

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ В РАЙОНЕ КУЛУНДИНСКОЙ СТЕПИ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ

Родионова Н.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино

Сделана оценка влажности почвы на станции SLAVGOROD сети ISMN по радарным данным Sentinel 1 на основе множественной регрессии для 2019 г. Регрессионные модели построены на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями влажности почвы, в качестве которых выбраны измерения на двух станциях сети ISMN в Германии. Построены множественные регрессии с коэффициентом детерминации до 0.91. В модели использованы помимо радарных, метеоданные, что позволило увеличить коэффициент детерминации и уменьшить стандартную ошибку регрессии. Для возможного распространения регрессий на другую территорию предложены два критерия: близость значений гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) и схожесть текстуры почвы.

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

SOIL MOISTURE ESTIMATION IN THE AREA OF THE KULUNDA STEPPE BY RADAR DATA BASED ON MULTIPLE REGRESSION

Rodionova N.V.

Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino

An assessment of soil moisture at the SLAVGOROD station of the ISMN network made using Sentinel 1 radar data based on multiple regression for 2019. Regression models base on the correlation of radar data with ground measurements of soil moisture. Measurements at two stations of the ISMN network in Germany selected as ground measurements. Multiple regressions with the coefficient of determination up to 0.91 are constructed. The model uses not only radar, but also meteorological data, which allowed increase the coefficient of determination and reduce the standard error of regression. Two criteria proposed for the possible spread of regressions to another territory: the proximity of the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient and the similarity of the soil texture.

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

Введение. Методы восстановления влажности почвы по радарным данным (РД) можно классифицировать на три типа:

- основанные на использовании аналитических моделей [1, 2]; могут быть сложными и их трудно инвертировать;
- полуэмпирические модели, например, модели Oh [3] и Dubois (1995) [4], учитывающие некоторые электромагнитные свойства среды, но упрощенные с помощью эмпирически полученных параметров;
- чисто эмпирические модели, такие как модели, основанные на регрессии [5].

В данной работе рассматривается построение и возможное использование регрессионных моделей на основе корреляции РД с наземными измерениями объемной ВП. При наличии высокой корреляции строится регрессия, позволяющая с той или иной точностью оценить по РД объемную ВП на определенной территории, а также на других территориях при близких параметрах текстуры почвы, напочвенного покрова и климатических условий. Для построения регрессии требуются наземные измерения ВП и РД на исследуемую территорию. РД с высоким пространственным разрешением (ПР) имеются в открытом доступе на территорию России, однако наземных измерений ВП – только единичные локальные данные и, как правило, не в открытом доступе. Во всемирной сети данных по наземным измерениям ВП ISMN

(International Soil Moisture Network) (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at>) информация о наземных измерениях параметров почвы на станциях России ограничивается в лучшем случае 1998 годом.

Регрессионная модель. В результате для построения регрессионных моделей были выбраны две станции сети ISMN MOL-RAO Falkenberg и TEREÑO Gevenich в Германии с разной текстурой почвы. В качестве РД использовались находящиеся в открытом доступе (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) 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>). Предварительная обработка данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

Станция Falkenberg (120 км к югу от Берлина) имеет координаты 52.16694° с.ш., 14.12417° в.д. Расположение станции показано на рисунке 1 (указано красной стрелкой). Состав почвы на глубине 0-30 см: насыщение 0.43 ($\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$), 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 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.

Координаты станции Gevenich 50.9892° с.ш., 6.32355° в.д. (отмечена красной стрелкой на рисунке 1). Состав почвы на глубине 0-30 см: насыщение: 0.43 ($\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$), 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.

Графики коэффициента обратного рассеяния (КОР) (дБ) VV и VH поляризаций (угол съемки $\approx 35^\circ \div 39^\circ$) и наземных измерений объемной влажности почвы sm ($\text{м}^3/\text{м}^3$) на глубине 8 см для Falkenberg и 5 см для Gevenich и температуры воздуха Ta ($^\circ\text{C}$) на время пролета спутника над исследуемыми территориями в 2019 г приведены на рисунке 2.



