



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.

Родионова Н.В.

**Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, МО*

**21-я Международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", ИКИ РАН,
13-17 ноября 2023 г. Москва,**



ВВЕДЕНИЕ



В данной работе для участка “Буртинская степь” заповедника “Оренбургский” и участка Кулундинской степи в районе Славгорода прослеживается динамика изменений и трендов климатических условий, вегетационного индекса NDVI, влажности верхнего слоя почвы и содержания в атмосфере черного углерода в условиях степных палов по наземным и спутниковым измерениям за период 2000-2022 гг.

В толковом словаре русского языка под редакцией Д.Н. Ушакова приводится следующее определение: «степь – это безлесное и обычно безводное пространство с ровной поверхностью, покрытое травянистой растительностью» [Толковый словарь русского языка / Под ред. Д.Н. Ушакова. М.: Гос. ин-т «Сов. энцикл.»; ОГИЗ; Гос. изд-во иностр. и нац. слов., 1935-1940. (4 т.)].

Степь характеризуется небольшим количеством осадков (250-350 мм в год), периодами засухи, богатыми гумусом черноземами и темно-каштановыми почвами. Травяные экосистемы связывают углерод, основная часть которого сохраняется в почве. Но в результате масштабной распашки и травяных палов происходит эмиссия удерживаемых в почве миллиардов тонн углеродосодержащих парниковых газов, что способствует глобальному потеплению и ведет к деградации почвы, обеднению почвы гумусом.

В конце 20 в. степи частично были восстановлены, для сохранения степей организованы заповедники, одним из которых является «Оренбургский государственный степной заповедник» [Чибилов А.А. Заповедник «Оренбургский»: история создания и природное разнообразие. Екатеринбург: Институт степи УрО РАН, Оренб. отд. РГО. ООО «УИПЦ», 2014. 139 с.14].



Исследуемые территории



Рис. 1. Место расположения станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD (ISMN) 52.97° N, 78.65° E, Кулундинская степь- 51° - 55° N, 78 - 84 E

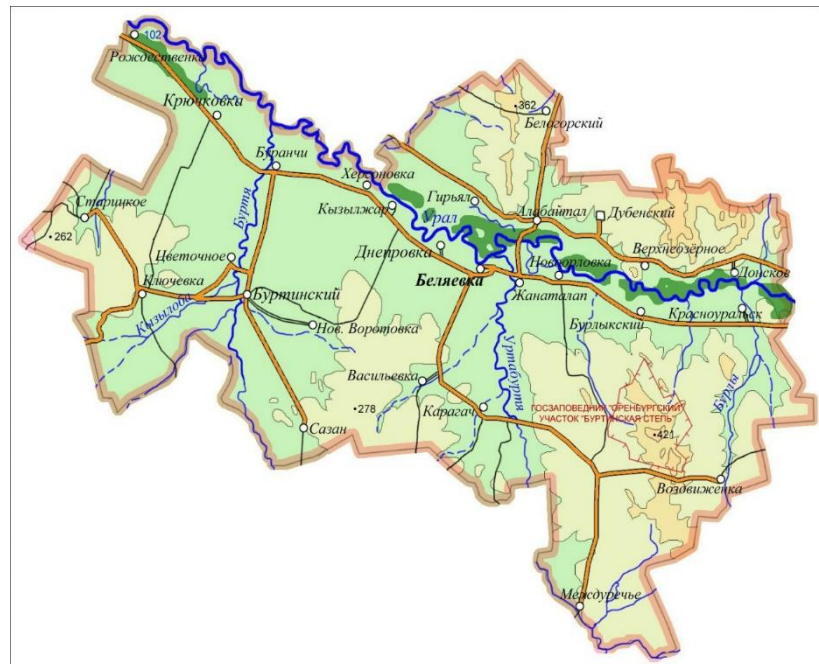


Рис. 2. Карта Беляевского района Оренбургской области, в юго-восточной части карты - Буртинская степь: $51^{\circ} 10' 20''$ - $51^{\circ} 6' 20''$ с.ш., $56^{\circ} 38' 40''$ - $56^{\circ} 45' 45''$ в.д.;



Климатические условия в районе Славгорода и Оренбурга по гидротермическому коэффициенту (ГТК) Селянинова (май-сентябрь)



Одним из показателей влагообеспеченности, используемым в сельском и лесном хозяйстве для прогнозирования, является гидротермический коэффициент (ГТК), предложенный Г.Т.Селяниновым $ГТК=10*\Sigma RR/\Sigma Ta$ [Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165-177.].

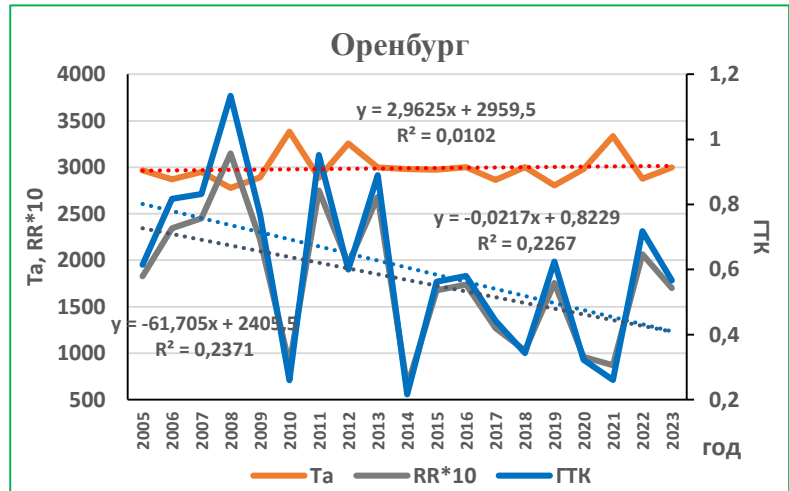
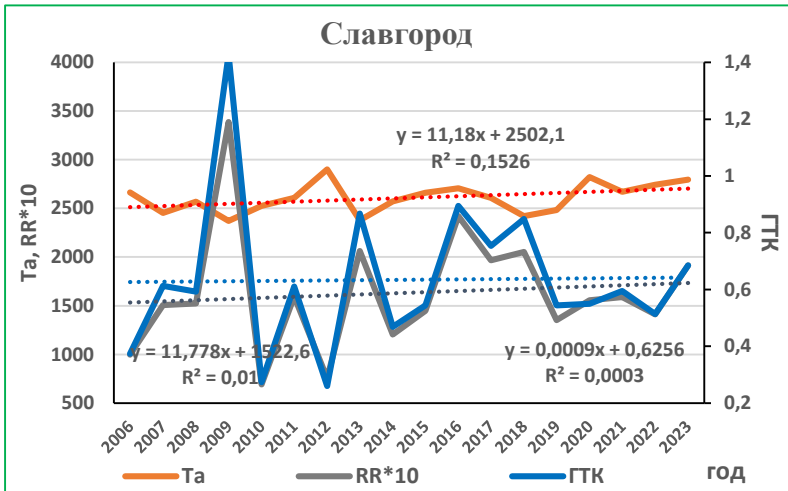
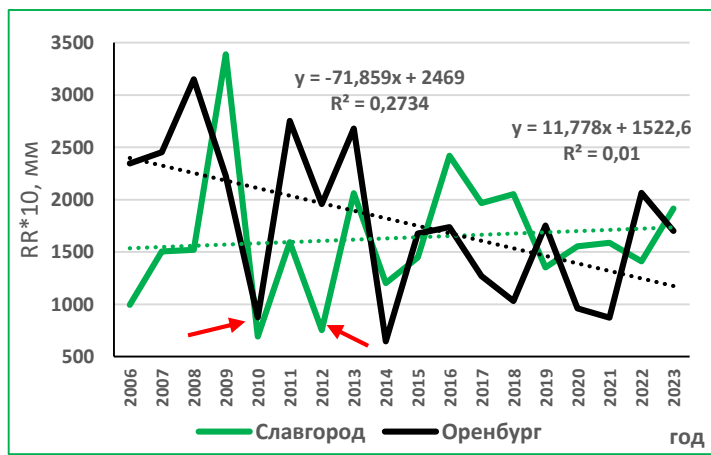
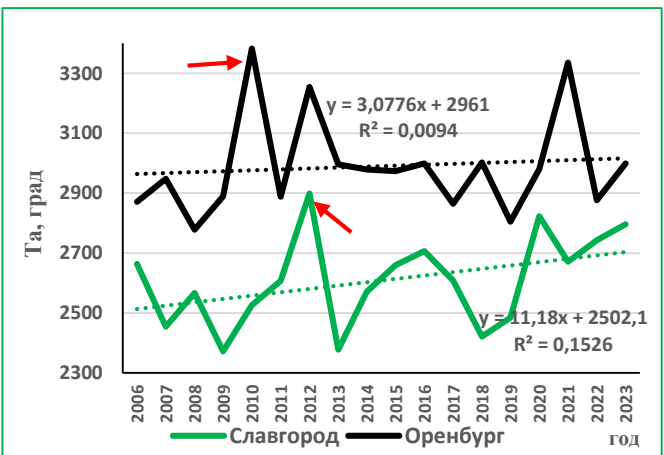


