

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ

© 2023 г. Н. В. Родионова*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
Московская обл., Фрязино, Россия*

**E-mail: rnv1948123@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

Задача оценки влажности почвы дистанционными (спутниковыми) методами остается актуальной вплоть до настоящего времени. 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 используются данные спутника Sentinel-1. Построены множественные регрессии с коэффициентом детерминации до 0.91. Предлагается 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 гидро-термального коэффициента Селянинова (ГТК) и схожесть текстуры почвы. По этим условиям выбраны две станции в Рязанской области и Калмыкии, архивная информация которых по влажности почвы содержится в базе данных ISMN до 1998 г. Каждая из выбранных станций удовлетворяет только одному из выбранных критериев.

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

DOI: 10.31857/S0205961423050068, **EDN:** XDTCXU

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:

– основанные на использовании аналитических моделей, подобных AIEM (Advanced Integrated Equation Model) (Wu et al., 2001; Chen et al., 2003); могут быть сложными и их трудно инвертировать;

– полуэмпирические модели, например, модели Oh (1992) и Dubois (1995), которые имеют форму, учитывающую некоторые электромагнитные свойства среды, но упрощены с помощью эмпирически полученных параметров;

– чисто эмпирические модели, такие как модели, основанные на регрессии (Beale et al., 2019).

Данная работа посвящена построению регрессионных моделей на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями объемной влажности почвы. При наличии высокой корреляции строится регрессия, позволяющая с той или иной точностью 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. Но есть проблема в том, что радарных данных с высоким пространственным разрешением в настоящее время имеется достаточное количество, а наземных измерений влажности почвы для территории России – только единичные локальные данные и, как правило, не в открытом доступе. Во всемирной сети ISMN (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>) информация о наземных измерениях по станциям России ограничивается в лучшем случае 1998 г. В августе 2022 г. появилась информация ISMN об обновлении данных российской сети Ru_CFR по 2021 г. для двух станций Федоровское (Тверская область). Правда, территории расположения обеих станций имеют древесный покров (NDVI ~ 0.9), что нивелирует возможность установить корреляцию радарных данных с влажностью почвы, поскольку сигнал радара взаимодействует как с кроной деревьев, так и с почвой (в зависимости от сплоченности леса и длины волны).

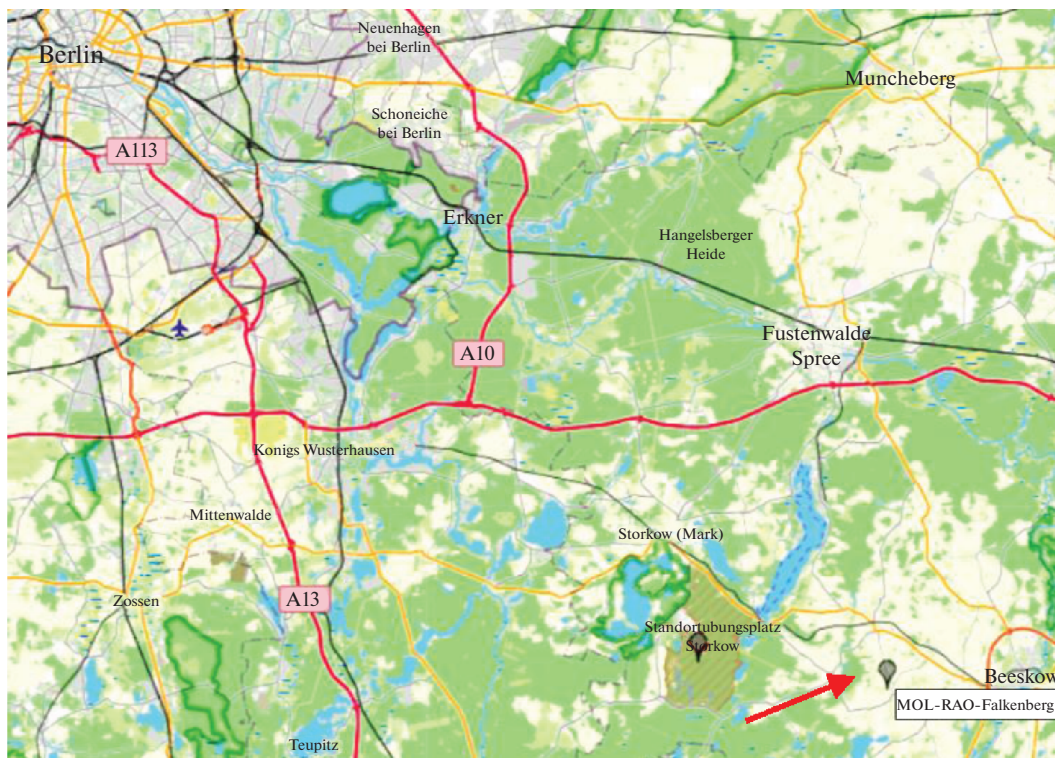


Рис. 1. Место расположения станции Falkenberg.

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 две станции со схожими климатическими условиями и текстурой почвы в Калмыкии и Рязанской области.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Falkenberg. Станция Falkenberg (Германия, 120 км к югу от Берлина) сети ISMN MOL-RAO имеет координаты 52.16694° с.ш., 14.12417° в.д. Расположение станции показано на рис. 1 (справа внизу, указано красной стрелкой). Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение 0.43 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), 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 8, 15, 30, 45 и 90 см, температура почвы (Ts) на глубине 5, 10, 15, 20, 30, 45, 50, 60, 90, 100, 120, 150 см.

