

## Измерение влажности почвы сельскохозяйственных полей с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS

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

<sup>1</sup>*Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева  
Красноярск, 660037, Россия*

*E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru*

<sup>2</sup>*Институт физики им. Л.В. Куренского СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*

*E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru*

В данной работе проводится экспериментальное исследование принципиальной возможности мониторинга влажности почвы сельскохозяйственных полей на основе интерференционных диаграмм создаваемых сигналами навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS. Интерференционные диаграммы регистрируются с помощью серийно выпускаемого приемника МРК-32Р, который оборудован антенной с вертикальной поляризацией. Проведены оценки погрешностей определения влажности почвы этим методом. Измерения интерференционных диаграмм сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS производились в случае сельскохозяйственного поля непокрытого растительностью, расположенного в пригородной зоне г. Красноярск, в предпосевной период с 14 апреля по 10 июня 2014 г. Установлено, что восстановленная влажность почвы наилучшим образом коррелирует с влажностью, измеренной в поверхностном слое почвы толщиной 1,2 см. В среднем погрешности измерения влажности почвы из интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS близки между собой и не превышают  $0,04 \text{ см}^3/\text{см}^3$  при вариации влажности почвы от  $0,04$  до  $0,21 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . Погрешность измерений влажности почвы, проведенных в данной работе, соответствует минимальным погрешностям, которые сообщались в литературе.

**Ключевые слова:** интерферометрия, влажность почвы, ГЛОНАСС, GPS.

### Введение

В настоящее время активно развивается метод дистанционного измерения влажности почвы с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (Alonso-Arroyo et al., 2014; Larson et al., 2010, 2008; Rodriguez-Alvarez et al., 2011, 2009; Zavorotny et al., 2010; Миронов и др., 2013). При размещении антенны приемника сигналов ГНСС на некоторой высоте над поверхностью почвы регистрируется интерференционная диаграмма, которая возникает в приемной антенне в результате сложения поля прямой волны, распространяющейся от спутника ГНСС к антенне, с полем волны, отраженной от поверхности почвы. Характеристики интерференционной диаграммы (ИД), в виде зависимости амплитуды интерференционного сигнала от угла возвышения спутника ГНСС определяются влажностью почвы, шероховатостью ее поверхности, а также локальным рельефом площадки, прилегающей к точке установки антенны. В зарубежных исследованиях используются приемники сигналов GPS, а в нашей работе (Миронов и др., 2013) одновременно принимались сигналы ГЛОНАСС и GPS. При этом использовались приемные антенны с правой круговой (Larson et al., 2010, 2008; Zavorotny et al., 2010) и

вертикальной поляризациями (Alonso-Arroyo et al., 2014; Rodriguez-Alvarez et al., 2011, 2009; Миронов и др., 2013).

Значения влажности почвы, восстановленные с применением интерференционных диаграмм, сравнивались в работах (Larson et al., 2008; Alonso-Arroyo et al., 2014; Rodriguez-Alvarez et al., 2009) с контактными измерениями этой величины, выполненным с помощью выпускаемых промышленностью импульсных рефлектометров влажности. В различных экспериментах отклонения восстановленных из ИД значений влажности от измеренных с помощью контактных датчиков варьировались от 0,03 до 0,1 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>. В частности, в работах (Larson et al., 2008; Alonso-Arroyo et al., 2014; Rodriguez-Alvarez et al., 2009) эти отклонения составили 0,03 - 0,1 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, 0,05 - 0,12 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> и 0,04 - 0,07 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, соответственно. При этом контактные датчики влажности располагались на глубине 2,5 см (Larson et al., 2008), в слое толщиной 5 см (Alonso-Arroyo et al., 2014) и на глубине 5 см и 20 см (Rodriguez-Alvarez et al., 2009).

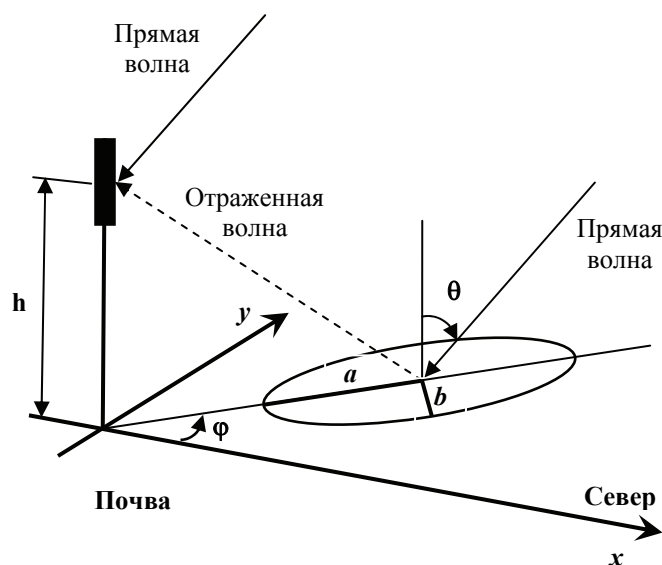
Разрабатываемые методы дистанционного зондирования влажности почвенного покрова имеют существенное практическое значение. В частности несколько десятков приемников GPS сети “Earthscope Plate Boundary Observatory” в настоящее время используется для мониторинга влажности почвы на территории США (PBO H2O Data Portal, 2014). Отметим, что данная сеть первоначально была создана для мониторинга смещений тектонических плит в зонах разломов и насчитывает порядка 2500 приемников GPS. В дальнейшем перспективной может оказаться технология измерения влажности почвы с использованием таких же простых и широкодоступных приемников как GPS и ГЛОНАСС навигаторы. Однако необходимые для достижения этой цели систематические исследования погрешности измерений влажности почвенного покрова с помощью ИД сигналов ГНСС в зависимости от поляризационной характеристики приемной антенны, способа обработки принятых ИД, общего увлажнения и профилей влажности в поверхностном слое не проводились.

