

Метод восстановления абсолютных квазимгновенных значений влажности и шероховатости почвы по данным Sentinel-1 без наземной калибровки

В. В. Калинин

Университет Иннополис

Предложен метод совместного восстановления абсолютных квазимгновенных значений объемной влажности и шероховатости открытой почвы по двухракурсным двухполяризационным наблюдениям Sentinel-1 без использования наземных данных для калибровки. Для каждой пары съемок независимо решается переопределенная система из четырех нелинейных уравнений: двух уравнений модели Дюбуа для УЭПР в поляризации VV и двух эмпирических уравнений, связывающих кросс-поляризационные УЭПР VH с среднеквадратической высотой неровностей. Метод проверен на полигоне, включающим гидрометеорологическую станцию Айвадж (AYVA) в Хатлонской области Таджикистана. Данные Sentinel-1 для полигона доступны с восходящей относительной орбиты R144 и нисходящей R151 с углами падения 44,40° и 38,43°. Съемки образуют 197 квазисинхронных пар с интервалом около 12 ч за период 2017–2023 гг. Средние восстановленные значения шероховатости и относительной диэлектрической проницаемости составили 1,67 см и 5,94 соответственно. После преобразования по полиному Топпа средняя объемная влажность составила 0,100 м³/м³. Независимое сравнение с измерениями на станции AYVA на глубине 10 см дало коэффициент корреляции 0,516, среднеквадратическую ошибку 0,0466 м³/м³ и среднее смещение +0,0182 м³/м³.

Влажность почвы; шероховатость поверхности; Sentinel-1; радиолокация; УЭПР; модель Дюбуа; кросс-поляризация; диэлектрическая проницаемость.

ВВЕДЕНИЕ

Влажность верхнего слоя почвы определяет интенсивность инфильтрации, испарения и поверхностного стока, влияет на водообеспеченность растений и используется в гидрологических, метеорологических и агрометеорологических моделях. Радиолокационное дистанционное зондирование из космоса особенно привлекательно для ее оценки, поскольку активные микроволновые измерения доступны независимо от облачности и естественного освещения, а коэффициент обратного рассеяния открытой почвы чувствителен к ее диэлектрическим свойствам.

Основная трудность радиолокационной инверсии состоит в том, что удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) определяется одновременно влажностью, шероховатостью, геометрией наблюдения и состоянием поверхности. В широко используемой полуэмпирической модели Дюбуа влажность входит через относительную диэлектрическую проницаемость, а шероховатость — через среднеквадратическую высоту неровностей [Dub95]. При использовании радиолокационных измерений только с одного ракурса эти параметры оказываются сильно связанными, поэтому абсолютная влажность обычно восстанавливается после задания известного значения шероховатости или калибровки по наземным измерениям.

Калинников В. В. Метод восстановления абсолютных квазимгновенных значений влажности и шероховатости почвы по данным Sentinel-1 без наземной калибровки // СИИТ. 2026. Т. 8, № 4(28). С. 121–128. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no4-p121](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no4-p121). EDN: NXMIRH.

Kalinnikov V. V. "Method for retrieving absolute quasi-instantaneous soil moisture and roughness from Sentinel-1 data without ground calibration" // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 4(28), pp. 121–128. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no4-p121](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no4-p121). EDN: NXMIRH. (In Russian).