Рис. 3. Графики значений суммы температур и осадков*10 и значений ГТК за май ÷ сентябрь 2006-2022 гг. по данным метеостанции Славгород (WMO ID 29915) и метеостанции Оренбург (ID 35121) на сайте rp5.ru.





Вариации черного углерода в атмосфере степей в условиях степных пожаров

BC — это аэрозоль, «твёрдые частицы, в основном состоящие из чистого углерода, которые адсорбируют солнечную радиацию на всех длинах волн» (<https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>). Он образуется в результате неполного сгорания. Он образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы. Чёрный углерод — основной компонент сажи.

Время его жизни в атмосфере — от нескольких дней до недель. Частицы BC легко вымываются осадками. BC оказывает влияние на климат, поглощая солнечную энергию и излучая тепловую, а при выпадении на земную поверхность изменяет альбедо, приводя к дополнительному нагреванию поверхности (Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007–2012 гг. // Метеорология и гидрология. 2015. № 7. С. 5–17).

В степных почвах хранится огромный запас углерода, включающий в себя органический и неорганический углерод. Источником выбросов черного углерода (BC- black carbon) в степи являются степные пожары. Поскольку аэрозоль сажи (BC) может поглощать солнечную радиацию, он стал вторым ключевым фактором глобального потепления после CO₂. Баланс влаги в зоне степей резко отрицательный, периодически повторяются засухи. Травяные палы являются источником порядка 10% эмиссии BC в России.



Сентябрь 2010 г.



Апрель 2012 г.

Рис. 4. Карты пожаров для Буртинской степи за сентябрь 2010 г. и для Кулундинской степи для апреля 2012 г.



Вариации черного углерода в атмосфере Буртинской степи в условиях степных пожаров

Для оценки поверхностной концентрации массы ВС (surface mass concentration-SMC, кг/м³) использованы среднемесячные данные реанализа MERRA-2 за 2000-2022 годы (продукт MERRA-2 model M2TMNXAER v5.12.4, ПР 0.5°x0.625°). Данные усреднены по площадке с центром 51°N, 56.875°E (Буртинская степь) и по площадке 52.975°÷53.025° N, 78.625°÷78.675° E (Кулундинская степь).

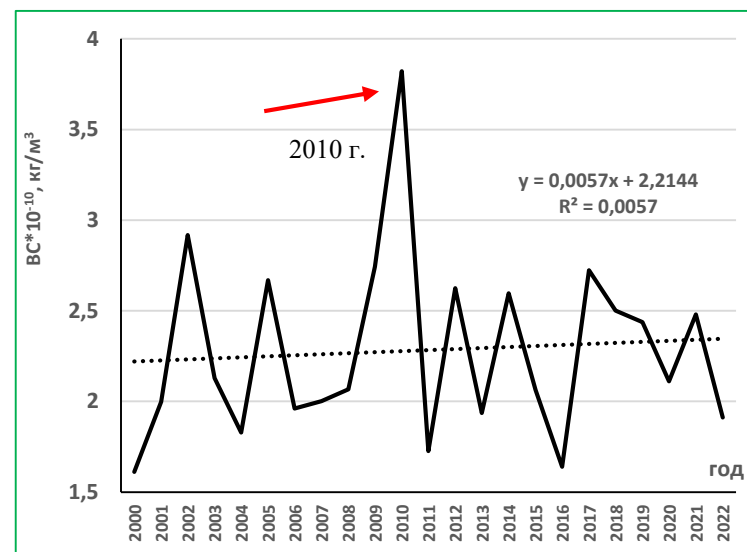
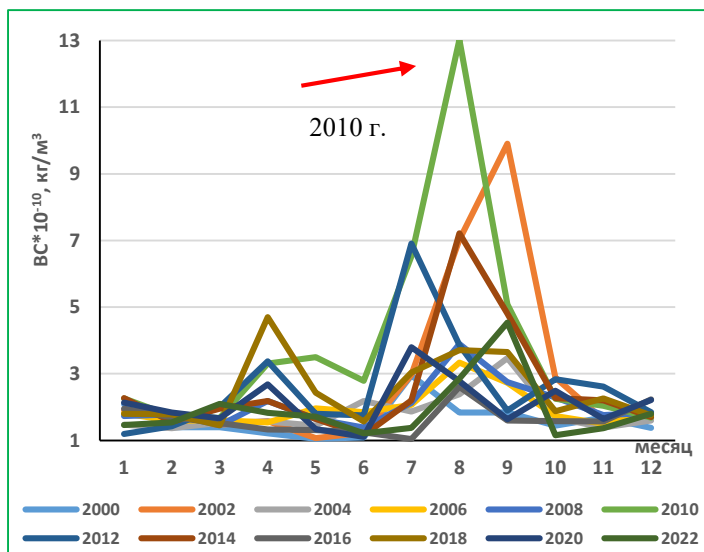


Рис. 5. Сезонные и межгодовые вариации значений черного углерода за 2000-2022 гг., стрелкой указан экстремальный год

Бимодальное сезонное распределение значений ВС с пиками в апреле и августе.
Слабая положительная межгодовая тенденция значений ВС за период 2000-2022 гг.



