

## Возможности дистанционного зондирования профилей влажности почв на основе поляриметрических наблюдений обратного рассеяния волн в Р- и С-диапазонах частот

К. В. Музалевский

*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН — обособленное  
подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия  
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

В данной теоретической работе предложен двухчастотный поляриметрический метод измерения профилей влажности в поверхностном слое агропочв толщиной до 30 см. Рассмотрен случай монотонного изменения влажности почвы с глубиной для профилей, которые измерялись в течение 37 дней после орошения. В качестве исходных значений сечений обратного радарного рассеяния выступали величины, рассчитанные на согласованных поляризациях методом Кирхгофа в скалярном приближении и методом малых возмущений на частотах 5,4 ГГц и 435 МГц соответственно. В этих расчётах использовались экспериментальные профили влажности и спектроскопическая рефракционная модель комплексной диэлектрической проницаемости для почвы с содержанием глинистой фракции, равной 14 %. Профили влажности почвы восстанавливались в ходе решения обратной задачи, информативным признаком в которой были отношения сечений обратного рассеяния на согласованных поляризациях, рассчитанные на двух частотах для измеренного и модельного профилей влажности почвы. В качестве модельного профиля влажности почвы выступала экспоненциальная функция. Среднеквадратичное отклонение и квадрат коэффициента корреляции между восстановленными и измеренными значениями влажности в поверхностном слое почвы толщиной 30 см оказались равны  $0,01 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и 0,92 соответственно. Выводы работы справедливы также и в случае бистатической конфигурации схемы зондирования. Исследование показывает перспективность разработки многочастотных радиолокационных систем комбинированного СВЧ- и дециметрового диапазонов для дистанционного зондирования профилей влажности почв.

**Ключевые слова:** обратное радарное рассеяние, бистатическое радарное рассеяние, агропочвы, профиль влажности, комплексная диэлектрическая проницаемость

Одобрена к печати: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-203-216

### Введение

Влажность поверхности почвы является одной из пятидесяти основных климатических переменных, рекомендованных Всемирной метеорологической организацией для наземного и спутникового наблюдения (Status..., 2015). В настоящее время радиометрами спутников SMAP и SMOS/MIRAS в L-диапазоне на частоте 1,4 ГГц (Entekhabi et al., 2014; Wigneron et al., 2017), GCOM-W1/AMSR2 в K- и Ka-диапазонах на частотах 19 и 37 ГГц (Gao et al., 2018), радаром спутника Metop/ASCAT в C-диапазоне на частоте 5,3 ГГц (Brocca et al., 2017) ведётся мониторинг влажности почвы в поверхностном слое ограниченной толщины порядка 2,5 см (Choudhury et al., 1979; Escorihuela et al., 2010). Прямое измерение влажности почвы в корневой зоне (0–1 м) с использованием существующей группировки спутников невозможно. Однако применение данных дистанционного зондирования (о влажности поверхности почвы) в сопряжении с гидрологическими моделями, описывающими динамику потоков тепла и влаги (Liou, England, 1998), позволяет восстанавливать распределение влажности в глубинных слоях почвы (Hoeben, Troch, 2000; Tian et al., 2019). Оценка профилей влажности в корневой зоне может быть основана также на установленных корреляционных связях между профилем влажности почвы и профилем наименьшей полевой влагоёмкости, величина которой является постоянной агрогидрологической характеристикой для заданного типа почвенного покрова (Васильев и др., 1983). В результате может быть предложена методика оценки

профиля полной влажности почвы в корневой зоне 0–1 м (Кондратьев и др., 1976) на основе априори известного профиля наименьшей полевой влагоёмкости для заданного типа почвы и прямых дистанционных измерений влажности поверхности почвы в СВЧ-диапазоне. Прямые дистанционные измерения влажности почвы в корневой зоне требуют применения волн более низкочастотного дециметрового (Р-диапазон) или метрового УКВ-диапазона. Действительно, теоретические исследования в приближении линейного профиля влажности почвы показали (Богородский, Козлов, 1985), что оценку градиента влажности невозможно провести на длине волны менее 43 см, если влажность поверхности почвы больше, чем её наименьшая влагоёмкость, или если относительная диэлектрическая проницаемость поверхности почвы больше 15. Вместе с тем в работе (Поверхностное..., 2015) на основе многочастотного (140; 430; 1,3; 8,6 ГГц) поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой ИМАРК производства ОАО «Концерн радиостроения «ВЕГА» (Kutuza et al., 2004) экспериментально подтверждена принципиальная возможность оценки вертикального распределения влажности почвы сельскохозяйственных полей на глубину до 2,5 м.

В 2021 г. Европейским космическим агентством будет запущен спутник BIOMAS, оснащённый радаром с синтезированной апертурой Р-диапазона с рабочей частотой 435 МГц (Carreiras et al., 2017), что впервые создаст техническую возможность для разработки новых алгоритмов перманентного мониторинга влажности почвы в корневой зоне в глобальном масштабе (Alemohammad et al., 2018). В связи с этим за рубежом (Konings et al., 2014; Moghaddam et al., 2007; Sadeghi et al., 2017; Tabatabaenejad et al., 2015) ведутся исследования принципиальной возможности количественных оценок глубинного распределения влажности почвы в корневой зоне на основе одночастотных поляриметрических наблюдений обратного радарного рассеяния электромагнитных волн в Р-диапазоне частот (435 МГц). В отличие от волн L-диапазона, для которых глубина зондирования может быть оценена экспериментальной величиной порядка 2,5 см (Choudhury et al., 1979; Escorihuela et al., 2010), в отдельных случаях засушливых почв до 10–20 см (см. теоретическую оценку (Yashchenko, Bobrov, 2016)) для волн Р-диапазона глубина зондирования в большей степени зависит от глубинного профиля влажности почвы в корневой зоне и для влажных или умеренно влажных почв не может быть определена одним универсальным значением. В результате для различных наборов профилей влажности до и после орошения не удаётся определить среднюю влажность почвы в слоях заданной толщины (5, 15, 30, 50 см), которая бы соответствовала кажущейся влажности почвы, восстановленной из дистанционных измерений (Р-диапазон) в приближении диэлектрически-однородного полупространства (Konings et al., 2014; Tabatabaenejad et al., 2015). В связи с этим в литературе задача восстановления профиля влажности почвы в Р-диапазоне частот сведена к нахождению параметров функции модельного профиля, описывающего глубинное распределение влажности в корневой зоне в виде: а) набора слоёв конечной толщины (Konings et al., 2014; Moghaddam et al., 2007); б) полинома второй и третьей степени (Sadeghi et al., 2017; Tabatabaenejad et al., 2015); в) профиля Эпштейна (Fung et al., 1996; Walker et al., 1997). В силу ограниченного числа радарных наблюдений на одной частоте 435 МГц (поляризация: согласованная горизонтальная HH, согласованная вертикальная VV, перекрёстная HV), которые позволяют одновременно восстановить до трёх переменных, в полном объёме задачу измерения профиля влажности с учётом шероховатости поверхности почвы и растительного покрова решить не представляется возможным. Однако, как было показано в работах (Зердев, Кулемин, 1993; Поверхностное..., 2015; Kwon et al., 2002), использование поляриметрических многочастотных радиолокационных наблюдений позволяет оценить влажность различных по глубине горизонтов почвы с учётом влияния шероховатости поверхности почвы.