Рис. 1. Место расположения станций Falkenberg и Gevenich.

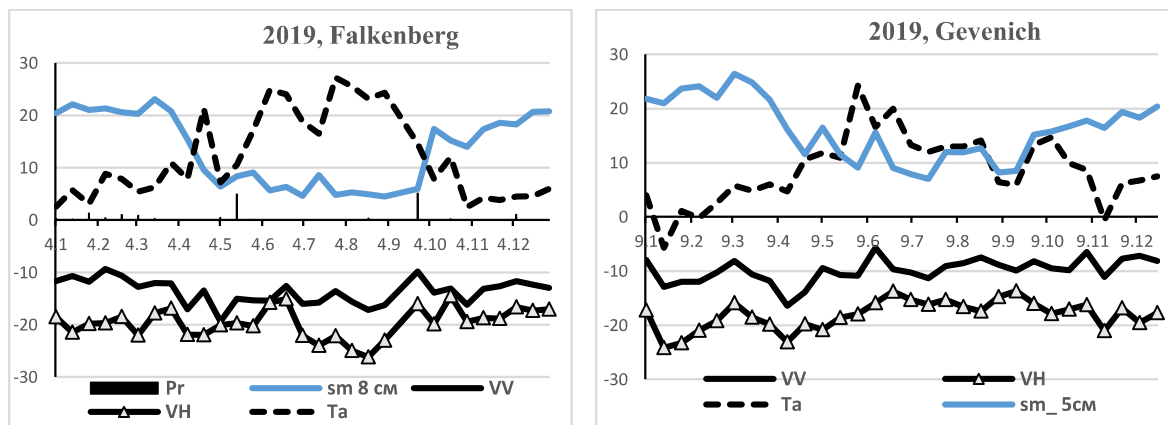


Рис. 2. Графики наземных и радарных измерений для Falkenberg и Gevenich в 2019 г.

В таблице 1 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена (ККС) ρ_s между КОР S1 и наземными измерениями температуры воздуха, влажности почвы на глубине 5, 8, 15 и 20 см и температуры почвы (T_s) на глубине 5 см для двух рассматриваемых станций. Значения ККС определялись с помощью программы Attestat, находящейся в открытом доступе.

Табл. 1. ККС между КОР (N=30) и наземными измерениями T_a и T_s и ВП для 2019 г.

Falkenberg				
	sm_0.08 м	sm_0.15 м	T_s 0.05 м	T_a
VV	$\rho_s=0.69$; $p=1*10^{-5}$	$\rho_s=0.72$; $p=4*10^{-6}$	$\rho_s=-0.61$; $p=2*10^{-4}$	$\rho_s=-0.38$; $p=0.017$
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	T_s 0.05 м	T_a
VV	$\rho_s=0.02$; $p=0,5$	$\rho_s=-0.21$; $p=0,13$	$\rho_s=0.26$; $p=0.08$	$\rho_s=0.37$; $p=2*10^{-3}$
VH	$\rho_s=-0.51$; $p=2*10^{-3}$	$\rho_s=-0.65$; $p=5*10^{-5}$	$\rho_s=0.71$; $p=5*10^{-6}$	$\rho_s=0.53$; $p=1*10^{-3}$

Значительное отличие ККС для Falkenberg и Gevenich в 2019 году для согласованной поляризации скорее всего объясняется разной текстурой почвы для этих станций, а именно, содержанием глины и песка. Корреляции между КОР и влажностью почвы выше для песчаных почв из-за большего содержания свободной воды [6].

Наличие умеренной корреляции между наземными измерениями ВП и значениями КОР позволяет построить регрессионные соотношения, определяющие вклад отдельных независимых переменных. В регрессионном соотношении, помимо РД, предлагается использовать в качестве независимых переменных метеоданные: температуру воздуха и осадки. Тогда формула для 4-х факторной регрессии такова:

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

где y -зависимая переменная; a - константа; x_1 - x_4 - независимые переменные ($x_1=\sigma^0_{VV}$ (дБ) – КОР VV поляризации, $x_2=\sigma^0_{VH}$ (дБ) – КОР VH поляризации, $x_3=T_a$ (°C)- температура воздуха, $x_4=Pr$ (мм)- осадки) в вариации зависимой переменной (sm -soil moisture, $m^3*m^{-3}*100$).

