

**ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ И МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПО
МОДЕЛИ FLDAS И СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ НА
ПРИМЕРЕ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА ПЕРИОД 2000-2023 ГГ.**

**ASSESSMENT OF SEASONAL AND INTERANNUAL VARIATIONS IN SOIL MOISTURE
USING THE FLDAS MODEL AND THE RELATIONSHIP OF VARIATIONS WITH
CLIMATIC CHANGES ON THE EXAMPLE OF THE ORENBURG REGION FOR THE
PERIOD 2000-2023**

Родионова Н.В.
Rodionova N.V.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
Фрязино, Московская область, Россия
Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino, Moscow region, Russia

E-mail: rnv1948123@yandex.ru

Аннотация. В работе определены сезонные и межгодовые вариации влажности верхнего слоя почвы, определенной по модели FLDAS, и связь вариаций с климатическими изменениями для четырех участков в Оренбургской области за период 2000-2023 гг.: в Курманаевском районе, Соль-Илецком, участке «Буртинской степи», Домбаровском районе. Климатические изменения определяются по гидротермическому коэффициенту Селянинова (ГТК) за вегетационный период май-сентябрь. Отрицательный тренд суммы осадков RR (май-сентябрь) при незначительных вариациях суммы среднесуточных температур T_a за 2000-2013 гг. привели к снижению за последние 10 лет среднего значения RR и ГТК в 1,65 раз в сравнении с периодом 2000-2013 гг., что свидетельствует об ухудшении влагообеспеченности территорий. Показана тесная связь между значениями влажности почвы (ВП) по модели FLDAS и наземными измерениями ВП (коэффициент корреляции больше 0,7). Тренд межгодовых значений ВП сходен с трендом ГТК и RR от умеренной до тесной связи между метеоданными и ВП. Направление тренда поменялось с отрицательного (2000-2013 гг.) на слабо положительное за последние 10 лет. Абсолютный минимум межгодовых значений ВП по модели FLDAS принадлежит 2010 году, как и для ГТК и RR. Для Курманаевского района отмечены наибольшие межгодовые значения ГТК, RR, ВП и наименьшие T_a . Тесная связь между ГТК и ВП позволила построить регрессионное соотношение зависимости ВП от метеоданных.

Ключевые слова: гидротермический коэффициент Селянинова, влажность почвы, модель FLDAS, межгодовые вариации, корреляция, тренд.

Abstract. The paper identifies seasonal and interannual variations in the upper layer soil moisture content, determined by the FLDAS model, and the relationship of variations with climatic changes for four sites in the Orenburg region: in the Kurmanaevsky district, Sol-Iletsky, the Burtinskaya Steppe site, Dombarovsky district, for the period 2000-2023. Climatic changes are determined by the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) for the growing season May-September. The negative trend in the amount of precipitation RR (May-September) with minor variations in the sum of average daily temperatures for 2000-2013 led to a decrease in the average value of RR and HTC by 1.65 times over the past 10 years compared to the period 2000-2013, which indicates a deterioration in the moisture supply of territories. It is shown a close relationship between the values of soil moisture (sm) according to the FLDAS model and ground measurements (the correlation coefficient is greater than 0.7). The trend of interannual values of sm is similar to the trend of HTC and RR with a moderate to close correlation between meteorological data and sm. The trend direction has changed from negative (2000-2013) to slightly positive over the past 10 years. The absolute minimum of the interannual values of the sm according to the FLDAS model belongs to 2010, as well as for the HTC and RR. The highest interannual values of HTC, RR, sm and the lowest T_a belong to Kurmanayevsky district. The close relationship between the HTC and the sm allowed to build a regression relationship of sm dependence on meteorological data.

Key words: Selyaninov hydrothermal coefficient, soil moisture, FLDAS model, interannual variations, correlation, trend.

В данной работе на примере нескольких районов Оренбургской области прослеживается динамика сезонных и межгодовых изменений влажности верхнего слоя почвы, определяемой по модели FLDAS, и связь этих изменений с вариациями климатических условий за период 2000-2023 гг.

