

---

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн  
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
Поволжский государственный технологический университет  
Российский новый университет

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**  
**XXVIII Всероссийская открытая научная конференция**  
(Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года)

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**



Йошкар-Ола  
Поволжский государственный технологический университет  
2023

---

УДК 621.37  
ББК 32.840  
Р 24

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Д. С. Лукин, *научный редактор*;  
Д. В. Иванов, *председатель редакционной коллегии*;  
Н. В. Рябова, *заместитель председателя редакционной коллегии*;  
В. А. Иванов, Н. Г. Котонаева, А. С. Крюковский, В. И. Куркин,  
Б. Г. Кутуза, И. А. Насыров, Д. В. Растягаев, Г. Г. Щукин;  
А. А. Кислицын, *ответственный секретарь*

**Распространение радиоволн:** сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции (Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года) / редколлегия: Д. С. Лукин, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова и др. – Электронные данные. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. – 648 с. – URL: <https://science.volgatech.net/upload/documents/science/RRW2023.pdf>  
ISBN 978-5-8158-2337-2

В сборник включены доклады, отражающие результаты исследований в области распространения радиоволн от километрового до субмиллиметрового диапазона в различных средах; распространения широкополосных сигналов в средах с дисперсией; дистанционного зондирования космического пространства, ионосферы, атмосферы и земных покровов в радио-, инфракрасном и оптическом диапазонах; нелинейных эффектов в ионосфере, возникающих при распространении радиоволн большой мощности: эффектов, проявляющихся в диапазоне радиочастот, связанных с атмосферным электричеством.

Представленные новые научные результаты в области распространения радиоволн могут быть полезны специалистам по радиофизике, геофизике, радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также студентам, аспирантам и докторантам соответствующих специальностей.

УДК 621.37  
ББК 32.840

---

*Электронное научное издание*

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции  
(Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года)

Ответственный за выпуск *А. А. Кислицын*

Редакторы *Л. С. Емельянова, П. Г. Павловская*. Компьютерная верстка *С. Н. Эштыкова*

Сборник разработан с помощью программного обеспечения Microsoft Office Word, Adobe Acrobat Pro.

Подписано к использованию 10.05.2023. Объем издания 34,7 Мб.

Поволжский государственный технологический университет. 424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

---

ISBN 978-5-8158-2337-2

© Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн, 2023  
© Поволжский государственный технологический университет, 2023

УДК 528.8

## ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ

**Н. В. Родионова**

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,  
г. Фрязино, Россия  
E-mail: rnv1948123@yandex.ru*

**Аннотация.** Для оценки влажности почвы в работе построены регрессионные модели на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями влажности почвы. В качестве наземных выбраны измерения на двух станциях в Германии (Falkenberg и Gevenich), входящих в всемирную сеть данных по влажности почвы ISMN (International Soil Moisture Network). В качестве радарных использованы данные спутника Sentinel 1. Построены множественные линейные регрессии с коэффициентом детерминации до 0.91. Предложено использовать в регрессиях не только радарные, но и метеоданные, что позволяет увеличить коэффициент детерминации и уменьшить стандартную ошибку регрессии. Для возможного распространения регрессий, полученных для одной территории, на другую территорию, в работе предложены два критерия: близость значений гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) и схожесть почвенной текстуры. Для примера использования полученных регрессий выбрана станция в Рязанской области, архивная информация по влажности почвы которой содержится в базе данных ISMN до 1998 г.

**Ключевые слова:** наземные и спутниковые измерения; объемная влажность почвы; коэффициент корреляции Спирмена; множественная регрессия; ГТК; почвенная текстура

## SOIL MOISTURE ESTIMATION BY RADAR DATA BASED ON MULTIPLE REGRESSION

**N. V. Rodionova**

**Abstract.** Regression models are constructed to estimate soil moisture based on the correlation of radar data with ground measurements. Two stations in Germany (Falkenberg and Gevenich), included in the ISMN (International Soil Moisture Network), have been selected for ground-based soil moisture measurements. Sentinel 1 satellite data is used as radar data. Multiple regressions with a determination coefficient up to 0.91 are constructed. It is proposed to use not only radar, but also meteorological data in regressions, which allows increasing the determination coefficient and reducing the regression standard error. For the possible spread of regressions obtained for one territory to another territory, two criteria are offered: the proximity of the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) and the similarity of the soil texture. As an example of using regressions, a station in Ryazan region is proposed.

