

Дистанционная оценка влагозапаса почвы в метровом слое по данным спутника SMOS

А. Н. Романов, И. В. Хвостов, И. В. Рябинин, Д. А. Романов

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия
E-mail: romanov_alt@mail.ru*

Исследована возможность дистанционного определения влагозапаса почвы в метровом слое на основе яркостной температуры подстилающей поверхности, измеренной со спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture Ocean Salinity) на длине волны 21 см. Для этой цели предложен новый подход, основанный на использовании экспериментально установленных зависимостей между влагосодержанием в соседних слоях почвы, начиная с поверхности и до глубины 1 м. Исследования проводились на территории Кулундинской степи (Алтайский край). В полевом эксперименте определялась на тестовых участках объёмная влажность (W) и влагозапас почвы (h) на разных глубинах от поверхности до глубины 1 м. По данным спутника SMOS (продукт L1c) и полевых измерений W и h установлена зависимость яркостной температуры на горизонтальной поляризации от влагозапаса почвы в поверхностном слое 0–5 см. Полученные зависимости использовались для расчёта суммарного влагозапаса в метровом слое почвы H_{0-100} . Из комплексного анализа спутниковых данных, полевых и лабораторных измерений получено удовлетворительное соответствие между значениями H_{0-100} , определёнными контактным (термостатно-весовым) и дистанционным (радиофизическим) способом.

Ключевые слова: влажность почвы, яркостная температура, коэффициент излучения, показатели преломления и поглощения, микроволновый диапазон, спутник SMOS

Одобрена к печати: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-209-222

Введение

Важнейшими физическими характеристиками почвы, от которых зависит урожайность выращиваемых сельскохозяйственных культур, являются объёмная влажность (W) (в $\text{см}^3/\text{см}^3$) в корнеобитаемом слое почвы и влагозапас в метровом слое почвы H_{0-100} (в мм), представляющий собой объёмное содержание воды в указанном слое, выраженное в миллиметрах. При больших площадях сельскохозяйственных полей становится актуальным определение W и H_{0-100} не в отдельных точках контактным способом, а на значительной территории с использованием методов дистанционного микроволнового зондирования. Точное прогнозирование W имеет решающее значение для понимания гидрологических процессов.

Данные дистанционного микроволнового зондирования несут информацию о W в скин-слое (L_λ), зависящую от плотности, засоленности, температуры, гранулометрического состава почвы, а также от длины волны (λ) принимаемого радиометром микроволнового излучения. Согласно результатам экспериментальных исследований и теоретических расчётов, проведённых разными авторами (например (Шарков, 2014; Шутко, 1986)), а также из анализа диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв, приведённых в данной статье, следует, что в дециметровом диапазоне L_λ увлажнённой почвы составляет несколько сантиметров, а для абсолютно сухой почвы не превышает 2λ . В то же время для планирования мелиоративных мероприятий, прогнозирования будущих урожаев, а также оценки вероятности почвенных засух требуется информация о запасах воды в метровом слое почвы. Таким образом, возникает несоответствие между возможностями дистанционного зондирования и потребностями аграрного сектора.

Дистанционное определение W , основанное на кардинальном различии в микроволновом диапазоне диэлектрических характеристик сухой почвы и воды, было одной из первых задач, решавшихся с использованием методов дистанционного аэрокосмического зондирования (Башаринов и др., 1968, 1974; Njoku, Kong, 1977; Schmugge et al., 1974). Для повышения

точности дистанционного определения W было предложено учитывать фазовый состав почвенной влаги, выделив прочносвязанную и рыхлосвязанную воду, объёмные доли и диэлектрические свойства которых зависят от гранулометрического состава почвы (Schmugge, 1980). На этой основе были разработаны более точные методы дистанционного определения W , учитывающие объёмную долю связанной воды в почве (Зотова, Геллер, 1982; Комаров и др., 1994а; Никифоров и др., 1983; Реутов, Шутко, 1987).

В статье (Boyarskii et al., 2002) была предложена модель комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ) связанной воды, позволяющая учесть различие ϵ связанной и свободной воды во влажной почве. В работе (Romanov, 2004) было исследовано на частоте 1,11 ГГц влияние макроагрегатного состава на ϵ почвы и высказано предположение, что с увеличением размера макроагрегатов (при слипании почвенных частиц) увеличивается доля связанной воды в результате образования в макроагрегатах тонких пор. К факторам, затрудняющим дистанционную оценку W , относятся неучтённое влияние гумусовых веществ (Беляева и др., 2003; Романов, 2006) и минеральных солей (Komarov et al., 2002), а также экранирование микроволнового излучения почвы растительным покровом (Kirdiashev et al., 1979).

Точность дистанционного определения W и H_{0-100} зависит от точности задания профилей объёмной влажности $W(z)$ и $\epsilon(z)$ почвы в слое z , учитывающих гранулометрический и макроагрегатный состав, а также содержание минеральных солей и гумуса. Подробный анализ возможных профилей $W(z)$ и $\epsilon(z)$ приведён в работе (Шутко, 1986). Для восстановления градиента W измерения проводят на нескольких длинах волн в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Соответственно, определённые значения W относятся к разным L_λ . Разработаны методы оценки W по данным многочастотных измерений и восстановления W до капиллярной каймы, образующейся над уровнем грунтовых вод (Комаров и др., 1993, 1994б; Реутов, Шутко, 1991). Зависимость капиллярного поднятия над уровнем грунтовых вод приведена в работе (Голованов, Паласиос, 1968).

Для дистанционного определения W в поверхностном слое большей толщины, чем $L_\lambda = 21$ см, предложено использовать радиометры с λ , равной 40 см (Ye et al., 2021). Дистанционное зондирование на длине волны 21 см позволяет определять W почвы в поверхностном слое L_λ толщиной 2–5 см. При зондировании на длине волны 40 см ожидается увеличение L_λ до 10 см. Диапазон радиочастот P (англ. previous, частота <300 МГц, длина волны >1 м) имеет более высокую точность определения W из-за его меньшей чувствительности к содержанию воды в растительности и шероховатости поверхности. В работе (Pal, Maity, 2021) разработана модель профиля влажности почвы SSMP (англ. Statistical Soil Moisture Profile model), основанная на использовании данных дистанционного зондирования и гидрофизических характеристик грунтов в слое 100 см. Величину W в корневой зоне рассчитывают на основе данных спутника SMOS (англ. Soil Moisture Ocean Salinity) и выявленных месячных аномалий W (Bitar et al., 2021).

Для повышения точности дистанционной оценки W , зависимости яркостной температуры ($T_{\text{я}}$) от W , основанные на закономерностях микроволнового излучения почв, дополняются моделями машинного обучения (John et al., 2024; Li et al., 2024), в том числе моделью случайного леса RF (англ. Random Forest), свёрточной нейронной сетью CNN (англ. Convolutional Neural Network). В публикации (Wang C. et al., 2024) приведён анализ результатов дистанционного определения W с использованием данных спутника SMAP (англ. Soil Moisture Active Passive) (длина волны 21 см), AMSR-2 (англ. Advanced Microwave Scanning Radiometer — усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр) (длина волны 0,8–4,0 см) и наземных измерений W . Результаты показывают, что продукт SMAP имеет более низкую среднеквадратическую погрешность, чем AMSR-2, и обеспечивает более точные значения W в аграрных районах.

