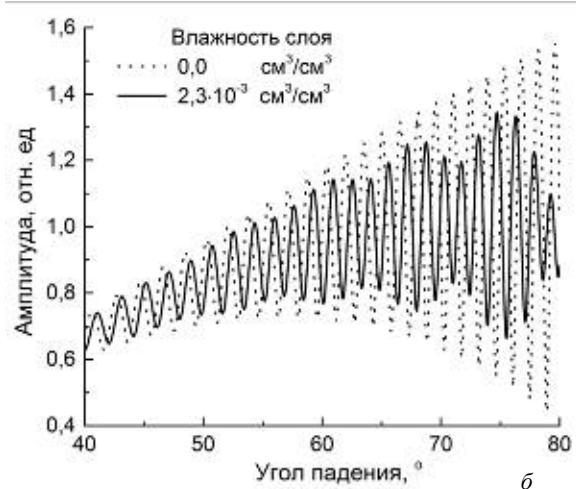
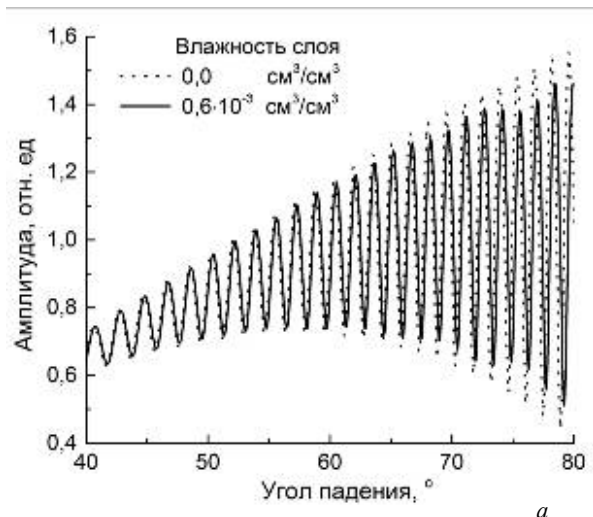


Рис. 5. Интерферограммы сигналов ГНСС в зависимости от влажности растительного слоя. Высота растительного слоя задавалась равной $0,9 \text{ м}$

Определение влажности и высоты растительного покрова с использованием измеренных интерферограмм сигналов ГЛОНАСС и GPS. Метод восстановления, влажности и высоты растительности сельскохозяйственных полей из интерференционной картины сигналов ГНСС основан на минимизации в диапазоне углов зондирования $50^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ функционала, образующего норму невязки между измеренной амплитудой сигнала ГНСС $U^m(\theta)$ и модельным значением $U(\theta)$ (см. формулу (4)). В общем виде минимизируемый функционал является функцией объемной влажности W_s и весового содержания глины W_c в почве, влажности W_l и высоты d_e растительного покрова, высоты антенны приемника ГНСС h_e и среднеквадратичной высоты неровностей поверхности почвы σ . Проведенные исследования показали, что коэффициент отражения волны с правой круговой поляризацией при падающей волне от спутника ГНСС правой круговой поляризации слабо меняется (менее 3 %) при вариациях весового содержания глины ($0,20$ – $0,49 \text{ г/г}$) и объемного содержания влаги ($0,18$ – $0,40 \text{ см}^3/\text{см}^3$) в почве. В связи с этим при минимизации функционала объемное содержание влаги задавалось средним

значением между сухой почвой и влажностью при полной влагоемкости $W_s = 0,23 \text{ см}^3/\text{см}^3$, весовое содержание глины задавалось средним значением по содержанию глинистой фракции на исследуемых полях $W_c = 0,312 \text{ г/г}$. Среднеквадратичная высота неровностей поверхности почвы задавалась равной $\sigma = 0,0 \text{ м}$.