В качестве радарных в работе использовались находящиеся в открытом доступе 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 S1Toolbox и позднее SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>). Для исследуемой территории 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.

На рис. 2 приведены графики наземных измерений влажности почвы на глубине 8 см и температуры воздуха, а также радарных измерений на исследуемом участке для 2018 и 2019 гг. (количество сеансов радарной съемки для каждого года $N = 30$). Данные по наземным измерениям приведены на дату и время пролета спутника Sentinel 1B над исследуемым участком (UTC 17.00). Основная шкала графиков показывает значения объемной влажности почвы в $\text{m}^3/\text{m}^3 \times 100$, температуру воздуха в °C, значения КОР в дБ, значения осадков в мм.

Gevenich. Станция сети ISMN TERENO Gevenich имеет координаты 50.9892° с.ш., 6.32355° в.д. (отмечена красной стрелкой на рис. 3). Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение: 0.43 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), глина – 22%, песок – 41%, ил – 37%, organic car-

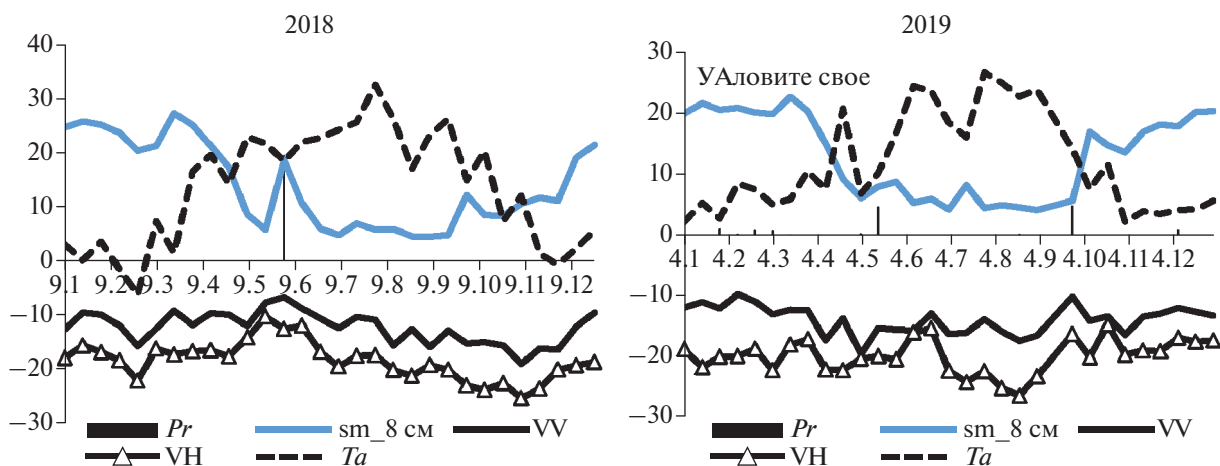


Рис. 2. Графики наземных и радарных измерений для Falkenberg в 2018 и 2019 гг.

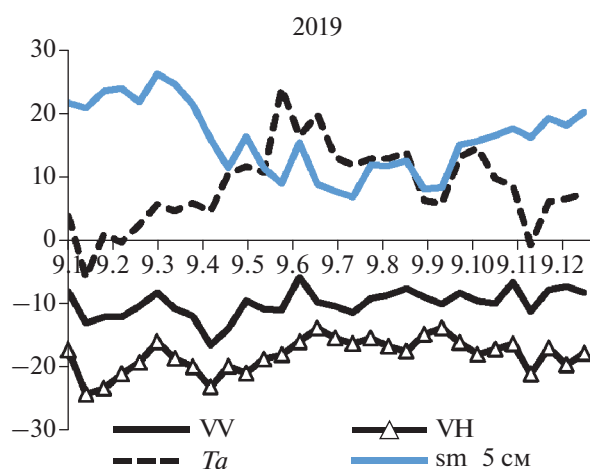
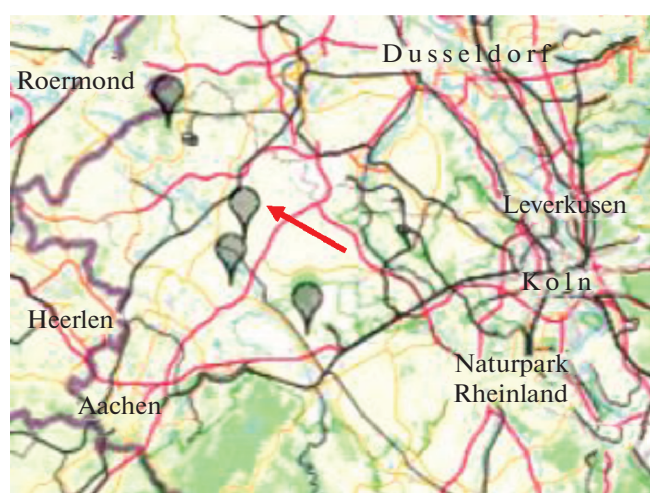


Рис. 3. Место расположения станции Gevenich (слева) и графики наземных и радарных измерений (справа).