Значения констант в (1) приведены для обеих станций в [7]. 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 и стандартная ошибка регрессии Se_y , 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. Так, для станции Falkenberg изменение R^2 и Se_y при изменении числа независимых переменных в (1) от 1 до 4 такие: R^2 — 0.395, 0.397, 0.82, 0.91; Se_y —6.5, 5.5, 3.03, 2.15. Увеличение в 2 раза R^2 и одновременное уменьшение в 2 раза Se_y произошло при добавлении в (1) метеоданных.

Пример возможного использования регрессионной модели. 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 текстуре почва, и другие.

Одним из важнейших факторов является схожесть климатических условий. Наиболее часто используемым количественным показателем климата является гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) [8], [9]. Определяется ГТК так: $ГТК=10*\Sigma P/\Sigma T$, где ΣP - сумма осадков за вегетационный период (период со среднесуточными температурами воздуха больше 10°C), ΣT - сумма среднесуточных температур за этот же период. Значения ГТК (май-сентябрь) для станций Falkenberg и Gevenich в 2019 году равно, соответственно, 0.37 и 0.74.

Славгород. На сайте ISMN информация о наземных измерениях на станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD ограничена периодом с 1972 по 1985 гг. Координаты станции 52.97° с.ш., 78.65° в.д. Состав почвы (0-30 см): насыщение 0.45 (m^3*m^{-3}), глина-21%, песок-

37%, ил-42%, растительность-трава. Наземные измерения ВП на глубине 0- 10 см и 0- 100 см. На рисунке 3 показано расположение станции и приведены графики наземных измерений влажности почвы на глубине 0-10 см с 1982 по 1985 гг. (месяцы апрель-октябрь).

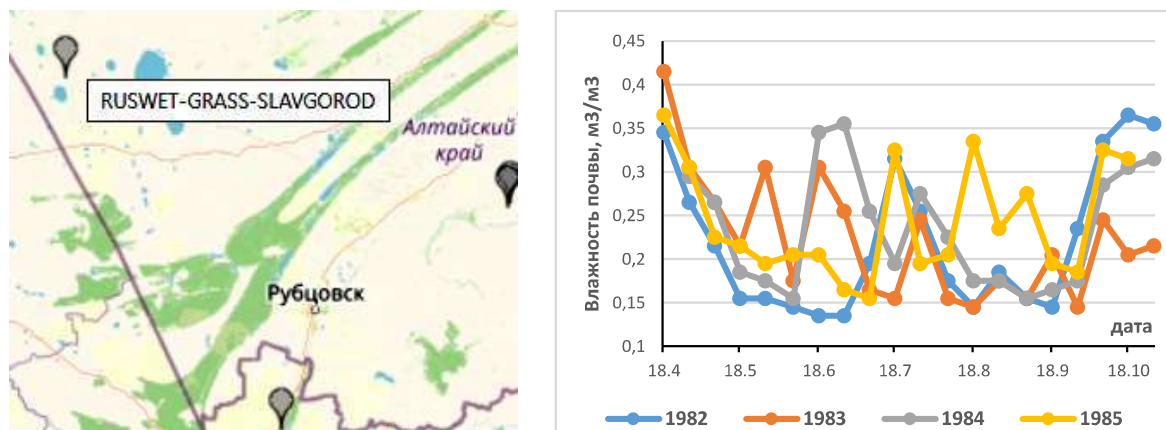


Рис. 3. Место расположения станции и графики наземных измерений влажности почвы на глубине 0-10 см с 1982 по 1985 гг. (апрель-октябрь) для станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD.