Использование данных SMAP, модели Палмера и нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) позволяет уменьшить погрешность оценки W (Mladenova et al., 2019). Данные SMAP, SMOS, AMSR2, FY-3C (Feng-Yun 3C) дополняются данными реанализа (Wang P. et al., 2024). В (Luo et al., 2024) предложена методика прогнозирования W с использованием Глобальной навигационной спутниковой

системы (англ. Global Navigation Satellite System — GNSS) и модели движения воды в ненасыщенной почве. Предложенная методика использует данные о W , полученные в результате инверсии сигнала GNSS, физические параметры почвы и воды. Используя модель прогнозирования влажности почвы, этот подход обеспечивает прогноз W в слое 1 м в режиме реального времени.

Цель данной работы — оценка возможности определения влагозапаса почвы в метровом слое на основе данных микроволнового зондирования и установленных связей между влагосодержанием в разных слоях почвы, начиная с поверхности и до глубины 1 м. Исследуется случай глубокого залегания грунтовых вод, когда капиллярная кайма не попадает в L_λ .

Методика исследований

Экспериментальные исследования проводили на тестовых участках Кулундинской степи (Алтайский край), представляющей собой плоскую равнину. По данным спектрорадиометра MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), сельскохозяйственные площади в пикселе SMOS составляют 96,3 %, луга — 3,6 %, озёра и водные источники — менее 0,1 %. На основе полевого обследования, проведённого авторами статьи, установлено, что почвы тестовых участков в основном легкосуглинистые и среднесуглинистые. В поверхностном слое 0–5 см плотность влажной ($\rho_{\text{вл}}$), сухой ($\rho_{\text{сух}}$) почвы, W и температура (t) в период измерений изменялись в пределах: 1,06–1,25 г/см³ ($\rho_{\text{вл}}$); 1,05–1,12 г/см³ ($\rho_{\text{сух}}$); 0,05–0,28 см³/см³ (W); 18–63 °С (t). Влажность устойчивого завядания ($W_{\text{уз}}$), характеризующая максимальную долю недоступной для растений влаги, варьировала на разных тестовых участках и на разной глубине в диапазоне 0,08–0,11. Согласно работе (Комаров и др., 1997), $W_{\text{уз}} = 0,93W_t$ (W_t — максимальная объёмная доля связанной воды в почве). Соответственно, W_t имеет значение в пределах 0,09–0,12 см³/см³. Участки отбора образцов почв приведены на рис. 1.

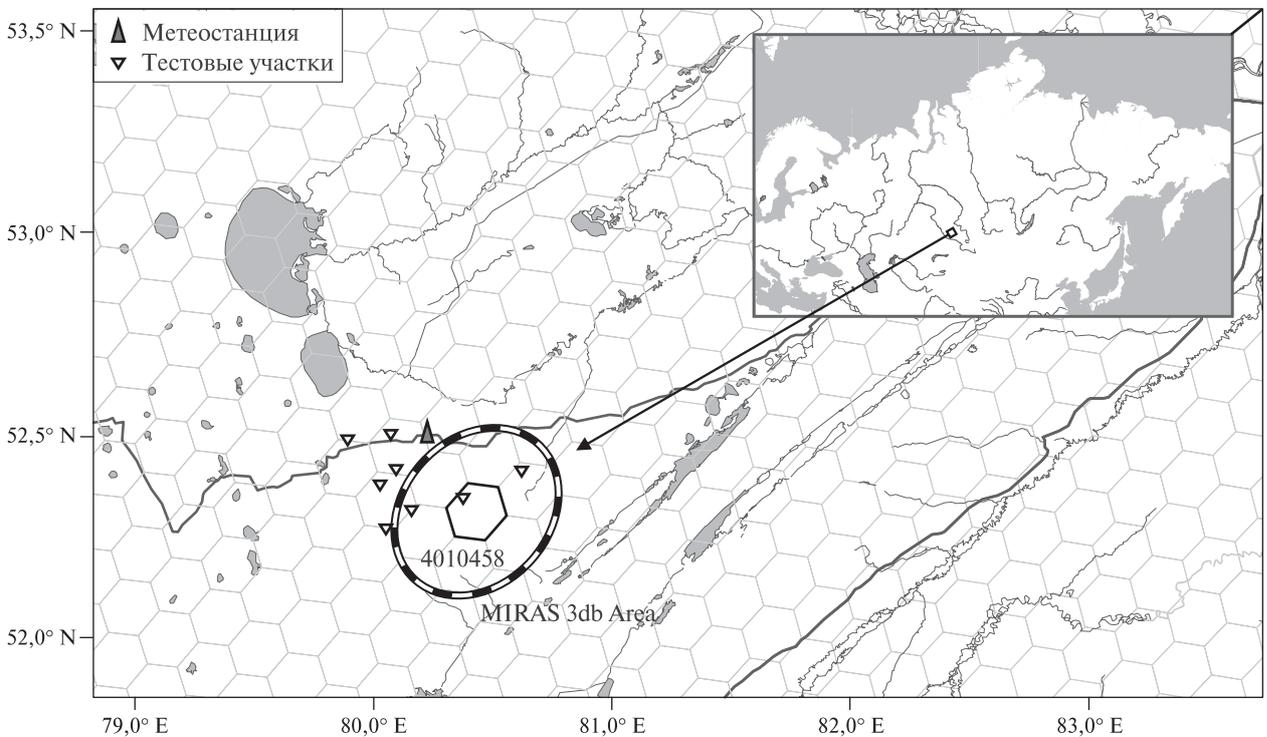


Рис. 1. Карта-схема тестовых участков: 4010458 — геодезическая ячейка DGG ISEA 4N9; чёрно-белый контур — зона, формирующая регистрируемое MIRAS (англ. Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) излучение; треугольники — места отбора образцов почв

Спутниковые данные

Использовались данные спутника SMOS, основная миссия которого состоит в глобальном наблюдении за двумя климатическими параметрами: влажностью почвы и солёностью океанических и морских вод. Однако данные SMOS используются также для мониторинга влагосодержания растительности, наблюдения за снежным покровом, состоянием ледового покрова на водоёмах суши, морях (Тихонов и др., 2022, 2023).

Основным рабочим инструментом спутника SMOS является 2-D-интерференционный радиометр MIRAS, имеющий в составе антенну с 69 пассивными приёмниками L-диапазона, регистрирующими восходящее от поверхности Земли микроволновое излучение на частоте 1400–1427 МГц (Kerr et al., 2012).

С высоты орбиты в диаграмму направленности приёмников попадают участки поверхности Земли размером до 3000 км. С учётом принципов интерферометрии и благодаря Y-образной конфигурации размещения приёмников зона обзора радиометра ограничивается областью около 900 км в поперечнике. В результате движения спутника по орбите каждая конкретная точка земной поверхности, попадающая в поле зрения приёмников, наблюдается с разных углов обзора. Получаемая в результате серия измерений (до 380 измерений за один пролёт) после соответствующей обработки позволяет повысить точность восстановления параметров подстилающей поверхности.