воп – 0.74%, пахотные земли, богарные. В наземные измерения входят температура воздуха, осадки, влажность и температура почвы на глубине 5, 20, 50 см. Графики радарных данных (угол съемки 39°) и наземных измерений влажности почвы на глубине 5 см и температуры воздуха на время пролета спутника над исследуемой территорией (6 AM UTC) приведены на рис. 3 (справа).

В табл. 1 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена (ККС) ρ_s между КОР Sentinel-1 (p -уровень значимости коэффициента корреляции) и наземными измерениями температуры воздуха (Ta), влажности почвы (sm) на глубине 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.

Корреляция не является стабильной, и в разные годы для одного и того же профиля принимает разные значения. Так, для станции Falkenberg для 2018 г. отмечаем слабую корреляцию КОР с влажностью почвы и отсутствие корреляции с температурой воздуха и почвы. Для 2019 г. есть умеренная корреляция с влажностью почвы и температурой почвы для VV поляризации и слабая с температурой воздуха. Для Gevenich умеренная корреляция КОР кросс-поляризации с влажностью почвы и температурой воздуха и отсутствие корреляции КОР согласованной поляризации с влажностью почвы. Отметим, что в работе (Родионова, 2018) определялась корреляция между радарными данными и наземными измерениями температуры и влажности почвы для станции Gevenich за период 16.11.14–13.8.16.

Таблица 1. Коэффициент корреляции Спирмена (ККС) между радарными данными ($N = 30$) и наземными измерениями температуры воздуха и почвы и влажности почвы для 2018 и 2019 гг.

Falkenberg				
	sm_0.08 м	sm_0.15 м	Ts_0.05 м	Ta
2018 г.				
VV	$\rho_s = 0.32; p = 0,04$	$\rho_s = 0.33; p = 0.04$	$\rho_s = 0.16; p = 0.2$	$\rho_s = 0.11; p = 0.28$
VH	$\rho_s = 0.27; p = 0.07$	$\rho_s = 0.34; p = 0.03$	$\rho_s = 0.12; p = 0.26$	$\rho_s = 0.17; p = 0.19$
2019 г.				
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, 2019 г.				
	sm_0.05 м	sm_0.2 м	Ts_0.05 м	Ta
VV	$\rho_s = 0.02; p = 0.5$	$\rho_s = -0.21; p = 0,3$	$\rho_s = 0.26; p = 0.08$	$\rho_s = 0.37; p = 2 \times 10^{-3}$
VH	$\rho_s = -0.51; p = 2 \times 10^{-3}$	$\rho_s = -0.65; p = 5 \times 10^{-5}$	$\rho_s = 0.71; p = 5 \times 10^{-6}$	$\rho_s = 0.53; p = 1 \times 10^{-3}$

Значительное отличие ККС для Falkenberg и Gevenich в 2019 г. для согласованной поляризации скорее всего объясняется разной текстурой почвы для этих станций, а именно, содержанием глины и песка. Так, для Falkenberg содержание глины составляет 6%, песка – 73%, для Gevenich – глины 22%, песка – 41%. Текстура почвы влияет на КОР из-за изменений в диэлектрических свойствах почвы через влагоемкость текстурных составляющих почвы. Jackson и Schmutge (1989) нашли, что молекулы воды поглощаются частицами почвы и эффективно лишают подвижности (связывают) их диполи, препятствуя связанной воде взаимодействовать с сигналом радара. Песчаные почвы содержат более высокое количество свободной воды (free water), чем глинистая почва (Srivastava et al., 2006). Таким образом, коэффициент корреляции Спирмена между КОР и влажностью почвы выше для песчаных почв (Blumberg et al., 2000).

МНОЖЕСТВЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ

Наличие корреляции между наземными измерениями влажности почвы и значениями КОР позволяет построить регрессионные соотношения, определяющие вклад отдельных независимых переменных ($x_1 = \sigma_{VV}^0$ (дБ) – КОР согласованной поляризации, $x_2 = \sigma_{VH}^0$ (дБ) – КОР кросс-поляризации, $x_3 = Ta$ (°C) – температура воздуха, $x_4 = Pr$ (мм) – осадки) в вариации зависимой переменной (sm-soil moisture, $m^3 m^{-3} \times 100$). В зависимости от числа независимых переменных i ре-

грессия бывает однофакторной ($i = 1$), двухфакторной ($i = 2$) и т.д. Для определения наилучшей линии регрессии используют метод наименьших квадратов. Регрессия вычисляется с помощью вкладки Excel “Анализ данных”. Для оценки качества уравнения регрессии (близости рассчитанных по регрессии и фактических значений y) используются две величины: коэффициент детерминации R^2 (чем ближе R^2 к 1, тем выше качество регрессионной модели) и Se_y – стандартная ошибка регрессии, показывающая среднее расстояние, на которое наблюдаемое значение отклоняется от линии регрессии. При использовании регрессии в целях прогноза Se_y может быть более полезной, чем R^2 , поскольку дает понимание того, насколько точными будут прогнозы.

Формула для 4-х факторной регрессии:

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + fx_4, \quad (1)$$

где y – зависимая переменная; a – константа, определяющая точку пересечения прямой с осью y ; x_1-x_4 – независимые переменные.