Вариации черного углерода в атмосфере Кулундинской степи в условиях степных пожаров

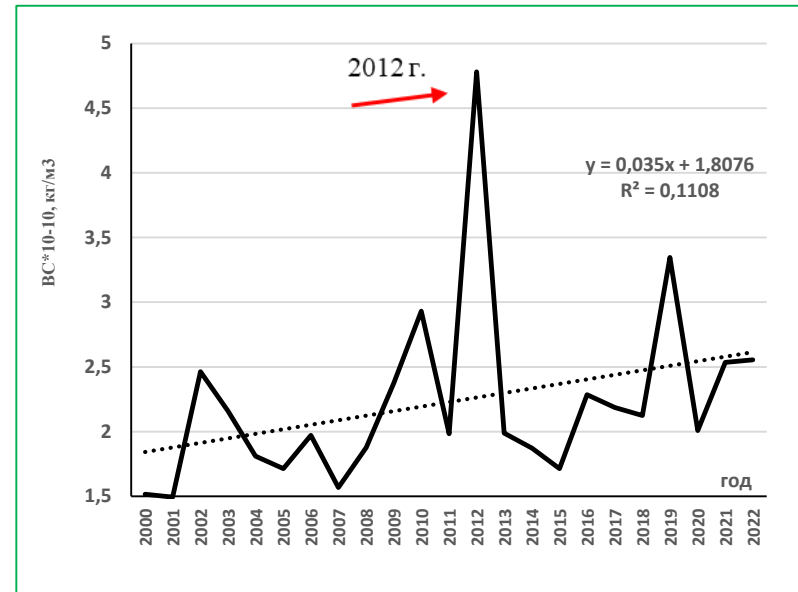
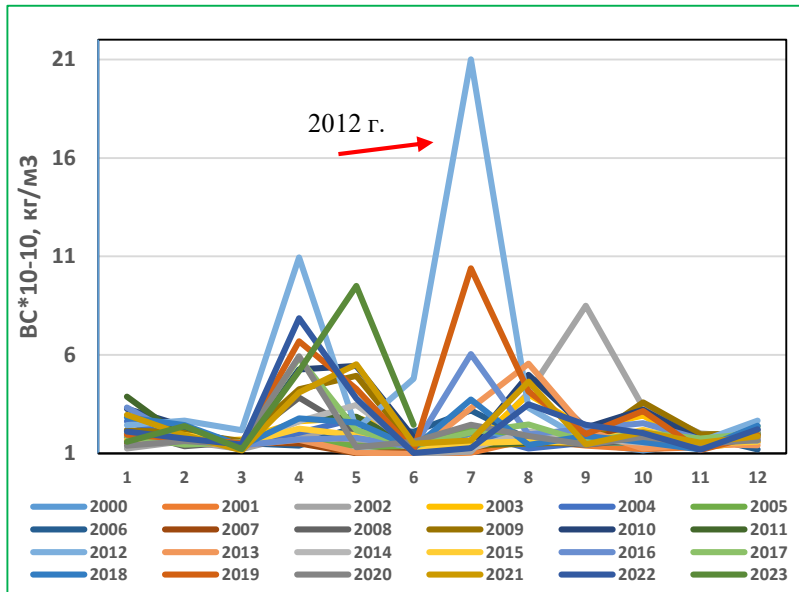
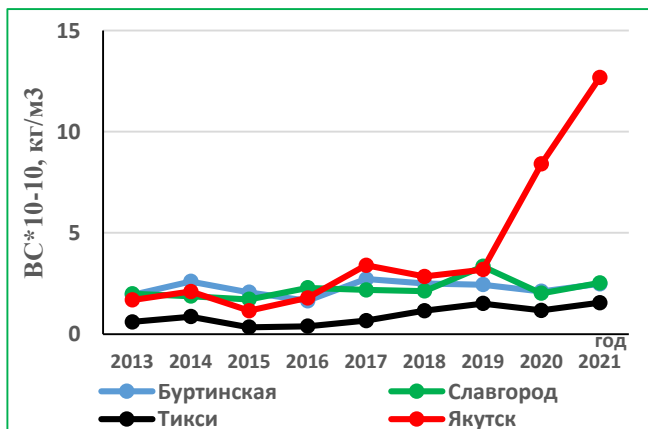


Рис. 6. Сезонные и межгодовые вариации значений черного углерода в атмосфере Кулундинской степи за 2000-2022 гг. с экстремальным 2012 годом



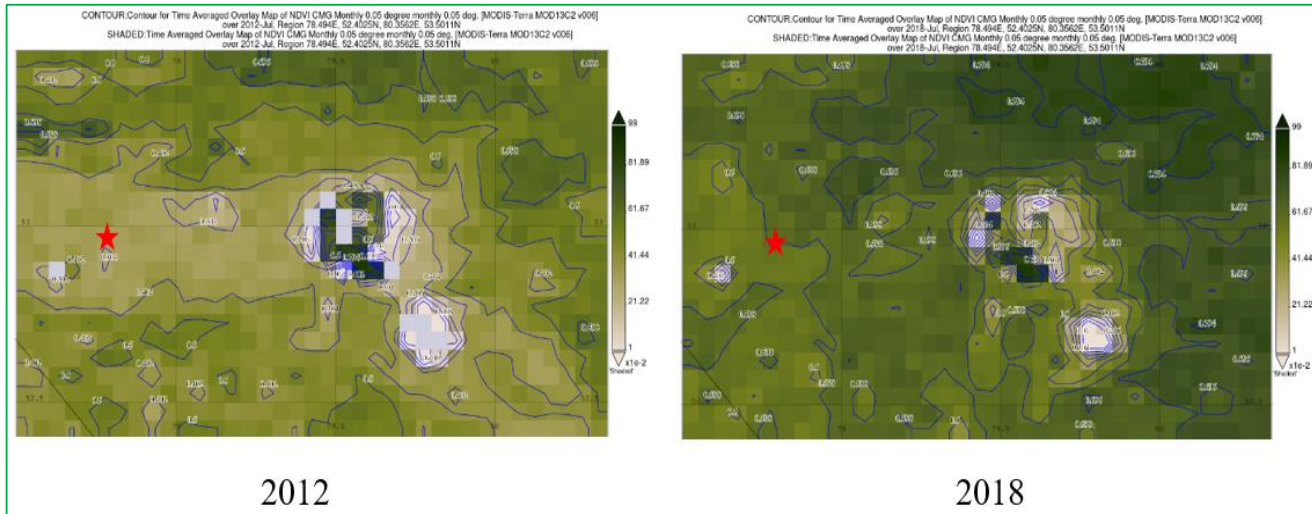
Сравнение максимальных сезонных и межгодовых значений ВС для Буртинской и Кулундинской степей:

BC, мкг/м3	Буртинская, 2010 г.	Кулундинская, 2012 г.
сезонные	1.3	2.1
межгодовые	0.38	0.48

Вариации NDVI на территории Кулундинской и Буртинской степи в 2000-2022 гг.



Для региона Алтайского края годы 2000, 2008, 2012 и 2020 отличались минимальными значениями NDVI с абсолютным минимумом в 2012 году (Плуталова, Романов, 2022). На рисунке 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 (ПР = 0.05°, продукт MOD13C2 v006). Красной звездочкой на картах отмечено положение тестового участка в Славгороде.



Динамику изменений NDVI за 2000-2022 годы на территории Кулундинской степи определим с помощью системы анализа и визуализации данных Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>). Используются усредненные по площадке (52.975°÷53.025° N, 78.625°÷78.675° E) ежемесячные измерения прибора MODIS (Terra) (mean_MOD13C2_006_CMG_0_05_Deg_Monthly_NDVI). Для Буртинской степи используются усредненные по площадке (51.125°÷51.175° N, 56.675°÷56.725° E) (продукт mean_MOD13C2_006_CMG_0_05_Deg_Monthly_NDVI).

Вариации NDVI на территории Кулундинской и Буртинской степи в 2000-2022 гг.