Климатические условия в районе исследования

В качестве исследуемых территорий были выбраны четыре района Оренбургской области (рисунок 1, отмечены красной звездочкой): Курманаевский район в западной части Оренбургской области с обширными площадями, занятыми посевами яровой пшеницы; Соль-Илецкий район в южной части Оренбургской области, известный обширными арбузными полями; Буртинская степь, являющаяся частью заповедника “Оренбургский”, находящаяся в юго-восточной части Беляевского района; Домбаровский район в юго-восточной части Оренбургской области с посевами яровой пшеницы, подсолнечника (https://сельхозпортал.рф/analiz-posevnyh-ploshhadej/?region_id=2246).

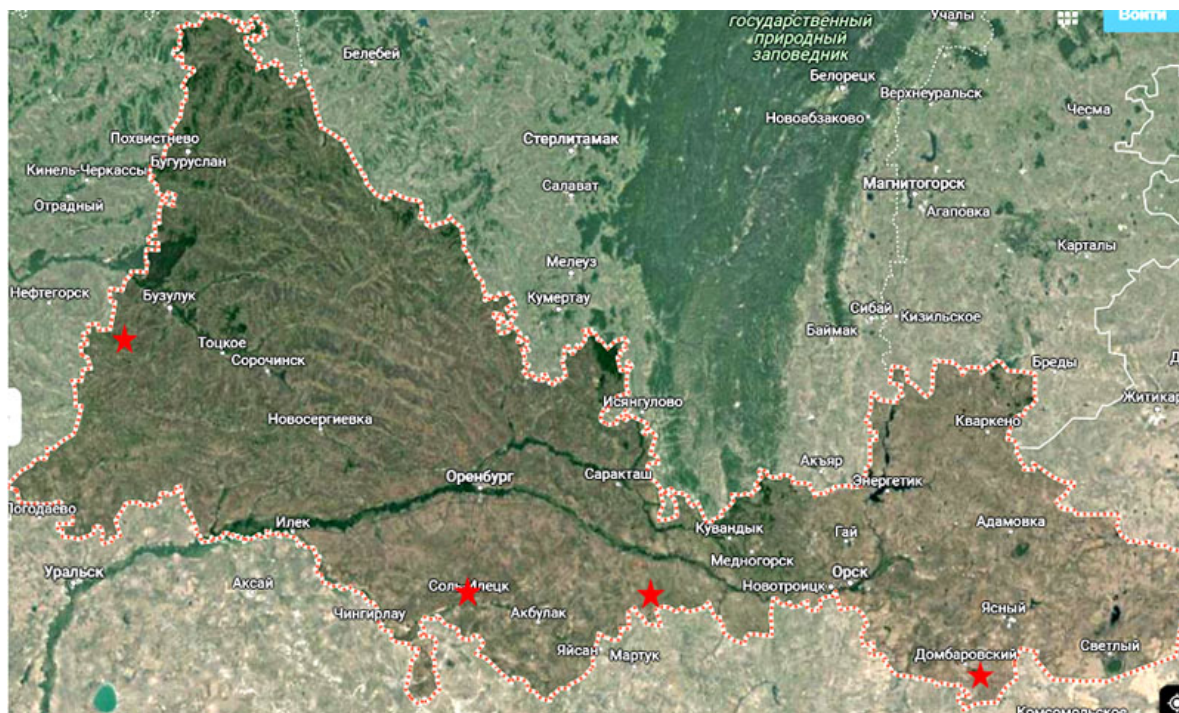


Рисунок 1. Оренбургская область с исследуемыми районами.

Климат Оренбуржья резко континентальный с большой амплитудой колебаний средних температур воздуха, с дефицитом атмосферных осадков. Около 60-70 % годового количества осадков приходится на тёплый период.