**Keywords:** ground and satellite measurements; volume soil moisture; Spearman correlation coefficient; multiple regression; HTC; soil texture

### Введение

Задача оценки влажности почвы дистанционными (спутниковыми) методами остается актуальной вплоть до настоящего времени, особенно для обширной территории России.

Методы восстановления влажности почвы по радарным данным могут быть классифицированы на три типа:

- аналитические модели, подобные АИЕМ (Advanced Integrated Equation Model) [1];
- полуэмпирические модели (например, модели Oh [2] и Dubois [3]);
- чисто эмпирические модели (модели, основанные на регрессии [4]).

Данная работа посвящена построению регрессионных моделей на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями объемной влажности почвы. При наличии хорошей корреляции строится регрессия, позволяющая оценить по радарным данным объемную влажность почвы на определенной территории, а также на других территориях при близких параметрах текстуры почвы, напочвенного покрова и климатических условий. Во всемирной сети ISMN (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>) информация о наземных измерениях по станциям России ограничивается в лучшем случае 1998 годом. В данной работе рассмотрена корреляционная связь между наземными измерениями влажности почвы на двух станциях сети ISMN MOL-RAO Falkenberg (Германия) и TERENO Gevenich (Германия) и находящимися в открытом

доступе радарными данными Sentinel 1 (<https://earthdata.nasa.gov/>). Построены регрессионные модели и сделана попытка распространить множественные регрессии на станцию со схожими климатическими условиями и текстурой почвы в Рязанской области.

### Исходные данные

Станция Falkenberg имеет координаты 52.16694° с.ш., 14.12417° в.д. Состав почвы на глубине 0-30 см: насыщение 0.43 ( $\text{м}^3 \times \text{м}^{-3}$ ), глина – 6 %, песок – 73 %, ил – 21 %, organic carbon – 0.9 %, пастбища/сельхозугодья/трава. В наземные измерения входят осадки (Pr), температура воздуха (Ta), влажность почвы (sm) на глубине от 8 до 90 см, температура почвы (Ts) на глубине от 5 до 150 см.

В качестве радарных в работе использовались Sentinel 1 (S1) данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями (VV+VH) и пространственным разрешением 20 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>). Для Falkenberg угол обзора составлял ~35°. Предварительная обработка данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку. Коэффициент обратного рассеяния (КОР) определялся по среднему значению на профиле (3-8 точек) на исследуемом участке.

Станция Gevenich имеет координаты 50.9892° с.ш., 6.32355° в.д. Состав почвы на глубине 0-30 см: насыщение: 0.43, глина – 22 %, песок – 41 %, ил – 37 %, organic carbon – 0.74 %, пахотные земли, богарные. В наземные измерения входят температура воздуха, осадки, влажность и температура почвы на глубине 5, 20, 50 см.

В таблице 1 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена (ККС)  $\rho_s$  между КОР Sentinel 1 и наземными измерениями температуры воздуха (Ta), влажности почвы (sm) на глубинах 5, 8, 15 и 20 см и температуры почвы (Ts) на глубине 5 см для двух рассматриваемых наземных станций. Значения ККС определялись с помощью программы Attestat, находящейся в свободном доступе.