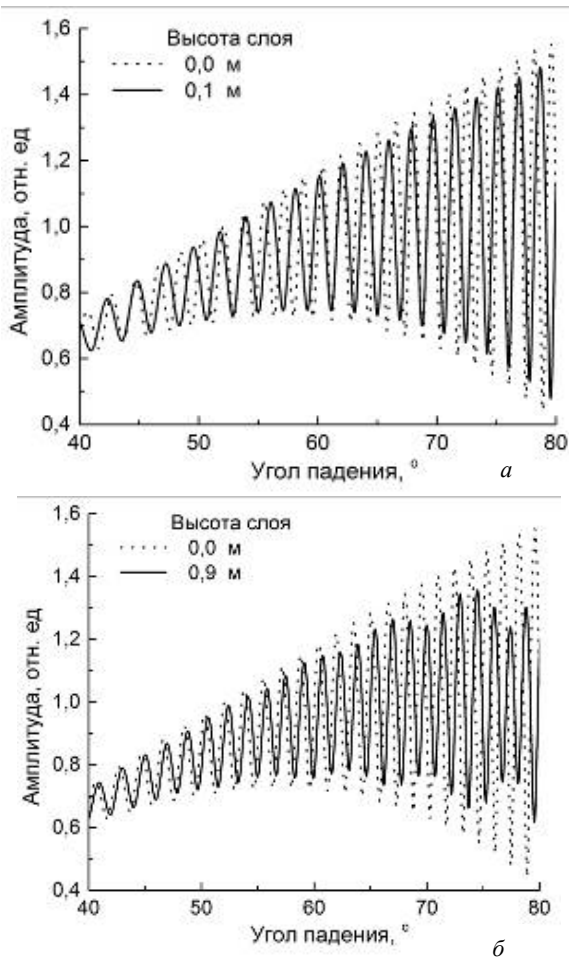


Рис. 6. Интерферограммы сигналов ГНСС в зависимости от высоты растительного слоя. Влажность растительного слоя задавалась $1,5 \text{ г/см}^3$

Метод восстановления влажности и высоты растительности из интерференционной картины сигналов ГНСС поэтапно реализовывался по следующему алгоритму:

1. В формуле (4) средний уровень амплитуды сигналов на выходе приемника ГНСС $\bar{U}(\theta)$ может быть аппроксимирован полиномом четвертой степени $\bar{U}(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4$. Воспользуемся этой функцией в регрессионном анализе экспериментального интерференционного сигнала и найдем коэф-

фициенты $a_{i,1}$ полинома $\bar{U}(\theta)$. Полученную экспериментальную функцию $\bar{U}(\theta)$ будем использовать в дальнейшем в качестве первого приближения для теоретической модели амплитуды $F_1(\theta) = \bar{U}(\theta)$ на выходе приемника ГНСС в отсутствие отраженной волны растительным и почвенным покровом.

2. На втором этапе путем минимизации функционала нормы невязки находим первые приближения для высоты антенны приемника ГНСС $h_{e,1}$, высоты $d_{e,1}$ и объемной влажности $W_{l,1}$ растительного слоя.

3. На заключительном этапе проводится минимизация функционала и определяются следующие восстанавливаемые параметры: $a_{i,F}$, $h_{e,F}$, $d_{e,F}$, $W_{l,F}$. При этом в качестве начальных величин для этих параметров используются значения, определенные на предыдущих этапах: $a_{i,1}$, $h_{e,1}$, $d_{e,1}$, $W_{l,1}$.

Данная методика была реализована на языке программирования С++ в рабочей среде программы OriginLab, в которой производилась минимизация функционала на основе алгоритма Левенберга–Марквардта [16]. Вышеописанный алгоритм был применен для восстановления влажности и высоты посевов следующих культур: рапс, рожь, пшеница и ячмень. На рис. 7 приведены результаты экспериментальной и теоретически рассчитанной интерференционной картины.

В табл. 3 сведены восстановленные параметры модели и экспериментально измеренные контактными методами соответствующие величины (обозначены с индексом m).