Наиболее часто используемым количественным показателем климата является гидротермический коэффициент Селянинова [1, 2], являющийся критерием влагообеспеченности территории. По ГТК определяется оценка засушливости климата. Определяется ГТК так: $ГТК = 10 \cdot \Sigma RR / \Sigma Ta$, где ΣRR – сумма осадков за вегетационный период (период со среднесуточными температурами воздуха больше $10^{\circ}C$), ΣTa – сумма среднесуточных температур за этот же период. На *рисунке 2* (левый ряд) приведены графики значений ГТК, суммы осадков и температур (май-сентябрь) за 2005-2023 гг. по метеоданным станций Бузулук (WMO ID 28909) (для Курманаевского района), Соль-Илецк (ID 35120) (для Соль-Илецкого района), Оренбург (ID 35121) (для участка Буртинской степи), Орск (ID 35138) (для Домбаровского района). Для периода 2005-2023 гг. тренды значений ГТК, RR и Ta (кроме Оренбурга, где тренд Ta положительный) отрицательные. Однако, за последние 10 лет направление тренда для ГТК и RR поменялось на положительное. Для Ta с 2014 года направление тренда сохранилось для всех станций, кроме Орска, где нет тренда Ta. На *рисунке 2* (правый ряд) показаны гистограммы межгодовых значений ГТК, RR и Ta, усредненных за два временных периода: 2005-2013 гг. и за последние десять лет: 2014-2023 гг. Среднее межгодовое значение RR (май-сентябрь) за последние 10 лет уменьшилось в 1,65 раз для Бузулука, Оренбурга, Соль-Илецка и в 1,76 раз для Орска. Средние межгодовые значения за оба временных периода для Ta практически не менялись. В результате средние межгодовые значения ГТК за последние 10 лет уменьшились так же, как и RR, что свидетельствует об ухудшении влагообеспеченности территории.



Рисунок 2. Графики межгодовых значений ГТК, RR и Та по данным метеостанций в исследуемых районах за 2005-2023 гг. (левый ряд); гистограммы средних межгодовых значений и СКО для ГТК, RR и Та за 2005-2013 гг. и 2014-2023 гг. (правый ряд).

По метеоданным в наилучшем положении находится Курманаевский район – больше осадков, меньше суммарная температура за вегетационный период, и в результате наибольший ГТК практически за весь период 2005-2023 гг. Минимальные значения ГТК и RR приходятся на 2010 и 2014 гг., и максимальные значения Та на 2010, 2012 и 2021 гг. Ниже будет показано, как эти климатические экстремумы отразились на влажности верхнего слоя почвы.

Определение влажности почвы по модели FLDAS. Корреляция с наземными измерениями влажности почвы

В данной работе оценка влажности верхнего слоя почвы сделана с помощью модели FLDAS. FLDAS (Famine Land Data Assimilation System) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/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 [3]. Модель поверхности суши Noah 3.6 от FLDAS [4] основана на наземных и спутниковых данных об осадках CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data) [5] и современном ретроспективном анализе метеорологического воздействия MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and

Application Version 2) [6]. MERRA-2 – первый долгосрочный глобальный реанализ, представляющий данные, начиная с 1980 года, использует спектрометрические измерения со спутников Nimbus-7, NOAA, радиометры, GPS. Ежемесячные результаты моделирования FLDAS за более чем 40 лет с 1982 года по настоящее время находятся в открытом доступе. Пространственное разрешение (ПР) для ежемесячных данных составляет $0,1^\circ$, и для ежедневных данных, доступных с 2000 года, $0,01^\circ$. Дополнительной особенностью FLDAS является то, что эти данные могут быть визуализированы с помощью онлайн-инструмента Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>).

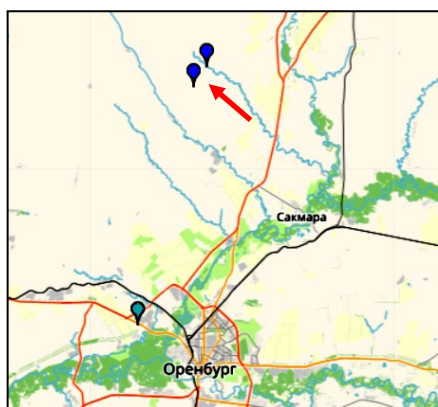
Прежде, чем использовать модель FLDAS для оценки влажности верхнего слоя почвы в исследуемых районах, определим наличие корреляции наземных измерений ВП с полученными по модели. Используем информацию для наземных измерений ВП на одной из двух станций в Оренбуржье, входящей в мировую базу данных влажности почвы ISMN (International Soil Moisture Network) (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>). Это станция RUSWET-AGRO Orenburgskaya #1, данные которой по ВП доступны на сайте ISMN с 1958 по 1998 гг. (апрель-сентябрь). Координаты станции 52.17° с.ш., 55.08° в.д. Расположение станции показано на *рисунке 3а* (указано красной стрелкой). Состав почвы на глубине 0-30 см: насыщение $0,51 \text{ (м}^3\text{*м}^{-3}\text{)}$, глина – 23%, песок – 23%, ил – 54%, organic carbon – 0,89%, пахотные земли, богарные. В наземные измерения входит влажность почвы (sm-soil moisture) на глубине 0-20 см и 0-100 см. На *рисунке 3б* приведены графики сезонных вариаций (три значения в месяц) наземных измерений влажности почвы на глубине 0-20 см на станции Orenburgskaya #1 и на *рисунке 3в* - графики среднемесячных значений ВП на глубине 0-10 см по модели FLDAS (продукт Model FLDAS_NOAH01_C_GL_M v001, ПР= $0,1^\circ$, усреднение по площадке с центром 52.15° с.ш., 55.05° в.д.) за 1994-1998 гг. [7]. Графики среднемесячных вариаций наземных и FLDAS измерений ВП для станции Orenburgskaya #1 приведен на *рисунке 3г*.