Наиболее интересным с практической точки зрения продуктом SMOS является L1c, который содержит измеренную на различных углах зондирования яркостную температуру на верхней границе атмосферы. Продукт представлен в виде двух отдельных наборов данных: для поверхности суши (L1CL) и для поверхности океана (L1CS).

Для представления результатов измерений яркостной температуры подстилающей поверхности используется икосаэдрическая сетка Шнайдера (*англ.* Icosahedral Snyder Equal Area (ISEA) grid 4N9) (Sahr et al., 2023). Название 4N9 (гексагональная с апертурой 4 и разрешением 9) означает, что сетка построена в результате девяти шагов рекурсивного разбиения исходного икосаэдра шестиугольниками (*англ.* hexagon) при четырёхкратном уменьшении площадей шестиугольников на каждом шаге. В результате такого разбиения сетка ISEA 4N9 состоит из 2 621 450 ячеек равной площади (194,57 км²) с почти равномерными интервалами между ними (около 15 км). Большинство ячеек сетки являются шестиугольниками, 12 ячеек — пятиугольниками.

Алгоритм определения влагозапаса почвы

Полевые измерения профиля влажности почвы на исследуемой территории проводились в тёплый период года на тестовых участках Родинского р-на (Алтайский край). На каждом участке в течение сезона проводилось 10–13 измерений с периодичностью 10–11 дней. Для анализа были отобраны 264 профиля влажности. Результаты измерений представляют собой осреднённые по четырём буровым стволам на каждом участке значения относительной массовой влажности W_M образцов из каждого 10-см слоя почвы до глубины 1 м. Для каждого образца значение W_M определяли по разности ($M_{\text{вод}}$) между массой образца до ($M_{\text{вл}}$) и после ($M_{\text{сух}}$) высушивания, отнесённой к массе сухой почвы, по формуле (1). Соответствующие значения W (в см³/см³) и влагозапаса h_i (в мм) в слоях толщиной $z = 10$ см вычислены по формулам (2) и (3). Интегральный влагозапас почвы в метровом слое H_{0-100} определяется выражением (4), где h_i — влагозапас каждого 10-см слоя (i — порядковый номер каждого 10-см слоя от поверхности до глубины 100 см).

$$W_M = (M_{\text{вл}} - M_{\text{сух}}) / M_{\text{сух}} = M_{\text{вод}} / M_{\text{сух}}, \quad (1)$$

$$W = W_M (\rho_{\text{сух}} / \rho_{\text{вод}}), \quad (2)$$

$$h_i = Wz, \quad (3)$$

$$H_{0-100} = \sum_{i=1}^{10} h_i. \quad (4)$$

Алгоритм обработки спутниковых данных

Яркостная температура $T_{\text{Я}}$ подстилающей поверхности в скин-слое L_{λ} зависит от коэффициента излучения (χ), зависящего от W , и эффективной температуры ($T_{\text{эф}}$)

$$T_{\text{Я}} = (W)T_{\text{эф}}, \quad T_{\text{эф}} = T_0 + \int_0^{\infty} \frac{dT}{dz} \exp\left[-\int_0^z \gamma(z') dz'\right] dz,$$

где T_0 — температура поверхности почвы; dT/dz — локальный градиент температуры, определённый по наземным измерениям на тестовых участках; $\gamma(z)$ — линейный коэффициент поглощения при угле зондирования θ :

$$\gamma(z) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon'(W(z)) - \sin^2 \theta}{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''(W(z))}{\varepsilon'(W(z)) - \sin^2 \theta}\right)^2 - 1}. \quad (5)$$

Действительную (ε') и мнимую (ε'') часть ε почв измеряли на длине волны 21 см на лабораторной установке мостового типа, созданной на основе измерителя разности фаз ФК2-18. Перед измерением образцы измельчали, перемешивали до однородного состояния, увлажняли дистиллированной водой. Величину W определяли термостатно-весовым способом, выдерживая исследуемый образец в термостате при температуре 105 °С и взвешивая на аналитических весах с точностью до 0,001 г. Высушивание продолжали до постоянной массы исследуемого образца. Измерения проводили при температуре 24±1 °С.

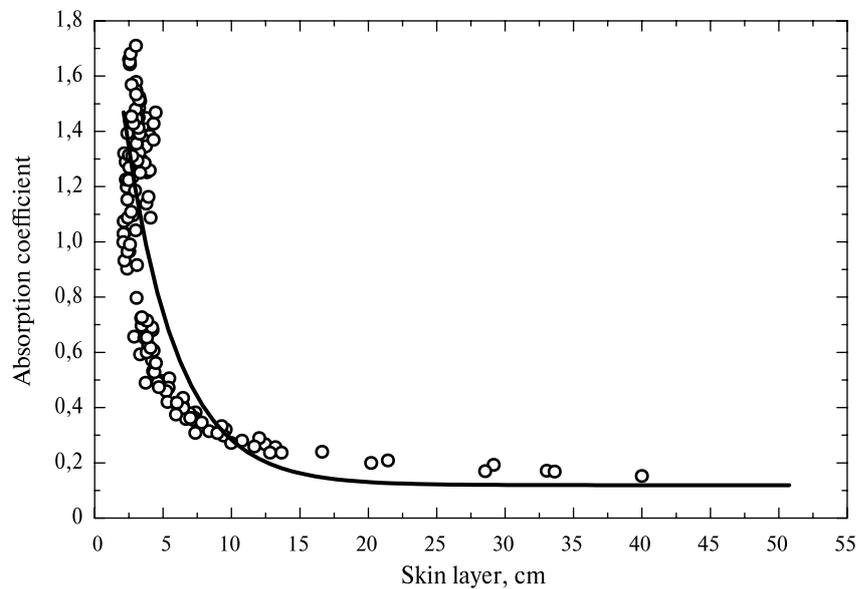


Рис. 2. Зависимость скин-слоя $L_{\lambda}(W)$ на длине волны $\lambda = 21$ см от объёмной влажности W (сплошная линия). Кружками обозначены экспериментальные значения L_{λ} , рассчитанные по данным измерений диэлектрических характеристик почвенных образцов при разной W

Температура T_0 на поверхности почвы в летний период изменялась в течение суток от 298 до 336 К. Спутник SMOS пролетал над районом исследований в 07:00 и в 20:00 по местному времени. Для эксперимента были выбраны данные SMOS во время утреннего пролёта. К этому времени T_0 остывала до 300±2 К. Экспериментально установленная зависимость $T(z)$

имеет вид $T = 300 - 0,07z$, $0 \leq z \leq 70$ см; $dT/dz = -0,074$. Из формулы (5) видно, что $\gamma(z)$ зависит от $W(z)$:

$$\gamma = 0,13644 + 3,3354W_z, \quad R^2 = 0,988, \quad \sigma = 0,074,$$

где $W_z = W_0 \pm Az$, $A = (2-6) \cdot 10^{-4}$ — численный коэффициент.