В данной работе представлен метод, который позволяет проводить измерения профилей влажности почвы в корневой зоне на основе наблюдения сечения рассеяния волн в зеркальном или обратном направлении на двух частотах в С- и Р-диапазонах. Предлагаемая поляриметрическая многочастотная методика может быть реализована на базе одного (радар бокового обзора) или нескольких (бистатическая радиолокация) беспилотных летательных аппаратов. Кроме того, с 2021–2022 гг. на орбите будут функционировать два космиче-

ских аппарата, обеспечивающих поляриметрическую радарную съёмку поверхности Земли в глобальном масштабе на частотах 435 МГц (BIOMAS) и 5,4 ГГц (Sentinel-1), что открывает перспективы создания новых двухчастотных алгоритмов дистанционного измерения влажности почвы в корневой зоне на основе наблюдения обратного радарного рассеяния волн Р- и С-диапазона частот. В будущем данный подход может быть реализован на сухопутной части Арктической зоны Российской Федерации, для которой в прибрежной области не только применяется повышенная частота наблюдений тандемом спутников Sentinel-1(A/B) с периодом 2–6 дней, но и осуществляется почти одновременная съёмка в интерференционном IW (VV, VH) и сверхширокополосном EW (HH, HV) режимах с разницей во времени менее суток (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/acquisition-segments>; <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, см., например, для п-ва Ямал или Таймыр, Дельты р. Лены или Новосибирских островов), что позволяет говорить о поляриметрических измерениях с усреднением в один день.

### Постановка задачи

В качестве первого шага будет рассматриваться случай почвы без растительного покрова. Исключим из анализа величины сечения обратного радарного рассеяния на перекрёстных поляризациях  $\sigma_{HV}$ ,  $\sigma_{VH}$  ввиду более сильной их зависимости от объёмного рассеяния на элементах растительного покрова по сравнению с согласованными поляризациями  $\sigma_{HH}$ ,  $\sigma_{VV}$ , особенно на частотах С-диапазона. Для волн С-диапазона будем считать, что среднеквадратические отклонения высот неровностей поверхности почвы не превышают величины  $\sim\lambda/6$ , а радиусы её кривизны значительно превосходят длину волны  $\lambda$ . Для волн Р-диапазона будем считать, что среднеквадратические отклонения высот неровностей и наклонов (в англоязычной литературе используется термин *slope* — тангенс угла между двумя компланарными векторами, один из которых проведён по касательной к поверхности почвы в какой-либо её точке, а другой лежит на горизонтальной плоскости) поверхности почвы не превышают величины  $\sim\lambda/20$  и 1 (угол наклонов не более  $45^\circ$ ) соответственно. Тогда для волн С- и Р-диапазонов справедливо оценивать некогерентную компоненту сечения обратного радарного рассеяния шероховатой поверхности почвенного покрова в скалярном приближении метода Кирхгофа и методом малых возмущений соответственно (Bass, Fuks, 1979; Ulaby et al., 1982). Отношения сечений обратного радарного рассеяния на согласованной горизонтальной ( $\sigma_{HH}$ ) и вертикальной ( $\sigma_{VV}$ ) поляризации, рассчитанные на основе метода малых возмущений ( $P_1(\theta)$ ) и Кирхгофа ( $P_2(\theta)$ ), не зависят от функции спектральной плотности высот шероховатой поверхности почвы и могут быть выражены в виде (Комаров, Якушев, 1998; Ceraldi et al., 2005; Komarov et al., 2002):

$$P_1(\theta) = \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{VV}} = \frac{|1 + R_H(\theta)|^4}{\left| \cos^2 \theta (1 + R_V(\theta))^2 + \frac{\sin^2 \theta}{\varepsilon_s(0)} (1 - R_V(\theta))^2 \right|^2}, \quad (1)$$

$$P_2(\theta) = \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{VV}} = \frac{|R_H(\theta)|^2}{|R_V(\theta)|^2}, \quad (2)$$

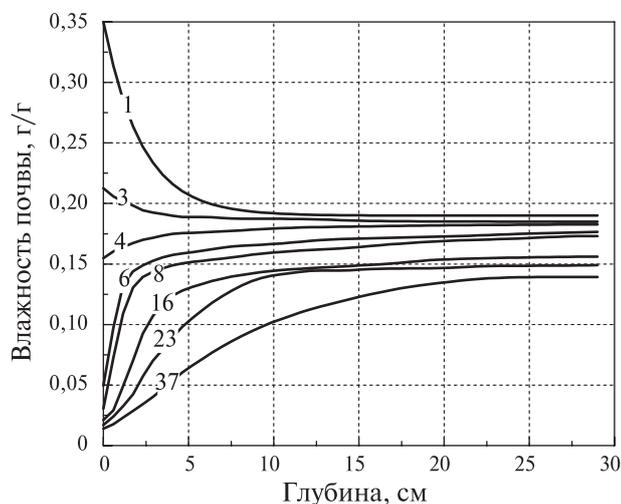
где  $\varepsilon_s(0)$  — значение комплексной диэлектрической проницаемости поверхности почвенного покрова в точке с вертикальной координатой  $z = 0$  м;  $\theta$  — угол зондирования;  $R_H(\theta)$  и  $R_V(\theta)$  — комплексный коэффициент отражения Френеля на горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно от почвенного покрова с плоской границей раздела воздух — почва и профилем диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_s(z)$ . Отметим, что формулы (1) и (2), хотя и не зависят от степени шероховатости поверхности почвы, однако в рамках моделей Кирхгофа и малых возмущений описывают отношение сечений рассеяния

от шероховатой границы почвенного покрова, параметры которого (среднеквадратические отклонения высот, радиусы кривизны и наклоны неровностей поверхности почвы) удовлетворяют приведённым выше критериям. В случае наблюдения рассеянных волн в зеркальном направлении отношение сечений на горизонтальной и вертикальной поляризации в скалярном приближении метода Кирхгофа и метода малых возмущений выражается формулой (2); вследствие этого дальнейшее исследование можно распространить также и для случая бистатической радиолокации. Формула (1) получена в работе (Комаров, Якушев, 1998) и является строгим решением задачи о рассеянии волны на шероховатой границе слоисто-неоднородного диэлектрического полупространства. В ходе выводов формулы (1) не накладывалось каких-либо ограничений на величину градиента диэлектрической проницаемости у поверхности почвенного покрова. Формула (2), хотя и получена для случая диэлектрически-однородного полупространства, при использовании итерационного метода Бреховских (Brekhovskikh, 1960) для расчёта коэффициентов отражения  $R_H(\theta)$ ,  $R_V(\theta)$  может быть применена в случае слоисто-неоднородного почвенного покрова. В соответствии с методикой Бреховских слоисто-неоднородное полупространство с произвольным изменением комплексной диэлектрической проницаемости по вертикальной координате разбивается на конечное число диэлектрически-однородных слоёв конечной толщины. В результате может быть решена классическая граничная задача электродинамики по нахождению амплитуд плоских волн в каждом слое из системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Решая СЛАУ итерационным методом, можно найти интегральные коэффициенты отражения от всей толщи неоднородного полупространства.

В соответствии с классической теоремой о среднем (Gradshteyn, Ryzhik, 2000) для любой формы профиля должно существовать среднее значение влажности в слое почвы конечной толщины. Действительно, в работах (Gorrab et al., 2014; Fung et al., 1997) показано, что коэффициенту отражения, рассчитанному для слоисто-неоднородного диэлектрического полупространства, можно сопоставить такой же по величине коэффициент отражения, рассчитанный для однородного полупространства, с некоторым эффективным значением диэлектрической проницаемости или влажности почвы.