Значения констант во множественной регрессионной модели (1), а также значения коэффициента детерминации и стандартной ошибки регрессии (COP) для двух станций Falkenberg, Gevenich приведены в табл. 2. Для станции Falkenberg приведены значения констант, R^2 и Se_y для 2019 г. при числе независимых переменных в регрессии от 1 до 4 и влажности почвы на глубине 8 см, а также для трех- и четырехфакторных регрессий для глубины почвы 15 см. Для станции Gevenich – для регрессии с числом независимых переменных равным 3 и влажности почвы на глубине 5 и 20 см.

Для Falkenberg двухфакторная регрессия ($i = 2$) с использованием КОР обеих поляризаций дала лишь малую прибавку (0.002) к коэффициенту детерминации однофакторной регрессии ($i = 1$) (использование КОР согласованной поляризации) из-за слабой корреляции КОР кросс-поляризации с наземными измерениями влажности почвы. При этом СОР уменьшилась на единицу. Если для регрессии использовать в качестве независимых переменных не только радарные данные, но и метеоданные, а именно, температуру воздуха и осадки, то коэффициент детерминации повышается, а СОР уменьшается. Так при трехфакторной регрессии ($i = 3$) добавление к радарным переменным температуры воздуха привело к увеличению R^2 до 0.82 и уменьшению СОР до 3. А использование еще и осадков ($i = 4$) привело к дальнейшему увеличению R^2 до 0.91 и уменьшению СОР до 2.15. Следует отметить, что учет осадков в виде суммарного количества за сутки, а не на час пролета, может привести к неоправданным скачкам в значениях влажности почвы при ее оценке по регрессии.

Сравнение трехфакторной регрессии (три переменные – σ_{VV}^0 , σ_{VH}^0 , Ta) для двух станций показало преимущество по R^2 для Falkenberg,

Для Falkenberg на рис. 4 показаны графики значений объемной влажности почвы ($\text{м}^3/\text{м}^3 \times 100$), полученные по наземным данным (sm_8 см) и по 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).

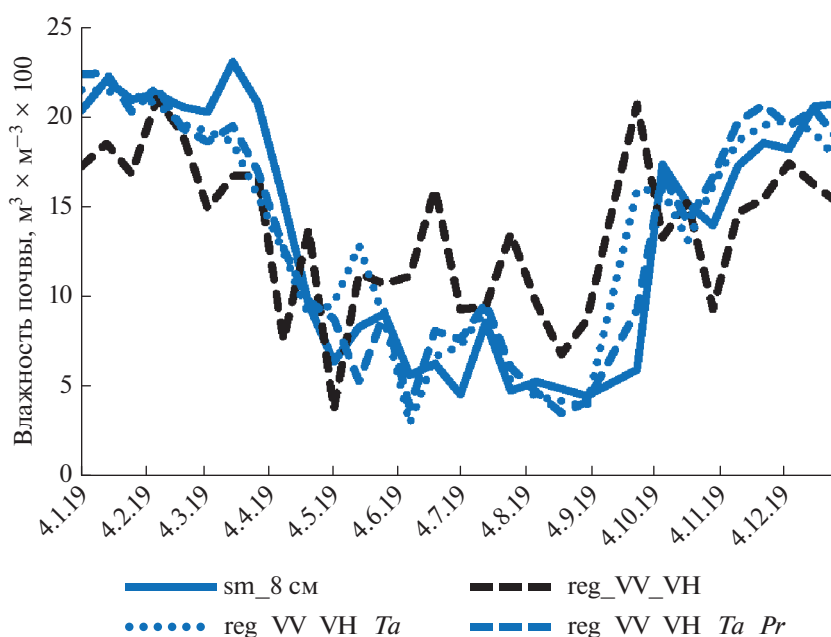


Рис. 4. Графики влажности почвы на глубине 8 см по наземным данным и по регрессионным соотношениям с числом переменных от 2 до 4 для Falkenberg.

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
sm_15 см							
3	33.45	1.19	–0.18	–0.59	–	0.81	3.2
4	38.45	1.37	–0.1	–0.59	–1.84	0.91	2.17
Gevenich, 2019 г., sm_5 см							
3	12.08	1.23	–1.1	–0.43	–	0.58	3.85
sm_20 см							
3	11.13	0.32	–0.6	–0.26	–	0.64	2.08

Включение в регрессию метеоданных, помимо радарных, привело к значительному увеличению коэффициента детерминации R^2 от 0.39 (параметры σ_{VV}^0 и σ_{VH}^0) до $R^2 = 0.91$ (параметры σ_{VV}^0 , σ_{VH}^0 , Ta , Pr). Средние значения и СКО отклонений наземных измерений объемной влажности почвы от полученных по регрессии для $i = 2$ равны, соответственно, 4.26 и 3.05, для $i = 3$ – 1.99 и 2.02 и для $i = 4$ – 1.63 и 1.1.

Таблица 3. Значения ГТК для исследуемых станций

Станция, год	Falkenberg, 2019	Gevenich, 2019	Калмыкия, 2020	Ряз. область 2019, 2020
ГТК (май–сентябрь)	0.37	0.74	0.226	0.98, 1.09

ПРИМЕРЫ ВОЗМОЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 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.