Таблица 1 – Коэффициент корреляции Спирмена между радарными данными и наземными измерениями температуры воздуха и почвы и влажности почвы для 2019 г.

| Falkenberg |                                    |                                    |                                    |                                   |
|------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|            | sm 0.08 м                          | sm 0.15 м                          | Ts 0.05 м                          | Ta                                |
| VV         | $\rho_s=0.69; p=1 \times 10^{-5}$  | $\rho_s=0.72; p=4 \times 10^{-6}$  | $\rho_s=-0.61; p=2 \times 10^{-4}$ | $\rho_s=-0.38; p=0.017$           |
| VH         | $\rho_s=0.37; p=0.02$              | $\rho_s=0.42; p=0.01$              | $\rho_s=-0.32; p=0.04$             | $\rho_s=-0.29; p=0.056$           |
| Gevenich   |                                    |                                    |                                    |                                   |
|            | sm 0.05 м                          | sm 0.2 м                           | Ts 0.05 м                          | Ta                                |
| VV         | $\rho_s=0.02; p=0,5$               | $\rho_s=-0.21; p=0,13$             | $\rho_s=0.26; p=0.08$              | $\rho_s=0.37; p=2 \times 10^{-3}$ |
| VH         | $\rho_s=-0.51; p=2 \times 10^{-3}$ | $\rho_s=-0.65; p=5 \times 10^{-5}$ | $\rho_s=0.71; p=5 \times 10^{-6}$  | $\rho_s=0.53; p=1 \times 10^{-3}$ |

### Множественная линейная регрессия

Наличие корреляции между наземными измерениями влажности почвы и значениями КОР позволяет построить регрессионные соотношения, определяющие вклад отдельных независимых переменных в вариации зависимой переменной. В зависимости от числа независимых переменных  $i$  регрессия бывает однофакторной ( $i=1$ ), двухфакторной ( $i=2$ ) и т.д. Регрессия вычисляется с помощью вкладки Excel 'Анализ данных'. Для оценки качества уравнения регрессии используются две величины: коэффициент детерминации  $R^2$  и стандартная ошибка регрессии  $Se_y$ , показывающая среднее расстояние, на которое наблюдаемое значение отклоняется от линии регрессии. Формула для 4-факторной регрессии:

$$Y = a + b \times x_1 + c \times x_2 + d \times x_3 + f \times x_4, \quad (1)$$

где  $y$  – зависимая переменная (sm-soil moisture,  $\text{м}^3 \times \text{м}^{-3} \times 100$ );  $a$  – константа, определяющая точку пересечения прямой с осью  $y$ ;  $x_1$ - $x_4$  – независимые переменные:  $x_1 = \sigma_{VV}^0$  (дБ) – КОР согласованной поляризации,  $x_2 = \sigma_{VH}^0$  (дБ) – КОР кросс-поляризации,  $x_3 = Ta$  (°C) – температура воздуха,  $x_4 = Pr$  (мм) – осадки.

Значения констант во множественной регрессионной модели (1), а также значения  $R^2$  и  $Se_y$  для Falkenberg, Gevenich приведены в таблице 2. Для Falkenberg приведены значения констант,  $R^2$  и  $Se_y$  при числе независимых переменных в регрессии от 1 до 4 и влажности почвы на глубине 8 см; для станции Gevenich – для регрессии с числом независимых переменных равным 3 и влажности почвы на глубине 5 см.

Таблица 2 – Значения констант в регрессионной модели

| i                            | a     | b    | c     | d     | f     | $R^2$ | $Se_y$ |
|------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Falkenberg, 2019 г., sm 8 см |       |      |       |       |       |       |        |
| 1                            | 38.3  | 1.8  | -     | -     | -     | 0.395 | 6.5    |
| 2                            | 39.74 | 1.73 | 0.12  | -     | -     | 0.397 | 5.49   |
| 3                            | 33.02 | 1.22 | -0.23 | -0.59 | -     | 0.82  | 3.02   |
| 4                            | 37.56 | 1.39 | -0.16 | -0.59 | -1.67 | 0.91  | 2.15   |
| Gevenich, 2019 г., sm 5 см   |       |      |       |       |       |       |        |
| 3                            | 12.08 | 1.23 | -1.1  | -0.43 | -     | 0.58  | 3.85   |

Для Falkenberg на рисунке 1 показаны графики значений объемной влажности почвы, полученные по наземным данным (sm\_8 см) и регрессионным соотношениям при разном числе параметров в регрессии от  $i=2$  (reg\_VV\_VH),  $i=3$  (reg\_VV\_VH-Ta) до  $i=4$  (reg\_VV\_VH-Ta\_Pr). Включение в регрессию метеоданных, помимо радарных, привело к значительному увеличению коэффициента детерминации  $R^2$  от 0.39 (параметры  $\sigma_{VV}^0$  и  $\sigma_{VH}^0$ ) до  $R^2=0.91$  (параметры  $\sigma_{VV}^0$ ,  $\sigma_{VH}^0$ , Ta, Pr).