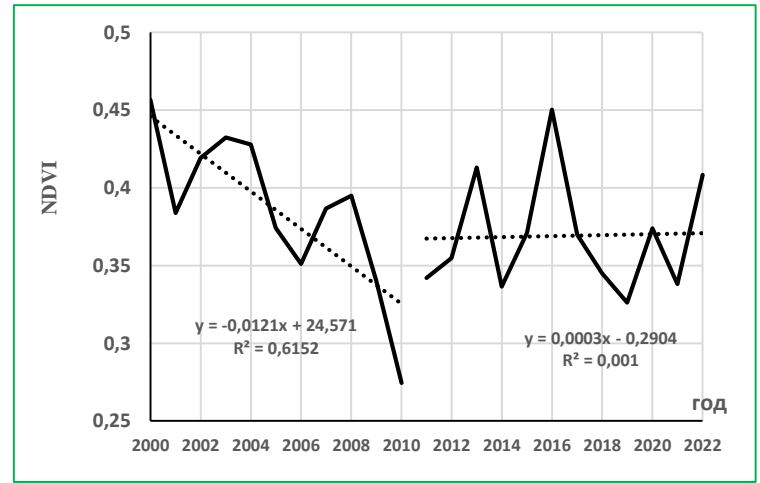
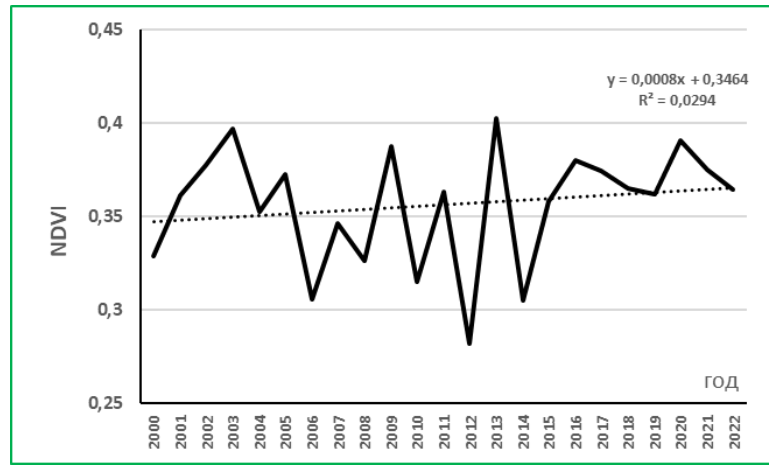
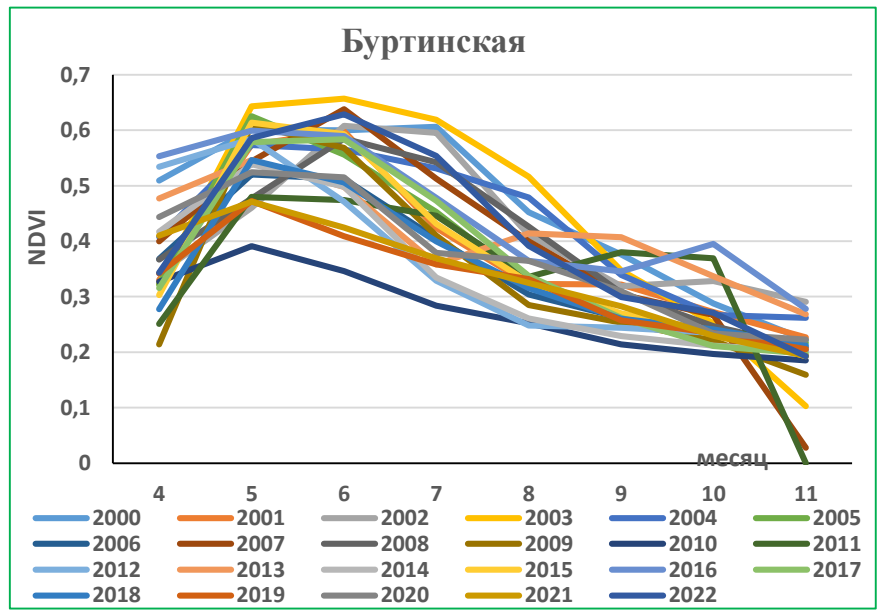
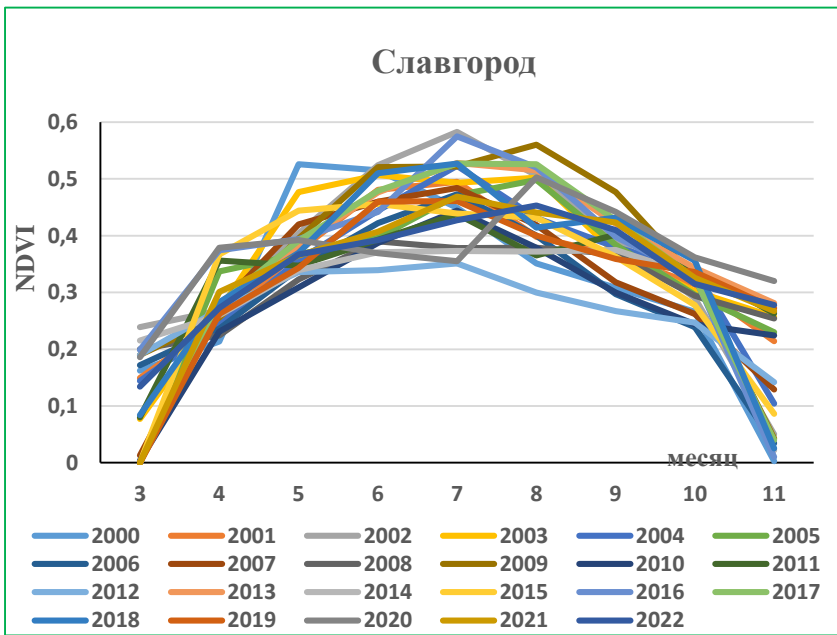


Рис. 7. Сезонные и межгодовые вариации NDVI Кулундинской и Буртинской степи за 2000-2022 гг.

ККС между ГТК и NDVI равен 0.86 ($p=2 \cdot 10^{-6}$, $N=17$) для Славгорода и 0.5 для Буртинской степи



Вариации влажности верхнего слоя почвы по модели FLDAS (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/fldas>)

Прежде чем использовать модель FLDAS (Famine Land Data Assimilation System) для оценки влажности почвы в исследуемых районах после 2000 года, было сделано сравнение наземных измерений влажности верхнего слоя почвы на станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD и на станции сети RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 с модельными измерениями. Результаты сравнения наземных и модельных измерений приведены ниже.

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 полузасушливых районах (McNally, et al., 2017). Модель поверхности суши Noah 3.6 от FLDAS (Ek et al., 2003) основана на наземных и спутниковых данных об осадках CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data) (Funk et al., 2015) и современном ретроспективном анализе метеорологического воздействия MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application Version 2) (Gelaro et al., 2017). 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/>). Пространственное разрешение для ежемесячных данных составляет 0.1° , и для ежедневных данных, доступных с 2000 года, 0.01° .

Была поставлена цель- сравнить имеющиеся наземные данные ВП (ISMN) и модельные данные FLDAS за период 1982-1985 гг. для станции SLAVGOROD и за период 1994-1998 гг. для станции Orenburgskaya_#1. При наличии хорошей корреляции между наземными и модельными измерениями использовать модель FLDAS для оценки ВП для территории Кулундинской и Буртинской степей за период 2000-2022 гг. (продукт Model FLDAS_NOAH01_C_GL_M v001, ПР= 0.1°).



Сравнение наземных и модельных (FLDAS) измерений влажности почвы для станции Славгород



На сайте ISMN (International Soil Moisture Network) - всемирной сети данных по наземным измерениям влажности почвы- 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 ($\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$), глина-21%, песок-37%, ил-42%, растительность-травы. Наземные измерения ВП на глубине 0- 10 см и 0- 100 см.