Радарные данные для исследуемой территории представлены значениями измерений аппаратом S1B для 2019 г. по находящимся в открытом доступе данным спутника на сайте Earthdata. Угол съемки $\sim 37^\circ$. Значения КОР для станции для 2019 г. представлены на рисунке 4 (N=23, N-число сеансов съемки). На рисунке 4 приведен также график температуры воздуха для станции Славгород по данным метеостанции Славгород WMO ID 29915 на сайте rp5.ru. Температура взята на момент пролета спутника над исследуемой территорией.

В таблице 2 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена (ККС) между КОР и температурой воздуха (T_a) и значения ГТК для 2019 года для станции Славгород.

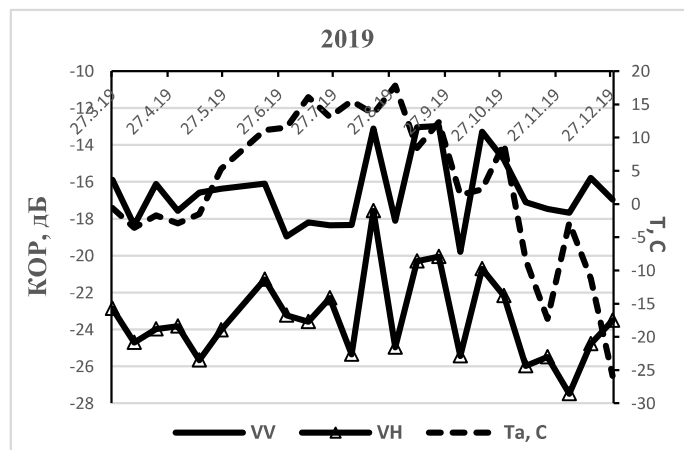


Рис. 4. Графики значений КОР и температуры воздуха для станции SLAVGOROD.

Табл. 2. ККС между КОР и T_a и значение ГТК для станции Славгород.

	VV	VH	ГТК	N
2019	$\rho_s=-0.04$; $p=0.43$	$\rho_s=0.436$; $p=0.02$	0.54	23

Значение ГТК для Славгорода в 2019 году находится между значениями ГТК для Gevenich и Falkenberg. Значения текстуры почвы более близки к Gevenich. Воспользуемся 3-х факторной регрессией Gevenich sm-5 см и Falkenberg sm -8 см (2019 год) для оценки влажности почвы для Славгорода. Подставив значения КОР и T_a , показанные на рисунке 4, в формулу (1) для трехфакторной регрессии, получаем графики оценки значений объемной влажности почвы в приповерхностном слое на станции Славгород в 2019 году по регрессии для Gevenich (глубина почвы 5 см) и по регрессии для Falkenberg (глубины 8 см) (рисунок 5, слева).

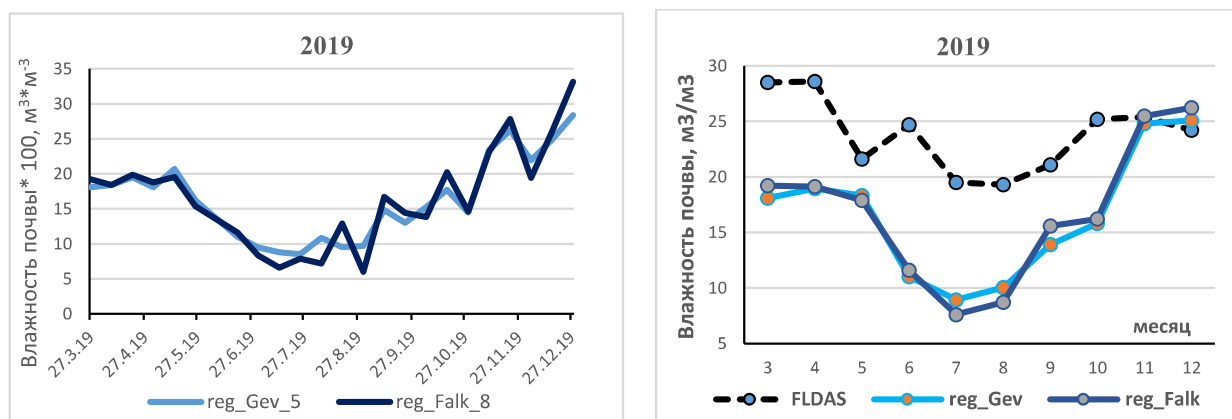


Рис. 5. Графики значений объемной влажности почвы (глубина 5 см и 8 см) на станции Славгород в 2019 году по регрессионной модели.