В данной работе проведено измерение влажности почвы, оценена погрешность восстановления влажности почвы сельскохозяйственного поля в период весеннего высыхания почвы на основе использования сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. В качестве приемника сигналов ГНСС применяется серийно выпускаемый в России прибор МРК-32Р. Приемная антенна имеет вертикальную поляризацию. Метод восстановления влажности почвы основан на регрессионном анализе с использованием теоретической модели ИД и измеренных ИД в области зенитных углов навигационных спутников, превышающих угол Брюстера для сухой почвы. Восстановленные по измеренным ИД значения влажности почвы были сравнены с данными одновременных контактных измерений

влажности в поверхностном слое почвенного покрова. На основе проведенного анализа даны оценки погрешности измерения влажности на основе применения сигналов ГЛОНАСС и GPS.

### Схема измерения

На *рис. 1* показана схема формирования интерференционного сигнала на антенне приемника при сложении поля прямой волны, распространяющаяся от спутника ГНСС к приёмной антенне, с полем отраженной волны от поверхности почвы.



*Рис. 1. Схема формирования интерференционного сигнала на приемной антенне.  $h$  – высота антенны.  $\theta$  - угол падения электромагнитной волны, приходящей от спутника ГНСС,  $\varphi$  - азимутальный угол спутника ГНСС*

В соответствии с принципом Кирхгофа поле волны, отраженной от поверхности почвенного покрова, формируется на приемной антенне токами, возбуждаемыми падающей волной на поверхности в области, ограниченной первой зоной Френеля (Черный, 1972), которая и является площадкой зондирования. Расстояние от антенны до центра первой зоны Френеля на поверхности почвы может быть оценено по формуле

$$\rho_c = h \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (1)$$

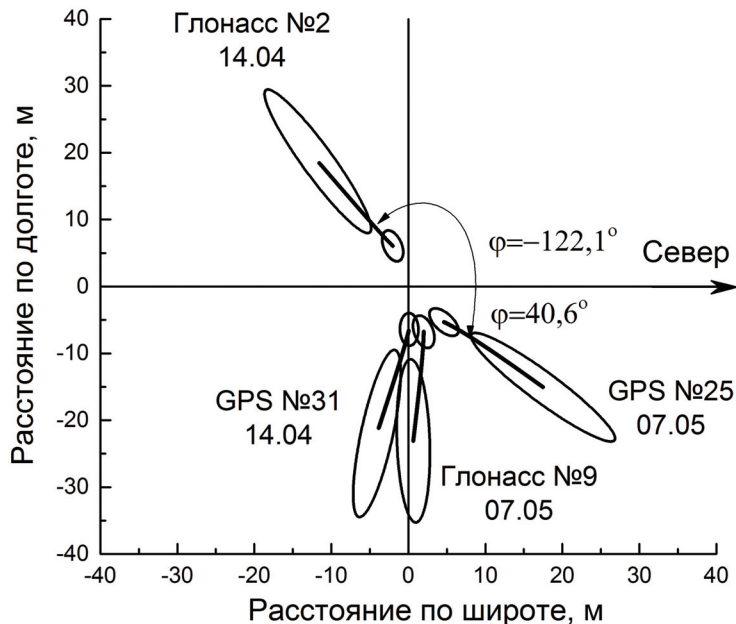
где  $h$  – высота фазового центра антенны.  $\theta$  - зенитный угол спутника ГНСС. Первая зона Френеля ограничена эллипсом с большой,  $a$ , и малой,  $b$ , полуосями (Rodriguez-Alvarez et al., 2009):

$$a = \frac{\sqrt{\lambda h \cos \theta}}{\cos^2 \theta}, \quad b = \frac{\sqrt{\lambda h \cos \theta}}{\cos \theta}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - длина электромагнитной волны, излучаемой спутниками ГНСС. Азимутальный угол  $\varphi$  определен в диапазонах  $[0, \pi]$  и  $[0, -\pi]$  для восточного и западного секторов. При движении спутника ГНСС по небосклону траектория движения центра первой зоны Френеля  $\rho_c = (x_c, y_c)$  по поверхности почвенного покрова определяется следующим параметрическим уравнением:

$$\begin{aligned} x_c &= h \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \cos \varphi(\theta), \\ y_c &= h \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \sin \varphi(\theta), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x_c$ , и  $y_c$  – расстояния, отсчитываемые вдоль меридианы и параллели, соответственно, функция  $\varphi(\theta)$  описывает движение спутника ГНСС по небесной сфере, соответствующее его эфемериде. На *рис. 2* показаны примеры для траектории перемещения и размера первой зоны Френеля (эллипса зондирования) в случае конкретных спутников ГЛОНАСС и GPS, излучение которых принималось в точке с координатами (56,0845 с.ш., 92,6763 в.д.). Зенитные углы всех спутников изменялись в диапазоне  $60^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ . Как видно из *рис. 2*, площадь эллипса зондирования по мере восхождения спутников уменьшается примерно в 16 раз. При этом по мере восхождения спутника центр эллипса зондирования перемещается, приближаясь к приемной антенне с расстояния примерно 25 м при зенитном угле  $80^\circ$  на расстояние около 5 м при зенитном угле  $60^\circ$ .



*Рис. 2. Перемещения первой зоны Френеля (эллипса зондирования) для спутниковых траекторий GPS №25 (07.05.2014, 12:36-13:32), ГЛОНАСС №9 (07.05.2014, 15:04-15:54), GPS №31 (14.04.2014, 16:08-17:02), ГЛОНАСС №2 (14.04.2014, 17:42-18:29). Значения азимутальных углов, соответствующих минимальному углу возвышения, равны  $40,6^\circ$ ,  $88,8^\circ$ ,  $100,5^\circ$  и  $-122,1^\circ$ , соответственно. Высота антенны над поверхностью почвенного покрова составляла 3,71 м и 4,06 м для сеансов от 14.04 и 07.05, соответственно*

## Теоретическая модель интерференционного сигнала ГНСС

Влажность почвы может быть восстановлена из измеренной приемником ГНСС интерференционной диаграммы с использованием теоретической модели, описывающей сложение прямой и отраженной от почвенного покрова волн в точке расположения приемной антенны. Рассмотрим приемник, оборудованный вертикальной дипольной антенной. Учитывая требования постоянства мощности сигнала ГНСС на поверхности Земли, которое предъявляется к системам GPS и ГЛОНАСС при любом положении спутника на небесной сфере, будем считать, что изменения амплитуды принимаемого сигнала ГНСС при увеличении угла возвышения спутника определяются только диаграммой направленности дипольной приемной антенны и интерференцией прямой и отраженной от поверхности почвы волн. Диаграмму направленности дипольной антенны по напряженности поля запишем в виде  $F(\theta)=\sin \theta$  (Макаров и др., 1975). Для описания амплитуды интерференционного сигнала в случае однородного почвенного покрова с шероховатой границей, воспользуемся следующей приближенной формулой (Rodriguez-Alvarez et al., 2009):

$$U(\theta) = U_0 \sin \theta \cdot \left| 1 + \Gamma(\theta) e^{2ik_0 h \cos \theta + i\Phi(\theta)} \right|, \quad (4)$$

где  $U_0$  – напряжение на выходе приемника при расположении спутника ГНСС на горизонте ( $\theta=90^\circ$ ) и в отсутствие отражения от поверхности,  $\Gamma(\theta)$  – модуль когерентной составляющей коэффициента отражения,  $\Phi(\theta)$  – фаза когерентной составляющей коэффициента отражения,  $k_0=\omega/c$  – волновое число свободного пространства,  $\omega=2\pi f$ , где  $f$  – частота электромагнитной волны. Величина  $U_0$  пропорциональна амплитуде прямого сигнала ГНСС в точке расположения приемника. Формула (4) записана в приближении, что изменения амплитуды волны за счет поглощения в атмосфере можно не учитывать. Модуль когерентной составляющей коэффициента отражения при отражении волны от шероховатой поверхности почвы, можно приближенно представить (Финкельштейн и др., 1994) в виде среднеквадратичного значения модуля коэффициента отражения

$$\Gamma(\theta) = |R(\theta)| \cdot e^{-2[k_0 \sigma \cos \theta]^2}, \quad R(\theta) = \frac{\varepsilon_s \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2 \theta}}{\varepsilon_s \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2 \theta}}, \quad (5)$$

где  $R(\theta)$  – коэффициента отражения Френеля,  $\sigma$  - среднеквадратичное отклонение высот неровностей поверхности почвы. Фазу когерентной составляющей коэффициента отражения будем считать совпадающей с фазой коэффициента отражения Френеля  $\Phi(\theta)=\arg R(\theta)$ . Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость почвы  $\varepsilon_s=\varepsilon_s(M_C, M_V, T, f)$  в формуле (5) была задана с помощью обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси (Mironov et al., 2009). Входными параметрами модели

(Mironov et al., 2009) являются  $M_C$  – весовое содержание глинистой фракции, которое определяется из гранулометрического состава почвы,  $M_V$  – объемная влажность почвы и  $T$  – температура почвы. Модель (Mironov et al., 2009), соответствует диапазону температур от 20°C до 25°C. Частота электромагнитного поля, излучаемого спутниками ГЛОНАСС рассчитывается по формуле:  $f = 1602 \text{ МГц} + n \times 0,5625 \text{ МГц}$ , где  $n$  это номер частотного канала ( $n=-7, \dots, 6$ ), а для спутников GPS частота  $f$  задавалась равной 1575,42 МГц.