Будем далее называть такое значение диэлектрической проницаемости или влажности кажущимся. Тогда измерение величин  $P_1(\theta)$  и  $P_2(\theta)$  на двух частотах 435 МГц (Р-диапазон) и 5,4 ГГц (С-диапазон) соответственно позволяет найти два значения кажущегося значения влажности почвы. В следующем разделе предложен метод, позволяющий на основе двух найденных значений кажущейся влажности почвы и параметрически заданного профиля восстановить влажность почвы на любой глубине в корнеобитаемом слое толщиной до 30 см.

### Способ измерения профилей влажности в корнеобитаемом слое почвы



Для изучения возможностей дистанционного зондирования распределения влаги в корнеобитаемом слое выберем опорные профили влажности (Schmugge et al., 1976), которые наблюдались в течение 37 дней со 2 марта 1971 г. в середине дня на оном из сельскохозяйственных полей в районе г. Феникс сотрудниками Американской Лаборатории водосбережения (рис. 1).

Рис. 1. Профили влажности, наблюдаемые в пахотном слое почвы с 1-го по 37-й день после орошения

Профиль 1 не содержится в работе (Schmugge et al., 1976) и был нами получен на основе двумерной интерполяции (по глубине и времени) профилей влажности с 3-го по 37-й день после орошения.

В силу ограниченности количества радарных наблюдений для описания экспериментальных профилей влажности (см. *рис. 1*) будем использовать упрощённое решение уравнения вертикального влагопереноса в почве (Sadeghi et al., 2017):

$$m(z) = m_{\infty} + (m_0 - m_{\infty}) \cdot e^{z/\alpha}, \quad (3)$$

где  $m_0$  — влажность на поверхности почвы;  $m_{\infty}$  — влажность за пределами пахотного слоя при  $z \rightarrow \infty$ ;  $\alpha$  — эффективная толщина капиллярной каймы. Сведём задачу о восстановлении профиля влажности почвы к определению двух из трёх неизвестных параметров в выражении (3).

Для этого определим среднее значение влажности почвы  $\bar{m}$  в слое толщиной  $d$ :

$$\bar{m} = \frac{1}{d} \int_0^d m(z) dz = m_{\infty} + \frac{(m_0 - m_{\infty})}{\gamma} (1 - e^{-\gamma}), \quad (4)$$

здесь  $\gamma = d/\alpha$ . Тогда уравнение для профиля влажности почвы (3) с учётом выражения (4) может быть записано в виде:

$$m(z) = m_{\infty} + (m_0 - m_{\infty}) \exp\left[-\frac{z}{d} \gamma\right], \quad (5)$$

$$m_{\infty} = \frac{\bar{m} - m_0 \frac{1 - e^{-\gamma}}{\gamma}}{1 - \frac{1 - e^{-\gamma}}{\gamma}}. \quad (6)$$

В результате задача о восстановлении профиля влажности свелась к нахождению параметров  $d$  и  $\gamma$  при известной влажности на поверхности почвы  $m_0$  и средней влажности  $\bar{m}$  в слое толщиной  $d$ .

С целью разработки алгоритма для практических оценок величин  $m_0$  и  $\bar{m}$  найдём такое значение влажности почвы (кажущаяся влажность), при котором отношение сечений рассеяния, рассчитанное в приближении диэлектрически-однородного полупространства, оказалось бы равно отношению сечений рассеяния, рассчитанному с учётом всего профиля влажности (см. *рис. 1*) для диэлектрически-неоднородного полупространства. Отношение сечений рассеяния на частотах 1,4 ГГц и 435 МГц рассчитывалось с помощью формулы (1), на частоте 5,4 ГГц использовалась формула (2). Кажущееся значение влажности находилось отдельно на каждой частоте с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта (Gill, Murray, 1978) в ходе решения обратной задачи путём минимизации нормы невязки между двумя значениями отношений сечений рассеяния, одно из которых было рассчитано для слоисто-неоднородной среды с учётом профилей влажности, представленных на *рис. 1*, другое — для однородного полупространства. Коэффициенты отражения, входящие в формулы (1) и (2), рассчитывались на основе метода итераций (Brekhovskikh, 1960) с использованием модели комплексной диэлектрической проницаемости почвы (Mironov et al., 2013). При расчётах слоисто-неоднородное полупространство разбивалось на 1500 слоёв при  $0 > z > -0,3$  м. Диэлектрическое полупространство в области  $z < -0,3$  м считалось однородным с заданной комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_s(z) = \epsilon_s(z = -0,3)$ . Здесь и далее содержание глинистой фракции по весу в почве задавалась равным 14 % (по классификации Министерства сельского хозяйства США (United States Department of Agriculture — USDA)). Плотность сухого сложения почвы считалась равным  $1,0 \text{ г/см}^3$ , что соответствует часто культивируемой пашне. В связи с тем, что угол зондирования спутника BIOMASS будет находиться в диапазоне  $23\text{--}43^\circ$  (Quegan et al., 2018), угол зондирования Sentinel-1 в IW- и EW-режимах варьируется от  $31$  до  $46^\circ$  и от  $20$  до  $47^\circ$  соответственно (Fletcher, 2012), а в диапазоне углов наблюдения от  $25$

до  $50^\circ$  сечение обратного радарного рассеяния почвенного покрова на согласованных поляризациях существенно не меняется (Oh et al., 1992); в данном исследовании угол зондирования был задан равным  $25^\circ$ . Восстановленные значения кажущейся влажности почвы приведены на рис. 2. Из данных, представленных на графике, видно, что кажущаяся влажность почвы, восстановленная на частоте 5,4 ГГц (см. линию 3) со среднеквадратическим отклонением менее  $0,003 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , соответствует заданным значениям влажности на поверхности почвы при  $z = 0 \text{ м}$  (точечная линия). Примерно до 4-го дня с момента орошения (влажность поверхности почвы более чем  $0,15 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , см. рис. 1 и 2) влажности почвы, восстановленные на частотах 5,4 ГГц и 435 МГц, практически совпадают между собой, отклонение не более чем на  $0,025 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . Кажущаяся влажность почвы, восстановленная на частоте 435 МГц, как и ожидалось, несёт в себе больше информации о глубинном распределении влажности начиная с 4-го дня после орошения. По-видимому, для рассмотренного типа почвенного покрова, в случае если влажность поверхности превышает  $0,15 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , возможность получения информации о глубинном распределении влажности необходимо связывать с применением более низких частот, чем 435 МГц. На промежуточной частоте 1,4 ГГц (рабочая частота радиометров SMAP, SMOS и средняя частота GPS, GLOSS: L1+L2) восстановленные значения кажущейся влажности почвы отличаются от её значения на поверхности только с 4-го по 15-й день после орошения при влажности поверхности почвы менее чем  $0,15 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и более чем  $0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . На основе левой части формулы (4) оценим толщину слоя почвы  $d$ , средняя влажность  $\bar{m}$  в котором равна восстановленным значениям (см. рис. 2) кажущейся влажности почвы для каждого дня с момента орошения. Назовём  $d$  кажущейся толщиной слоя, или глубиной зондирования. Результаты расчёта представлены на рис. 3.