При отсутствии возможности сравнить полученные оценки влажности почвы по регрессии с наземными измерениями, предлагается сравнить графики на рисунке 5 с данными модели FLDAS (Famine Land Data Assimilation System) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/fldas>) для станции Славгород. FLDAS обычно используется для получения информации о многих переменных, связанных с климатом, включая содержание влаги в почве, влажность воздуха, испарение, среднюю температуру почвы, общую норму осадков и т.д., в полусухих районах [10]. Модель поверхности суши Noah 3.6 от FLDAS [11] основана на наземных и спутниковых данных об осадках CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data) [12] и современном ретроспективном анализе метеорологического воздействия MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application Version 2) [13]. Ежемесячные результаты моделирования FLDAS за более чем 30 лет с 1982 года по настоящее время находятся в открытом доступе. Дополнительной особенностью FLDAS является то, что эти данные могут быть визуализированы с помощью онлайн-инструмента Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>).

Предварительно выясним наличие корреляции между наземными измерениями ВП в Славгороде за период 1982-1985 гг. и данными модели FLDAS (продукт Model FLDAS_NOAH01_C_GL_M v001, ежемесячные значения объемной ВП (м³/м³) на глубине 0-10 см, $PP=0.1^\circ$). ККС между ежемесячными значениями ВП по наземным и модельным FLDAS данным за 1982-1985 гг. ($N=28$) равен $\rho_s=0.77$ ($p=1 \cdot 10^{-7}$). На рисунке 6 показаны графики ежемесячных значений объемной влажности почвы по наземным измерениям на станции Славгород и по модели FLDAS для глубины (0-10 см) за 1982-1985 гг. (апрель - октябрь). Среднее отклонение значений составляет 0.032, СКО~0.02.

Значение корреляции наземных измерений объемной ВП и среднемесячных значений, полученных по модели FLDAS для станции Славгород, дает возможность использовать модельные данные FLDAS для оценки ВП для станции Славгород настоящего времени. На рисунке 7 приведен график значений ВП для станции Славгород по данным модели FLDAS для 2000, 2008, 2012, 2018-2021 гг. (апрель-октябрь). Абсолютный минимум ВП принадлежит августу 2012 года, максимум – апрелю 2018 года.

Для данного региона Алтайского края годы 2000, 2008, 2012 и 2020 отличались минимальными значениями NDVI с абсолютным минимумом в 2012 году [14]. На рисунке 8 приведены карты усредненных за июль значений NDVI для района Славгорода для 2012 года и для сравнения для 2018 года. Карты получены на основе измерений аппаратом MODIS спутника Terra и представлены в системе анализа и визуализации данных Giovanni ($PP=0.05^\circ$, продукт MOD13C2 v006). Красной звездочкой на картах отмечено положение тестового участка в Славгороде.

