

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ NDVI, ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА УЧАСТКЕ “БУРТИНСКАЯ СТЕПЬ” ЗАПОВЕДНИКА “ОРЕНБУРГСКИЙ” ПО СПУТНИКОВЫМ И НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ ЗА 2000–2022 ГГ.

© 2024 г. Н. В. Родионова¹. *

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., Россия

*E-mail: rnv1948123@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.06.2023 г.

В данной работе для участка “Буртинская степь” заповедника “Оренбургский” 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. Отрицательный тренд значений гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) свидетельствует о тенденции к ослаблению влагообеспеченности территории, что способствует возникновению степных пожаров. Следствием климатических тенденций является положительный тренд значений черного углерода в атмосфере исследуемой территории, а также тенденция к уменьшению влажности верхнего слоя почвы. Абсолютными межгодовыми значениями выделился пирогенный 2010 год: минимум значений NDVI, влажности почвы и максимум значений черного углерода.

Ключевые слова: степь, наземные и спутниковые измерения, ГТК, NDVI, влажность почвы, черный углерод, корреляция

DOI: 10.31857/S0205961424020017, **EDN:** FPCGZE

ВВЕДЕНИЕ

Степная зона России простирается от Черного моря до Алтая на юге страны. Особенности степной зоны складываются, прежде всего, под влиянием климатических факторов. Климат русской степи меняется в направлении с юга на восток с умеренно-континентального до резко-континентального. Степная зона отличается наиболее теплым и сухим климатом. Баланс влаги резко отрицательный. Эти факторы способствуют возникновению степных пожаров. Воздействие пожаров на степь неоднозначное. В результате степных пожаров, возникающих преимущественно весной и осенью, в атмосферу выбрасывается большое количество газообразных и дисперсных продуктов пиролиза и горения степных горючих материалов. Положительное воздействие огня на растительный покров состоит в части изменения возрастного состава сообществ, выпадения сорных видов растений, обогащения зольными элементами почвенных горизонтов. Отрицательные факторы воздействия пирогенной нагрузки на растительность степи состоят в том, что выпадают из травостоя некоторые виды однолетних растений,

повышается температура верхних слоев почвы, тем самым усиливая процесс опустынивания степи, вымерзают подземные побеги и семена в зимний период. При благоприятных метеорологических условиях заповедная степь восстанавливается в течение 9–17 месяцев, и пожар не наносит растительному покрову катастрофических изменений. Одно из влияний пожаров на почвы заключается в том, что на оголенном участке в ближайшие месяцы после пожара на поверхности почвы резко увеличивается испарение, повышается горизонт вскипания, происходит обеднение почв органическим веществом и другие негативные последствия (Буйволов и др., 2014).

В данной работе на примере участка “Буртинская степь” заповедника “Оренбургский” прослеживается динамика изменений за период 2000–2022 гг. климатических условий по гидротермическому коэффициенту Селянинова (ГТК), содержания в атмосфере черного углерода в условиях степных палов, изменения биомассы растительного покрова по значениям вегетационного индекса NDVI и значений поверхностной влажности почвы.

ВАРИАЦИИ ГТК ДЛЯ БУРТИНСКОЙ СТЕПИ ЗА ПЕРИОД 2005–2022 ГГ.

Буртинская степь – участок Природного заповедника “Оренбургский”, находится в Беляевском районе Оренбургской области. Площадь участка составляет 4500 га. Никогда не распахивалась, за исключением залежей 1976 и 1982 гг. общей площадью около 300 га. Частично использовалась под сенокос. На рис. 1 показана карта Беляевского района Оренбургской области (<http://orensteppe.org/node/4966>), в юго-восточной части которой находится территория Буртинской степи.

Климат Буртинской степи имеет явные черты континентальности с холодной суровой зимой (январь $-15,8^{\circ}\text{C}$), сухим жарким летом ($+22^{\circ}\text{C}$). Среднегодовое количество осадков 327 мм. Буртинская степь расположена в подзоне южных черноземов. (<http://artlib.osu.ru/web/books/chibilev/book0114.pdf?ysclid=lh0g3obbty257593177>).