На рис. 2 (см. с. 213) представлена зависимость $L_\lambda(W) = 1/\gamma(W(z))$ (сплошная линия), рассчитанная на основе лабораторных измерений диэлектрических характеристик почв и имеющая следующий вид:

$$L_\lambda = (3,24 \pm 0,1) + (44,1 \pm 0,94) \exp(-W/(0,02823 \pm 0,00074)).$$

Из рис. 2 видно, что даже при малых значениях $W = 0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (сильная почвенная засуха) $L_\lambda < 10$ см, а в диапазоне $W \geq 0,10 \text{ см}^3/\text{см}^3$ получаем $L_\lambda \leq 5$ см.

Результаты обработки спутниковых данных

Яркостную температуру T_λ подстилающей поверхности на горизонтальной поляризации, измеренную со спутника SMOS (продукт L1c) (Gutierrez et al., 2017), использовали для определения влагозапаса в слое 0–5 см, так как согласно рис. 2 при $W \geq W_l$ микроволновое излучение почвенного покрова формируется в слое $L_\lambda = 5$ см.

На основе экспериментально установленных зависимостей $h_{0-5}(T_\lambda)$ (по данным дистанционного зондирования) и $h_{0-10}(h_{0-5})$ (по данным наземных измерений) рассчитывали влагозапас h_{0-10} поверхностного верхнего слоя 0–10 см. В качестве основных объектов исследования были выбраны участки, попадающие в ячейку № 4010458 сетки SMOS (см. рис. 1).

На рис. 3 приведены зависимости T_λ подстилающей поверхности, измеренные со спутника SMOS, от влагозапаса в слоях почвы h_{0-5} и H_{0-100} , аппроксимированные прямыми линиями, имеющими вид:

$$T_\lambda = 270,8 - 4,17386h_{0-5}, \quad R = -0,44, \quad \sigma = 19,7, \quad (6)$$

$$T_\lambda = 274,1 - 0,13941H_{0-100}, \quad R = -0,22, \quad \sigma = 18,1. \quad (7)$$

Обратные зависимости имеют вид:

$$h_{0-5} = 17,1 - 0,0467T_\lambda, \quad R = -0,44, \quad \sigma = 2,9,$$

$$H_{0-100} = 247,1 - 0,35437T_\lambda, \quad R = -0,22, \quad \sigma = 2,8.$$

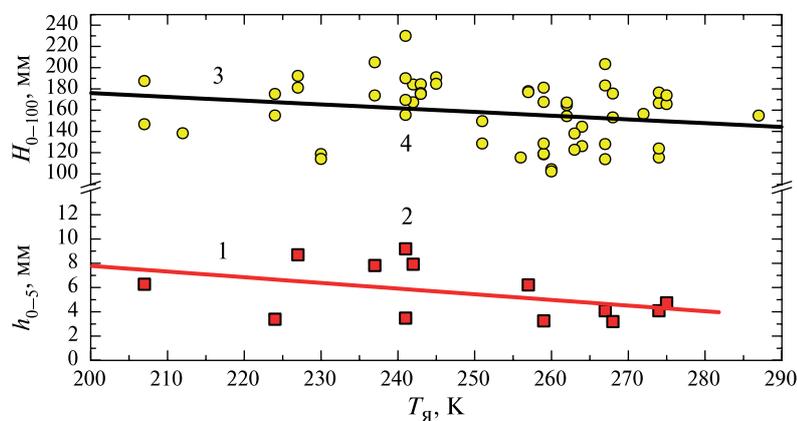


Рис. 3. Зависимости яркостной температуры (T_λ) на горизонтальной поляризации от влагозапаса в слоях почвы h_{0-5} (1) и H_{0-100} (3): 1, 3 — теоретические зависимости, рассчитанные по формулам (6) и (7); 2 и 4 — экспериментальные данные — влагозапас в слоях 0–5 и 0–100 см и соответствующие им значения T_λ

Из графиков видно, что одним и тем же значениям влагозапаса соответствует широкий диапазон значений $T_{\text{я}}$. Например, значению $H_{0-100} = 150$ мм соответствуют значения $T_{\text{я}}$ в диапазоне 207–275 К. В то же время значению $T_{\text{я}} = 265$ К соответствуют значения H_{0-100} в пределах 120–200 мм. Из сравнительного анализа приведённых спутниковых и наземных данных следует вывод, что прямое определение влагозапаса почвы в метровом слое по данным спутникового зондирования на длине волны $\lambda = 21$ см проблематично. Поверхностный слой перувлажнённой почвы даже малой толщины (например, после дождя) может заметным образом экранировать микроволновое излучение нижележащих слоёв почвы и тем самым существенно искажать данные дистанционного зондирования. Соответственно с этим выводом возникает необходимость поиска новых подходов к дистанционной оценке влагозапаса почвы в метровом слое. Для этой цели были исследованы профили влажности почвы в метровом слое и проанализированы зависимости влагозапаса в соседних слоях почвы (толщиной 10 см).

Результаты полевых исследований

Профили влажности $W(z)$ весьма разнообразны. Это связано с разными погодными условиями, предшествующими их определению. Для примера на *рис. 4* приведена сезонная динамика профилей H_{0-100} в вегетационные периоды (апрель–сентябрь) с 2012 по 2022 г. на тестовых участках, попадающих в пиксель SMOS (почва чернозёмная обыкновенная среднесуглинистая). Видно, что высокие значения H_{0-100} зафиксированы в весенний период после таяния снежного покрова (28 апреля) (*рис. 4*, график 1). Высокие значения H_{0-100} также связаны с обильными атмосферными осадками и просачиванием воды в нижние горизонты почвенного слоя (график 2). В периоды летней засухи влагозапас почвы в корнеобитаемом слое почвы заметно уменьшается, опускаясь ниже влагозапаса h_r , соответствующего W_r . Для среднесуглинистой почвы с $W_r \approx 0,11$ почвенная засуха проявляется при влагозапасе корнеобитаемого слоя 0–30 см, $h_r \leq 0,33$ мм. Графики 3 и 4 соответствуют условиям засухи.

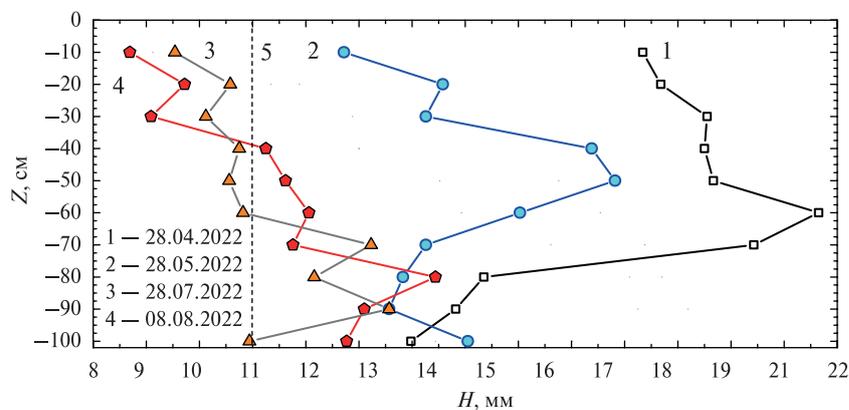


Рис. 4. Профили влагозапаса в почвенном слое 0–100 см (1–4) в разные периоды тёплого сезона, 5 — влагозапас h_r в слое 10 см, соответствующий $W_r \approx 0,11$ (начало засухи)

Из *рис. 4* видно, что наблюдается некоторая слоистость (стратификация) h_r в слое 0–100 см, которая может быть связана с разным гранулометрическим составом, соответственно, с разной долей связанной воды, не просачивающейся в нижележащие слои под действием силы тяжести, а также с разной плотностью почвы.