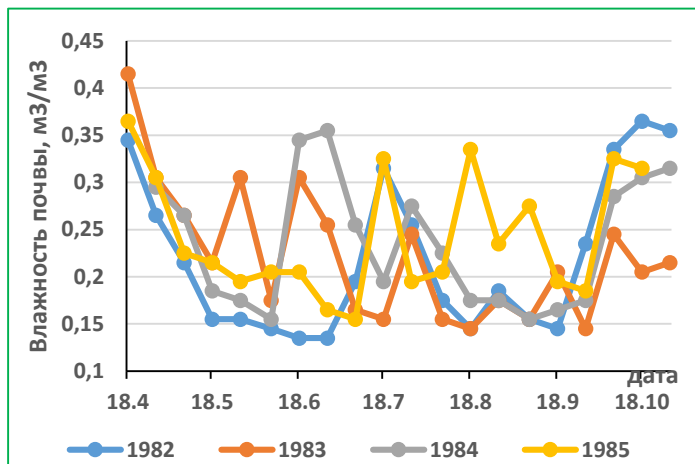


Рис. 8. Графики наземных измерений влажности почвы на глубине 0-10 см с 1982 по 1985 гг. (апрель-октябрь) для станции сети RUSWET-GRASS SLAVGOROD.

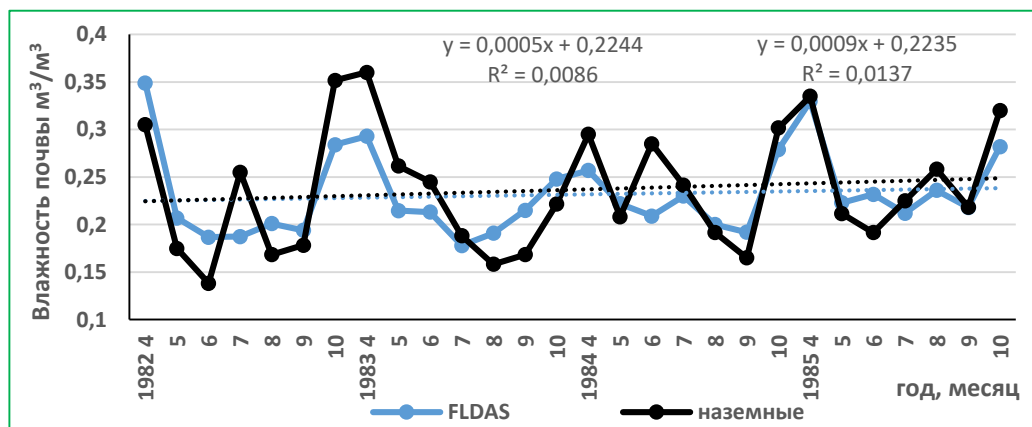


Рис. 9. Графики сезонных вариаций значений объемной влажности почвы по наземным измерениям на станции Slavgorod и по модели FLDAS для глубины (0-10 см) за 1982-1985 гг. (апрель - октябрь).

Коэффициент корреляции Спирмена (ККС) между наземными измерениями ВП и по модели FLDAS равен **0.77** ($p=7 \cdot 10^{-7}$, $N=28$).

Сезонные вариации ВП (рис.8) максимальные значения как для наземных, так и для FLDAS, принадлежат апрелю и октябрю. Минимальные значения ВП принадлежат летним месяцам.



Сравнение наземных и модельных (FLDAS) измерений влажности почвы для станции Orenburgskaya_#1 за период 1994-1998 гг.



Рис. 13. Расположение станции RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 на карте Оренбургской области

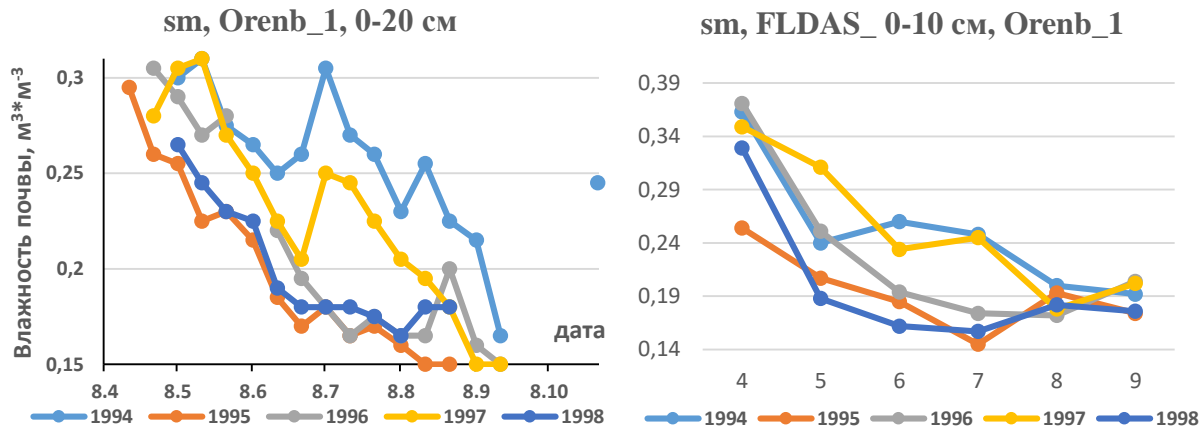


Рис. 14. Сезонные вариации наземных измерений влажности почвы на глубине 0-20 см и (б) среднемесячные значения ВП на глубине 0-10 см по модели FLDAS за 1994-1998 гг. на станции Orenburgskaya_#1

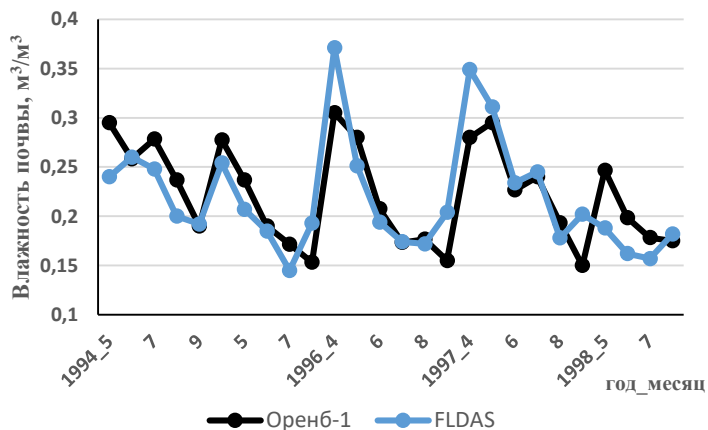


Рис. 15. Среднемесячные вариации значений ВП по наземным и FLDAS данным для станции Orenburgskaya_#1

Коэффициент корреляция Спирмена (ККС) между среднемесячными значениями наземных измерений ВП и полученными на основе модели FLDAS равен $\rho_s=0.74$ ($p=5 \cdot 10^{-6}$, $N=26$).



Оценка влажности почв в районе Славгорода по модели FLDAS за период 2000-2022 гг.