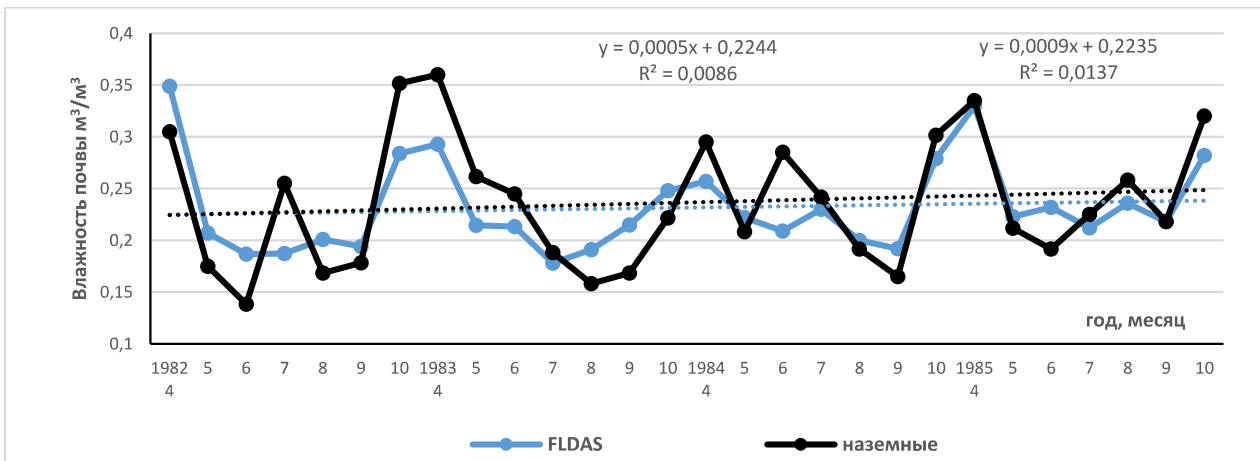


Рис. 6. Графики ежемесячных значений объемной влажности почвы по наземным измерениям на станции Slavgorod и по модели FLDAS для глубины (0-10 см) за 1982-1985 гг. (апрель - октябрь).

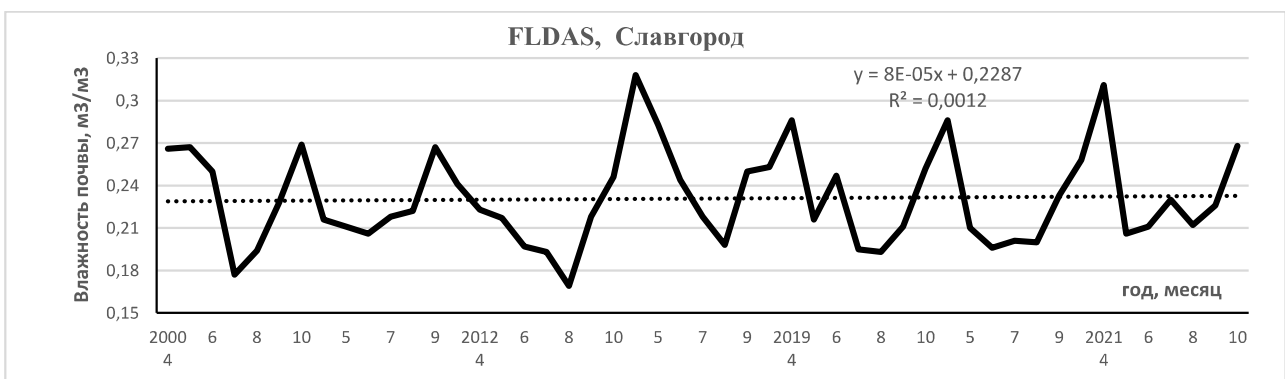


Рис. 7. График значений ВП для станции Славгород по данным модели FLDAS для 2000, 2008, 2012, 2018-2021 гг. (апрель-октябрь).