Одним из важнейших факторов является сходство климатических условий. Наиболее часто используемым количественным показателем климата является гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) (Селянинов, 1928; Селянинов, 1958). Для климатических условий России Селянинов разработал ГТК, характеризующий период вегетации, т.е. период со среднесуточными температурами воздуха больше 10°C. Определяется ГТК следующим образом: $ГТК = 10 \Sigma P / \Sigma T$, где ΣP – сумма осадков за вегетационный период, ΣT – сумма среднесуточных температур за этот же период. На основании значений ГТК выделяются природные зоны от пустыни до тайги. ГТК – переменчивая величина, многолетние тренды которой позволяют судить о перемене природной зональности (Шумова, 2021).

В качестве территорий для апробации полученных регрессионных моделей были выбраны на сайте ISMN станции России сети RUSWET-AGRO Kalmkskaya#1 (K1) и Kalmkskaya#2 (K2) (Калмыкия) и Ryazanskaya#2 (114b) (Рязанская область). Значения ГТК для рассматриваемых станций приведены в табл. 3.

Для станций в Калмыкии значение ГТК ближе к ГТК для станции Falkenberg. Для станции в Рязанской области значение ГТК ближе к ГТК для Gevenich.

Калмыкия. На сайте ISMN информация о наземных измерениях на двух станциях Калмыкии сети RUSWET-AGRO Kalmkskaya#1 (K1) и Kalmkskaya#2 (K2) ограничена периодом с 1987.05.08 до 1998.10.08. Координаты станций, соответственно, 46.4° с.ш., 43.63° в.д. и 46.4° с.ш., 43.65° в.д. Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение 0.45 (м³/м³), глина – 21%, песок – 37%, ил – 42%, растительность – трава. Наземные измерения включают влажность почвы на глубине 0–20 и 0–100 см. По ГТК станции в Калмыкии близки к станции Falkenberg, но по текстуре почвы – к станции Gevenich. Расположение станций в Калмыкии показано на рис. 5 (указатель – красная стрелка вверх слева). На рис. 5, б показаны гра-

фики наземных измерений влажности почвы на глубине 20 см для станции K2 с 1993 по 1998 гг. (месяцы апрель–октябрь) (для станции K1 наземные измерения влажности почвы ограничены июлем). Радарные данные для исследуемой территории представлены на рис. 5, в значениями КОР аппарата Sentinel-1A для 2020 г. Угол съемки 38°. Температура воздуха на момент пролета спутника над исследуемой территорией была взята в архиве погоды в аэропорту Элисты для 2020 г. на сайте gr5.ru (рис. 5, в).

Для станций в Калмыкии измерения влажности почвы проводились для глубины 20 см, поэтому воспользуемся регрессией для глубины почвы 15 см (Falkenberg) и для глубины почвы 20 см (Gevenich). Ранее выяснено, что для станций в Калмыкии значение ГТК близко к значению ГТК Falkenberg, а гранулометрический состав почвы близок к соответствующему параметру для Gevenich. Подставим в трехфакторные регрессии для Falkenberg и Gevenich значения КОР и температуры воздуха (σ_{VV}^0 , σ_{VH}^0 , Ta) для Калмыкии. На рис. 5, г показаны графики “восстановленной” объемной влажности почвы на станции Kalmkskaya#2 для 2020 г. на глубине 15 см по регрессии Falkenberg (sm_15_Falk) и на глубине 20 см по регрессии для Gevenich (sm_20_reg_Gev). Возможности сравнить полученные оценки влажности почвы для станции Kalmkskaya#2 для 2020 г. с реальными значениями нет. Сравнивая графики на рис. 5, б с графиками на рис. 5, г, можно отметить два момента: сезонный ход наземных измерений влажности почвы (апрель–октябрь) не противоречит полученному по регрессии для Falkenberg (близость климатических параметров); значения влажности почвы, “восстановленной” по регрессии, занижены относительно значений, полученных по наземным измерениям.

Рязанская область. Рассмотрим еще один пример использования регрессии для другой территории. Это станция ISMN Ryazanskaya#2 (114b) сети RUSWET-AGRO, координаты станции 54.24° с.ш., 40.25° в.д. В наличии данные о влажности почвы на глубинах 0–20 см и 0–100 см до 8.11.1998 г. Текстура почвы: глубина 0.00–0.30 м – насыщение 0.42 (м³/м³), глина – 8%, песок – 80%, ил – 12%, organic carbon – 0.58%. Сельхозугодья, неорошаемые.

Выбор данной станции обусловлен тем, что здесь схожая текстура почвы со станцией Falkenberg, но значение ГТК (2019 год, май–сентябрь) в 3 раза больше, чем для Falkenberg.