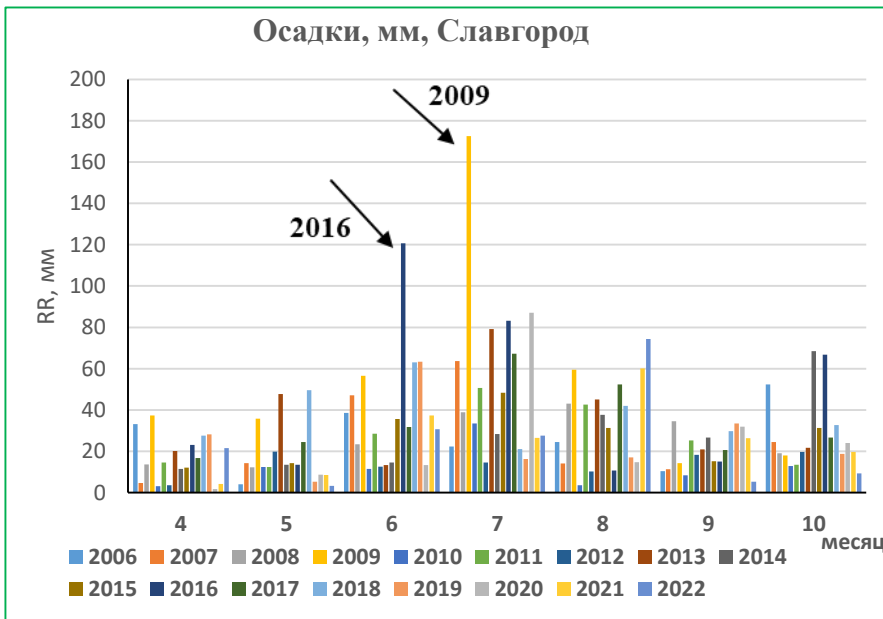
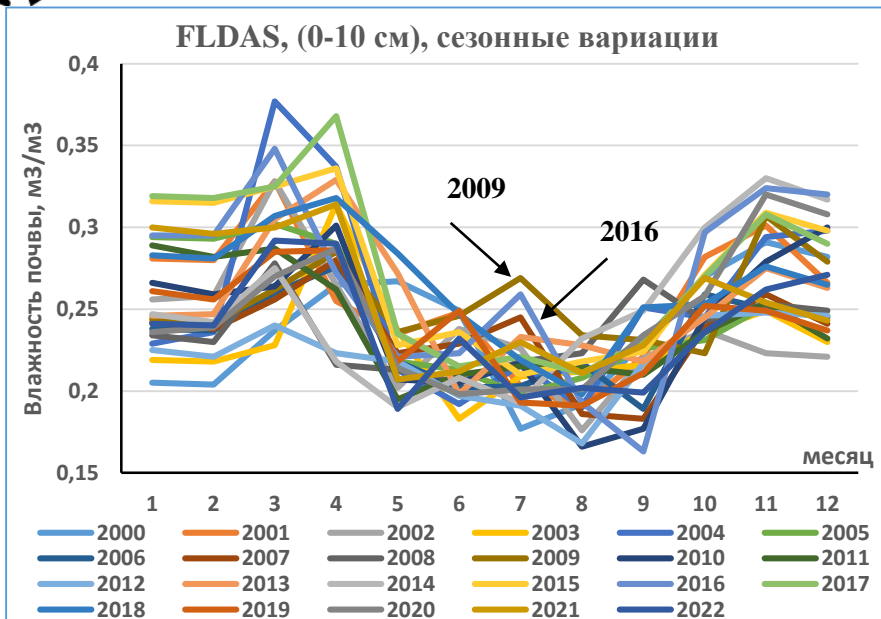


Рис. 10. Сезонные вариации значений ВП по FLDAS за период 2000-2022 гг. и осадки в мм за 2006-2022 гг.

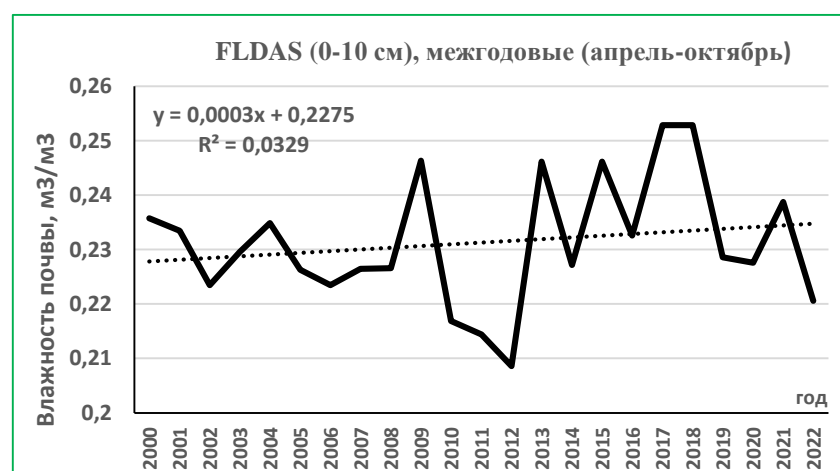
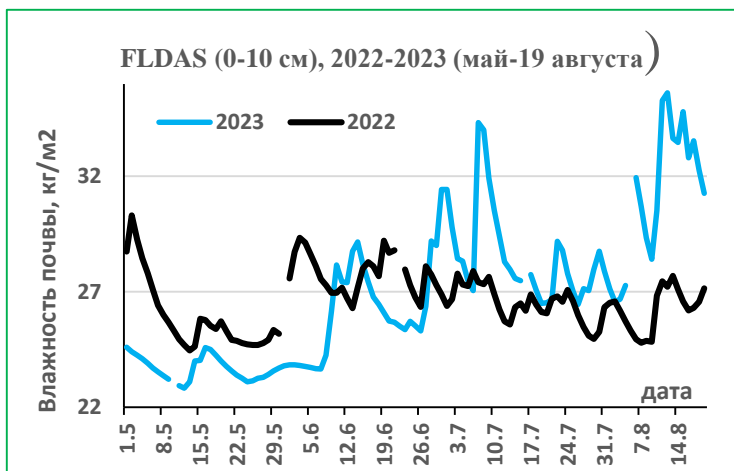


Рис.11. Значения ВП по модели FLDAS (0-10 см) (daily) для района Славгорода за 2022-2023 гг. (май-19 августа) (PP=0.01 град)

Рис. 12. Межгодовые вариации ВП по модели FLDAS для района Славгорода за период 2000-2022 гг. (PP=0.1 град)
ККС между ГТК и FLDAS за период 2006-2022 гг. равен 0.66 ($p=2 \cdot 10^{-3}$, $N=17$)



На рисунке 16 показаны графики сезонных вариаций и межгодовых вариаций среднемесячных значений ВП на глубине 0-10 см для района Буртинской степи по модели FLDAS (усреднение по площадке с центром 51.15° с.ш., 56.7° в.д.) за период 2000-2022 гг.

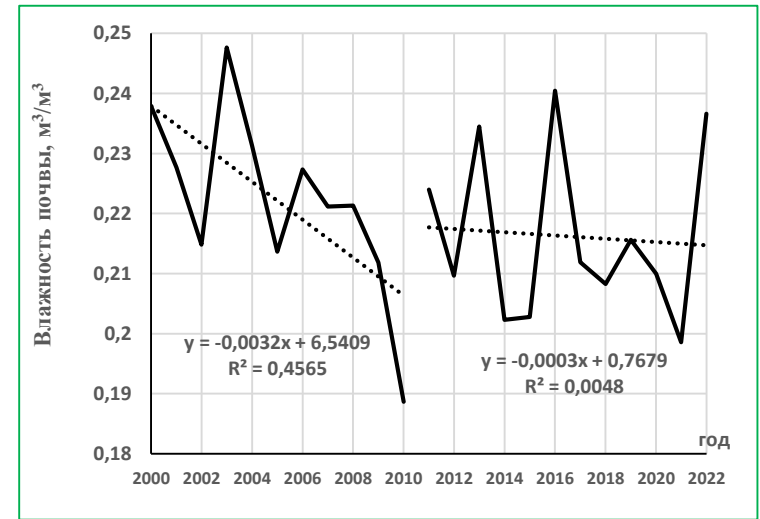
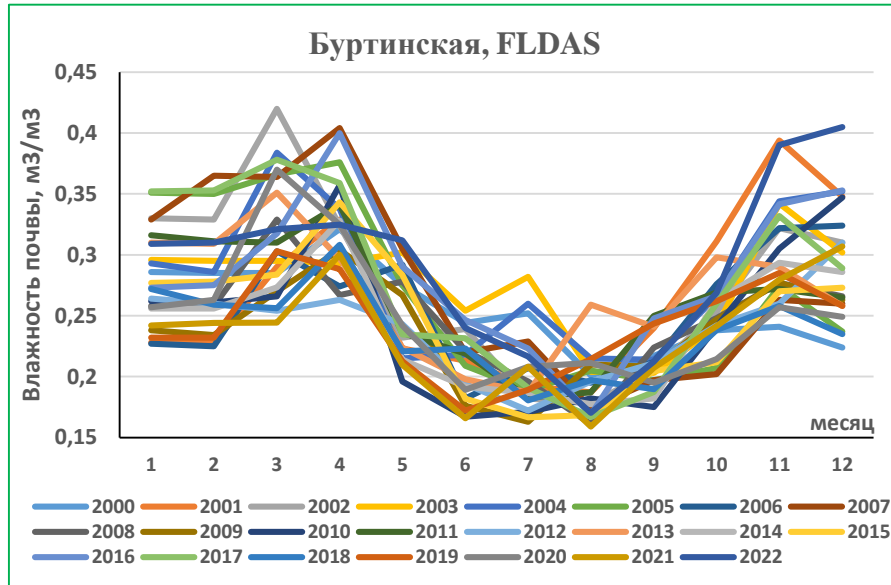