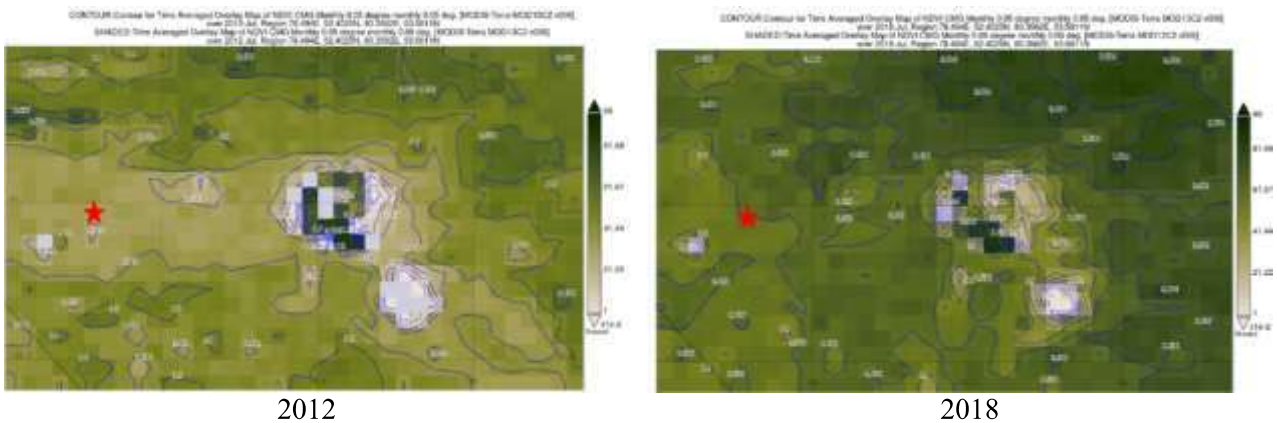


Рис. 8. Карты значений NDVI для июля 2012 и 2018 гг. для района Славгорода.

Сравнение графиков оценки среднемесячных значений ВП по регрессионной модели и по модели FLDAS для Славгорода в 2019 году показано на рисунке 5 (справа). Среднее отклонение для разности значений по абсолютной величине и СКО равны, соответственно, 7.46 и 4.38. Максимальные отклонения приходятся на летние месяцы. По радарной регрессии получаются заниженные значения ВП в сравнении с модельными FLDAS. ККС между значениями ВП по регрессии и значениями ВП, полученными по модели FLDAS, равен 0.71 ($p=1 \cdot 10^{-5}$) для регрессии reg_Gev и $\rho_s=0.75$ ($p=2 \cdot 10^{-5}$) для reg_Falk .

Итак, для оценки ВП для Славгорода по регрессионной модели, полученной для другой территории, требуется соблюдение ряда условий. Оценка значений ВП по регрессии получилась заниженной относительно наземных измерений, что показано, при отсутствии в открытом доступе наземных измерений ВП для данной станции, с помощью модели FLDAS.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *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.
- [2] *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.
- [3] *Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.* An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces// *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 1992. 30. P. 370-381. DOI:10.1109/36.134086.
- [4] *Dubois P., van Zyl J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars// *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995. 33. P. 915-926.
- [5] *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 // Preprint. Discussion started: 28 June 2019. Author(s) 2019. CC BY 4.0 License. DOI:10.5194/hess-2019-294.
- [6] *Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokononko A.D.* Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer // *Rem. Sens. Environm.* 2000. V. 71. P. 309-319.
- [7] *Родионова Н.В.* Оценка влажности почвы по радарным данным на основе множественной регрессии // *ИЗК, 2023* (в печати).
- [8] *Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // *Труды по сельскохозяйственной метеорологии.* 1928. Вып. 20. С. 165-177.
- [9] *Селянинов Г.Т.* Принципы агроклиматического районирования СССР // *Вопросы агроклиматического районирования СССР.* М.: МСХ СССР. 1958. С. 7-14.
- [10] *McNally A., Arsenault K., Kumar S. et al.* A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications // *Scientific Data.* 2017. 4. 170012. DOI:10.1038/sdata.2017.12.
- [11] *Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y., et al.* Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2003.108. 8851. DOI:10.1029/2002JD00 3296.
- [12] *Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Michaelsen J.* The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes// *Sci. data.* 2015. 2. 150066.
- [13] *Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K.* The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *J.Clim.* 2017.30(14). P. 5419-5454.
- [14] *Плуталова Т.Г., Романов А.Н.* Анализ процессов аридизации территорий в Западной Сибири и Центральной Азии на основе спутниковых и наземных данных // *Материалы 20-й Межд. конф. «Совр. пробл. ДЗЗ из космоса».* Электр. сб. матер. конф. ИКИ РАН. М., 2022. С. 328. DOI:10.21046/20DZZconf-2022a.