Между влагозапасом соседних слоёв h_i и h_{i+1} установлены статистически значимые корреляционные связи, выявленные для выборки (264 профиля) с апреля по сентябрь с 2012 по 2022 г. (*рис. 5*). На основе этих связей определены линейные зависимости, позволяющие рассчитать влагозапас каждого 10-см слоя (h_{i+1}), основываясь на влагозапасе вышележащего 10-см слоя (h_i). При этом поверхностный 10-см слой (h_{0-10}) определён на основе данных

о влагозапасе 5-см слоя (h_{0-5}), который, в свою очередь, определён на основе дистанционных измерений $T_{\text{я}}$ со спутника SMOS. Соотношения для расчёта влагозапасов слоёв имеют вид:

$$h_{i+1} = A_i + B_i h_i, \quad i = 1 \dots 10, \quad (8)$$

где A_i и B_i — численные коэффициенты, приведённые в таблице.

Численные коэффициенты в формуле (8)

$h_{i+1}(h_i)$	A	ΔA	B	ΔB	R	SD
$h_{0-10}(h_{0-5})$	7,427	0,569	1,390	0,073	0,94	2,41
$h_{10-20}(h_{0-10})$	3,402	0,466	0,811	0,029	0,87	2,33
$h_{20-30}(h_{10-20})$	1,567	0,340	0,877	0,021	0,93	1,55
$h_{30-40}(h_{20-30})$	1,626	0,372	0,949	0,023	0,93	1,64
$h_{40-50}(h_{30-40})$	0,864	0,303	0,960	0,018	0,96	1,29
$h_{50-60}(h_{40-50})$	1,733	0,328	0,896	0,019	0,94	1,39
$h_{60-70}(h_{50-60})$	0,850	0,319	0,940	0,019	0,95	1,27
$h_{70-80}(h_{60-70})$	0,722	0,348	0,936	0,021	0,94	1,40
$h_{80-90}(h_{70-80})$	0,068	0,358	0,992	0,022	0,94	1,46
$h_{90-100}(h_{80-90})$	0,294	0,337	0,933	0,020	0,94	1,44

Примечание: R — коэффициент корреляции, SD (англ. standard deviation) — стандартное отклонение.

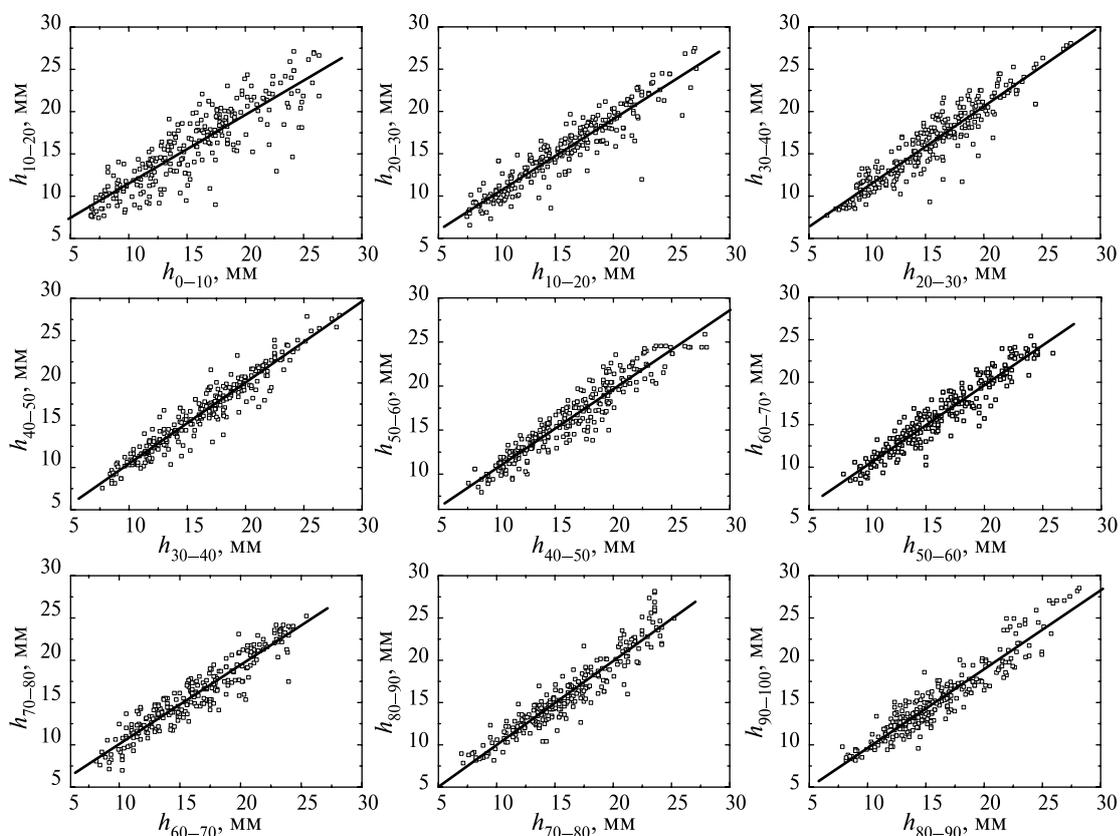


Рис. 5. Зависимости влагозапаса почвы в слое h_{i+1} от влагозапаса в слое h_i (сплошные линии), квадратами показаны экспериментальные значения влагозапаса почвы, определённые по данным полевого обследования

На рис. 5 (см. с. 216) по оси абсцисс отложены влагозапасы слоя h_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) для слоёв 0–10, 10–20, ..., 90–100 см), по оси ординат — влагозапас нижележащего слоя h_{i+1} , в который просачивается вода из верхнего слоя. Соответственно, влажность нижнего слоя зависит от влажности верхнего слоя h_i . На графиках сплошными линиями показаны зависимости $h_{i+1}(h_i)$ для каждого слоя от $z = 0$ до $z = 100$ см, рассчитанные по формуле (8) и данным, приведённым в таблице. Из графиков и таблицы видно, что для всех слоёв наблюдаются довольно устойчивые зависимости $h_{i+1}(h_i)$ с высокими значениями коэффициентов корреляции R (0,87–0,94) и малыми значениями SD, что указывает на обоснованность данного подхода для оценки влагозапаса почвы.