Рис.16. Графики сезонных и межгодовых вариаций (май-октябрь) среднемесячных значений ВП на глубине 0-10 см для района Буртинской степи по модели FLDAS

ККС между ГТК и FLDAS за период 2005-2022 гг. равен 0.75 ($p=2*10^{-4}$, $N=18$)



Сравнение межгодовых вариаций ГТК, ВП, NDVI, ВС для Кулундинской и Буртинской степей за период 2000-2022 гг.

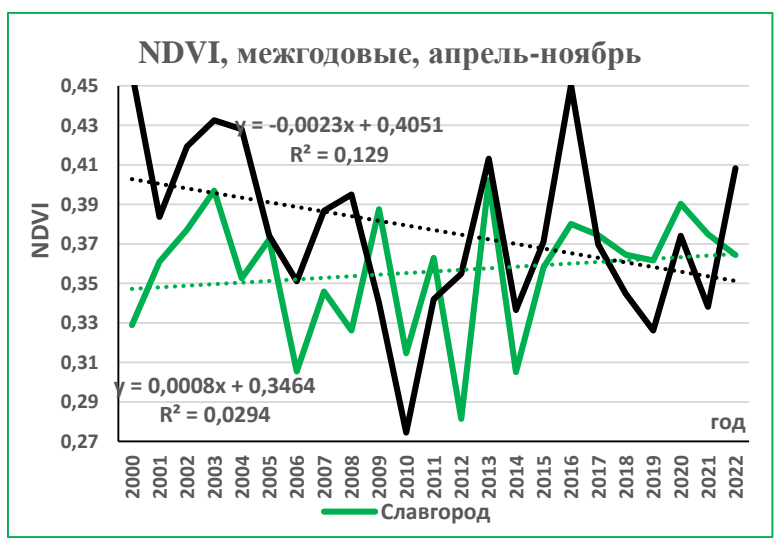
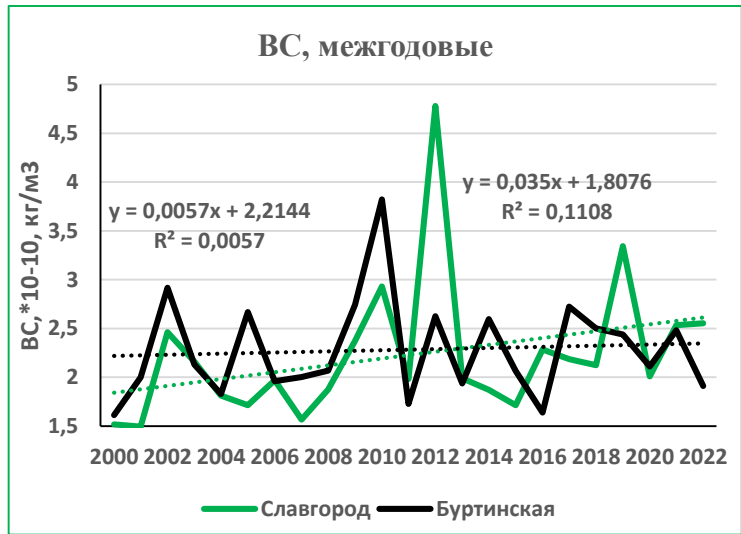
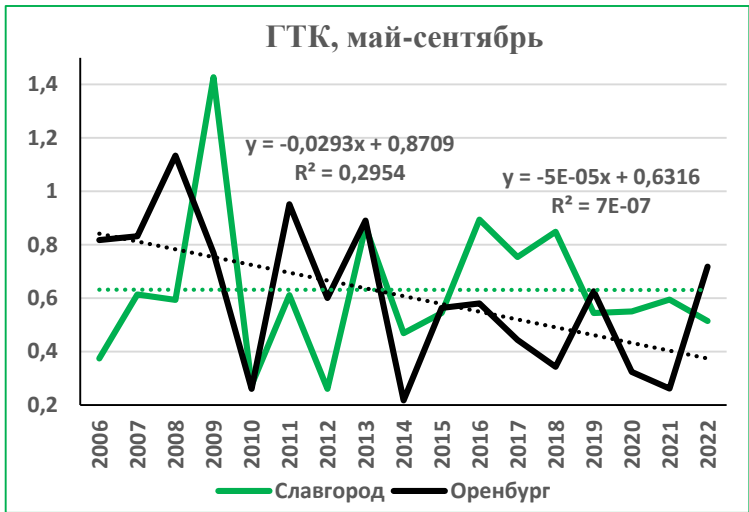


Рис. 17. Сравнение межгодовых вариаций ГТК, ВП, NDVI и ВС за период 2000-2022 гг.



Корреляция ГТК, Та, RR с ВС, NDVI, ВП для Кулундинской и Буртинской степей за период 2005-2022 гг. (N=18) (май-сентябрь)

Славгород									
	ГТК-FLDAS	Та-FLDAS	RR-FLDAS	ГТК-ВС	Та-ВС	RR-ВС	ГТК-NDVI	Та-NDVI	RR-NDVI
ρ_s	0.7	-0.61	0.67	Корр. нет	Корр. нет	Корр. нет	0.86	Корр. нет	0.85
p	8*10-4	5*10-3	2*10-3				2*10-6		6*10-6
Оренбург-Буртинская									
ρ_s	0.77	-0.42	0.75	-0.53	Корр. нет	-0.52	0.496	Корр. нет	0.5
p	2*10-5	0.04	2*10-4	0.01		0.01	0.02		0.02

ρ_s - коэффициент корреляции Спирмена, p-уровень значимости

Межстепная (межгодовая) корреляция есть только для ВС: $\rho_s=0.45$, $p=0.02$, $N=23$



Регрессионные соотношения

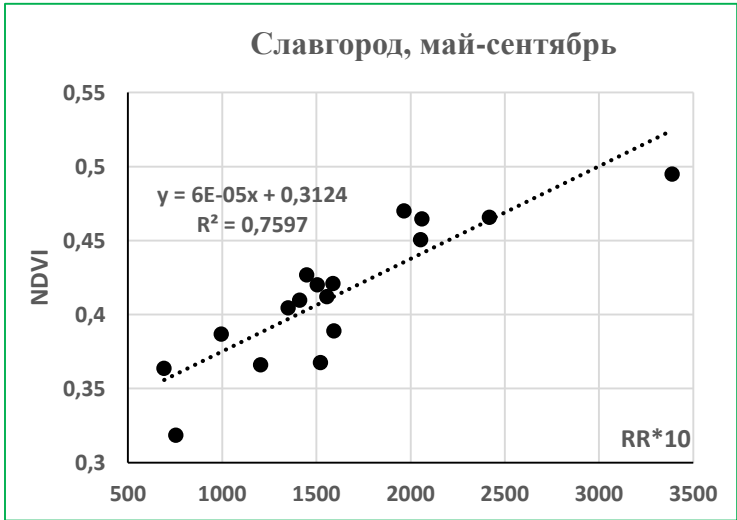
Славгород, май-сентябрь 2006-2022 гг.