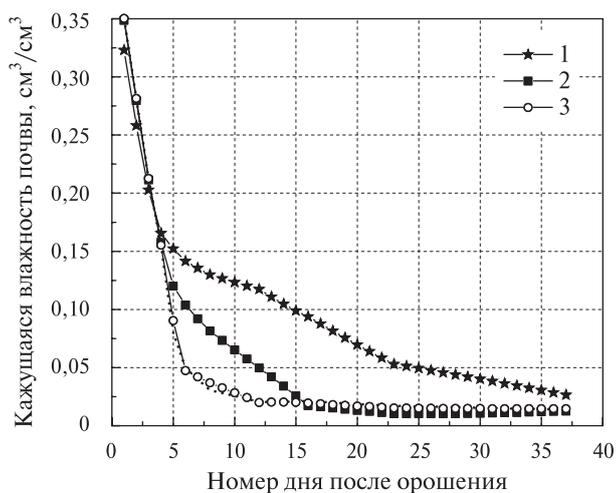


Рис. 2. Восстановленные значения кажущейся влажности почвы в зависимости от дня с момента орошения. Частота: 1 — 435 МГц, 2 — 1,4 ГГц, 3 — 5,4 ГГц. Точечная линия соответствует измеренным значениям влажности почвы на поверхности в точке  $z = 0 \text{ м}$ . Здесь указаны объёмные значения влажности почвы, которые являются произведением весовой влажности (см. рис. 1) и заданной плотности сухого сложения почвы, равной  $1 \text{ г}/\text{см}^3$

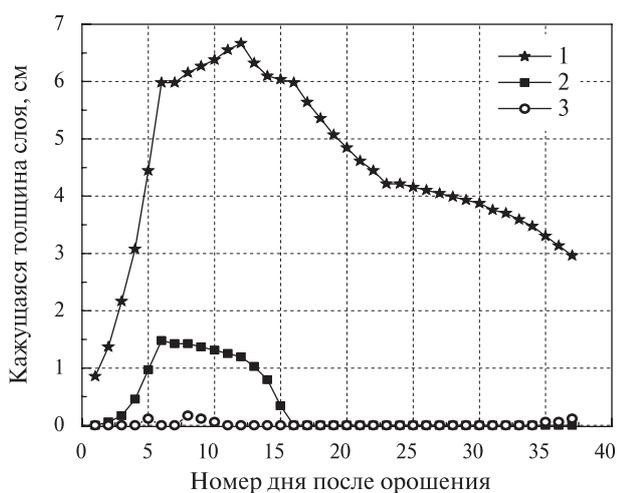
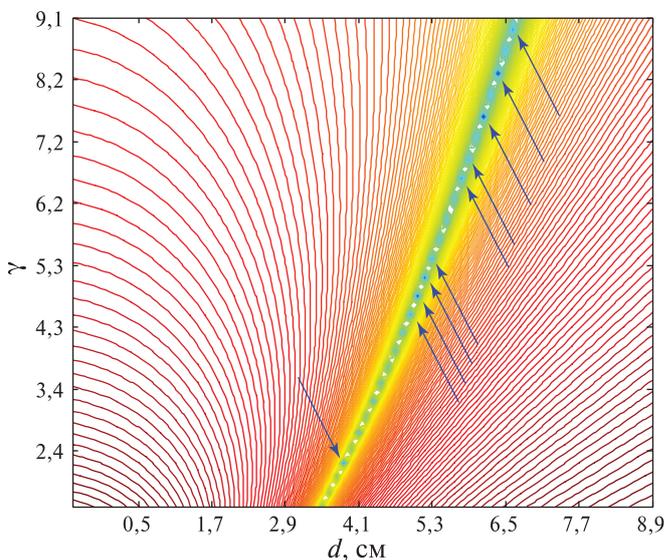


Рис. 3. Толщина слоя почвы, средняя влажность в котором (по данным рис. 1) равна восстановленным значениям кажущейся влажности почвы (см. рис. 2). Частота: 1 — 435 МГц, 2 — 1,4 ГГц, 3 — 5,4 ГГц

Действительно, как видно из рис. 3, глубина зондирования на частоте 5,4 ГГц не превышает 0,2 см, в связи с этим восстановленные значения кажущейся влажности практически совпадают с влажностью поверхности почвы (см. кривые 3 на рис. 2 и 3). Максимальная глубина зондирования достигает порядка 7 см на частоте 435 МГц (см. кривые 1 на рис. 2 и 3). На частоте 1,4 ГГц глубина зондирования не превышает 2 см (см. кривые 2 на рис. 2 и 3), что хо-

рошо согласуется с литературными данными (Choudhury et al., 1979; Escorihuela et al., 2010). Из *рис. 3* видно, что глубина зондирования зависит не только от частоты, но и от формы профиля влажности. Максимум глубина зондирования достигает с 6-й по 14-й день после орошения, в момент, когда профили влажности (или, что то же самое, показатели преломления) имеют максимальный градиент в слое толщиной  $d$  (см. *рис. 1*). Действительно, как показано в работе (Brekhovskikh, 1960), в приближении линейно изменяющегося показателя преломления с глубиной коэффициент отражения волны прямо пропорционален градиенту показателя преломления у поверхности почвы. В результате возрастание глубины зондирования с 6-й по 14-й день после орошения, по-видимому, связано с необходимостью учёта заметных вкладов амплитуд переотражённых волн в области максимальных градиентов показателя преломления для формирования полного коэффициента отражения от слоисто-неоднородного диэлектрического полупространства.

Согласно проведённому анализу, величина влажности поверхности почвы  $m_0$  в формулах (4)–(6) может быть оценена в виде кажущейся влажности, восстановленной из отношения сечений рассеяния, наблюдаемого на частоте 5,4 ГГц для почвенного покрова с произвольными профилями влажности (см. *рис. 1* и 2). С другой стороны, показано (см. *рис. 3*), что найденному из отношения сечений рассеяния на частоте 435 МГц значению кажущейся влажности можно сопоставить среднее значение влажности  $\bar{m}$ , рассчитанное в приближении экспоненциального профиля влажности в некотором поверхностном слое почвы, толщина  $d$  которого зависит от наблюдаемого профиля влажности в почве (см. *рис. 1* и 3). В результате искомый профиль влажности почвы (5) оказывается функцией только двух переменных  $d$  и  $\gamma$ . Переменные  $d$  и  $\gamma$  предлагается определить в ходе минимизации нормы невязки между отношениями сечений рассеяния, одно из которых рассчитано на основе формулы (1) с использованием модельного профиля (5), в котором параметры  $m_0$ ,  $\bar{m}$  определены, а другое — с использованием формулы (1) и профилей влажности, изображённых на *рис. 1*. Поставленная обратная задача является некорректной (не доопределена) и в литературе решается, например, методом поиска глобального минимума с использованием алгоритма имитации отжига (Corana et al., 1987; Sadeghi et al., 2017; Tabatabaenejad et al., 2015). В отличие от исследований (Sadeghi et al., 2017; Tabatabaenejad et al., 2015), в данной работе предлагается использовать все решения (локальные минимумы нормы невязки), которые будут ограничены определённой областью в плоскости искомых переменных ( $d$ ,  $\gamma$ ). Если обратиться к *рис. 1*, то можно заметить, что влажность почвы на бесконечности  $m_\infty$  никогда не выходит за пределы величин  $0,14–0,2 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . Данные пределы вариаций  $m_\infty$  ограничивают вариации параметра  $\gamma$ , определяемого нелинейным уравнением (6), в диапазоне  $\sim 1 < \gamma < \sim 10$ . Вариация значений  $d$  в соответствии с данными, приведёнными на *рис. 3*, может быть ограничена диапазоном

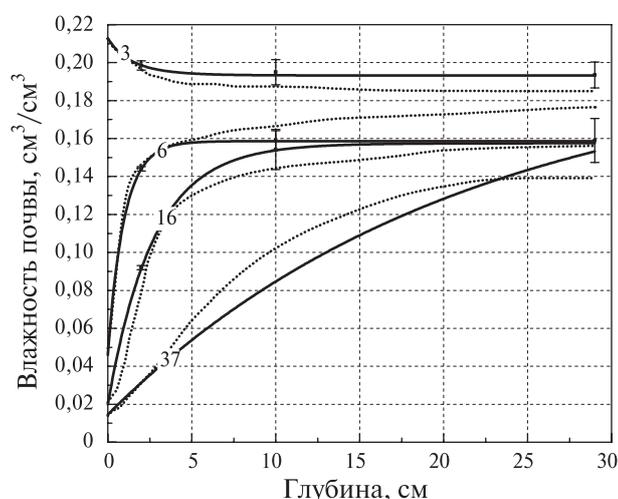


$0,005 < d < 0,1 \text{ м}$ . В качестве примера на *рис. 4* изображены в логарифмическом масштабе значения минимизируемой нормы невязки в координатах ( $d$ ,  $\gamma$ ) для 6-го дня с момента орошения. Как видно на *рис. 4*, в области поиска решения имеется 10 локальных минимумов с координатами  $(d_i, \gamma_i)$ , где  $i = 1, \dots, 10$ .