Для расчёта H_{0-100} по данным яркостной температуры, измеренной со спутника SMOS (продукт L1c) и соотнесённой к слою 0–5 см (см. рис. 2), использованы соотношения (4), (6) и (8). На рис. 6 приведена динамика влагозапаса в метровом слое, определённого термостатно-весовым способом, и значений H_{0-100} , рассчитанных по данным дистанционной оценки $T_{я}$ в слое h_5 с использованием зависимости (7) и соотношений (6). Из рис. 6 видно, что рассчитанные дистанционным способом значения $H_{0-100}(T_{я})$ совпадают с экспериментальными значениями H_{0-100} , определёнными термостатно-весовым способом. В то же время в некоторых случаях наблюдаются заметные отличия дистанционных и наземных данных. Наблюдаемое расхождение между дистанционными и наземными данными, а также между полевыми измерениями в разных точках тестового участка могут быть связаны с тем, что сравниваются площадные спутниковые данные в пикселе SMOS 35×65 км с результатами единичных наземных измерений влагозапаса почвы в конкретных точках. При этом следует отметить, что в ряде случаев наблюдается значительное расхождение самих наземных данных, измеренных термостатно-весовым способом в один и тот же день, но на разных тестовых участках, попадающих в пиксель SMOS. Одним из источников возникающих погрешностей может быть несовпадение спутниковых и наземных измерений по времени. Спутник SMOS регистрирует микроволновое излучение подстилающей поверхности два раза в сутки в утренние и вечерние часы (07:00 и 20:00 по местному времени), а полевые измерения могут проводиться в течение всего дня, когда вариации T_0 достигают 30–40 К.

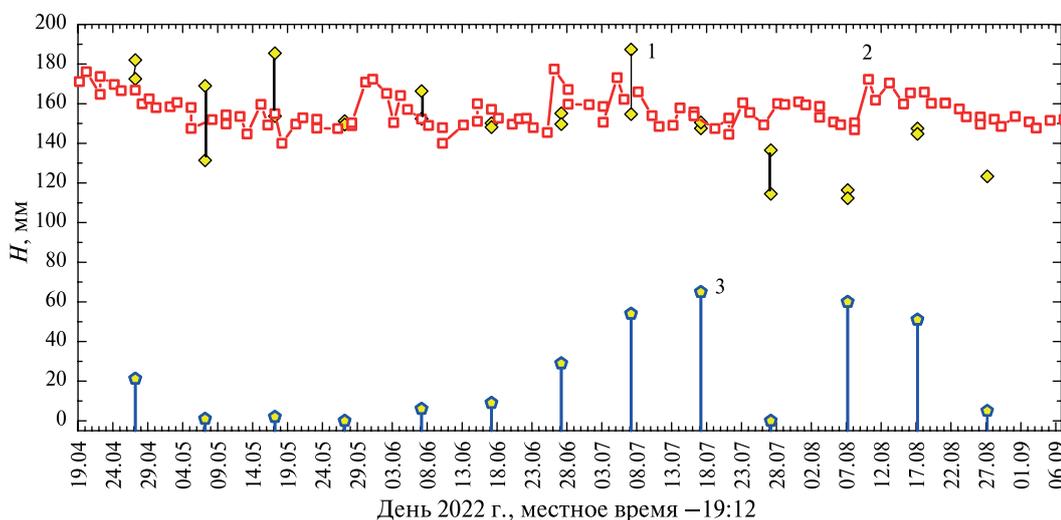


Рис. 6. Динамика влагозапаса в метровом слое, определённая термостатно-весовым способом (1) и рассчитанная по данным дистанционного зондирования (2), 3 — атмосферные осадки (в мм)

Заключение

Из комплексного анализа спутниковых данных, полевых и лабораторных измерений следует, что наблюдается удовлетворительное соответствие влагозапаса в почвенном слое 0–100 см, определённого контактными (термостатно-весовым) и дистанционным (радиофизическим)

способами. Следует отметить, что полевые измерения, проведённые на разных участках, попадающих в пиксель SMOS, заметно различаются, а яркостная температура, определённая по спутниковым данным, представляет собой усреднённые значения по всему пикселю размером 35×65 км. При малых значениях объёмной влажности погрешность дистанционного определения суммарного влагозапаса в метровом слое почвы может быть связана с увеличением толщины скин-слоя с 5 м до 7–10 см (см. рис. 2). Возможными источниками погрешностей дистанционного определения влагозапаса почвы также являются:

1. Разнообразии ландшафтов с разными радиоизлучательными характеристиками, попадающих в пиксель микроволнового радиометра. Для повышения точности дистанционных измерений возникает необходимость корректировки спутниковых данных путём учёта площадей и радиоизлучательных характеристик разных ландшафтов (почвенного покрова, водных объектов, лесных массивов, населённых пунктов).
2. Неоднородность физических и химических свойств почв по глубине. Микроволновое излучение почвенного покрова формируется в скин-слое почвы. Наличие в этом слое почвенных горизонтов с разными физическими и химическими параметрами, изменяющимися с глубиной, затрудняет интерпретацию данных дистанционного зондирования.
3. Пространственная «пестрота» почв. В связи с конечной разрешающей способностью радиометрической аппаратуры дистанционного микроволнового зондирования может регистрироваться радиоизлучение от участков почв с разным гранулометрическим составом, в результате чего происходит осреднение радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности по излучающей площадке, размеры которой определяются диаграммой направленности антенн используемых радиометрических приёмников.

В данной работе остался неизученным вопрос применимости предлагаемого подхода на почвах с другим гранулометрическим составом, от чего зависят объёмная доля связанной воды, а также скорость просачивания почвенной влаги сквозь почвенную толщу. Следует отметить, что установленные соотношения $h_{i+1}(h_i)$ могут иметь локальный характер и зависеть от физических характеристик почвенного слоя (плотности, гранулометрического состава, объёмной доли связанной воды).

Также за рамками данной статьи остался вопрос о комплексном использовании спутниковых данных в сантиметровом и дециметровом диапазонах для более точного определения градиента влажности в поверхностных слоях 0–5 и 0–10 см, на основе которых основан разработанный подход к дистанционному определению влагозапаса в метровом слое почвы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-20041, <https://rscf.ru/project/22-17-20041/>.

Литература

1. Башаринов А. Е., Тучков Л. Т., Поляков В. С., Ананов Н. И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений в СВЧ-диапазоне. М.: Сов. ред., 1968. 390 с.
2. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиотепловое излучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
3. Беляева Т. А., Бобров А. П., Бобров П. П., Галеев О. В., Мандрыгина В. Н. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1–20 ГГц // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 5. С. 28–35.
4. Голованов А. И., Паласиос О. Об определении зависимости запасов почвенной влаги от глубины промерзания грунтовых вод // Почвоведение. 1968. № 1. С. 101–105.
5. Зотова Е. Н., Геллер А. Г. Способ определения влажности почв: Авторское свидетельство SU 985741. МПК G 01 N 22/04. Оpubл. 30.12.1982. Бюл. № 48. 4 с.
6. Комаров С. А., Миронов В. Л., Романов А. Н. Дистанционное определение уровней грунтовых вод с использованием региональных баз данных // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 4. С. 79–82.