Содержание воды растительного слоя на один квадратный метр M_l рассчитывалось по формуле $M_l = W_l \rho_w \cdot d_e$, $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды. Высота фазового центра антенны $h_{e,m}$ над растительным покровом рассчитывалась как разница между высотой антенны над почвой h и высотой растительного покрова d_m , измеренными на поле во время эксперимента.

В экспериментах по измерению влажности и высоты растительности с помощью приемника МРК-32Р показано, что в среднем погрешность измерения высоты и влажности растительного покрова сельскохозяйственных полей с четырьмя различными видами культур составляет величину $\Delta d_e = 0,17 \text{ м}$ и $\Delta M_l = 0,21 \text{ кг/м}^2$ соответственно (табл. 3). Предложенная теоретическая модель (4)–(8), описывающая амплитуду сигнала, регистрируемого приемником ГНСС в присутствии почвенного покрова, покрытого растительностью, в среднем с коэффициентом корреляции 0,71 коррелирует с измеренными интерференционными сигналами.

Таблица 3

Восстановленные и измеренные параметры растительности

Поле	$h_{e,F}$, м	$d_{e,F}$, м	$W_{l,F}10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$	$M_{l,F}$, кг/м^2	$h_{e,m}$, м	d_m , м	$W_{l,m}10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$	$M_{l,m}$, кг/м^2
Рапс	2,56	0,45	3,35	1,51	2,39	0,66	2,30	1,52
Рожь	2,26	0,87	1,10	0,96	2,05	1,03	0,60	0,62
Пшеница	2,23	0,87	1,19	1,04	2,21	0,87	0,79	0,69
Ячмень	2,54	0,49	2,1	1,03	2,30	0,77	1,51	1,16