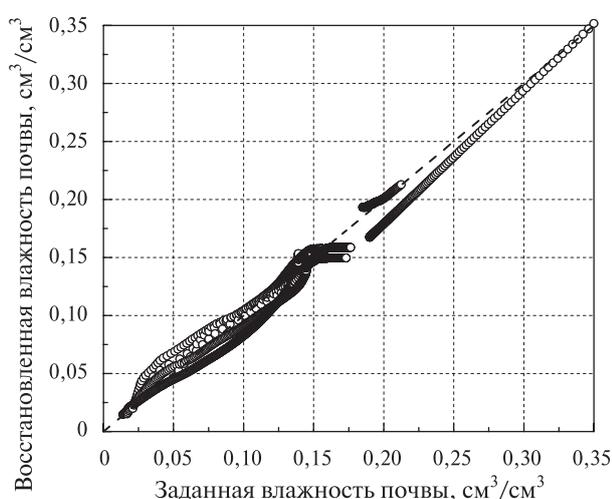
*Рис. 4.* Значения минимизируемой нормы невязки в логарифмическом масштабе в плоскости координат ( $d$ ,  $\gamma$ ). В синем псевдоцвете изображены локальные минимумы

## Результаты и обсуждение

В соответствии с предложенной методикой для всех дней после орошения была найдена норма невязки (подобная той, что изображена на *рис. 4*) в точках локальных минимумов ( $d_i, \gamma_i$ ), рассчитаны профили, получен усреднённый профиль и проведена оценка среднеквадратического отклонения найденных профилей от усреднённого профиля влажности (на сетке по глубине с шагом 0,1 см). В качестве примера на *рис. 5* приведены исходно заданные и восстановленные усреднённые профили влажности почвы, рассчитанные по глубине с шагом 0,1 см для 3-го, 6-го, 16-го и 37-го дней после орошения. Среднеквадратические отклонения найденных профилей от усреднённого профиля показаны на *рис. 5* в виде усов на глубине 2, 10 и 29 см. Для профиля 37-го дня после орошения стандартное отклонение не приведено, так как начиная с 23-го дня минимизируемая норма невязки содержала единственный минимум. Зависимость восстановленных значений влажности почвы (усреднённый профиль) относительно исходно заданных значений влажности почвы в слое 30 см приведена на *рис. 6*.



*Рис. 5.* Профили влажности почвы, исходно заданные (точечная линия) аналогично тем, что изображены на *рис. 1*, и восстановленные профили влажности (сплошная линия)



*Рис. 6.* Зависимость восстановленных значений влажности почвы от заданных в слое толщиной 30 см

Для построения графика на *рис. 6* значения влажности почвы рассчитывались с шагом 0,1 см. Среднеквадратическое отклонение между восстановленными и измеренными значениями влажности почвы составило  $0,01 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , при этом квадрат коэффициента корреляции оказался равен 0,92. Экспоненциальная функция модельного профиля (5)–(6) адекватно описывает экспериментально наблюдаемые изменения влажности почвы с глубиной в слое толщиной 30 см (см. *рис. 5* и *б*) в течение 37 дней после орошения. Для некоторых дней после орошения в *таблице* приведены параметры восстановленных профилей влажности (см. формулы (5)–(6)). Восстановленные значения влажности почвы на бесконечной глубине  $m_\infty$  (см. *таблицу*) хорошо согласуются со значениями влажности почвы на глубине 30 см для исходно заданных профилей (см. *рис. 1*). При этом среднеквадратические отклонения восстанавливаемых величин  $m_\infty$  не превышают  $\Delta m_\infty \approx \pm 0,02 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . Восстановленные значения  $d$  (см. *таблицу*) для модельного профиля (5)–(6) хорошо коррелируют с соответствующими величинами, оценёнными в приближении однородного полупространства (см. *рис. 3*). Найденные в данной работе значения глубин зондирования  $d$  (см. *рис. 3* и *таблицу*) существенно меньше относительно оценок, в которых учитывается лишь затухание волны в почве на частоте 435 МГц (Moghaddam et al., 2007, глубина зондирования была оценена значениями  $\sim 0,15$  и  $\sim 0,25$  м для почвы с содержанием глины 20 % при влажности 25 и 5 % соответственно).

## Восстановленные параметры профиля влажности для некоторых дней после орошения

Номер дня	1	3	6	8	16	23	37
$m_{\infty}$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	0,167	0,193	0,159	0,150	0,158	0,154	0,200
$\Delta m_{\infty} \times 10^2$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	1,9	0,7	0,5	1,2	1,3	–	–
$\gamma$	0,35	2,39	7,03	7,09	1,85	0,67	0,13
$\Delta\gamma$	0,04	1,26	1,61	2,50	0,28	–	–
$z_{eff}$ , см	0,8	2,8	6,6	7,0	4,9	4,1	2,8
$\Delta z_{eff}$ , см	0,1	0,6	0,6	1,1	0,2	–	–

Примечание: Символом  $\Delta$  обозначены среднеквадратические отклонения соответствующих восстановленных величин.

Это может быть объяснено тем, что в проведённых нами расчётах учитывалось не только затухание электромагнитной волны в слоисто-неоднородном почвенном покрове, но и изменение амплитуд волн при их отражении от всех внутренних границ слоёв, на которые разбивалось полупространство. Действительно, в исследовании (Khankhoje et al., 2013) также получены заниженные относительно результатов работы (Moghaddam et al., 2007) оценки глубины зондирования неоднородно увлажнённого почвенного покрова на основе расчёта сечения обратного радарного рассеяния в L-диапазоне частот методом конечных элементов.