Наиболее часто используемым количественным показателем климата является гидротермический коэффициент Селянинова (Селянинов, 1928; 1958). Определяется ГТК так: $\text{ГТК} = 10 \times \Sigma \text{RR} / \Sigma \text{Ta}$, где ΣRR – сумма осадков за вегетационный период (период со среднесуточными температурами воздуха больше 10°C), ΣTa – сумма среднесуточных температур за этот же период. На рис. 2 приведе-

ны графики значений ГТК, а также суммы температур и осадков*10 за май–сентябрь 2005–2022 гг. для станции Оренбург (ID35121). График ГТК повторяет график количества осадков при практически не меняющихся среднегодовых вариациях за май–сентябрь температуры воздуха. Абсолютный минимум ГТК и осадков принадлежит 2014 году ($\text{ГТК} = 0.2165$). Следующие минимумы ГТК в порядке возрастания значений принадлежат 2010 году (0.26) и 2021 году (0.261). Отрицательный тренд значений суммы осадков и слабый положительный тренд значений суммы температур воздуха за вегетационный период стали основанием для отрицательного тренда значений ГТК за 2005–2022 гг., что свидетельствует о тенденции усиления аридности территории.

ВАРИАЦИИ ВС В АТМОСФЕРЕ БУРТИНСКОЙ СТЕПИ В УСЛОВИЯХ СТЕПНЫХ ПАЛОВ

В степных почвах хранится огромный запас углерода, включающий в себя органический и неорганический углерод. Одной из двух фракций неорганического углерода является черный углерод, т.е. мелкие и мельчайшие частицы угля, образовавшиеся в результате природных пожаров. Источником выбросов черного углерода (BC – black carbon) в степи являются степные пожары. BC является основным компонентом сажи. Время его жизни в ат-



Рис. 1. Карта Беляевского района Оренбургской области.

мосфере от нескольких дней до недель. Частицы ВС легко вымываются осадками. Баланс влаги в зоне степей резко отрицательный, периодически повторяются засухи. Основная часть степных пожаров в заповеднике происходит в конце летнего сезона – августе-октябре, когда идут полевые работы на прилегающих сельскохозяйственных угодьях, а надземная масса травянистых растений высыхает; реже они происходят в апреле-мае, когда сгорает прошлогодняя сухая трава. В 2009 году на участке “Буртинская степь” выгорело 1900 га. В 2010 году в результате пожаров на участках “Айтуарская степь” и “Буртинская степь” выгорело 8100 га травянистой растительности. В 2014 году на участке “Буртинская степь” пожар, возникший на сопредельной территории, в 8 км от границы участка, привел к выгоранию травянистой растительности на общей площади 2000 га. Пожар тушили до 20.09.2014 года почти 2 месяца (Буйволов и др., 2014).

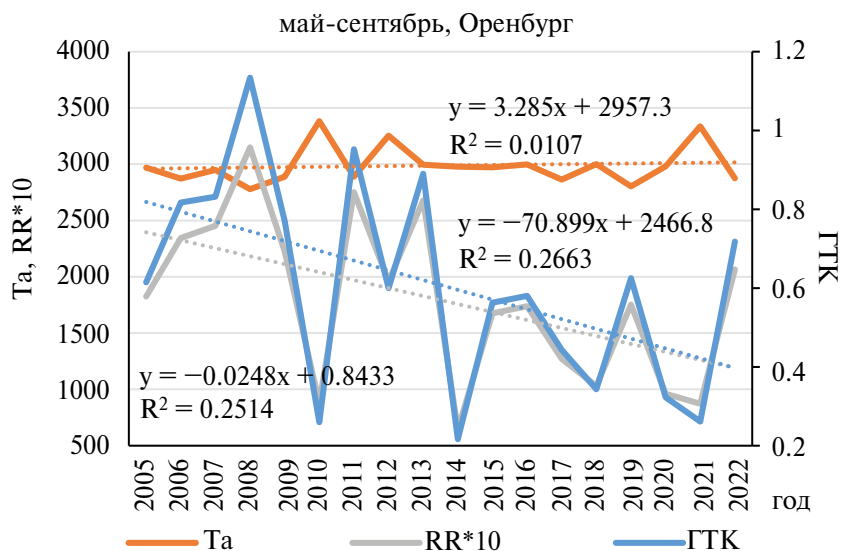


Рис. 2. Графики значений суммы температур и осадков*10 и значений ГТК за май-сентябрь 2005–2022 гг.