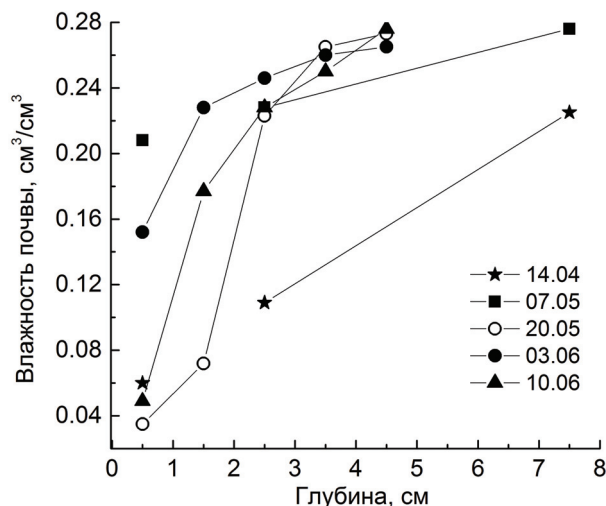
### **Аппаратно-программный комплекс для измерения интерференционных диаграмм**

Для проведения полевых экспериментов по дистанционному зондированию влажности почвенного покрова с помощью интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS был создан автономный измерительно-регистрирующий комплекс на базе серийного комплекта МРК-32Р производства НПО «Радиосвязь», г. Красноярск. Аппаратура МРК32-Р обеспечивает прием сигналов ГЛОНАСС и GPS при минимальном угле возвышения спутников над горизонтом 9,5 градусов. Частота кадров равна 1Гц, точность привязки секундной метки к шкале государственного эталона времени и частоты не хуже 1 мкс. Аппаратура МРК32-Р была дополнительно оборудована дипольной антенной, снабженной малошумящим усилителем. Вертикально ориентированная антенна крепилась к переносной металлической треноге с удлинительной штангой, что позволяло варьировать ее высоту над поверхностью почвы от 3 до 5,5 м. Сигналы навигационных спутников, принятые антенной, поступают через смеситель в блок МРК-11 ПрМ-16. Здесь сигналы обрабатываются и через конвертор RS-232/USB2.0 направляются в ноутбук. С помощью специального программного обеспечения обеспечивается визуализация процесса приема и обработки сигналов, а также их запись в файлы. Процесс дальнейшей обработки и регрессионного анализа проводился в среде Originlab и Matlab.

### **Тестовый участок для измерения влажности почвы с использованием сигналов ГНСС**

В качестве тестового участка было выбрано поле непокрытое растительностью в пригородной зоне г. Красноярска (пос. Минино). Поле представляло собой поверхность мелко разрыхленную с высотой случайных неровностей порядка 2 см. Перепады высот рельефа в пределах участка диаметром 40м составляли до 15 см. Весовое содержание глины в почве  $M_C=0,35$  г/г было определено из результатов гранулометрического анализа почвенного образца, взятого с участков почвенного покрова, где проводились измерения интерференционных диаграмм. Результаты контактных измерений влажности почвы, вы-

полненные термостатно-весовым методом на различных глубинах в почве в дни записей ИД, представлены на *рис. 3*. Среднеквадратичное отклонение значений влажности почвы между пробами, взятыми на различных участках поля, не превышала  $0,027 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и  $0,043 \text{ см}^3/\text{см}^3$  в поверхностных слоях толщиной 5 см и 10 см, соответственно.



*Рис. 3. Профиль влажности верхнего горизонта почвы в дни проведения экспериментов 2014 года*

Измерения, относящиеся к 20.05, 03.06 и 10.06, проводились путем взятия образцов в последовательных по глубине слоях толщиной 1 см. На *рис. 3* показаны значения влажности в этих слоях. Данные, относящихся к 14.04 и 07.05, были получены путем измерения средней влажности почвы в поверхностном и нижележащем слоях толщиной по 5 см. На *рис. 3* соответствующие измеренные значения влажности почвы отнесены к глубинам 2,5 см и 7,5 см. Отдельными точками на *рис. 3* (звездочка и квадрат) отмечены средние значения влажности почвы в верхнем слое толщиной 1 см для 14.04 и 07.05, соответственно, полученные в результате расчета в предположении линейного профиля влажности в почве.

### Восстановление влажности из измерений интерференционных диаграмм сигналов ГНСС

Запись интерференционных сигналов производилась в 2014 году 14.04, 07.05, 20.05, 03.06 и 10.06. Все сеансы были проведены между 12:00 и 19:00 часами по местному времени. На *рис. 4* приведены экспериментальные интерференционные диаграммы сигналов ГНСС в диапазоне зенитных углов  $\theta_{min}=60^\circ \leq \theta \leq \theta_{max}=80^\circ$ , характерные для сухого (сеанс от 07.05) и влажного (сеанс от 14.04) состояния поверхностного слоя почвенного по-