В работе Mirsoleimani et al. [Mir19] для открытой почвы использовались модель интегрального уравнения (Integral Equation Model, IEM), описывающая радиолокационное рассеяние шероховатой поверхности, и полуэмпирическая модель Дюбуа. Параметры IEM предварительно калибровались по экспериментальным данным. Для этого влажность и шероховатость измерялись на 58 площадках в даты пролетов спутников Sentinel-1, а наземные данные входили в процедуру построения и проверки алгоритмов. В работе Singh et al. [Sin20] применялась модифицированная модель Дюбуа для восстановления влажности по данным Sentinel-1. Полученные спутниковые оценки дополнительно корректировались по результатам наземных измерений влажности почвы методом рефлектометрии во временной области (Time Domain Reflectometry, TDR), что позволяло устранить систематическое различие между рассчитанной и фактически измеренной влажностью. В работе Ma et al. [Ma21] для оценки шероховатости поверхности использовались значения УЭПР, измеренные Sentinel-1 в кросс-поляризации VH, а также отношение УЭПР в кросс- и ко-поляризациях VH и VV. Связь этих радиолокационных характеристик со среднеквадратической высотой неровностей поверхности задавалась эмпирическими зависимостями, коэффициенты которых были получены ранее Srivastava, et al. [Sri08]. Полученная таким образом оценка шероховатости использовалась при восстановлении влажности почвы с помощью модифицированной модели Дюбуа.

Другой путь к разделению влажности и шероховатости связан с увеличением числа независимых радиолокационных наблюдений. Srivastava et al. [Sri03] показали возможность учета шероховатости по данным спутника RADARSAT-1, полученным при разных углах падения. Oh [Oh04] продемонстрировал одновременное восстановление влажности и шероховатости из многополяризационных наблюдений, однако использовал набор поляризаций, недоступный в стандартной конфигурации Sentinel-1 VV+VH. В наиболее близком современном подходе Fan et al. [Fan25] предложен алгоритм одновременного восстановления влажности и шероховатости почвы по измерениям УЭПР Sentinel-1 в поляризациях VV и VH. Однако алгоритм не является полностью автономным относительно внешних данных: для определения его параметров и оценки долговременного уровня шероховатости используются данные спутника Soil Moisture Active Passive (SMAP), предоставляющей независимые оценки влажности почвы по микроволновым наблюдениям.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная проверка метода восстановления абсолютных квазимгновенных значений влажности и шероховатости открытой почвы по данным Sentinel-1, в котором неоднозначность инверсии снимается совместным использованием двух ракурсов и двух поляризаций, а наземные измерения не применяются для калибровки. В отличие от параметризации длинного временного ряда, значения шероховатости и диэлектрической проницаемости определяются независимо для каждой квазисинхронной разноракурсной пары съемок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Для каждого момента съемки внутри выбранного полигона вычисляются средние значения измеренных УЭПР σ_{VV}^0 и σ_{VH}^0 в линейной мере. Таким образом, для каждой квазисинхронной пары разноракурсных съемок полигона используются четыре измеренных значения УЭПР: по два значения в поляризациях VV и VH. УЭПР в поляризации VV описывается полуэмпирической моделью Дюбуа, связывающей обратное рассеяние с диэлектрической проницаемостью и шероховатостью открытой поверхности. Для УЭПР в поляризации VH используется эмпирическая зависимость от среднеквадратической высоты неровностей поверхности, предложенная Srivastava et al. [Sri08]. Соответственно, для двух ракурсов совместная нелинейная система уравнений измерений записывается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{VV,1}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3 \varphi_1}{\sin^3 \varphi_2} (k s \sin \varphi_1)^{1.1} \cdot \lambda^{0.7} \cdot 10^{0.046 \cdot \varepsilon \cdot \tan \varphi_1}, \\ \sigma_{VV,2}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3 \varphi_2}{\sin^3 \varphi_1} (k s \sin \varphi_2)^{1.1} \cdot \lambda^{0.7} \cdot 10^{0.046 \cdot \varepsilon \cdot \tan \varphi_2}, \\ \sigma_{VH,1}^0 = 10^{\frac{s-4.71}{1.4}}, \\ \sigma_{VH,2}^0 = 10^{\frac{s-4.71}{1.4}}. \end{array} \right.$$

где φ_1 и φ_2 — углы падения двух ракурсов, отсчитываемые от локальной нормали к поверхности; λ — длина волны; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, $\lambda = 5,55$ см; s — среднеквадратическая высота неровностей, см; ε — действительная часть относительной диэлектрической проницаемости.