### Заключение

Предложенный двухчастотный поляриметрический метод может быть применён для восстановления профилей влажности почв, монотонно меняющихся с глубиной в корнеобитаемом слое. Использование экспоненциального модельного профиля позволило восстановить влажность на различных глубинах в поверхностном слое почвы толщиной до 30 см с погрешностью не более 0,01 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> (теоретическая оценка предельной точности). Для описания профиля влажности почвы, содержащего один или несколько максимумов или минимумов, необходимо использовать более сложную модель с дополнительным набором неизвестных параметров. Это потребует увеличения числа независимых наблюдений сечения обратного радарного рассеяния. В связи с этим для более сложных профилей влажности или уточнения параметров экспоненциального профиля влажности наиболее целесообразно проводить измерение сечения обратного радарного рассеяния на дополнительных частотах, распределённых в диапазоне от ~435 МГц (или ниже) до 1,4 ГГц, чем использовать угловые зависимости на тех же частотах (так как в диапазоне углов наблюдения от 25 до 50° сечение обратного радарного рассеяния на согласованных поляризациях существенно не меняется (Oh et al., 1992) при умеренной влажности почвы менее 0,29 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>). Предложенный метод восстановления профилей влажности почвы не учитывает влияние растительного покрова. Особенно большие погрешности могут вноситься растительностью при определении влажности поверхности почвы на частоте 5,4 ГГц вследствие значительного рассеяния волн данного диапазона элементами растительного покрова. В работе (Khankhoje et al., 2013) показано, что с ростом степени шероховатости поверхности почвенного покрова возрастает глубина зондирования. Используемые в настоящей работе модели для расчёта отношения сечений рассеяния на согласованных поляризациях методом Кирхгофа и малых возмущений не позволяют установить какое-либо влияние степени шероховатости поверхности почвенного покрова на погрешность восстановления профилей влажности почвы и глубину зондирования. Для дальнейшего исследования данного вопроса необходимо либо обратиться к эксперименту, либо использовать более сложные модели сечения рассеяния, например модель интегральных уравнений (Fung, 1994) или прямое численное моделирование (Khankhoje et al., 2013). Кроме того, дополнительно требуется исследовать вопрос о сходимости метода при решении обратной

задачи вследствие инструментальной погрешности измерения сечений обратного радарного рассеяния.

В связи с тем, что величины отношения сечения рассеяния на согласованных поляризациях в направлении зеркального отражения в приближении Кирхгофа и метода малых возмущений совпадают между собой (Ceraldi et al., 2005), проведённые оценки можно распространить на случай бистатического радарного зондирования. Развитая методика может быть реализована не только на основе дистанционного зондирования спутниками BIOMASS и Sentinel-1, но также и на воздушных носителях в конфигурации бистатической радиолокации. В связи с широким развитием и доступностью малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предлагаемая методика может быть реализована в конфигурации моностатической или бистатической радиолокации с использованием тандема синхронно движущихся БПЛА, оснащённых компактными многочастотными рефлектометрами, на основе портативных анализаторов спектра (<http://www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument/r-series>).

Исследование предельной глубины зондирования и восстановление влажности почвы в L-диапазоне частот для сигналов GPS, ГЛОНАСС выполнено в рамках проекта № 0356-2019-0004 СО РАН, методика измерения профилей влажности на двух частотах 435 МГц и 5,4 ГГц получена в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00405.

## Литература

1. Богородский В. В., Козлов А. И. Микроволновая радиометрия земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
2. Васильев Е. К., Рабинович Ю. И., Широков К. П., Шульгина Е. М. Определение влажности и влагозапасов почв Ленинградской области СВЧ-радиометрическим методом // Тр. Ордена Трудового Красного Знамени Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 1983. Вып. 478. С. 62–71.
3. Зердев Н. Г., Кулемин Г. П. Определения влажности почв многоканальными радиолокационными методами // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 1. С. 90–95.
4. Комаров С. А., Якушев А. И. Сечение рассеяния радиоволн на плоскостром полупространстве с шероховатой границей // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 6. С. 650–656.
5. Кондратьев К. Я., Рабинович Ю. И., Шульгина Е. М. Определение влажности и запасов продуктивной влаги в почве по микроволновому излучению // Тр. Ордена Трудового Красного Знамени Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 1976. Вып. 371. С. 3–11.
6. Поверхностное и подповерхностное зондирование покровов с помощью многочастотного поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой: отчет о НИР (закл.): № 01201280948 ФАНО РАН ФГБУН ИРЭ РАН / рук. Б. Г. Кутуза. М., 2015. 28 с.
7. Alemohammad S. H., Konings A. G., Jagdhuber T., Moghaddam M., Entekhabi D. Characterization of vegetation and soil scattering mechanisms across different biomes using P-band SAR polarimetry // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 209. P. 107–117.
8. Bass F. G., Fuks I. M. Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces. Pergamon Press, 1979. P. 536.
9. Brekhovskikh L. M. Waves in Layered Media. N. Y.: Academic Press, 1960. P. 561.
10. Brocca L., Crow W. T., Ciabatta L., Massari C., de Rosnay P., Enenkel M. A Review of the Applications of ASCAT Soil Moisture Products // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. No. 5. P. 2285–2306.
11. Carreiras J. M. B., Quegan S., Le Toan T. Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 196. P. 154–162.
12. Ceraldi E., Franceschetti G., Iodice A., Riccio D. Estimating the soil dielectric constant via scattering measurements along the specular direction // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 2. P. 295–305.
13. Choudhury B., Schmugge T., Chang A., Newton R. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils // J. Geophysical Research. 1979. V. 84. No. C9. P. 5699–5706.
14. Corana A., Marchesi M., Martini C., Ridella S. Minimizing multimodal functions of continuous variables with the ‘Simulated Annealing’ algorithm ACM // Trans. Mathematical Software. 1987. V. 13. No. 3. P. 262–280.

15. Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P. E., Kellogg K. H., Allen A., Bindlish R., Brown M., Chan S., Colliander A., Crlow W. T., Das N., De Lannoy G., Dunbar R. S., Edelstein W. N., Entin J. K., Escobar V., Goodman Sh. D., Jackson Th. J., Jai B., Johnson J., Kim E., Kim S., Kimball J., Koster R. D., Leon A., McDonald K. C., Moghaddam M., Mohammed P., Moran S., Njoku E. G., Piepmeier J. R., Reichle R., Rogez F., Shi J. C., Spencer M. W., Thruman S. W., Tsang L., Van Zyl J., Weiss B., West R. SMAP Handbook: Soil Moisture Active Passive. Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space. Pasadena, CA, USA, California Institute of Technology, Jet Propulsion Lab., 2014. 192 p.
16. Escorihuela M., Chanzy A., Wigneron J., Kerr Y. Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. No. 5. P. 995–1001.
17. Fletcher K. Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services. ESA SP-1322/1. 2012. 96 p.
18. Fung A. K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Norwood: Artech House, MA, 1994. P. 592.
19. Fung A. K., Dawson M. S., Chen K. S., Hsu A. Y., Engman E. T., O'Neill P. O., Wang J. A modified IEM model for: scattering from soil surfaces with application to soil moisture sensing // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. NE, USA. 1996. V. 2. P. 1297–1299.
20. Fung A. K., Boisvert J., Brisco B. Interpretation of radar measurements from rough soil surface with a permittivity profile // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Singapore. 1997. V. 3. P. 1376–1378.
21. Gao H., Zhang W., Chen H. An Improved Algorithm for Discriminating Soil Freezing and Thawing Using AMSR-E and AMSR2 Soil Moisture Products // Remote Sensing. 2018. V. 10(1697). P. 1–17.
22. Gill P. E., Murray W. Algorithms for the Solution of the Nonlinear Least-Squares Problem // SIAM J. Numerical Analysis. 1978. V. 15. No. 5. P. 977–992.
23. Gorraab A., Zribi M., Baghdadi N., Lili-Chabaane Z., Mougenot B. Multi-frequency analysis of soil moisture vertical heterogeneity effect on radar backscatter // Proc. Intern. Conf. Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP). 17–19 March 2014, Sousse, Tunisia. 2014. P. 379–384.
24. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. Tables of Integrals, Series, and Products. 6<sup>th</sup> ed. San Diego, CA: Academic Press, 2000. 1163 p.
25. Hoeben R., Troch P. A. Assimilation of active microwave observation data for soil moisture profile estimation // Water Resources Research. 2000. V. 36. No. 10. P. 2805–2819.
26. Khankhoje U. K., van Zyl J. J., Cwik T. A. Computation of Radar Scattering From Heterogeneous Rough Soil Using the Finite-Element Method // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. No. 6. P. 3461–3469.
27. Komarov S. A., Mironov V. L., Li S. SAR polarimetry for permafrost active layer freeze/thaw processes // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 24–28 June 2002, Toronto, Canada. 2002. V. 5. P. 2654–2656.
28. Konings A. G., Entekhabi D., Moghaddam M., Saatchi S. S. The Effect of Variable Soil Moisture Profiles on P-Band Backscatter // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. No. 10. P. 6315–6325.
29. Kutuza B., Davidkin A., Dzenkevich A., Kalinkevich A., Manakov V., Plushchev V., Shishkova O., Verba V., Vostrov E. Multi-frequency polarimetric synthetic aperture radar for surface and subsurface sensing // Proc. EuRAD. Horizon House Publications Ltd, 2004. P. 5–12.
30. Kwon E. Y., Park S. E., Moon W. M., Lee K. K. Estimation of soil moisture content from L- and P-band AirSAR data: A case study in Jeju, Korea // Geosciences J. 2002. V. 6. No. 4. P. 331–339.
31. Liou Y. A., England A. W. A land surface process/radiobrightness model with coupled heat and moisture transport in soil // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. No. 1. P. 273–286.
32. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. V. 10. No. 3. pp. 603–606.
33. Moghaddam M., Rahmat-Samii Ya., Rodriguez E., Entekhabi D., Hoffman J. P., Moller D., Pierce L. E., Saatchi S. S., Thomson M. Microwave Observatory of Sub canopy and Subsurface (MOSS): A Mission Concept for Global Deep Soil Moisture Observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 8. P. 2630–2643.
34. Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F. T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing. 1992. Vol. 30. P. 370–382.
35. Quegan S., Lomas M., Papathanassiou K. P., Kim J.-S., Tebaldini S., Giudici D., Scagliola M., Gucci P. Calibration Challenges for the Biomass P-Band SAR Instrument // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 22–27 July 2018, Valencia, Spain. 2018. P. 8575–8578.
36. Sadeghi M., Tabatabaenejad A., Tuller M., Moghaddam M., Jones S. B. Advancing NASA's AirMOSS P-Band Radar Root Zone Soil Moisture Retrieval Algorithm via Incorporation of Richards' Equation // Remote Sensing. 2017. V. 9(1). P. 1–17.
37. Schmugge T., Wilheit T., Webster Jr. W., Gloersen P. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers-II. NASA technical note D-8321. 1976. P. 34.