крова (см. рис. 3). Для этих сеансов записи, размеры и положение «пятна» зондирования на площадке, прилегающей к приемной антенне, показаны на рис. 2. Кроме того, на рис. 4 приведены интерференционные диаграммы, рассчитанные по формулам теоретической модели (4), (5). Параметры этой модели, а именно, уровень сигнала ГНСС,  $U_0$ , высота фазового центра приемной антенны,  $h$ , среднеквадратичное отклонение высот неровностей поверхности почвы,  $\sigma$ , и объемная влажность,  $M_V$ , для каждой интерференционной диаграммы определялись путем минимизации нормы невязки между рассчитанной и измеренной интерференционными диаграммами с применением алгоритма Левенберга — Марквардта (Гилл и др., 1985). Восстановленные значения влажности почвы из интерференционных диаграмм сигналов для 14.04 (ГЛОНАСС №2 и GPS №31) и 07.05, (ГЛОНАСС №9 и GPS №25) оказались равны ( $0,06 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и  $0,07 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) и ( $0,13 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и  $0,27 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ), соответственно.

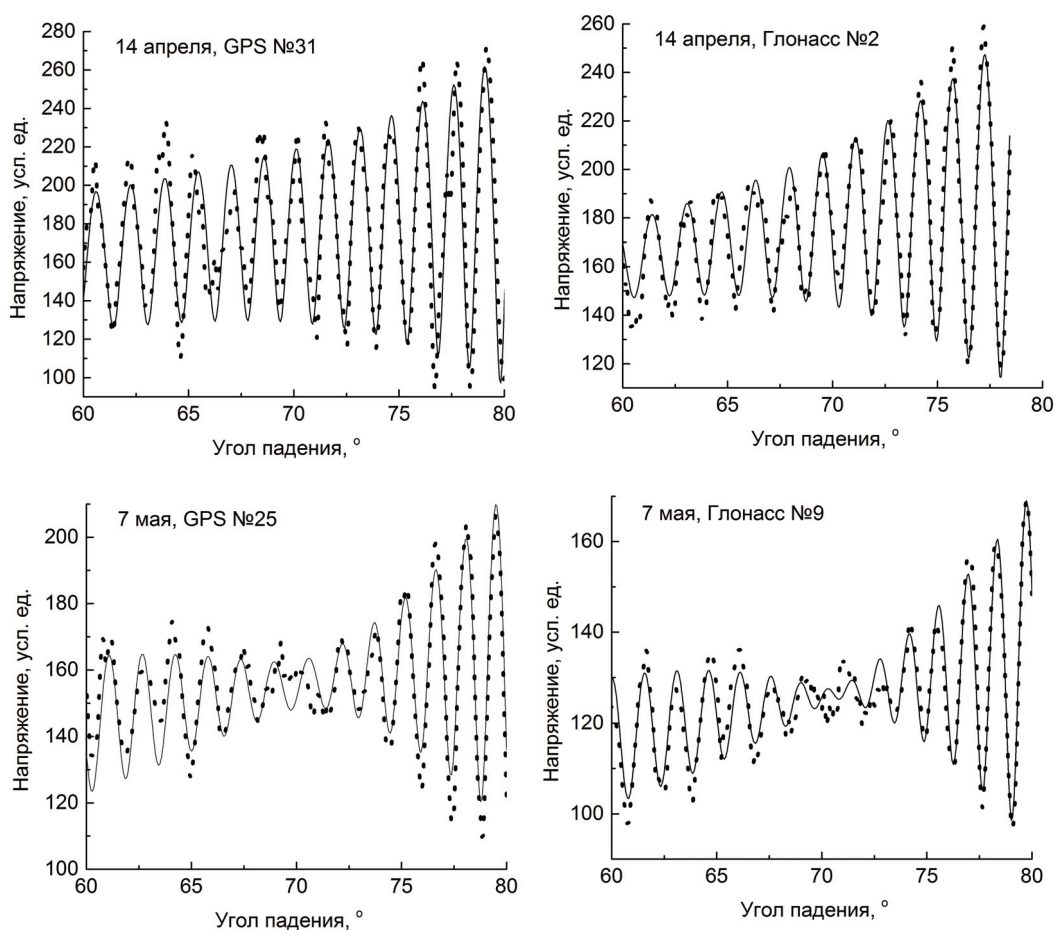


Рис. 4. Интерференционные диаграммы сигналов ГЛОНАСС и GPS, измеренные в сеансах от 14.04 и 07.05. Символами и сплошными линиями показаны значения интерференционного сигнала, измеренные и рассчитанные из теоретической модели (4), (5), соответственно. Значения высоты антенны и влажности почвы показаны на рис. 2 и 3, соответственно