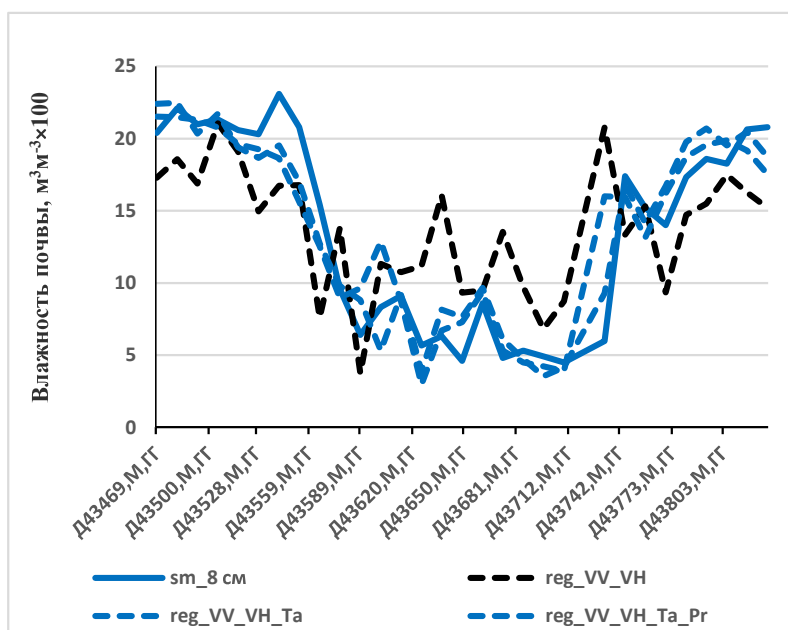


Рис. 1. Графики влажности почвы на глубине 8 см по наземным данным и по регрессионным соотношениям с числом переменных от 2 до 4 для Falkenberg

### Пример возможного применения регрессионных соотношений

Для того чтобы распространить регрессионные соотношения, полученные для одной территории, на другую, необходимо выполнить ряд условий. Среди основных это сходные климатические данные, сходные типы подстилающих поверхностей, близкая по составу почва, и другие. Наиболее часто используемым количественным показателем климата является гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) [5]). Для климатических условий России Селянинов разработал ГТК, характеризующий период со среднесуточными температурами воздуха больше  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , период вегетации. Определяется ГТК по формуле  $\text{ГТК} = 10 \times \Sigma P / \Sigma T$ , где  $\Sigma P$  – сумма осадков за период вегетации,  $\Sigma T$  – сумма среднесуточных температур за этот же период.

Для апробации полученных регрессионных моделей была выбрана на сайте ISMN станция сети RUSWET-AGRO Ryazanskaya#2 (Рязанская область), для которой есть данные измерений влажности почвы на глубине 20 см по 1998 год. Координаты станции 54.24°с.ш., 40.25°в.д. По значению ГТК в 2019 году (0.98) данная станция ближе к станции Gevenich (0.74), чем к станции Falkenberg (0.37), а по почвенной текстуре – к станции Falkenberg. Графики наземных измерений объемной влажности почвы на глубине 20 см на станции Ryazanskaya#2 для 1994-1998 гг. (апрель-октябрь) показаны на рисунке 2 слева, а графики, полученные для Ryazanskaya#2 по трехфакторной регрессии для Falkenberg и Gevenich, – на рисунке 2 справа.