Первые два уравнения описывают УЭПР в кополяризации VV по модели Дюбуа и содержат обе неизвестные величины s и ε . Два последних уравнения используют кросс-поляризацию VH, чувствительную к шероховатости поверхности. Таким образом, для каждой пары съемок имеются четыре наблюдения при двух неизвестных s и ε . Система переопределена и может быть решена нелинейным методом наименьших квадратов. В нашем исследовании остаточные разности четырех уравнений нормировались на робастные оценки характерного разброса соответствующих рядов, чтобы различия абсолютного масштаба УЭПР в VV и VH поляризациях не задавали искусственно вес отдельных уравнений. Ограничения при оптимизации составляли $0,05 < s < 10$ см и $-20 < \varepsilon < 80$, но фактические решения находились далеко от верхних границ.

В идеальном случае необходимо составлять приведенную систему уравнений для синхронных измерений на двух ракурсах. Однако строго синхронные разноракурсные измерения отсутствуют в данных Sentinel-1. Фактическое окно наблюдений между ракурсами составляет около 12 ч. В связи с этим был введен термин «квазимгновенная оценка», означающий, что восстановленные параметры характеризуют состояние поверхности в пределах этого временного окна, но без временной регуляризации, сглаживания, сезонной модели или предположения о постоянстве шероховатости между последовательными эпохами.

Объемная влажность почвы m_v может быть вычислена из полученной диэлектрической проницаемости ε по полиному Топпа [Top80]:

$$m_v = -0.053 + 0.0292 \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3.$$

Для экспериментальной отработки предложенного метода был выбран полигон площадью около 0,6 га, включающий в себя территорию гидрометеорологической станции Айвадж (AYVA) в Хатлонской области Таджикистана. Полигон находится на окраине одноименного села. Координаты станции составляют $36,97912^\circ$ с. ш. и $68,02351^\circ$ в. д., абсолютная высота — около 318 м. Полигон представляет собой преимущественно открытую песчаную поверхность с редкой низкой пустынной растительностью. В описании станции Айвадж почва характеризуется как преимущественно песчаная (суглинистый песок); отмечается присутствие мелкого песка, илстой фракции и аллювиального гравия. Уровень грунтовых вод составляет около 8 м [AYVA20]. Слабое развитие растительного покрова и преобладание открытой песчаной поверхности делают выбранный полигон удобным для экспериментальной проверки предлагаемого метода.

Для территории полигона были отобраны геокодированные продукты Sentinel-1 в поляризациях VV и VH, полученные с восходящей относительной орбиты R144 и нисходящей относительной орбиты R151. Углы падения для ракурсов орбит R144 и R151 составляли соответственно $44,40^\circ$ и $38,43^\circ$.

Для каждого момента съемки внутри выбранного однородного полигона вычислялись средние значения УЭПР в линейной мере. Сцены двух орбит сопоставлялись по критерию

ближайшего времени без интерполяции. За период с 26 февраля 2017 г. по 28 декабря 2023 г. сформировано 197 пар; средний интервал между проходами составил 12,010 ч, стандартное отклонение интервала — менее 0,001 ч. Более ранние данные Sentinel-1 имеются, но для выбранных R151 и R144 не образуют устойчивой последовательности 12-часовых пар.

Для независимой валидации использованы данные станции AYVA, входящей в сеть ROMPS проекта Water in Central Asia (CAWa). Сеть создавалась Центром геонаук имени Гельмгольца GFZ (Потсдам, Германия) совместно с Централно-Азиатским институтом прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ, Бишкек, Кыргызская Республика) и национальными гидрометеорологическими службами стран Центральной Азии [Zec21]. В период с июня 2012 г. по январь 2023 г. на станции AYVA измерялась влажность почвы датчиками Campbell Scientific CS616 на глубинах 10, 20, 40, 60, 80 и 100 см [AYVA20]. В настоящей работе для независимой валидации использованы измерения на глубине 10 см. Набор распространяется GFZ Data Services [Zec20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Совместное решение четырех уравнений для 197 квазисинхронных пар позволило получить временной ряд среднеквадратической высоты неровностей s (рис. 1). Среднее значение s составило 1,666 см, медиана 1,639 см, стандартное отклонение временного ряда 0,178 см; диапазон оценок — от 1,18 до 2,23 см. На рис. 1 заметна выраженная сезонная составляющая. Это показывает, что предложенный метод позволяет восстанавливать не только среднее значение шероховатости за весь период наблюдений, но и ее значение для каждой отдельной квазисинхронной пары съемок.