Как видно из *рис. 4*, интерференционные диаграммы, зарегистрированные 14.04 и 07.04 качественно отличаются друг от друга. В случае сеанса от 07.05, в области зенитных углов в окрестности значения  $\theta = 71^\circ$  амплитуда осциллирующих сигнала существенно убывает, что свидетельствует о заметном уменьшении амплитуды волны, отраженной от почвенного покрова. Действительно, значение угла Брюстера, рассчитанное в случае почвенного покрова с равномерной по глубине влажностью  $M_V = 0,21 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , равно  $72^\circ$ . Именно такая влажность наблюдается, согласно данным, представленным на *рис. 3*, в приповерхностном слое почвенного покрова. При этом для вычисления значения диэлектрической проницаемости и оценки угла Брюстера при заданной влажности использовалась диэлектрическая модель предложенная в работе (Mironov et al., 2009). В тоже время, как следует из *рис. 4*, в случае сеанса от 14.04 амплитуда осциллирующих сигнала убывает более медленно с уменьшением зенитного угла спутника, так что угол Брюстера намечается в окрестности зенитного угла  $\theta = 60^\circ$ . Для этого сеанса, согласно данным, представленным на *рис. 3*, влажность в поверхностном почвенном слое ( $M_V = 0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) в четыре раза меньше значения  $M_V = 0,21 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , наблюдавшегося в сеансе от 07.05. Соответствующая оценка дает в этом случае для угла Брюстера значение  $\theta = 62^\circ$ , которое хорошо согласуется с убыванием амплитуды осцилляций, наблюдаемом на *рис. 4* для сеанса от 14.04.

Чтобы выбрать оптимальный диапазон углов наблюдения, в котором проводится регрессионный анализ теоретической модели ИД относительно принятых значений сигналов ИД, найдем зависимость от нижней границы диапазона углов наблюдения ( $\theta_{min} \leq \theta \leq 80^\circ$ ) для среднеквадратического отклонения (СКО) принятых сигналов ИД от оптимизированной теоретической модели. Данная зависимость приведена на *рис. 5*. Как следует из *рис. 5*, измеренные ИД отклоняются от теоретической модели с наименьшим СКО в диапазоне зенитных углов наблюдения  $\theta_{min} = 60^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ . Именно в этом диапазоне будем далее проводить обработку измеренных ИД при определении влажности почвы.

Проведем оценку ошибки измерения влажности при использовании некоторого конечного числа интерференционных диаграмм. С этой целью были восстановлены значения влажности,  $M_V$ , высоты антенны,  $h$ , и среднеквадратических значений для высоты случайных неровностей поверхности почвы,  $\sigma$ , для всех полученных интерференционных диаграмм спутников ГЛОНАСС и GPS, которые наблюдались в процессе сеансов от 14.04, 07.05, 20.05, 03.06 и 10.06 в 2014 году. В *табл. 1* сведены средние значения влажности почвы,  $M_V$  и высоты фазового центра антенны  $h$  с соответствующими доверительными интервалами рассчитанными с доверительной вероятностью 95%. Среднеквадратичные значения для высоты случайных неровностей поверхности почвы,  $\sigma$ , варьировались

от 3 мм до 4 см, и этот интервал включает значение оценки  $\sigma=2$ см, сделанной из полевых наблюдений.

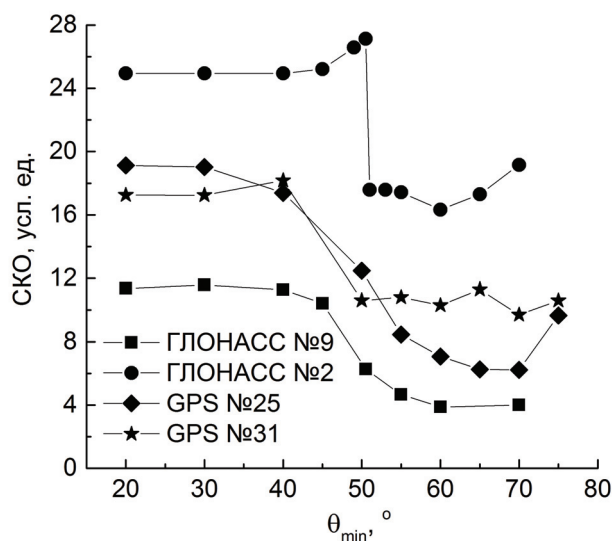


Рис. 5. Среднеквадратичное отклонение между измеренной и рассчитанной интерферограммами в зависимости от нижнего предела,  $\theta_{min}$ , диапазона зенитных углов спутника ГНСС,  $\theta_{min} \leq \theta \leq 80^\circ$

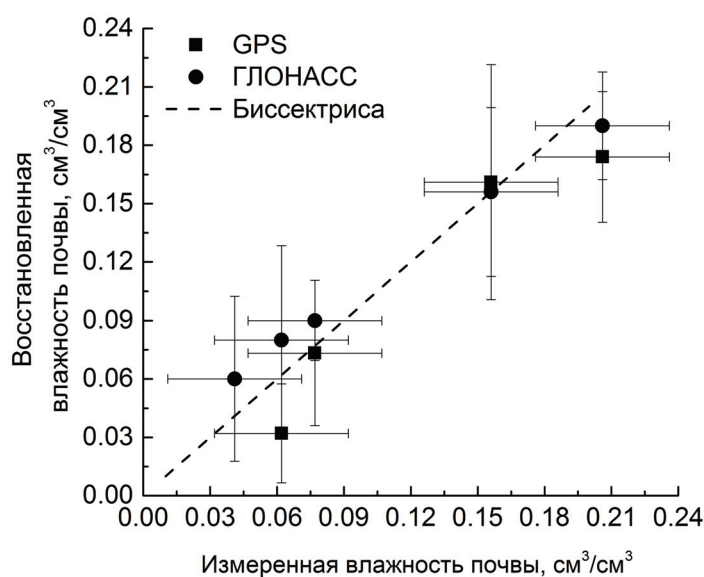
Таблица 1. Влажность почвы и высота приемной антенны, восстановленные из ИД сигналов спутников ГНСС и измеренные в полевых условиях.