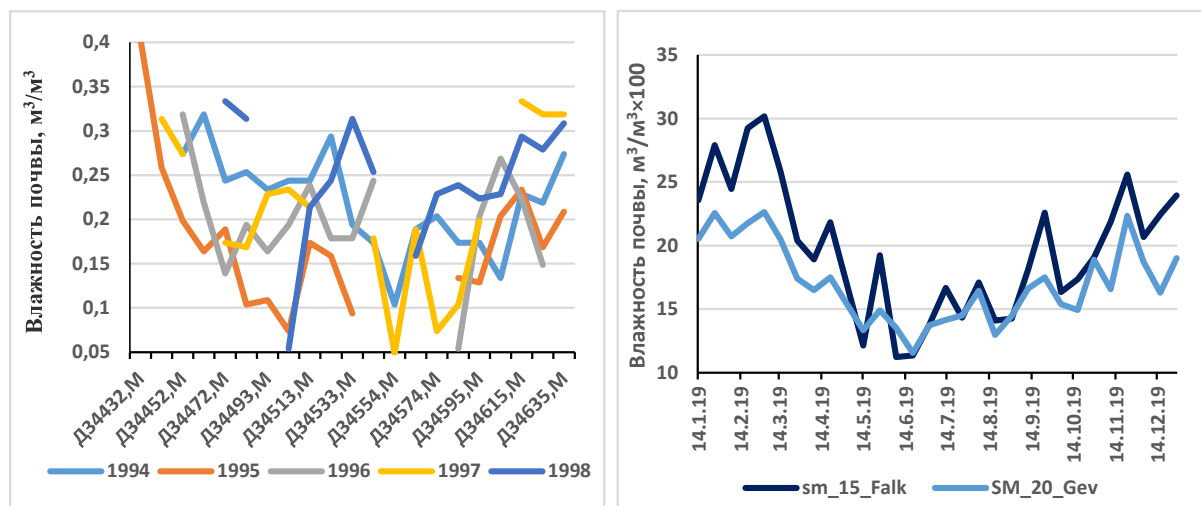


Рис. 2. Графики наземных измерений влажности почвы на глубине 20 см и по регрессионным соотношениям (глубина 15 см и 20 см) для станции Ryazanskaya#2

Ограниченная доступность наземных измерений влажности почвы для России (как правило, на коммерческой основе) не позволила сравнить полученные результаты с реальными.

### Заключение

Для оценки влажности почвы в работе построены регрессионные модели на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями влажности почвы. В качестве наземных измерений взяты данные за 2019 год для двух станций в Германии (Falkenberg и Gevenich), входящих во всемирную сеть по влажности почвы ISMN. В качестве радарных используются данные спутника Sentinel 1. Построены множественные линейные регрессии с коэффициентом детерминации до 0.91. Предложено использовать в регрессиях не только радарные, но и метеоданные (температуру воздуха и осадки), что позволило увеличить коэффициент детерминации с  $R^2 \sim 0.39$  (только радарные измерения) до  $R^2 \sim 0.91$  (радарные плюс метеоданные) и уменьшить стандартную ошибку регрессии с 5.4 до 2.1. Следует отметить, что использование осадков в качестве независимой переменной может привести к неоправданным скачкам в значениях влажности почвы при ее оценке по регрессии из-за учета осадков в виде суммарного количества за сутки. Для возможного распространения регрессий, полученных для одной территории, на другую территорию предложено использовать два критерия: близость значений ГТК и схожесть почвенной текстуры. Для примера использования полученных регрессий выбрана станция в Рязанской области Ryazanskaya#2, архивная информация которой по влажности почвы содержится в базе данных ISMN до 1998 года. Ограниченная доступность наземных измерений влажности почвы для России не позволила сравнить полученные результаты для станции Ryazanskaya#2 2019 года с реальными.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по теме «Космос».

### Список литературы

1. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations / K. Chen, T.-D. Wu, L. Tsang, Q. Li, J. Shi, A. Fung // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. Vol. 41. P. 90–101.
2. Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1992. Vol. 30. P. 370–381.
3. Dubois P., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1995. Vol. 33. P. 915–926.
4. The significance of soil properties to the estimation of soil moisture from C-band synthetic aperture radar / J. Beale, B. Snapir, T. Waine, J. Evans, R. Corstanje. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-2019-294>. Preprint. 28 June 2019.
5. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165-177.