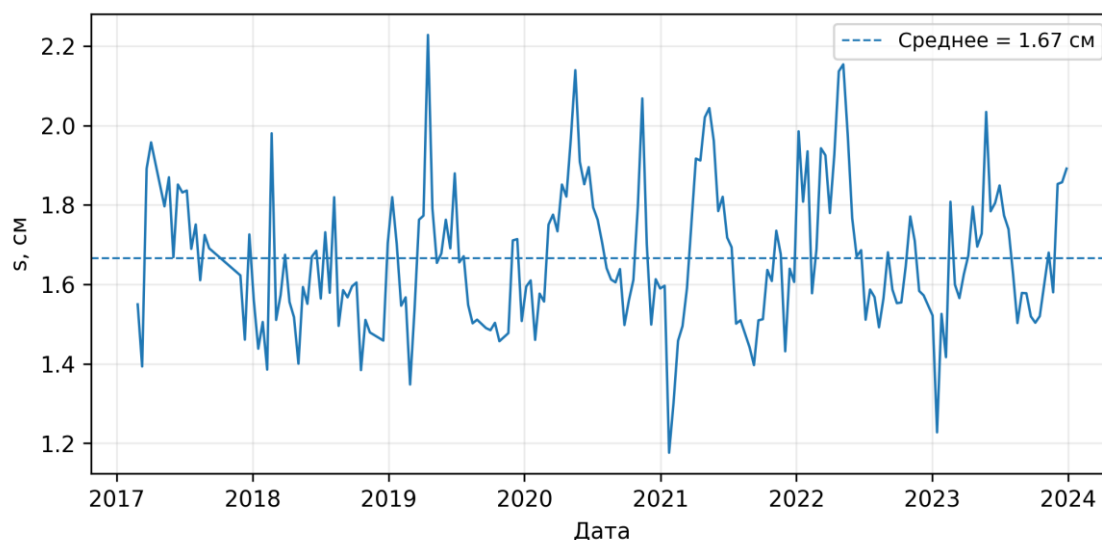


Рис. 1 Временной ряд шероховатости поверхности

Для относительной диэлектрической проницаемости получено среднее значение 5,94, медиана 5,53 и стандартное отклонение 2,24. Все 197 решений дали $\varepsilon > 1$; наблюдаемый диапазон составил 1,57–12,57. Временной ряд (рис. 2) демонстрирует как сезонную, так и межгодовую изменчивость.

Характерные среднеквадратические отклонения остаточных разностей УЭПР в линейной мере составили 0,0109 и 0,00481 для поляризации VV и 0,00148 и 0,000640 для поляризации VH на орбитах R151 и R144 соответственно. В децибелах соответствующие значения составили 0,82 и 0,48 дБ для VV и 0,81 и 0,39 дБ для VH.