Коэффициент корреляция Спирмена (ККС) между среднемесячными значениями наземных измерений ВП и полученными на основе модели FLDAS равен $\rho_s=0,74$ ($p=5*10^{-6}$, p -уровень статистической значимости, $N=26$). Отметим, что в работе [7] показано, что ККС между наземными измерениями ВП на станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD (Алтайский край) и полученными по модели FLDAS равен $0,77$ ($p=7*10^{-7}$, $N=28$).

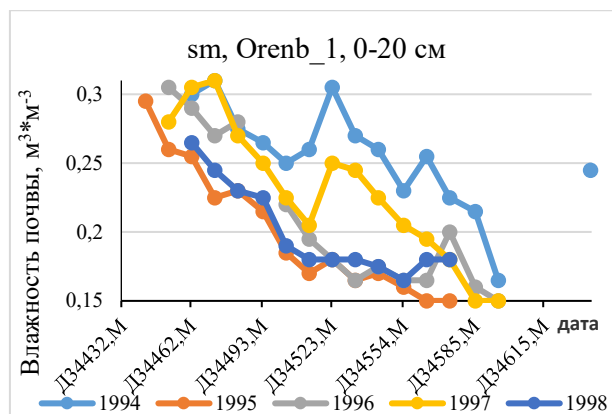
Сезонные и межгодовые вариации влажности верхнего слоя почвы по модели FLDAS за период 2000-2023 гг.

Тесная связь между наземными и FLDAS значениями ВП дает возможность использовать модель FLDAS для оценки ВП на исследуемых территориях за период 2000-2023 гг. На *рисунке 4* показаны графики сезонных вариаций среднемесячных значений ВП на глубине 0-10 см по модели FLDAS для Курманаевского района (усреднение по площадке с центром 52.4° с.ш., 52.15° в.д.). Отмечаем два максимума значений ВП: весной (март-апрель) и осенью (ноябрь). Минимум значений ВП принадлежит летним месяцам. Для Соль-Илецкого района данные FLDAS использовались для площадки с центром 51.17° с.ш., 55.18° в.д., для Буртинской степи – 51.15° с.ш., 56.7° в.д., для Домбаровского района – 50.9° с.ш., 58.87° в.д.

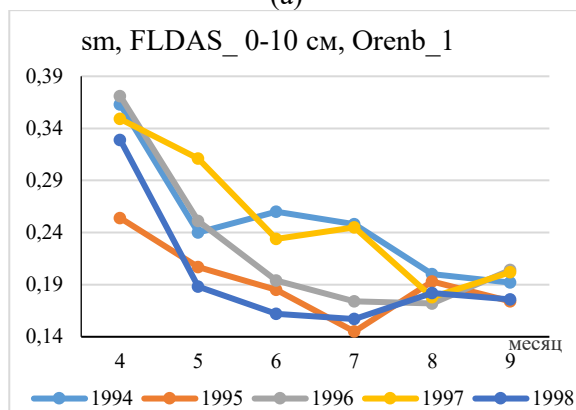
Межгодовые вариации значений ВП по модели FLDAS для исследуемых территорий при усреднении значений ВП за май-сентябрь показаны на *рисунке 5а* за период 2000-2023 гг. Абсолютный минимум межгодовых значений ВП принадлежит 2010 году (0,18). По мере возрастания значений следующие минимумы ВП в 2014 и 2021 гг. Тренд межгодовых значений ВП за период 2000-2023 гг. отрицательный для всех исследуемых территорий. Но за последние 10 лет направление тренда для ВП поменялось на положительное, аналогично, как и для ГТК и RR. На *рисунке 5б* сделано сравнение гистограмм средних и СКО межгодовых значений ВП (май-сентябрь) за периоды 2000-2013 гг. и 2014-2023 гг. В отличие от гистограмм на *рисунке 2*, где межгодовые изменения ГТК, RR для двух периодов были существенными, для ВП изменения несущественные, а именно, небольшое уменьшение среднего межгодового ВП за последние 10 лет.