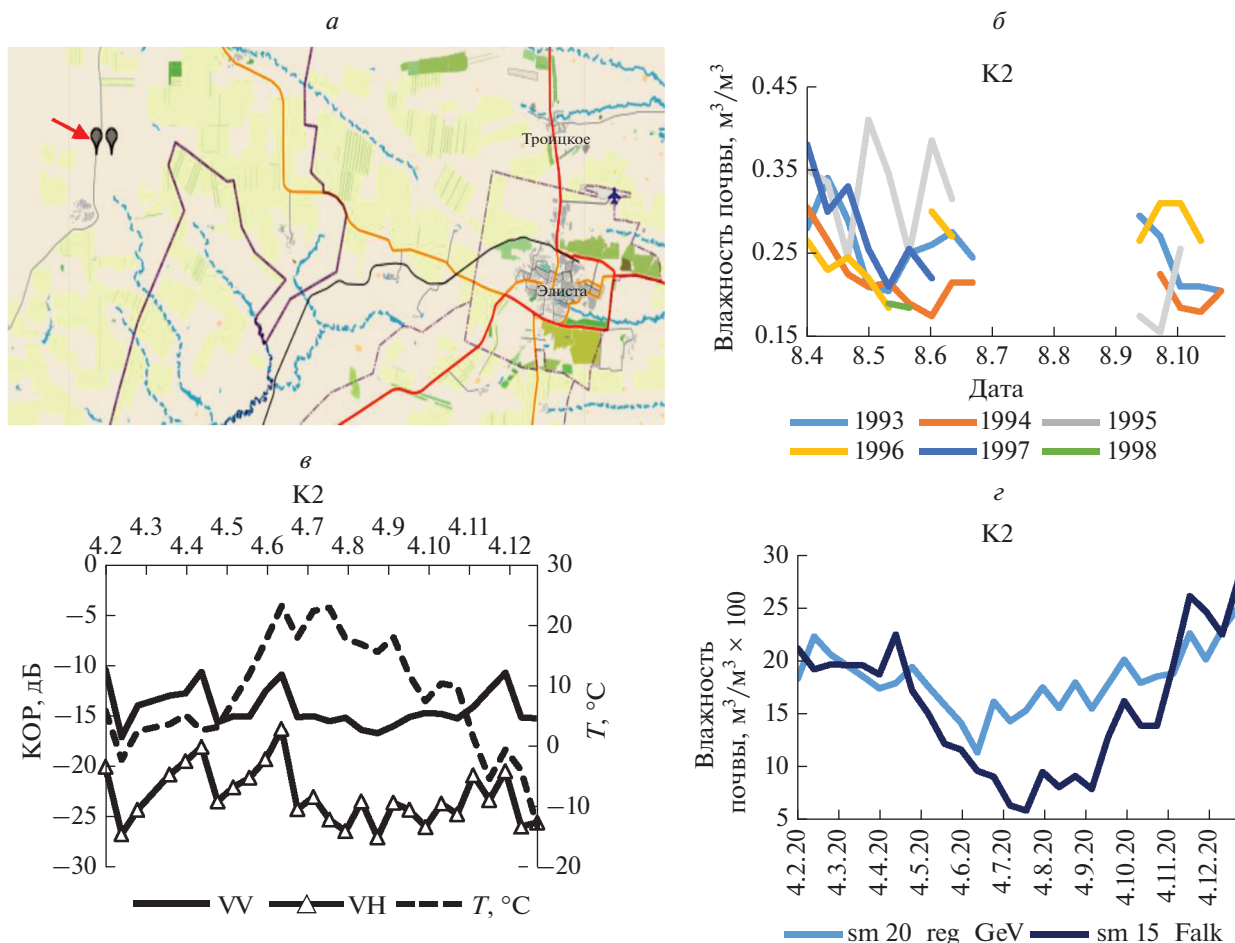


Рис. 5. Место расположения станций Kalmkskaya#1 и Kalmkskaya#2 (а), наземные измерения объемной влажности почвы на глубине 20 см на станции K2 за период 1993–1998 гг. (б), значения КОР и температуры воздуха для станции K2 в 2020 г. (в), графики значений влажности почвы (глубина 15 и 20 см) на станции K2 в 2020 г. по регрессионным соотношениям (з).

Станция Ryazanskaya#2 находится на расстоянии порядка 50 км к югу от Рязани (рис. 6, а, указатель – красная стрелка). Данные по температуре воздуха взяты на сайте gr5.ru для станции WMO_ID 27734 Старожилово.

Графики наземных измерений объемной влажности почвы на глубине 20 см на станции Ryazanskaya#2 для 1994–1998 гг. (апрель–октябрь) показаны на рис. 6, б. Результаты радарной съемки спутником S1A исследуемой территории (угол обзора 39°), а также температуры воздуха по измерениям на станции Старожилово на день и время пролета спутника показаны на рис. 6, в для 2019 г. Коэффициент корреляции Спирмена между радарными данными и температурой воздуха для 2019 года для согласованной поляризации равен $\rho_s = 0.59$ ($p = 3 \times 10^{-4}$) и для кросс-поляризации $\rho_s = 0.58$ ($p = 4 \times 10^{-4}$), $N = 29$.

Для станции Ryazanskaya#2 измерения влажности почвы проводились для глубины 20 см, по-

этому для оценки значений влажности почвы для данной станции в 2019 г. воспользуемся трехфакторной регрессией для Falkenberg, 2019, для глубины почвы 15 см (sm_15_Falk) и трехфакторной регрессией для Gevenich, 2019, для глубины почвы 20 см (sm_20_Gev). В формулы для регрессий подставим радарные данные для Ryazanskaya#2 и температуру воздуха для 2019 г. Полученные графики представлены на рис. 6, з.

Проверки полученных по регрессии графиков влажности почвы с реальными значениями нет, но сравнение с рис. 6, б (апрель–октябрь) показывает непротиворечивость полученных значений по регрессии с имеющимися архивными значениями. Возможность проверки ограничена дефицитом имеющихся в свободном доступе наземных измерений влажности почвы для территории России настоящего времени.