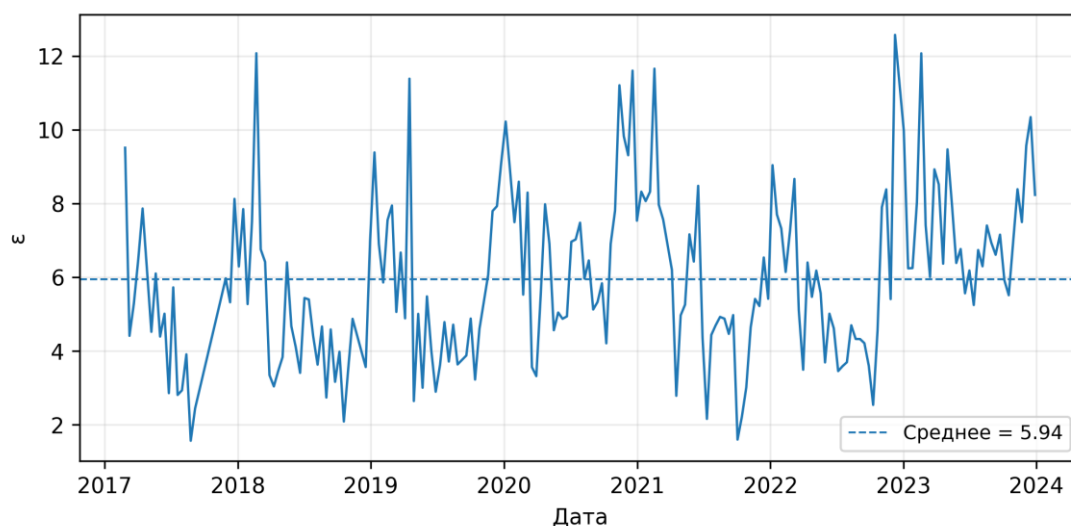


Рис. 2 Временной ряд относительной диэлектрической проницаемости почвы

Формальные стандартные ошибки параметров, рассчитанные по локальной матрице Якоби переопределенной системы, в среднем составили 0,073 см для s и 1,40 для ϵ ; медианные значения — 0,069 см и 1,27 соответственно. Эти оценки характеризуют внутреннюю согласованность четырех уравнений, но не включают систематическую ошибку самих моделей Дюбуа и Srivastava.

После преобразования ϵ в объемную влажность почвы (рис. 3) ее среднее значение составило 0,0996 м³/м³, медиана 0,0923 м³/м³, стандартное отклонение 0,0506 м³/м³. Для независимого сопоставления с натурными измерениями на станции AYVA доступны 112 квазисинхронных спутниковых эпох. Коэффициент корреляции Пирсона между спутниковой оценкой и влажностью на глубине 10 см равен 0,516. Среднеквадратическая ошибка составляет 0,0466 м³/м³, среднее смещение спутникового ряда относительно AYVA +0,0182 м³/м³.