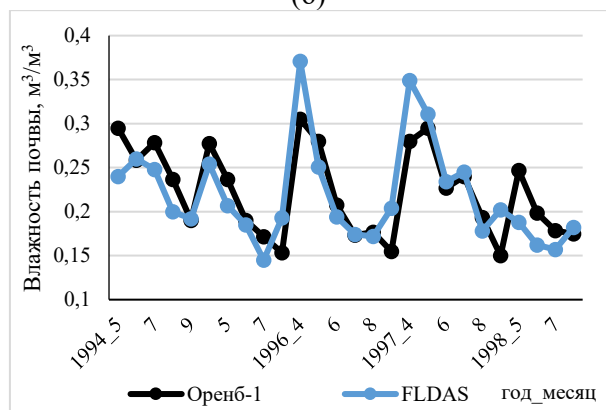
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3. (а) – Расположение станции Orenburgskaya #1 на карте Оренбургской области, (б) – вариации наземных измерений ВП на глубине 0-20 см, (в) – среднеемесячные значения ВП на глубине 0-10 см по модели FLDAS за 1994-1998 гг. на станции Orenburgskaya #1, (г) – среднеемесячные вариации значений ВП по наземным и FLDAS данным для станции Orenburgskaya #1.

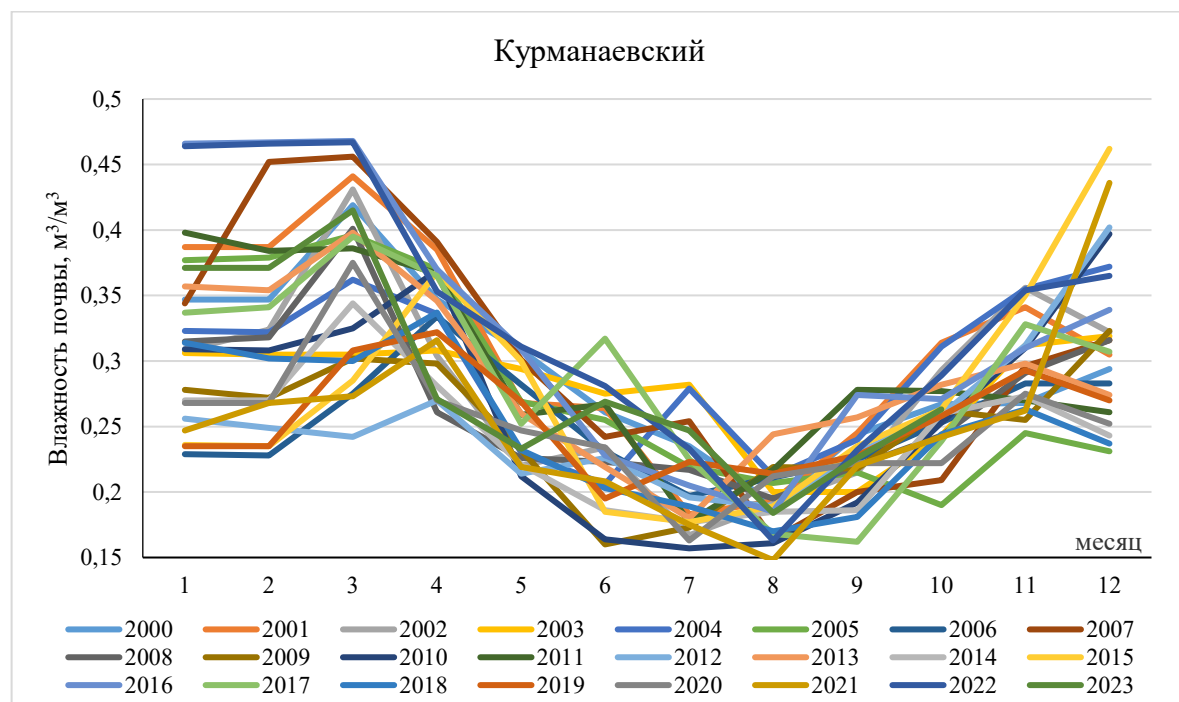


Рисунок 4. Графики сезонных вариаций среднеемесячных значений ВП на глубине 0-10 см по модели FLDAS для Курманаевского района.

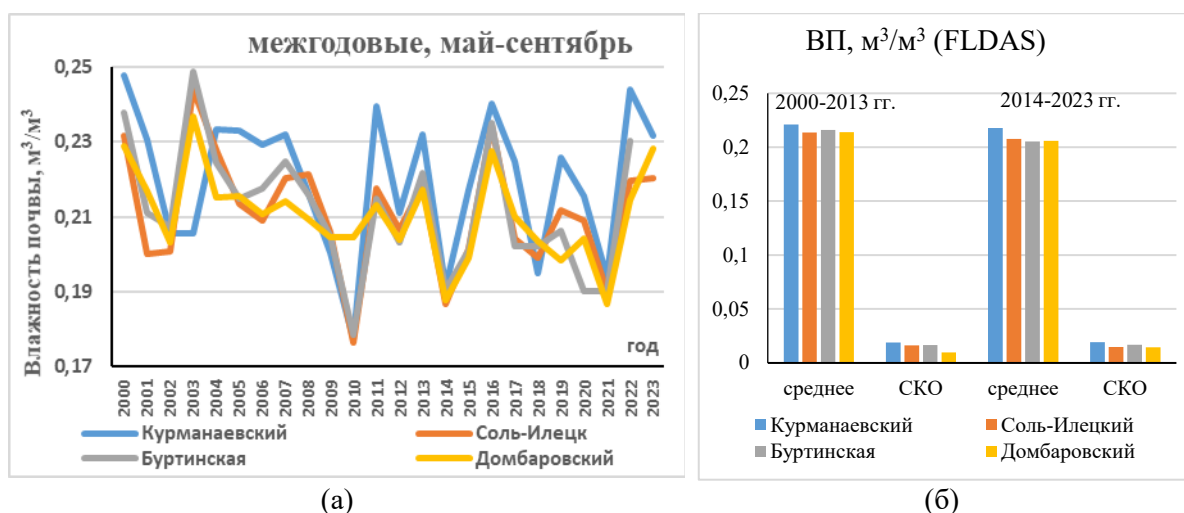


Рисунок 5. (а) – межгодовые вариации значений ВП по модели FLDAS для исследуемых территорий за период 2000-2023 гг., (б) – гистограммы средних межгодовых значений ВП и СКО за 2005-2013 гг. и 2014-2023 гг.

Как отмечалось выше, по метеоданным в наилучшей ситуации среди рассмотренных территорий находится Курманаевский район, что проявилось в больших межгодовых значениях ВП за вегетационный период для этого района.