Дата		14.04.14	07.05.14	20.05.14	03.06.14	10.06.14
Влажность почвы, см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	ГЛОНАСС	0,080±0,048	0,191±0,027	0,060±0,042	0,157±0,043	0,091±0,021
	GPS	0,032±0,025	0,173±0,035	-	0,161±0,060	0,073±0,037
	Полевые измерения	<b>0,062</b>	<b>0,206</b>	<b>0,041</b>	<b>0,156</b>	<b>0,077</b>
Высота антенны, м	ГЛОНАСС	3,64±0,06	4,03±0,06	3,96±0,08	4,76±0,06	5,47±0,06
	GPS	3,67±0,06	4,02±0,08	-	4,71±0,04	5,45±0,05
	Полевые измерения	<b>3,71±0,01</b>	<b>4,07±0,01</b>	<b>3,94±0,01</b>	<b>4,78±0,01</b>	<b>5,50±0,01</b>
Общее число спутников	ГЛОНАСС	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>19</b>	<b>17</b>
	GPS	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>13</b>	<b>16</b>

Как видно из табл. 1, величины влажности почвы и высоты приемной антенны, восстановленные из интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS оказались близки между собой. Наблюдаемые различия между значениями влажности и высоты фазового центра антенны для отдельных единичных сеансов измерения ИД могли возник-

нуть за счет локальных неоднородностей как влажности, так и рельефа (последний считался плоским в модели (4), (5)) на участке местности, по которому перемещаются эллипсы зондирования (см. *рис. 2*).

Данные, приведенные в *табл. 1*, показаны на *рис. 6* в виде корреляции между средними значениями влажности почвы, восстановленными из ИД (отдельно для спутников ГЛОНАСС и GPS) и измеренными в полевых условиях, в слое толщиной 1,5 см (последние оценены по данным приведенным на *рис. 3*). Здесь также даны 95% доверительные интервалы для всех средних значений влажности. Как видно из *рис. 6*, между этими величинами наблюдается хорошее соответствие. Оценки показали, что коэффициенты корреляции между значениями влажности почвы, восстановленными с помощью спутников ГЛОНАСС и GPS и значениями влажности, оцененными из полевых измерений, равны 0,991 и 0,963, соответственно. В то время как коэффициент корреляции между значениями измеренными с помощью ИД полученных с использованием ГЛОНАСС или GPS равен 0,985. Согласно данным, приведенным в *табл. 1* и на *рис. 6*, среднеквадратические отклонения средних влажностей, восстановленных с помощью спутников ГЛОНАСС и GPS, от средних влажностей почвы в слое 1,5 см составляют  $0,036 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и  $0,039 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , соответственно. Данная погрешность измерений может быть достигнута только при проведении около 15 отдельных сеансов регистрации интерференционных диаграмм. С учетом одновременного приема сигналов ГЛОНАСС и GPS необходимое для этого время может составлять порядка 4 часов.



*Рис. 6. Корреляция между средними значениями влажности почвы, восстановленными из ИД и измеренными в полевых условиях в слое толщиной 1,5 см*

Достигнутая погрешность измерения влажности почвы с помощью аппаратуры МРК-32Р, принимающей сигналы ГЛОНАСС и GPS, соответствует нижней границе погрешностей, полученных в работах (Larson et al., 2008; Alonso-Arroyo et al., 2014; Rodriguez-Alvarez et al., 2009). Эта погрешность удовлетворяет также требованиям, предъявляемым, в частности, к космическому аппарату SMOS, который специально спроектирован и введен в эксплуатацию с целью обеспечения глобального мониторинга влажности поверхности суши.

### Заключение

В данной работе экспериментально найдены погрешности измерения влажности почвы на основе использования сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. При этом использовалась серийная отечественная приемная аппаратура МРК-32Р производства ОАО «НПО «Радиосвязь», г. Красноярск.

Установлено, что в среднем погрешность измерения влажности открытой почвы сельскохозяйственных полей в период подготовки к севу не превышают  $0,04 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . Такая погрешность удовлетворяет критериям, предъявляемым Европейским космическим агентством к космическим аппаратам дистанционного зондирования влажности почвенных покровов. В проведенных экспериментах наименьшая погрешность была получена при сравнении данных зондирования влажности с наземными измерениями влажности почвы в поверхностном слое почвы толщиной 1,5 см. Проведенные эксперименты обосновывают новый метод измерения влажности почвы на основе сигналов ГЛОНАСС и GPS, и создают основу для разработки специализированных устройств-влажномеров, которые могут быть использованы в сельском хозяйстве, а так же на метеостанциях для мониторинга влажности поверхностного слоя почвы в круглосуточном режиме.

Работа выполнена в рамках проекта ККФПНиНТД №14 "Создание аппаратно-программного комплекса для отработки информационной технологии измерения влажности почвенного покрова с применением сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS".