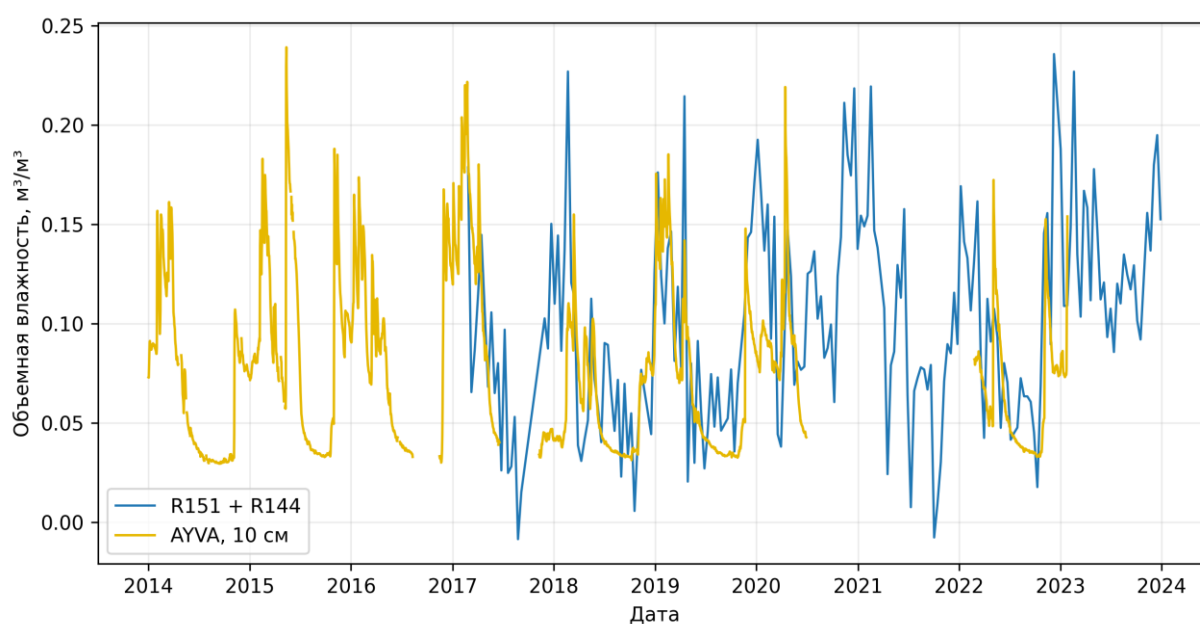


Рис. 3 Сравнение восстановленной объемной влажности с измерениями на станции AYVA на глубине 10 см

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученный результат принципиально отличается от одноракурсной инверсии. При одном угле падения изменение σ_{VV}^0 может быть объяснено различными сочетаниями s и ε , поэтому абсолютное решение требует дополнительной информации. В предлагаемом методе эта информация поступает из двух источников: различия углов падения в уравнениях Дюбуа и чувствительности кросс-поляризованного сигнала к шероховатости. В результате каждая 12-часовая пара дает отдельное решение, а временная гладкость параметров не используется как ограничение.

Среднее $s \approx 1,67$ см хорошо согласуется с независимыми оценками, которые получались непосредственно из УЭПР на поляризации VH для отдельных орбит, однако совместное решение дополнительно использует поляризацию VV и второй ракурс.

Корреляция 0,516 с натурными измерениями на станции AYVA является умеренной, но при оценке результата следует учитывать не только величину корреляции, но и физически реалистичный абсолютный уровень восстановленной влажности, воспроизведение ее сезонной изменчивости, сравнительно небольшое среднее смещение $+0,0182 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и отсутствие наземной калибровки. Для сравнения, современные методы Sentinel-1 нередко используют внешние данные или эмпирическую коррекцию абсолютного уровня [Mir19, Sin20, Fan25]. Поэтому независимая валидация здесь проверяет именно переносимость физико-эмпирической системы, а не качество подгонки к конкретной наземной станции.

Расхождения со станцией имеют несколько ожидаемых причин. Во-первых, С-диапазон зондирования спутника Sentinel-1 с длиной волны около 5,5 см наиболее чувствителен к верхним сантиметрам почвы, тогда как опорный датчик расположен на глубине 10 см. После осадков и при высыхании вертикальный профиль влажности может быстро изменяться, создавая временную задержку между поверхностным радиолокационным откликом и датчиком. Во-вторых, два ракурса разделены примерно 12 ч; сильный дождь, испарение или суточный ход температуры в этом интервале нарушают предположение о едином состоянии поверхности. В-третьих, поскольку зависимость УЭПР в поляризации VH от шероховатости, предложенная Srivastava et al. [Sri08], была получена для других почв и условий наблюдения, переносимость этой зависимости на полигон станции AYVA является одним из источников неопределенности восстановленных значений s .

Проведенный обзор не выявил работы, в которой именно сочетание двух ракурсов Sentinel-1 VV+VH использовалось бы для независимого по эпохам совместного восстановления абсолютных s и m , без внешней влажности и без временной регуляризации. Однако одновременное восстановление этих параметров как класс задач известно [Oh04], разноракурсные методы известны для RADARSAT-1 [Sri03], а восстановление влажности по двум поляризациям реализовано на данных Sentinel-1 с внешней параметризацией [Fan25]. Поэтому научная новизна предлагаемого метода заключается в квазисинхронной двухракурсной двухполяризационной постановке обратной задачи, позволяющей независимо для каждой пары наблюдений восстанавливать абсолютные значения влажности и шероховатости почвы без использования наземной калибровки и временной регуляризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод восстановления абсолютных квазимгновенных значений влажности и шероховатости открытой почвы по данным Sentinel-1 без использования наземной калибровки. Для каждой квазисинхронной разноракурсной пары наблюдений независимо решается система из двух уравнений Дюбуа для VV и двух уравнений связи VH с шероховатостью. Тем самым абсолютные значения шероховатости и действительной части диэлектрической проницаемости почвы определяются без предположения об их постоянстве или плавном изменении во времени.