В таблице 1 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена ρ_s между метеоданными (ГТК, RR, Ta) и ВП (по модели FLDAS) за вегетационный период (май-сентябрь). Соль-Илецкий район не включен в таблицу из-за неполноты данных по температуре воздуха и осадкам за летний период 2015 и 2016 гг. В условиях разнообразия используемых данных (метеоданные, модельные данные на основе спутниковых и наземных измерений), в результате получено, что между ними есть связь от умеренной до тесной при высоком уровне статистической значимости p (N-число лет).

Таблица 1

Значение ККС между ГТК, RR, Ta и ВП (FLDAS)

	Курманаевский			Буртинская степь			Домбаровский		
	ГТК	RR	Ta	ГТК	RR	Ta	ГТК	RR	Ta
ρ_s	0,58	0,45	-0,42	0,77	0,75	-0,42	0,67	0,57	-0,41
p	0,003	0,03	0,04	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,04	0,003	0,02	0,07
N	19	19	19	18	18	18	15	15	15

Регрессионные соотношения

При наличии тесной связи между предикторами (независимые переменные, в данном случае-метеоданные) и целевыми переменными (зависимые переменные, в данном случае-влажность почвы) можно построить регрессионную модель связи между этими переменными в виде уравнения. В зависимости от числа предикторов регрессия может быть однофакторной или множественной.