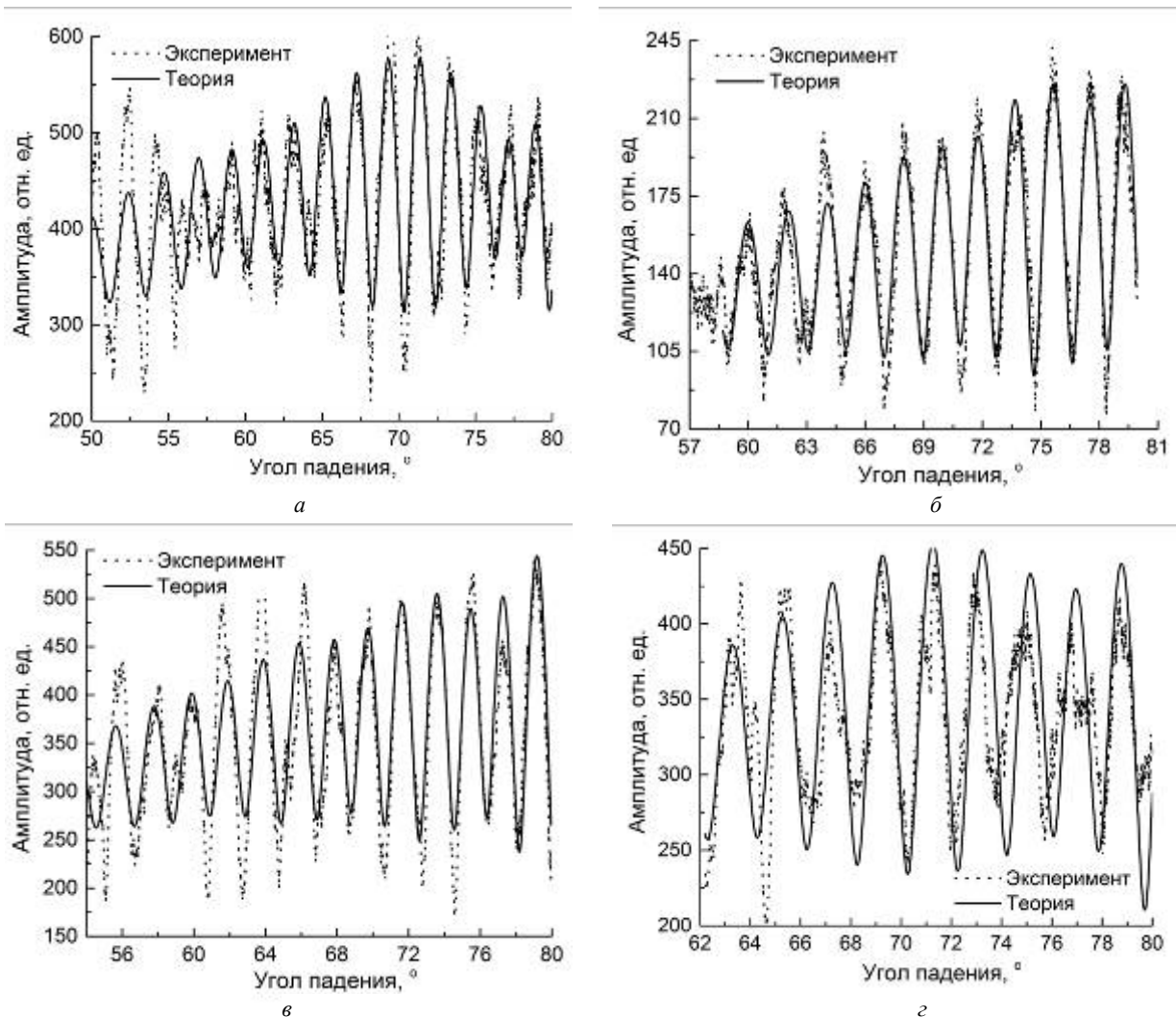


Рис. 7. Интерференционная картина, записанная приемником МРК-32 при регистрации сигналов GPS над сельскохозяйственным полем с посевами: а – рапс (спутник № 5, дата 28.08.2013), б – рожь (спутник № 1, дата 20.08.2013), в – пшеница (спутник № 10, дата 26.08.2013), г – ячмень (спутник № 2, дата 27.08.2013)

Заключение. Разработана теоретическая модель интерферограмм сигналов ГЛОНАСС и GPS, в которую интегрирована модель комплексной диэлектрической проницаемости почв с параметрами, характерными для почв тестовых участков сельскохозяйственных земель с посевами пшеницы, ржи, рапса и ячменя в Емельяновском районе Красноярского края.

Проведены полевые измерения интерферограмм сигналов ГЛОНАСС и GPS отечественным приемником МРК-32Р на тестовых участках. При сопоставлении теоретической модели интерферограмм с экспериментально измеренными получена высокая корреляция между ними. На основе разработанной теоретической модели интерферограмм и диэлектрической модели почв и растительности создан алгоритм определения влажности и высоты растительного покрова для тестовых участков пшеницы, рапса, ржи и ячменя в Емельяновском районе Красноярского края. Восстановленные значения влажности и высоты растительного покрова тестовых участков в среднем с погреш-

ностью 0,17 м и 0,21 кг/м² соответствуют экспериментально измеренным значениям. Для практического применения данных алгоритмов при восстановлении влажности почвы, уточнения погрешностей и условий, ограничивающих применимость данных алгоритмов, необходимо проводить дальнейшую их валидацию на других участках сельскохозяйственных полей при вариации метеорологических условий, шероховатости почвенного покрова.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 13-05-98089, р_сибирь_а, программы П.12.1. СО РАН «Радиофизические и акустические методы дистанционного зондирования природной среды».

Acknowledgements. The work was supported by RFBR, project № 13-05-98089, r_sibir_a, programmy П.12.1. SO RAN «Radiofizicheskie i akusticheskie metody distancionnogo zondirovaniya prirodnoj sredy».