38. Status of the Global Observing System for Climate (GCOS-195). World Meteorological Organization. Chairperson, Publications Board. Oct. 2015. 373 p.
39. *Tabatabaenejad A., Burgin M., Duan X., Moghaddam M.* P-Band Radar Retrieval of Subsurface Soil Moisture Profile as a Second-Order Polynomial: First AirMOSS Results // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 2. P. 645–658.
40. *Tian S., Renzullo L.J., van Dijk A.I.J.M., Tregoning P., Walker J.P.* Global joint assimilation of GRACE and SMOS for improved estimation of root-zone soil moisture and vegetation response // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. V. 23. P. 1067–1081.
41. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Microwave remote sensing. Active and Passive. V. 2: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Addison-Wesley Publishing Company, 1982. P. 457–1064.
42. *Walker J.P., Troch P.A., Mancini M., Willgoose G.R., Kalma J.D.* Profile soil moisture estimation using the modified IEM // *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 3–8 Aug. 1997, Singapore. 1997. V. 3. P. 1263–1265.
43. *Wigneron J.-P., Jackson T.J., O'Neill P.* Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 192. P. 238–262.
44. *Yashchenko A.S., Bobrov P.P.* Impact of the Soil Moisture Distribution in the Top Layer on the Accuracy Moisture Retrieval by Microwave Radiometer Data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2016. V. 54. No. 9. P. 5239–5246.

## Possibilities of remote sensing of soil moisture profile based on backscattering polarimetric observations in P- and C-bands

K. V. Muzalevskiy

*L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia  
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

In this theoretical work, a two-frequency polarimetric method is proposed for measuring moisture profiles in topsoil 30 cm thick. The problem was considered for monotonic moisture profiles, which were measured during 37 days after soil irrigation. Original values of co-polarization backscattering coefficients were calculated in scalar approximation by the Kirchhoff method and small perturbations method at a frequency of 5.4 GHz and 435 MHz, respectively. Experimentally measured moisture profiles and dielectric model of soil with a clay content of 14 % were used in the calculations. Soil moisture profiles were retrieved in the course of solving the inverse problem for the two frequencies, the cost function in which was selected as ratio of co-polarized HH-VV backscattering coefficients. Exponential function was used for modeling soil moisture profile. Standard error and square of correlation coefficient between the retrieved and measured values of soil moisture were found to be  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , and 0.92, respectively. These estimates were made for topsoil 30 cm thick. The obtained results remain suitable for the bistatic configuration of radar measurements. The study shows that the success of remote sensing of moisture profiles in the arable topsoil depends on selection of frequency range of radar. In this regard radar measurements are most expedient to carry out simultaneously at several frequencies of the ultra and super high frequency bands.

**Keywords:** backscattering, bistatic scattering, agro-soil, moisture profile, complex dielectric constant

Accepted: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-203-216

## References

1. Bogorodskii V. V., Kozlov A. I., *Mikrovolnovaya radiometriya zemnykh pokrovov* (Microwave radiometry earth covers), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 272 p.
2. Vasilev E. K., Rabinovich Yu. I., Shirokov K. P., Shulgina E. M., *Opređenje vlazhnosti i vlagozapasov pochv Leningradskoi oblasti SVCH-radiometricheskim metodom* (Determination of moisture and moisture