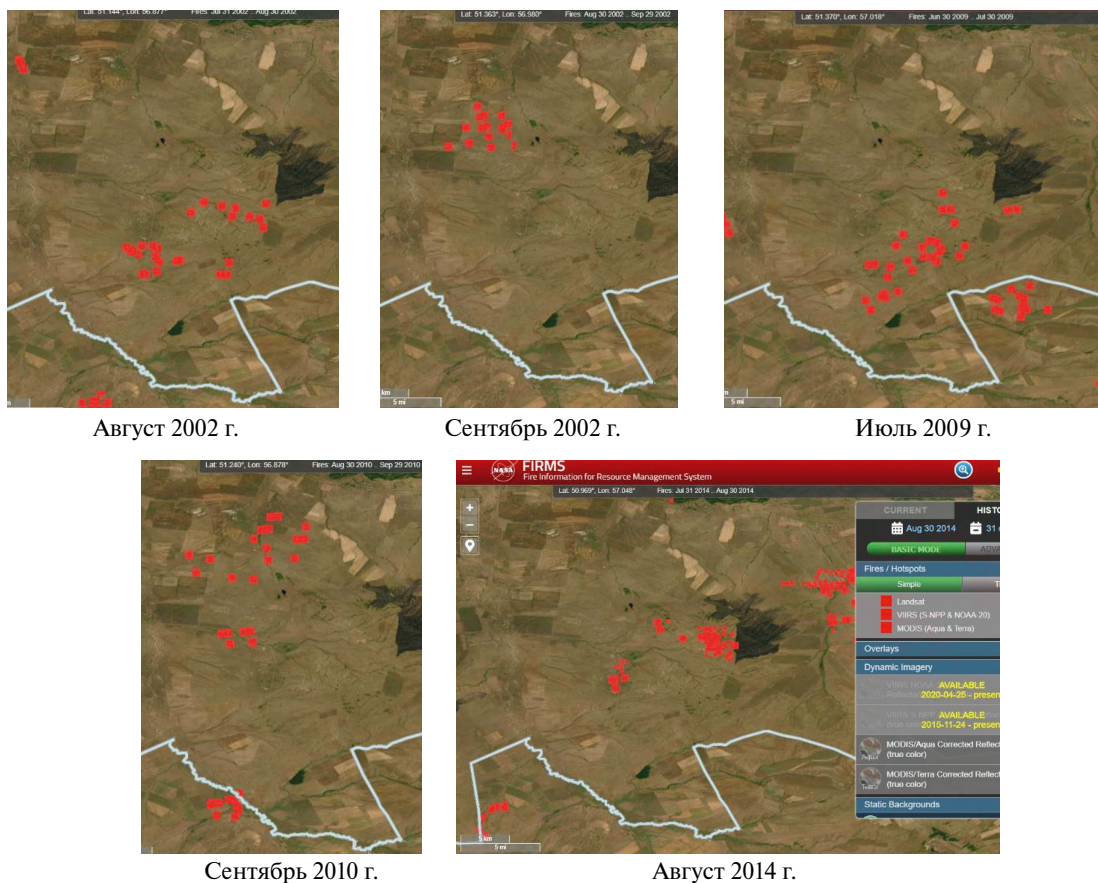


Рис. 3. Карты пожаров на территории Буртинской степи за 2002, 2009, 2010 и 2014 гг.

На рис. 3 показаны карты пожаров на территории Буртинской степи за 2002, 2009, 2010 и 2014 гг., взятые в архиве <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#t:adv;d:2014-07-31.2014-08-30;@56.8,51.1,11z>.

Графики границ пожаров, зафиксированных в период 1991–2014 гг. на участке “Буртинская степь”, и динамика площадей гарей с 1984 по 2014 гг. приведены в работах (Бакиев и др., 2017; Павлейчик, 2016).

Основным источником измерения содержания ВС в атмосфере является спутниковый мониторинг на основе данных реанализа спутниковой информации MERRA-2 (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application Version 2) (Gelaro et al., 2017). Для оценки поверхностной концентрации массы ВС (surface mass concentration-SMC, кг/м^3) использованы среднемесячные данные реанализа MERRA-2 за 2000–2022 годы (продукт MERRA-2 model M2TMNXAER v5.12.4, пространственное разрешение (ПР) $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ (широта $\times$ долгота)). Данные усреднены по площадке с центром 51°N , 56.875°E (Буртинская степь).

На рис. 4 приведены графики сезонных и межгодовых вариаций ВС для территории Буртинской степи за период 2000–2022 гг. В сезонных вариациях (рис. 4а) (показаны графики только для четных лет) есть два пика значений ВС: в апреле и июле–августе–сентябре. Абсолютный максимум значений ВС принадлежит августу 2010 г. со значением $13 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$, следующий по величине максимум – сентябрь 2002 г. ($9.9 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$), и апрель 2009 г. ($7.6 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$). Для 2014 года максимум принадлежит сентябрю со значением ВС $4.8 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$.