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.

$ВП=0.275-3.1*10^{-5}*Ta+1.3*10^{-5}*RR*10$; $R^2=0.71$; $Se_y=0.0076$; двухфакторная регрессия

$ВП=0.189+1.63*10^{-5}*RR*10$; $R^2=0.62$; $Se_y=0.0085$; однофакторная регрессия

$ВП=0.364-5.7*10^{-5}*Ta$; $R^2=0.4$; $Se_y=0.01$; однофакторная регрессия



ВП-влажность почвы на глубине 0-10 см,
 Та-сумма температур за вегетационный период года ($T > 10$ град С),
 RR- сумма осадков за этот же период, умноженная на 10.

Славгород									
	ГТК-ВП	Та-ВП	RR-ВП	ГТК-BC	Та-BC	RR-BC	ГТК-NDVI	Та-NDVI	RR-NDVI
ρ_s	0.7	-0.61	0.67	Корр. нет	Корр. нет	Корр. нет	0.86	Корр. нет	0.85
p	$8*10^{-4}$	$5*10^{-3}$	$2*10^{-3}$	-	-	-	$2*10^{-6}$		$6*10^{-6}$



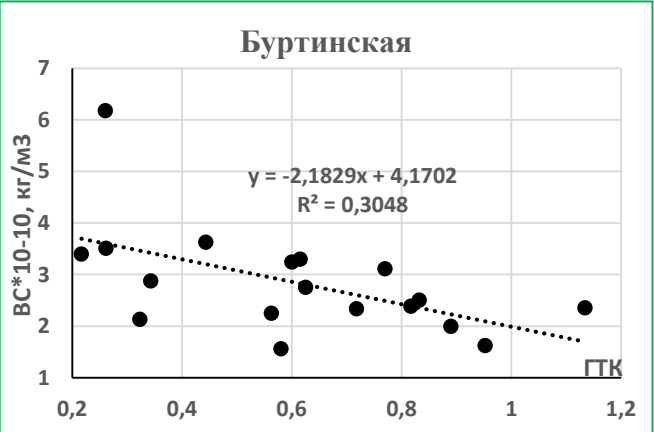
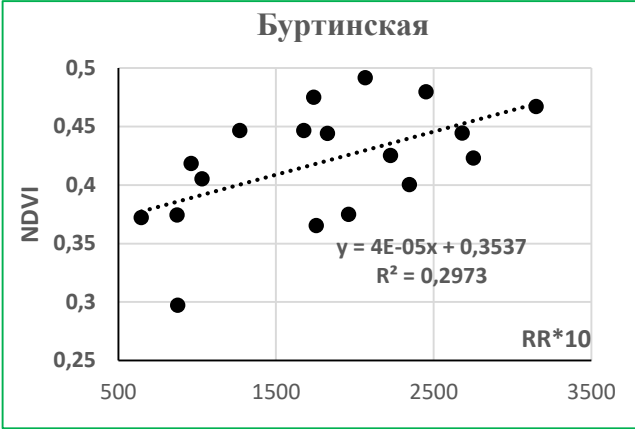
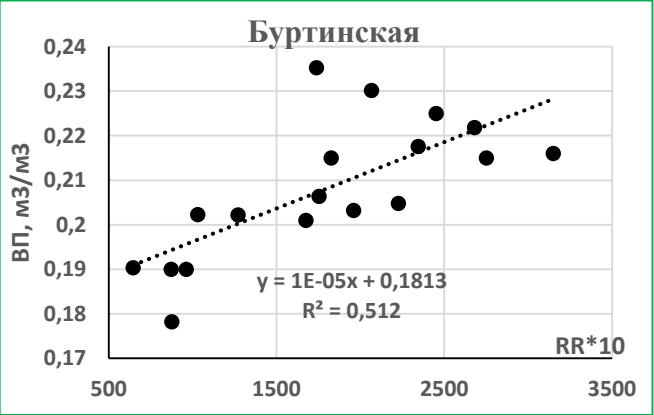
Регрессионные соотношения

Оренбург-Буртинская, май-сентябрь 2005-2022 гг.

$ВП=0.123+1.98*10^{-5}*Ta+1.44*10^{-5}*RR*10;$ $R^2=0.56; Se_y=0.011;$ двухфакторная регрессия

$ВП=0.181+1.49*10^{-5}*RR*10;$ $R^2=0.51; Se_y=0.011;$ однофакторная регрессия

$ВП=0.13+2.61*10^{-5}*Ta;$ $R^2=0.08; Se_y=0.015;$ однофакторная регрессия



Буртинская									
	ГТК-ВП	Ta-ВП	RR-ВП	ГТК-BC	Ta-BC	RR-BC	ГТК-NDVI	Ta-NDVI	RR-NDVI
ρ_s	0.77	-0.42	0.75	-0.53	Корр. нет	-0.52	0.496	Корр. нет	0.5
p	$2*10^{-5}$	0.04	$2*10^{-4}$	0.01	-	0.01	0.02	-	0.02



ВЫВОДЫ

- Межгодовые тренды $ГТК=10*\Sigma RR/\Sigma T_a$ для вегетационного периода (май-сентябрь) определяют тренды межгодовых вариаций рассматриваемых в данной работе значений ВП, ВС, NDVI.
- Так, экстремальные по минимуму ГТК 2010 год в Оренбуржье и 2012 год в Славгороде выявились в межгодовом минимуме ВП, в сезонном и межгодовом минимуме NDVI, в сезонном и межгодовом максимуме ВС для этих лет в этих регионах.
- Межгодовые тренды для Буртинской степи: ГТК, RR-отрицательный, ВП- отрицательный, NDVI – до 2010 отрицательный, после 2010 года- слабо положительный. ВС- положительный.
- Межгодовые тренды для Кулундинской степи в районе Славгорода: ГТК, RR - тренд практически отсутствует (очень слабо положительный), ВП, NDVI, ВС – слабо положительные.
- Межгодовые тренды суммы температур для степей за вегетационный период – положительные.
- Корреляция ВП, NDVI с ГТК значительная или выше, что позволило построить регрессионные соотношения, определяющие целевые переменные (ВП, NDVI) через предикторы (RR, T_a). Регрессии позволяют прогнозировать значения целевых переменных по суммарному количеству осадков и суммарной температуре за вегетационный период.

A vibrant blue sky with wispy white clouds, featuring a central pink rectangular box with the text 'СПАСИБО!' in black, serif font. The sky transitions from a deep blue at the top to a lighter blue near the horizon, where some darker, more dense clouds are visible. The overall mood is bright and positive.

СПАСИБО!



ЛИТЕРАТУРА

Baghdadi N., Choker M., Zribi M., El Hajj M., Paloscia S., Verhoest N. E. C., Lievens H., Baup F. and Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, 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: 10.1029/2002JD003296.

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.

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

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.

McNally, A., K. Arsenault, S. Kumar, 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.