7. Комаров С. А., Миронов В. Л., Романов А. Н., Евтюшкин А. В. (1994а) Определение площадей подтопленных земель дистанционными методами // Метеорология и гидрология. 1994. № 1. С. 87–91.
8. Комаров С. А., Миронов В. Л., Романов А. Н., Рычкова Н. В. (1994б) Дистанционный радиофизический способ определения влажности почвы. Патент RU 2010219. МПК G 01 N 22/00. Опубл. 30.03.1994. 3 с.
9. Комаров С. А., Миронов В. Л., Рычкова Н. В. Способ определения влажности устойчивого завядания. Патент RU 2092819. МПК G 01 N 22/04. Опубл. 10.10.1997. 5 с.
10. Никифоров М. В., Пегоев Н. Н., Шкуратов И. И. Способ определения влажности почв в их естественном залегании. Авторское свидетельство SU 1061096. МПК G 01 V 11/00. Опубл. 15.12.1983. Бюл. № 46. 3 с.
11. Реутов Е. А., Шутко А. М. Способ дистанционного определения профиля влажности и интегрального влаго содержания почвы. Авторское свидетельство SU 1326968. МПК G 01 N 22/04. Опубл. 30.07.1987. Бюл. № 28. 4 с.
12. Реутов Е. А., Шутко А. М. Оценка уровня грунтовых вод по данным дистанционных СВЧ-радиометрических измерений // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 2. С. 99–106.
13. Романов А. Н. Влияние объемной влажности на диэлектрические свойства гумуса в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 6. С. 734–735.
14. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Алексеева Т. А. Анализ гидрологического режима устьевых областей Енисея, Печоры и Хатанги в зимний период по данным спутника SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2022. Т. 202. № 6. С. 47–62. DOI: 10.31857/S0205961422060124.
15. Тихонов В. В., Алексеева Т. А., Афанасьева Е. В. и др. О возможности определения сплочённости ледяного покрова арктических морей по данным спутника SMOS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 329–335. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-329-335.
16. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 548 с.
17. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
18. Bitar A. A., Mahmoodi A., Kerr Y. et al. Global assessment of droughts in the last decade from SMOS root zone soil moisture // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. IGARSS. 2021. P. 8628–8631. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554773.
19. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Y. Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing // Progress in Electromagnetics Research. 2002. V. 35. P. 251–269. DOI: 10.1163/156939302X01227.
20. Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J. SMOS L1 Processor L1c data processing model: Technical rep. SO-DS-DME-L1OP-0009. 2017.
21. John J., Sushama L., Roose S. A machine learning framework for extending SMOS surface soil moisture observations over Canada // EGU General Assembly. 2024. Article EGU24-12005. DOI: 10.5194/egusphere-egu24-12005.
22. Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaume P. et al. The SMOS soil moisture retrieval algorithm // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 5. P. 1384–1403. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
23. Kirdiashev K. P., Chukhlantsev A. A., Shutko A. M. Microwave radiation of the Earth's surface in the presence of vegetation cover // Radio Engineering and Electronics. 1979. V. 24. P. 256–264.
24. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N. The effect of salinity on the permittivity of moist soils in the microwave band // J. Communications Technology and Electronics. 2002. V. 47. No. 6. P. 626–631.
25. Li L., Dai Y., Wei Z. et al. Enhancing deep learning soil moisture forecasting models by integrating physics-based models // Advances in Atmospheric Sciences. 2024. V. 41. No. 7. P. 1326–1341. DOI: 10.1007/s00376-023-3181-8.
26. Luo X., Yin C., Sun Y. et al. A real-time prediction approach to deep soil moisture combining GNSS-R data and a water movement model in unsaturated soil // Water. 2024. V. 16. No. 7. Article 979. DOI: 10.3390/w16070979.
27. Mladenova I. E., Bolten J. D., Crowet W. T. et al. Evaluating the operational application of SMAP for global agricultural drought monitoring // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2019. V. 12. No. 9. P. 3387–3397. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2923555.
28. Njoku E. G., Kong J. A. Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture // J. Geophysical Research. 1977. V. 82. P. 3108–3118. DOI: 10.1029/JB082i020p03108.
29. Pal M., Maity R. Assimilation of remote sensing based surface soil moisture to develop a spatially varying vertical soil moisture profile database for entire Indian mainland // J. Hydrology. 2021. V. 601. Article 126807. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126807.
30. Romanov A. N. On the influence of the macroaggregate composition of soils on their dielectric and radiative properties in the microwave band // J. Communications Technology and Electronics. 2004. V. 49. No. 9. P. 1048–1050.

31. Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic discrete global grid systems // Cartography Geographic Information Science. 2023. V. 30. No. 2. P. 121–134. DOI: 10.1559/152304003100011090.
32. Schmugge T.J. Effect of texture on microwave emission from soils // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1980. V. GE-18. No. 4. P. 353–361. DOI: 10.1109/TGRS.1980.350313.
33. Schmugge T.J., Gloersen P.W., Wilheit T., Geiger F. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometry // J. Geophysical Research. 1974. V. 79. No. 2. P. 317–323. DOI: 10.1029/JB079i002p00317.
34. Wang C., Yu T., Gu X. et al. The verification and fusion analysis of passive microwave soil moisture products in the three northeastern provinces of China // Atmosphere. 2024. V. 15. No. 4. Article 441. DOI: 10.3390/atmos15040441.
35. Wang P., Zeng J., Chen K.-S. et al. Global-scale assessment of multiple recently developed/reprocessed remotely sensed soil moisture datasets // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2024. V. 62. Article 4403518. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3361890.
36. Ye N., Walker J.P., Yeo I.-Y. et al., Toward P-band passive microwave sensing of soil moisture // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2021. V. 18. No. 3. P. 504–508. DOI: 10.1109/LGRS.2020.2976204.

Remote assessment of soil moisture content in one-meter layer using SMOS satellite data

A. N. Romanov, I. V. Khvostov, I. V. Ryabinin, D. A. Romanov

Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia
E-mail: ran@iwep.ru

In this paper, we investigate the possibility of remote determination of soil moisture content in one-meter-thick layer based on brightness temperatures of the underlying surface measured by the SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) satellite at a wavelength of 21 cm. For this purpose, we propose a new approach based on the use of experimentally established dependencies between the moisture content in adjacent soil layers, starting from the surface and down to a depth of 1 m. The studies were conducted in the Kulunda steppe (Altai Krai). In the field experiment, volumetric moisture (W) and soil moisture content (h) were determined at test sites at different depths from the surface to a depth of 1 m. Based on the SMOS satellite data (L1c product) and field measurements of W and h , the dependence of brightness temperature at horizontal polarization on soil moisture content in the surface layer of 0–5 cm was established. The obtained dependencies were used to calculate the total moisture content in one-meter soil layer H_{0-100} . From a comprehensive analysis of satellite data, field and laboratory measurements, a satisfactory agreement was obtained between the values of H_{0-100} determined by contact (thermostat-weight) and remote (radiophysical) methods.

Keywords: soil moisture, brightness temperature, emissivity, refractive and absorption indices, microwave range, SMOS satellite

Accepted: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-209-222

References

1. Basharinov A. E., Tuchkov L. T., Polyakov V. S., Ananov N. I., *Izmerenie radioteplovykh i plazmennyykh izlucheniiv SVCH-diapazone* (Measurement of radiothermal and plasma radiation in the microwave range), Moscow: Sovetskaya redaktsiya, 1968, 390 p. (in Russian).
2. Basharinov A. E., Gurvich A. S., Egorov S. T., *Radioteplovoe izluchenie Zemli kak planety* (Radiothermal radiation of the Earth as a planet), Moscow: Nauka, 1974, 188 p. (in Russian).
3. Beljaeva T. A., Bobrov A. P., Bobrov P. P., Galjeev O. V., Mandrygina V. N., Determination of soil dielectric models parameters at various density and humus content using experimental measurement data at frequency band 0,1–20 GHz, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2003, Vol. 18, No. 5, pp. 28–35 (in Russian).