В данной работе критерием возможного расширения регрессии, полученной для одной

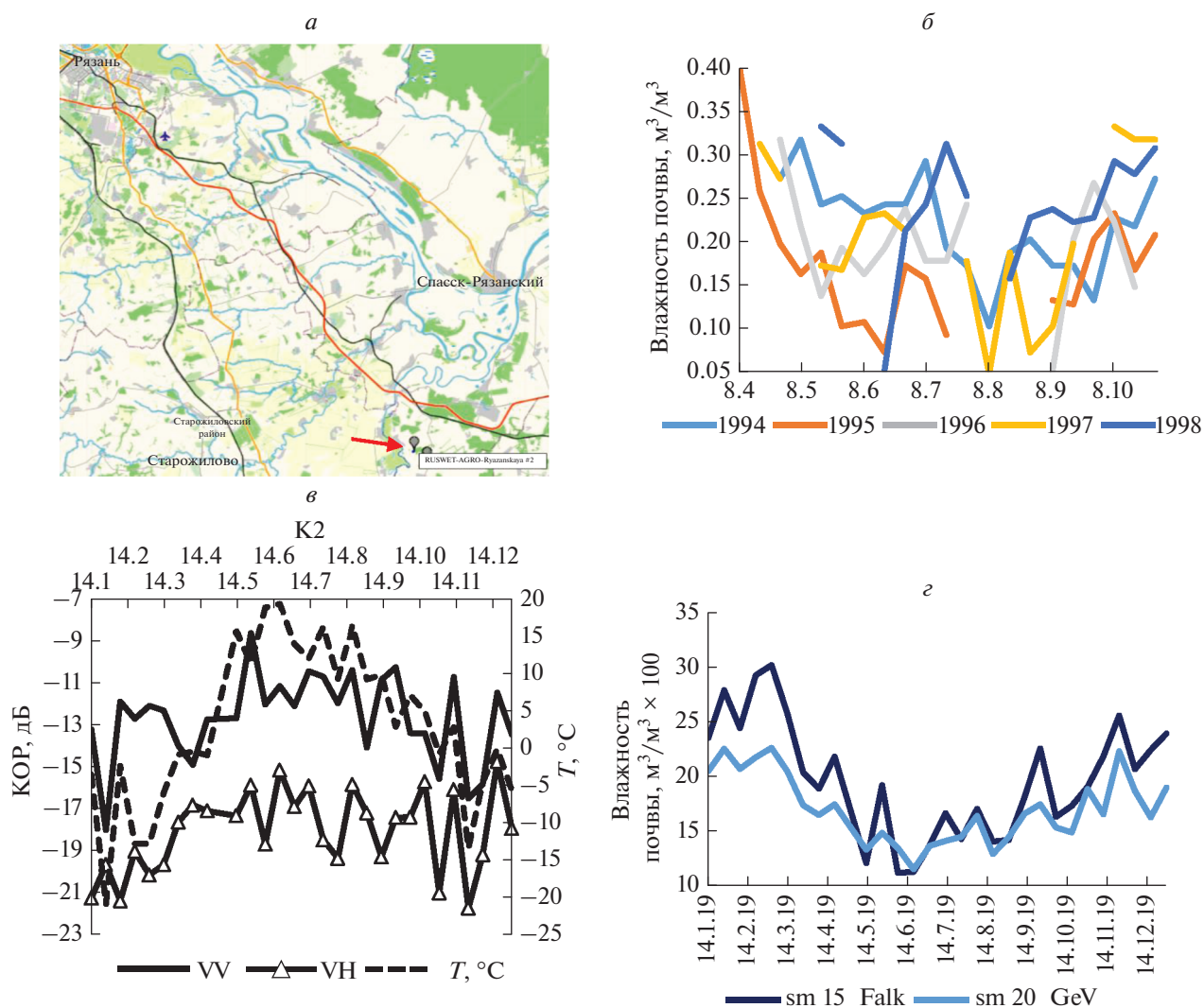


Рис. 6. Место расположения станции Ryazanskaya #2 (указано красной стрелкой внизу) (а), наземные измерения влажности почвы на глубине 20 см в 1994–1998 гг. (б), графики КОР и температуры воздуха для 2019 года (е), графики значений влажности почвы (глубина 15 и 20 см) по регрессионным соотношениям.

территории, на другую территорию, было выполнение двух условий: близости значений ГТК и схожести текстуры почвы. В одном случае – это близость ГТК (Калмыкия), и во втором – схожесть текстуры (Рязанская область). Доступность наземных измерений влажности почвы поможет выявить приоритетные условия для применения регрессионных моделей.

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 2018–2019 гг. 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 неоправданному скачкам в значениях влажности почвы при ее оценке по регрессии, при условии, что учет осадков осуществляется в виде суммарного количества за сутки, а не на час пролета. Для возможного распространения регрессий, полученных

для одной территории, для оценки влажности почвы на другой территории, предложено использовать два критерия: близость значений ГТК (гидротермального коэффициента Селянинова) и схожесть текстуры почвы. По этим критериям выбраны станции в Рязанской области и в Калмыкии, архивные данные которых по влажности почвы содержатся в базе ISMN до 1998 г. Однако, каждая из выбранных станций удовлетворяет только одному из выбранных критериев. Доступность наземных измерений влажности почвы в России является решающим моментом для проверки приведенных в данной работе регрессионных моделей. К сожалению, наземные измерения влажности почвы в России чаще всего доступны только на коммерческой основе.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Родионова Н.В. Корреляция радарных данных Sentinel-1 с наземными измерениями температуры и влажности почвы // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 32–42. <https://doi.org/10.31857/S020596140002354-0>

Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.

Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР. 1958. С. 7–14.

Шумова Н.А. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в

Республике Калмыкия // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27. № 4(89). С. 13–24. <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2021-4-13-24>

Beale J., Snapir B., Waine T., Evans J., Corstanje R. The significance of soil properties to the estimation of soil moisture from C-band synthetic aperture radar // <https://doi.org/>. Preprint. Discussion started: 28 June 2019. Author(s) 2019. CC BY 4.0 License.

<https://doi.org/10.5194/hess-2019-294>

Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokonenko A.D. Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer // Rem. Sens. Environm. 2000. V. 71. P. 309–319.

Chen K., Wu T.-D., Tsang L., Li Q., Shi J., Fung A. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. 41. P. 90–101.

Dubois P., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. 33. P. 915–926.

<http://ieeexplore.ieee.org/document/406677/>

<https://doi.org/10.1109/36.406677>

Jackson T.J., Schmugge T.J. Passive microwave remote-sensing system for soil moisture. Some supporting research // IEEE Trans. GRS. 1989. V. 27. P. 225–235.

Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992. 30. P. 370–381.

<https://doi.org/10.1109/36.134086>

Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R. How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture

Retrieval // SPIE Digital Library. 2006. 6410. Nov. 13–17. Paper No. 64100. P. 1–12.

Wu T.-D., Chen K., Shi J., Fung A. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. 39. P. 2040–2050.

Soil Moisture Estimation by Radar Data Based on Multiple Regression

N. V. Rodionova

Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Moscow Region, Fryazino, Russia

The task of soil moisture assessing by remote (satellite) methods remains relevant up to the present time. Regression models based on the correlation of radar data with ground measurements of soil moisture are constructed to assess soil moisture in the work. Ground-based measurements were taken at two stations in Germany (Falkenberg and Gevenich), which are part of the ISMN (International Soil Moisture Network) worldwide soil moisture data network. 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 coefficient of determination and reducing the standard error of regression. For the possible spread of regressions obtained for one territory to another territory, two criteria are selected: the proximity of the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient and the similarity of the soil texture. According to these conditions, two stations in the Ryazan region and in Kalmykia were chosen, whose archival information on soil moisture is contained in the ISMN database up to 1998. Each of the selected stations satisfies only one of the criteria.

Keywords: ground and satellite measurements, volume soil moisture, Spearman correlation coefficient, multiple regression, SCC, soil texture

REFERENCES

- Beale J., Snapir B., Waine T., Evans J., Corstanje R.* The significance of soil properties to the estimation of soil moisture from C-band synthetic aperture radar // <https://doi.org/10.5194/hess-2019-294>. Preprint. Discussion started: 28 June 2019. Author(s) 2019. CC BY 4.0 License.
- Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokonko A.D.* Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer // *Rem. Sens. Environm.* 2000. V. 71. P. 309–319.
- Chen K., Wu T.-D., Tsang L., Li Q., Shi J., Fung A.* Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. 41. P. 90–101.
- Dubois P., van Zyl J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995. 33. P. 915–926.
<https://doi.org/10.1109/36.406677>
<http://ieeexplore.ieee.org/document/406677/>.
- Jackson T.J., Schmugge T.J.* Passive microwave remote-sensing system for soil moisture. Some supporting research // *IEEE Trans. GRS.* 1989. V. 27. P. 225–235.
- Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.* An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1992. 30. P. 370–381.
<https://doi.org/10.1109/36.134086>
- Rodionova N.V.* Korrelyaciya radarnyh dannyh Sentinel 1 s nazemnymi izmereniyami temperatury i vlazhnosti pochvy [Sentinel 1 data correlation with ground measurements of soil moisture and temperature] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 4. P. 32–42. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S020596140002354-0>.
- Selyaninov G.T.* O sel'skohozyajstvennoj ocenke klimata [On agricultural climate assessment] // *Trudy po sel'skohozyajstvennoj meteorologii.* 1928. Vyp. 20. P. 165–177. (In Russian).
- Selyaninov G.T.* Principy agroklimaticheskogo rajonirovaniya SSSR [Principles of agro-climatic zoning of the USSR] // *Voprosy agroklimaticheskogo rajonirovaniya SSSR.* M.: MSKH SSSR. 1958. P. 7–14. (In Russian).
- Shumova N.A.* Kolichestvennye pokazateli klimata v prilozhenii k ocenke gidrotermicheskikh uslovij v Respublike Kalmykiya [Quantitative climate indicators in the assessment of hydrothermal conditions in the Republic of Kalmykia] // *Aridnye ekosistemy.* 2021. V. 27. № 4(89). P. 13–24. (In Russian).
<https://doi.org/10.24412/1993-3916-2021-4-13-24>
- Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R.* How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture
Retrieval // *SPIE Digital Library.* 2006. 6410. Nov.13–17. Paper No. 64100. P. 1–12.
- Wu T.-D., Chen K., Shi J., Fung A.* A transition model for the reflection coefficient in surface scattering // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2001. 39. P. 2040–2050.