### Литература

1. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
3. 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 // Вестник СибГАУ. 2013. Т. 51. № 5. С. 107-109.

4. PBO H2O Data Portal : [Электронный ресурс]. Заглавие с экрана: Soil Moisture. Режим доступа URL: [http://xenon.colorado.edu/portal/index.php?product=soil\\_moisture](http://xenon.colorado.edu/portal/index.php?product=soil_moisture) (Дата обращения: 04.06.2014).
5. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1972. 64с.
7. Alonso-Arroyo A., Camps A., Aguasca A., Forte G., Monerris A., Rudiger C., Walker J.P., Park H., Pascual D., Onrubia R. Improving the Accuracy of Soil Moisture Retrievals Using the Phase Difference of the Dual-Polarization GNSS-R Interference Patterns // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11. No. 12. P. 2090-2094.
8. Larson K.M., Braun J., Small E.E., Zavorotny V., Gutmann E., Bilich A. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content // IEEE J-STARS. 2010. Vol.3. P. 91-99.
9. Larson K. M., Small E. E., Gutmann E. D., Bilich A., Braun J. J., Zavorotny V. U. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. P. L24405-2008.
10. 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. P. 2059-2070.
11. 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.
12. Rodriguez-Alvarez N., Bosch-Lluis X., 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. № 11. P. 3616-3624.
13. 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. 100-110.

## Measuring soil moisture of agricultural fields using GLONASS and GPS data

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

<sup>1</sup>*Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, 660036, Russia*  
E-mail: [rsdvm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdvm@ksc.krasn.ru)

<sup>2</sup>*L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, 660036, Russia*  
E-mail: [rsdvm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdvm@ksc.krasn.ru), [rsdkm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdkm@ksc.krasn.ru)

In this paper, we experimentally investigate the possibility to monitor soil moisture of agricultural fields based on measuring the interference diagrams formed by the signals of the GLONASS and GPS navigation satellites. The interference diagrams are recorded with a commercially available receiver MRC-32R, which is additionally equipped with an antenna of vertical polarization. The errors of soil moistures derived with this technique are estimated. Measurements of interference diagrams of the GLONASS and GPS navigation satellites were conducted in the case of a bare agricultural field located in a suburb zone of the city of Krasnoyarsk in the preplant period from April 14 to June 10, 2014. The retrieved soil moistures were found to best correlate with soil moistures measured in the surface layer with a thickness of 1,2 cm. The average error of measurement of soil moisture derived with the use of interference diagrams obtained for the signals of GLONASS and GPS are close to each other and do not exceed 0,04 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, with the soil moisture varying from 0,04 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> to 0,21 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. The error of the conducted measurements of soil moisture meets the minimum errors reported in the literature.

**Keywords:** interferometry, soil moisture, GLONASS, GPS.

### References

1. Gill F., Myurrey U., Rayt M., *Prakticheskaya optimizatsiya* (Practical optimization), Moscow: Mir, 1985, 509 p.
2. Markov G.T., Sazonov D.M., *Antenny* (Antennas), Moscow: Energiya, 1975, 528 p.

3. Mironov V.L., Sorokin A.V., Mikhaylov M.I., Fomin S.V., Muzalevskiy K.V., Diagnostika vlazhnosti pochvy s ispolzovaniyem polarizatsionnykh reflektogramm signalov GLONASS i GPS (Measuring soil moisture with using polarimetric interferogram of the GPS and GLONASS), *Vestnik SibGAU*, 2013, Vol. 51, No. 5, pp. 107-109.
4. PBO H2O Data Portal: [on line]. Title from site: Soil Moisture. URL: [http://xenon.colorado.edu/portal/index.php?product=soil\\_moisture](http://xenon.colorado.edu/portal/index.php?product=soil_moisture) (date of access: 04.06.2014).
5. Finkelshteyn M.I., Karpukhin V.I., Kutev V.A., Metelkin V.N., *Podpoverkhnostnaya radiolokatsiya* (Subsurface radiolocation), Moscow: Radio i svyaz, 1994, 216 p.
6. Chernyy F.B., *Rasprostraneniye radiovoln* (Wave propagation), Moscow: Sovetskoye radio, 1972, 64p.
7. Alonso-Arroyo A., Camps A., Aguasca A., Forte G., Monerri A., Rudiger C., Walker J.P., Park H., Pascual D., Onrubia R., Improving the Accuracy of Soil Moisture Retrievals Using the Phase Difference of the Dual-Polarization GNSS-R Interference Patterns, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 11, No. 12, pp. 2090-2094.
8. Larson K.M., Braun J., Small E.E., Zavorotny V., Gutmann E., Bilich A., GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content, *IEEE J-STARS*, 2010, Vol. 3, pp. 91-99.
9. Larson K. M., Small E. E., Gutmann E. D., Bilich A., Braun J. J., Zavorotny V. U., Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 3, pp. L24405-2008.
10. 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, pp. 2059-2070.
11. Rodriguez-Alvarez N., Camps A., Vall-llossera M., Bosch-Lluis X., Monerri 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, pp. 71-84.
12. Rodriguez-Alvarez N., Bosch-Lluis X., 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, pp. 3616,3624.
13. 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, pp. 100-110.