4. Golovanov A. I., Palasios O., On determining the dependence of soil moisture reserves on the depth of groundwater freezing, *Pochvovedenie*, 1968, No. 1, pp. 101–105 (in Russian).
5. Zotova E. N., Geller A. G., *Sposob opredeleniya vlazhnosti pochv* (Method for determining soil moisture), Certificate of authorship SU 985741, Publ. 30.12.1982 (in Russian).
6. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., Remote determination of groundwater levels using regional databases, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1993, No. 4, pp. 79–82 (in Russian).
7. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., Evtyushkin A. V. (1994a), Determination of areas of flooded lands using remote methods, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1994, No. 1, pp. 87–91 (in Russian).
8. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., Rychkova N. V. (1994b), *Distsionnyi radiofizicheskii sposob opredeleniya vlazhnosti pochvy* (Remote radiophysical method for determining soil moisture), Patent RU 2010219, Publ. 30.03.1994 (in Russian).
9. Komarov S. A., Mironov V. L., Rychkova N. V., *Sposob opredeleniya vlazhnosti ustoichivogo zavyadaniya* (Method for determining moisture content of stable wilting), Patent RU 2092819, Publ. 10.10.1997 (in Russian).
10. Nikiforov M. V., Pegoev N. N., Shkuratov I. I., *Sposob opredeleniya vlazhnosti pochv v ikh estestvennom zaleganii* (Method for determining soil moisture in their natural occurrence), Certificate of authorship SU 1061096, Publ. 15.12.1983 (in Russian).
11. Reutov E. A., Shutko A. M., *Sposob distantsionnogo opredeleniya profilya vlazhnosti i integral'nogo vlagosoderzhaniya pochvy* (Method for remote determination of soil moisture profile and integral moisture content), Certificate of authorship SU 1326968, Publ. 30.07.1987 (in Russian).
12. Reutov E. A., Shutko A. M., Estimation of groundwater levels based on remote microwave radiometric measurements, *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 1991, No. 2, pp. 99–106 (in Russian).
13. Romanov A. N., Effect of the volume wetness on the dielectric properties of humus in the microwave band, *Radiotekhnika i elektronika*, 2006, Vol. 51, No. 6, pp. 734–735 (in Russian).
14. Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Alekseeva T. A. et al., Analysis of the winter hydrological regime of the Yenisei, Pechora and Khatanga estuaries using SMOS data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 202, No. 6, pp. 47–62 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422060124.
15. Tikhonov V. V., Alekseeva T. A., Afanasyeva E. V. et al., On the possibility to determine the concentration of Arctic sea ice using SMOS satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 329–335 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-329-335.
16. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy, V 2-kh t., T. 1* (Radiothermal remote sensing of the Earth: Physical foundations, V 2 t., Vol. 1), Moscow: IKI RAN, 2014, 548 p. (in Russian).
17. Shutko A. M. *SVCh-radiometriya vodnoi poverkhnosti i pochvogruntov* (Microwave radiometry of water surface and soil), Moscow: Nauka, 1986, 190 p. (in Russian).
18. Bitar A. A., Mahmoodi A., Kerr Y. et al., Global assessment of droughts in the last decade from SMOS root zone soil moisture, *2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. IGARSS*, 2021, pp. 8628–8631, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554773.
19. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Y., Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing, *Progress in Electromagnetics Research*, 2002, Vol. 35, pp. 251–269. DOI: 10.1163/156939302X01227.
20. Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J., *SMOS L1 Processor L1c data processing model: Technical rep.*, SO-DS-DME-L1OP-0009, 2017.
21. John J., Sushama L., Roose S., A machine learning framework for extending SMOS surface soil moisture observations over Canada, *EGU General Assembly, 2024*, Article EGU24-12005, DOI: 10.5194/egusphere-egu24-12005.
22. Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaume P. et al., The SMOS soil moisture retrieval algorithm, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 5, pp. 1384–1403, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
23. Kirdiashev K. P., Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Microwave radiation of the Earth's surface in the presence of vegetation cover, *Radio Engineering and Electronics*, 1979, Vol. 24, pp. 256–264.
24. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., The effect of salinity on the permittivity of moist soils in the microwave band, *J. Communications Technology and Electronics*, 2002, Vol. 47, No. 6, pp. 626–631.
25. Li L., Dai Y., Wei Z. et al., Enhancing Deep learning soil moisture forecasting models by integrating physics-based models, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2024, Vol. 41, No. 7, pp. 1326–1341, DOI: 10.1007/s00376-023-3181-8.
26. Luo X., Yin C., Sun Y. et al., A real-time prediction approach to deep soil moisture combining GNSS-R data and a water movement model in unsaturated soil, *Water*, 2024, Vol. 16, No. 7, Article 979, DOI: 10.3390/w16070979.
27. Mladenova I. E., Bolten J. D., Crow W. T. et al., Evaluating the operational application of SMAP for global agricultural drought monitoring, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, Vol. 12, No. 9, pp. 3387–3397, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2923555.

28. Njoku E. G., Kong J. A., Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture, *J. Geophysical Research*, 1977, Vol. 82, pp. 3108–3118. DOI: 10.1029/JB082i020p03108.
29. Pal M., Maity R., Assimilation of remote sensing based surface soil moisture to develop a spatially varying vertical soil moisture profile database for entire Indian mainland, *J. Hydrology*, 2021, Vol. 601, Article 126807, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126807.
30. Romanov A. N., On the influence of the macroaggregate composition of soils on their dielectric and radiative properties in the microwave band, *J. Communications Technology and Electronics*, 2004, Vol. 49, No. 9, pp. 1048–1050.
31. Sahr K., White D., Kimerling A. J., Geodesic discrete global grid systems, *Cartography Geographic Information Science*, 2023, Vol. 30, No. 2, pp. 121–134, DOI: 10.1559/152304003100011090.
32. Schmugge T. J., Effect of Texture on microwave emission from soils, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, Vol. GE-18, No. 4, pp. 353–361, DOI: 10.1109/TGRS.1980.350313.
33. Schmugge T. J., Gloersen P. W., Wilheit T., Geiger F., Remote sensing of soil moisture with microwave radiometry, *J. Geophysical Research*, 1974, Vol. 79, No. 2, pp. 317–323. DOI: 10.1029/JB079i002p00317.
34. Wang C., Yu T., Gu X. et al., The verification and fusion analysis of passive microwave soil moisture products in the three northeastern provinces of China, *Atmosphere*, 2024, Vol. 15, No. 4, Article 441, DOI: 10.3390/atmos15040441.
35. Wang P., Zeng J., Chen K.-S. et al., Global-scale assessment of multiple recently developed/reprocessed remotely sensed soil moisture datasets, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2024, Vol. 62, Article 4403518, DOI: 10.1109/TGRS.2024.3361890.
36. Ye N., Walker J. P., Yeo I.-Y. et al., Toward P-band passive microwave sensing of soil moisture, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 504–508, DOI: 10.1109/LGRS.2020.2976204.