- reserves of the soils of the Leningrad region by microwave-radiometric method), *Trudy Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 1983, Vol. 478, pp. 62–71.
3. Zerdev N. G., Kulemin G. P., *Opredeleniya vlazhnosti pochv mnogokanal'nymi radiolokatsionnymi metodami* (Determination using soil using multichannel radar methods), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1993, No. 1, pp. 90–95.
  4. Komarov S. A., Yakushev A. I., *Sechenie rasseyaniya radiovoln na ploskosloistom poluprostranstve s shero-khovatoi granitsej* (Radio wave scattering cross-section on a flat layered half-space with a rough boundary), *Radiotekhnika i elektronika*, 1998, Vol. 43, No. 6, pp. 650–656.
  5. Kondrat'ev K. Ya., Rabinovich Yu. I., Shulgina E. M., *Opredelenie vlazhnosti i zapasov produktivnoi vlagi v pochve po mikrovolnovomu izlucheniyu* (Determination of moisture and reserves of productive moisture in the soil by microwave radiation), *Trudy Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 1976, Vol. 371, pp. 3–11.
  6. *Poverkhnostnoe i podpoverkhnostnoe zondirovanie pokrovov s pomoshch'yu mnogochastotnogo polarimetri-cheskogo radiolokatora s sintezirovannoi aperturoi: otchet o NIR No. 01201280948* (Surface and subsurface sounding of covers using multi-frequency polarimetric radar with synthetic aperture: Tech. Report No. 01201280948), FANO RAN FGBUN IRE RAN, Moscow, 2015, 28 p.
  7. Alemohammad S. H., Konings A. G., Jagdhuber T., Moghaddam M., Entekhabi D., *Characterizing differ-ent biomes using P-band SAR polarimetry*, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 209, pp. 107–117.
  8. Bass F. G., Fuks I. M., *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces*, Pergamon Press, 1979, 536 p.
  9. Brekhovskikh L. M., *Waves in Layered Media*, New York, USA: Academic Press, 1960, 561 p.
  10. Brocca L., Crow W. T., Ciabatta L., Massari C., de Rosnay P., Enenkel M., *A Review of the Applications of ASCAT Soil Moisture Products*, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 5, pp. 2285–2306.
  11. Carreiras J. M. B., Quegan S., Leo T., *Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission un-der defense restrictions*, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 196, pp. 154–162.
  12. Ceraldi E., Franceschetti G., Iodice A., Riccio D., *Estimating the soil dielectric constant via scattering measurements along the specular direction*, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 2, pp. 295–305.
  13. Choudhury B., Schmutge T., Chang A., Newton R., *Effect of surface roughness on the microwave emis-sion from soils*, *J. Geophysical Research*, 1979, Vol. 84, No. C9, pp. 5699–5706.
  14. Corana A., Marchesi M., Martini C., Ridella S., *Minimizing multimodal functions of continuous variables with the 'Simulated Annealing' algorithm* ACM, *Transactions on Mathematical Software*, 1987, Vol. 13, No. 3, pp. 262–280.
  15. Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P. E., Kellogg K. H., Allen A., Bindlish R., Brown M., Chan S., Collian-der A., Crow W. T., Das N., De Lannoy G., Dunbar R. S., Edelstein W. N., Entin J. K., Escobar V., Goodman Sh. D., Jackson Th. J., Jai B., Johnson J., Kim E., Kim S., Kimball J., Koster R. D., Leon A., McDonald K. C., Moghaddam M., Mohammed P., Moran S., Njoku E. G., Piepmeier J. R., Reichle R., Rogez F., Shi J. C., Spencer M. W., Thruman S. W., Tsang L., Van Zyl J., Weiss B., West R., *SMAP Handbook: Soil Moisture Active Passive, Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space*, Pasadena, CA, USA, California Institute of Technology, 2014, 192 p.
  16. Escorihuela M., Chanzy A., Wigneron J., Kerr Y., *Effective soil sampling depth of the L-band radiometry: A case study*, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 5, pp. 995–1001.
  17. Fletcher K., *Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services*, ESA SP-1322/1, 2012, 96 p.
  18. Fung A. K., *Microwave Scattering and Emissions Models and Their Applications*, Norwood: Artech House, MA, 1994, 592 p.
  19. Fung A. K., Dawson M. S., Chen K. S., Hsu A. Y., Engman E. T., O'Neill P. O., Wang J. A., *A modified IEM model for: scattering from soil surfaces with application to soil moisture sensing*, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, NE, USA, 1996, Vol. 2, pp. 1297–1299.
  20. Fung A. K., Boisvert J., Brisco B., *Interpretation of radar measurements from rough soil surface with a permittivity profile*, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Singapore, 1997, Vol. 3, pp. 1376–1378.
  21. Gao H., Zhang W., Chen H., *An Improved Algorithm for Discriminating Soil Freezing and Thawing Using AMSR-E and AMSR2 Soil Moisture Products*, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(1697), pp. 1–17.
  22. Gill P. E., Murray W., *Algorithms for Nonlinear Least-Squares Problem*, *SIAM J., Numerical Analysis*, 1978, Vol. 15, No. 5, pp. 977–992.
  23. Gorraab A., Zribi M., Baghdadi N., Lili-Chabaane Z., Mougenot B., *Multi-frequency analysis of soil mois-ture vertical heterogeneity effect on radar backscatter*, *Intern. Conf. Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Sousse, 2014, pp. 379–384.
  24. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M., *Tables of Integrals, Series, and Products*, 6<sup>th</sup> edition, San Diego, CA: Academic Press, 2000, 1163 p.

25. Hoeben R., Troch P. A., Assimilation of active microwave observation data for soil moisture profile estimation, *Water Resources Research*, 2000, Vol. 36, No. 10, pp. 2805–2819.
26. Khankhoje U. K., van Zyl J. J., Cwik A. A., Computation of Radar Scattering From Heterogeneous Rough Soil Using the Finite-Element Method, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 6, pp. 3461–3469.
27. Komarov S. A., Mironov V. L., Li S., SAR polarimetry for permafrost active layer freeze/thaw processes, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Toronto, Canada, 2002, Vol. 5, pp. 2654–2656.
28. Konings A. G., Entekhabi D., Moghaddam M., Saatchi S. S., The Effect of Variable Soil Moisture Profiles on the P-Band Backscatter, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 10, pp. 6315–6325.
29. Kutuza B., Davidkin A., Dzenkevich A., Kalinkevich A., Manakov V., Plushchev V., Shishkova O., Verba V., Vostrov E., Multi-frequency polarimetric aperture radar for surface and subsurface sensing, *Proc. EuRAD*, Horizon House Publications Ltd., 2004, pp. 5–12.
30. Kwon E. Y., Park S. E., Moon W. M., Lee K. K., AirSAR data: A case study in Jeju, Korea, *Geosciences J.*, 2002, Vol. 6, No. 4, pp. 331–339.
31. Liou Y. A., England A. W., A land surface process/radiobrightness model with coupled heat and moisture transport in soil, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1998, Vol. 36, No. 1, pp. 273–286.
32. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V., Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model Moist Soils, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 603–606.
33. Moghaddam M., Rahmat-Samii Y., Rodriguez E., Entekhabi D., Hoffman J. P., Moller D., Pierce L. E., Saatchi S. S., Thomson M., Microwave Observatory of Sub Canopy and Subsurface (MOSS): A Mission Concept for Global Deep Soil Moisture Observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 8, pp. 2630–2643.
34. Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F. T., An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, pp. 370–382.
35. Quegan S., Lomas M., Pathanassiou K. P., Kim J.-S., Tebaldini S., Giudici D., Scagliola M., Gucci P., Calibration Challenges for the Biomass P-Band SAR Instrument, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Valencia, 2018, pp. 8575–8578.
36. Sadeghi M., Tabatabaenejad A., Tuller M., Moghaddam M., Jones S. B., Advancing NASA's AirMOSS P-Band Radar Root Zone Soil Moisture Retrieval Algorithm via Incorporation of Richards' Equation, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9(1), pp. 1–17.
37. Schmugge T., Wilheit T., Webster Jr. W., Gloersen P., *Remote Sensing of Soil Moisture with Microwave Radiometers-II*, NASA technical note D-8321, 1976, 34 p.
38. *Status of the Global Observing System for Climate (GCOS-195)*, World Meteorological Organization, October 2015, 373 p.
39. Tabatabaenejad A., Burgin M., Duan X., Moghaddam M., P-Band Radar Retrieval of Subsurface Soil Moisture Profile as a Second Order Polynomial: First AirMOSS Results, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 2, pp. 645–658.
40. Tian S., Renzullo L. J., van Dijk A. I. J. M., Tregoning P., Walker J. P., Global joint assimilation of GRACE and SMOS for improved estimation of root-zone soil moisture and vegetation response, *Hydrology Earth System Sciences*, 2019, Vol. 23, pp. 1067–1081.
41. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K., *Microwave remote sensing. Active and Passive. Vol. 2: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, 1982, pp. 457–1064.
42. Walker J. P., Troch P. A., Mancini M., Willgoose G. R., Kalma J. D., Profile soil moisture estimation using the modified IEM, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Singapore, 1997, Vol. 3, pp. 1263–1265.
43. Wigneron J.-P., Jackson T. J., O'Neill P., Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 192, pp. 238–262.
44. Yashchenko A. S., Bobrov P. P., Impact of the Soil Moisture Distribution in the Top Layer on the Accuracy Moisture Retrieval by Microwave Radiometer Data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 9, pp. 5239–5246.