Библиографические ссылки

1. A physical model of GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals / V. U. Zavorotny [et al.] // *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2010. Vol. 3, no. 1. P. 100–100.
2. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field / N. Rodriguez-Alvarez [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2009. Vol. 47, no. 11. P. 3616–3624.
3. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique / N. Rodriguez-Alvarez [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2010. Vol. 49, no. 1. P. 71–84.
4. Полевые эксперименты по получению GPS и ГЛОНАСС интерференционных сигналов, отраженных от пашни и лесного полога / В. Л. Миронов, [и др.]. Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. 2011. Ч. 1. С. 204–206.
5. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. The New Algorithm for Retrieval of Soil Moisture and Surface Roughness from GNSS Reflectometry // *In Proc. IGARSS.* 2012. Vol. 1. P. 7530–7532.
6. Диагностика влажности почвы с использованием поляризационных рефлектограмм сигналов ГЛОНАСС и GPS / В. Л. Миронов [и др.] // *Вестник СибГАУ.* 2013. Вып. 5(51). С. 107–109.
7. Экспериментальные данные радиомониторинга состояния посевов злаковых культур и почвы с использованием сигналов навигационных спутников / В. Л. Миронов [и др.] // *Материалы XVII Междунар. науч. конф.* 2013. Ч. 1. С. 257–259.
8. Восстановление диэлектрической проницаемости почв и лесных покровов при использовании сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS / В. Л. Миронов [и др.] // *Известия вузов. Физика.* 2012. Т. 55, № 9/2. С. 99–101.
9. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique / N. Rodriguez-Alvarez [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2011. Vol. 49, no. 1. P. 71–84.
10. The Use of Navigation Satellites Signals for Determination the Characteristics of the Soil and Forest Canopy / V. L. Mironov [et al.] // *In Proc. IGARSS.* 2012. Vol. 1. P. 7527–7529.
11. Soil Moisture and Vegetation Height Retrieval Using GNSS-R technique / N. Rodriguez-Alvarez [et al.] // *In Proc. IGARSS.* 2009. Vol. 3. P. III-869–III-872.
12. Vegetation Water Content Estimation Using GNSS Measurements / N. Rodriguez-Alvarez [et al.] // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2012. Vol. 9, no. 2. P. 282–286.
13. Методика измерения частотного спектра комплексной диэлектрической проницаемости почв / В. Л. Миронов [и др.] // *Радиотехника и электроника.* 2010. Т. 55, № 12. С. 1465–1470.
14. Миронов В. Л., Фомин С. В., Demontoux F. Зависимости диэлектрических спектров связанной и свободной почвенной воды в диапазоне частот от 0,3 до 26,5 ГГц от минерального состава почв // *Известия вузов. Физика.* 2010. Т. 53, № 9/3. С. 235–240.
15. Golub G. H., Van Loan C. F. *Matrix Computations.* 3rd edition. Johns Hopkins University Press, 1996. 687 p.