Для орбит R151 и R144 с углами падения $38,43^\circ$ и $44,40^\circ$ сформировано 197 пар за период 2017–2023 гг. с интервалом около 12 ч. Средние оценки составили 1,67 см и 5,94 для шероховатости и диэлектрической проницаемости; после преобразования Топпа средняя влажность почвы получена равной $0,100 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Независимая валидация по натурным измерениям на станции АУВА дала коэффициент корреляции Пирсона 0,516, среднеквадратическую ошибку $0,0466 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и смещение $+0,0182 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Основные ограничения связаны с 12-часовой несинхронностью ракурсов, различием глубины радиолокационного зондирования и датчика на станции АУВА, а также переносимостью эмпирических моделей на другие типы почв. Полученные результаты показывают перспективность дальнейшей проверки метода на других открытых почвах и при наличии независимых измерений поверхностной шероховатости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [AYVA20] Zech C. Station Exposure Description: Ayvadh / AYVA. GFZ Potsdam, updated 29.05.2020. Documentation for the CAWA ROMPS data set.
- [Dub95] Dubois P. C., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995. Vol. 33, No. 4. P. 915–926. DOI: [10.1109/36.406677](https://doi.org/10.1109/36.406677).
- [Fan25] Fan D. et al. A Sentinel-1 SAR-based global 1-km resolution soil moisture data product: Algorithm and preliminary assessment // Remote Sensing of Environment. 2025. Vol. 318. 114579. DOI: [10.1016/j.rse.2024.114579](https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114579). EDN: HNFOJE.
- [Ma21] Ma C. et al. Retrieving the Soil Moisture in Bare Farmland Areas Using a Modified Dubois Model // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 9. 735958. DOI: [10.3389/feart.2021.735958](https://doi.org/10.3389/feart.2021.735958). EDN: MVGURF.
- [Mir19] Mirsoleimani H., Sahebi M., et al. Bare Soil Surface Moisture Retrieval from Sentinel-1 SAR Data Based on the Calibrated IEM and Dubois Models Using Neural Networks // Sensors. 2019. 19. 3209. DOI: [10.3390/s19143209](https://doi.org/10.3390/s19143209).
- [Oh04] Oh Y. Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42, No. 3. P. 596–601. DOI: [10.1109/TGRS.2003.821065](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.821065).
- [Sin20] Singh A., Gaurav K., Meena G. K., Kumar S. Estimation of Soil Moisture Applying Modified Dubois Model to Sentinel-1; A Regional Study from Central India // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. 2266. DOI: [10.3390/rs12142266](https://doi.org/10.3390/rs12142266). EDN: XIAOJB.
- [Sri03] Srivastava H. S., Patel P., Manchanda M. L., Adiga S. Use of multi-incidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41, No. 7. P. 1638–1640. DOI: [10.1109/TGRS.2003.813356](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813356).
- [Sri08] Srivastava H. S., Patel P., Sharma Y., Navalgund R. R. Retrieval of surface roughness using multi-polarized Envisat-1 ASAR data // Geocarto International. 2008. Vol. 23, No. 1. P. 67–77. DOI: [10.1080/10106040701538157](https://doi.org/10.1080/10106040701538157).
- [Top80] Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // Water Resources Research. 1980. Vol. 16, No. 3. P. 574–582. DOI: [10.1029/WR016i003p00574](https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574).
- [Zec20] Zech C. et al. Hydrometeorological data from ROMPS network in Central Asia. Version 1.0. GFZ Data Services, 2020. DOI: [10.5880/GFZ.1.2.2020.002](https://doi.org/10.5880/GFZ.1.2.2020.002).
- [Zec21] Zech C. et al. Hydrometeorological data from a Remotely Operated Multi-Parameter Station network in Central Asia // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. P. 1289–1306. DOI: [10.5194/essd-13-1289-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-1289-2021). EDN: KAPBHF.