Для оценки качества уравнения регрессии (близости рассчитанных по регрессии и фактических значений) 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 , т.к. дает понимание того, насколько точными будут прогнозы.

В регрессии коэффициент детерминации R^2 является статистической мерой того, насколько хорошо предсказания регрессии приближаются к реальным точкам данных. Коэффициент детерминации для модели с константой имеет значение $R^2 = [0, 1]$. Чем ближе R^2 к 1, тем сильнее связь. При оценке регрессионных моделей это интерпретируется как соответствие

модели данным. Для приемлемых моделей предполагается, что R^2 должен быть хотя бы не меньше 0,5, в этом случае $|\rho_s| > 0,7$, т.е. есть тесная связь.

Для Буртинской степи условие тесной связи соблюдается, что дает возможность получить приемлемое однофакторное регрессионное уравнение (1), позволяющее прогнозировать межгодовую изменчивость значений ВП по значениям суммы осадков за вегетационный период:

$$\text{ВП} = 0,181 + 1,49 \cdot 10^{-4} \cdot \text{RR}; \quad R^2 = 0,51; \text{Se}_y = 0,011; \quad (1)$$

Двухфакторное уравнение (2), включающее, помимо RR, суммарное значение T_a , не уменьшает стандартную ошибку регрессии, хотя и увеличивает коэффициент детерминации. Но R^2 всегда растёт при увеличении числа независимых переменных:

$$\text{ВП} = 0,123 + 1,98 \cdot 10^{-5} \cdot T_a + 1,44 \cdot 10^{-4} \cdot \text{RR}; \quad R^2 = 0,56; \text{Se}_y = 0,011; \quad (2)$$

В качестве итогов данной работы можно выделить следующие моменты:

1. Использование ежемесячных данных ВП по модели FLDAS, учитывая их тесную связь с наземными измерениями, позволило получить оценку сезонных и межгодовых вариаций ВП в исследуемых районах Оренбургской области за 2000-2023 гг.

2. Межгодовые тренды ГТК для вегетационного периода (май-сентябрь) определяют тренды межгодовых вариаций значений ВП; за последние 10 лет с 2000 года направление тренда ВП поменялось с отрицательного на положительное, так же как и ГТК и RR. Экстремальный по минимуму ГТК 2010 год в Оренбуржье проявился в межгодовом минимуме ВП. Межгодовой тренд T_a (вегетационный период 2005-2023 гг.) отрицательный для территорий в западной части Оренбургской области (Курманаевский и Соль-Илецкий районы), слабо положительный для Буртинской степи и практически отсутствует для Домбаровского района.

3. Курманаевский район в сравнении с другими рассматриваемыми территориями имеет наилучшие метеоусловия: больше осадков, меньше суммарная температура за вегетационный период, и в результате наибольший ГТК практически за весь период 2005-2023 гг., что отразилось в больших межгодовых значениях ВП.

4. Наличие тесной связи между ВП и метеоданными для Буртинской степи позволило построить регрессию с возможностью прогноза межгодовой изменчивости значений ВП по значениям суммы осадков за вегетационный период.

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

Список литературы

1. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165-177.
2. Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР, 1958. С. 7-14.
3. McNally A., Arsenault K., Kumar S., Shukla S., Peterson P., Wang S., Funk C., Peters-Lidard C. D., Verdin J.P. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications // Scientific Data. 2017. No 4. 170012. DOI:10.1038/sdata.2017.12.
4. Ek M. B., Mitchell K. E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., and Tarpley J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res. 2003. No 108(D22). 8851. DOI:10.1029/2002JD003296.
5. 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. No 2. 150066.
6. 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. No 30(14). P. 5419-5454.
7. Родионова Н.В. Межгодовые тренды влажности почвы, NDVI и черного углерода и их зависимость от климатических изменений для Буртинской и Кулундинской степей по данным ДЗЗ за период 2000-2022 гг. // Материалы 21-й Межд. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. ИКИ РАН. Москва, 2023. С. 467. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8.