References

1. Zavorotny V. U., Larson K. M., Braun J. J., Small E. E., Gutmann E. D., Bilich A. L. A physical model of GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2010, vol. 3, no. 1, p. 100–100.
2. Rodriguez-Alvarez N., Camps A., Vall-llossera M., Valencia E., Marchan-Hernandez J. F., Ramos-Perez I. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2009, vol. 47, no. 11, p. 3616–3624.
3. Rodriguez-Alvarez N., Camps A., Vall-llossera M., Bosch-Lluis X., Monerris A., Ramos-Perez I., Valencia E., Marchan-Hernandez J. F., Martinez-Fernandez J., Baroncini-Turricchia G., Pérez-Gutiérrez C., Sanchez N. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2010, vol. 49, no. 1, p. 71–84.
4. Mironov V. L., Fomin S. V., Muzalevskiy K. V., Sorokin A. V., Mikhailov M. I. [Field study experiments for recording of GPS and GLONASS interferometric signals reflected from moist soil and forest cover]. *Materialy XV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Reshetnevskie chteniya"* [Proc. of 15th Int. Conf. "Reshetnev Readings"]. Krasnoyarsk, 2011, vol. 1, p. 204–206 (in Russ.).
5. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. The New Algorithm for Retrieval of Soil Moisture and Surface Roughness from GNSS Reflectometry. *In Proc. IGARSS.* 2012, vol. 1, p. 7530–7532.
6. Mironov V. L., Sorokin A. V., Mikhailov M. I., Fomin S. V., Muzalevskiy K. V. [Monitoring of soil moisture using polarimetric reflectogram of GLONASS and GPS signals]. *Vestnik SibGAU.* 2013, vol. 51, no. 5, p. 107–109 (in Russ.).
7. Mironov V. L., Mikhailov M. I., Sorokin A. V., Purlaur V. K. [Experimental data of monitoring of crops of cereals and soils, using GNSS signals]. *Materialy XVII Mezhdunar. Nauch. Konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Proc. of 17th Int. Conf. "Reshetnev Readings"]. Krasnoyarsk, 2013, vol. 1, p. 257–259 (in Russ.).
8. Mironov V. L., Fomin S. V., Sorokin A. V., Muzalevskiy K. V., Mikhailov M. I. [Retrieving dielectric permittivity of soil and forest cover using signals of GLONASS and GPS]. *Izvestiya vuzov. Fizika.* 2012, vol. 55, no. 9/2, p. 99–101 (In Russ.).
9. Rodriguez-Alvarez N., Camps A., Vall-llossera M., Bosch-Lluis X., Monerris A., Ramos-Perez I., Valencia E., Marchan-Hernandez J. F., Martinez-Fernandez J., Baroncini-Turricchia G., Pérez-Gutiérrez C., Sanchez N., Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 2011, vol. 49, no. 1, p. 71–84.

10. Mironov V. L., Fomin S. V., Muzalevskiy K. V., Sorokin A. V., Mikhailov M. I. The Use of Navigation Satellites Signals for Determination the Characteristics of the Soil and Forest Canopy. *In Proc. IGARSS*. Munich, 2012, vol. 1, p. 7527–7529.

11. Rodriguez-Alvarez N., Monerris A., Bosch-Lluis X., Camps A., Vall-Llossera M., Marchan-Hernandez J. F., Ramos-Perez I., Valencia E., Martínez-Fernández J., Sánchez-Martí N., Baroncini-Turricchi G., Pérez-Gutiérrez C. Soil Moisture and Vegetation Height Retrieval Using GNSS-R technique. *In Proc. IGARSS*. Beijing, 2009, vol. 3, p. III-869–III-872.

12. Rodriguez-Alvarez N., Bosch-Lluis X., Camps A., Ramos-Perez I., Valencia E., Hyuk Park, Vall-llossera M. Vegetation Water Content Estimation Using GNSS Measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2012, vol. 9, no. 2, p. 282–286.

13. Mironov V. L., Komarov S. A., Lukin Yu. I., Shatov D. S. [Method for measuring of spectrum of complex dielectric permittivity of soils]. *Radiotekhnika i Elektronika*. 2010, vol. 55, no. 12, p. 1465–1470 (In Russ.).

14. Mironov V. L., Fomin S. V., Demontoux F. [Dependence of dielectric spectrum of bound and free soil water on the texture of soils in the frequency range of 0.3–26.5GHz.]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2010, vol. 53, no. 9/3, p. 235–240.

15. Golub G. H., Van Loan C. F. *Matrix Computations*. Johns Hopkins University Press, 3rd edition. 1996, p. 687.

© Миронов В. Л., Михайлов М. И., Музалевский К. В., Сорокин А. В., Фомин С. В., Каравайский А. Ю., 2014