ОБ АВТОРЕ | ABOUT THE AUTHOR

КАЛИННИКОВ Владислав Валерьевич

Университет Иннополис, Россия.

v.kalinnikov@innopolis.ru ORCID: [0000-0001-6382-2309](https://orcid.org/0000-0001-6382-2309).

Руководитель направления геонаучного консалтинга. Канд. физ.-мат. наук по физике атмосферы и гидросферы.

KALINNIKOV Vladislav Valerievich

Innopolis University, Russia.

v.kalinnikov@innopolis.ru ORCID: [0000-0001-6382-2309](https://orcid.org/0000-0001-6382-2309).

Head of Geoscientific Consulting. Cand. of Physics and Mathematics in the physics of the atmosphere and hydrosphere.

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Метод восстановления абсолютных квазимгновенных значений влажности и шероховатости почвы по данным Sentinel-1 без наземной калибровки.

Авторы: Калинников В. В.

Аннотация: Предложен метод совместного восстановления абсолютных квазимгновенных значений объемной влажности и шероховатости открытой почвы по двухракурсным двухполяризационным наблюдениям Sentinel-1 без использования наземных данных для калибровки. Для каждой пары

Title: Method for retrieving absolute quasi-instantaneous soil moisture and roughness from Sentinel-1 data without ground calibration.

Authors: Kalinnikov V. V.

Abstract: A method is proposed for joint retrieval of absolute quasi-instantaneous volumetric soil moisture and effective surface roughness from dual-angle, dual-polarization Sentinel-1 observations without using ground measurements for calibration.

съемок независимо решается переопределенная система из четырех нелинейных уравнений: двух уравнений модели Дюбуа для УЭПР в поляризации VV и двух эмпирических уравнений, связывающих кросс-поляризационные УЭПР VH с среднеквадратической высотой неровностей. Метод проверен на полигоне, включающим гидрометеорологическую станцию Айвадж (AYVA) в Хатлонской области Таджикистана. Данные Sentinel-1 для полигона доступны с восходящей относительной орбиты R144 и нисходящей R151 с углами падения 44,40° и 38,43°. Съемки образуют 197 квазисинхронных пар с интервалом около 12 ч за период 2017–2023 гг. Средние восстановленные значения шероховатости и относительной диэлектрической проницаемости составили 1,67 см и 5,94 соответственно. После преобразования по полиному Топпа средняя объемная влажность составила 0,100 м³/м³. Независимое сравнение с измерениями на станции AYVA на глубине 10 см дало коэффициент корреляции 0,516, среднеквадратическую ошибку 0,0466 м³/м³ и среднее смещение + 0,0182 м³/м³.

Ключевые слова: Влажность почвы; шероховатость поверхности; Sentinel-1; радиолокация; УЭПР; модель Дюбуа; кросс-поляризация; диэлектрическая проницаемость.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 24 августа 2026 г.

For each acquisition pair, an overdetermined system of four non-linear equations is solved independently: two Dubois equations for VV backscatter and two empirical equations relating VH cross-polarized backscatter to rms surface height. The method was tested using relative orbits R151 and R144 with incidence angles of 38.43° and 44.40°. A total of 197 quasi-synchronous pairs separated by about 12 h were formed for 2017–2023. The mean retrieved roughness and relative dielectric permittivity were 1.67 cm and 5.94. After Topp conversion, mean volumetric soil moisture was 0.100 m³/m³. Independent validation against 10 cm AYVA measurements yielded $r = 0.516$, $RMSE = 0.0466$ m³/m³, and $bias = +0.0182$ m³/m³.

Key words: Soil moisture; surface roughness; Sentinel-1; SAR; backscatter; Dubois model; cross-polarization; dielectric permittivity.

Language: Russian.

The article was received by the editors on 24 August 2026.