Для межгодовых вариаций ВС (рис. 4б) тренд положительный как для всего исследуемого пери-

ода 2000–2022 гг., так и для отдельных его циклов: 2000–2010 гг., 2011–2022 гг. (для последнего цикла угол линии тренда уменьшился). С интенсивными пожарами в 2010 году связан всплеск межгодовых значений ВС этого года с абсолютным максимумом, равным $3.8 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$; второй по значению максимум принадлежит 2002 году ($2.9 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$), третий – 2009 году ($2.7 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$). Близкими к последнему являются значения ВС в 2005, 2011, 2012, 2014, 2017 гг.

ВАРИАЦИИ NDVI НА ТЕРРИТОРИИ БУРТИНСКОЙ СТЕПИ В 2000–2022 ГГ.

Динамику изменений NDVI за 2000–2022 гг. на территории Буртинской степи определим с помощью системы анализа и визуализации данных Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>). Используются усредненные по площадке ($51.125^\circ \div 51.175^\circ$ с.ш., $56.675^\circ \div 56.725^\circ$ в.д.) ежемесячные измерения прибора MODIS (Terra) с ПР = 0.05° (продукт mean_MOD13C2_006_CMG_0_05_Deg_Monthly_NDVI).

На рис. 5а приведены графики (только для четных лет) сезонных вариаций вегетационного индекса NDVI за период 2000–2022 гг. Максимумы значений NDVI принадлежат маю–июню. Абсолютный максимум равен 0.63 (июнь 2003 г.). Абсолютный минимум межгодовых значений NDVI (рис. 5б) принадлежит 2010 г. (0.2745), что очевидно связано с пожарами 2010 г. Далее по возрастающей межгодовые значения NDVI в 2019 г. (0.326), в 2014 г. (0.336), в 2009 г. (0.34), в 2011 г. (0.342) и т.д. Отрицательная линия тренда значений NDVI для цикла 2000–2010 гг. указывает на тенденцию к уменьшению биомассы на территории Буртинской степи за этот период, особенно в результате пожаров 2010 г. За

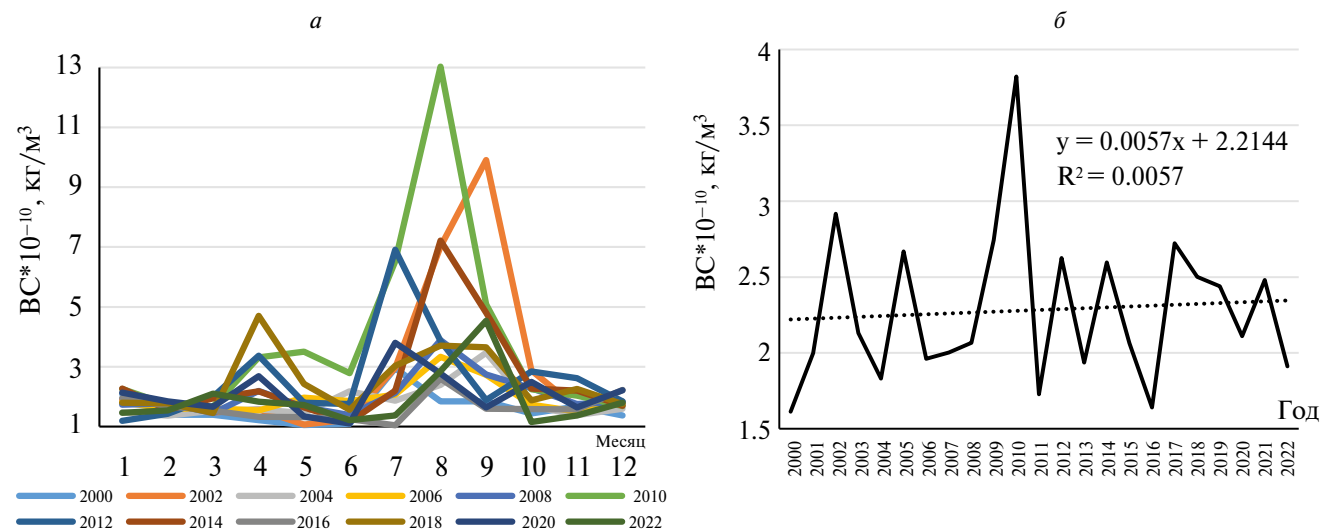


Рис. 4. Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации значений черного углерода за 2000–2022 гг.

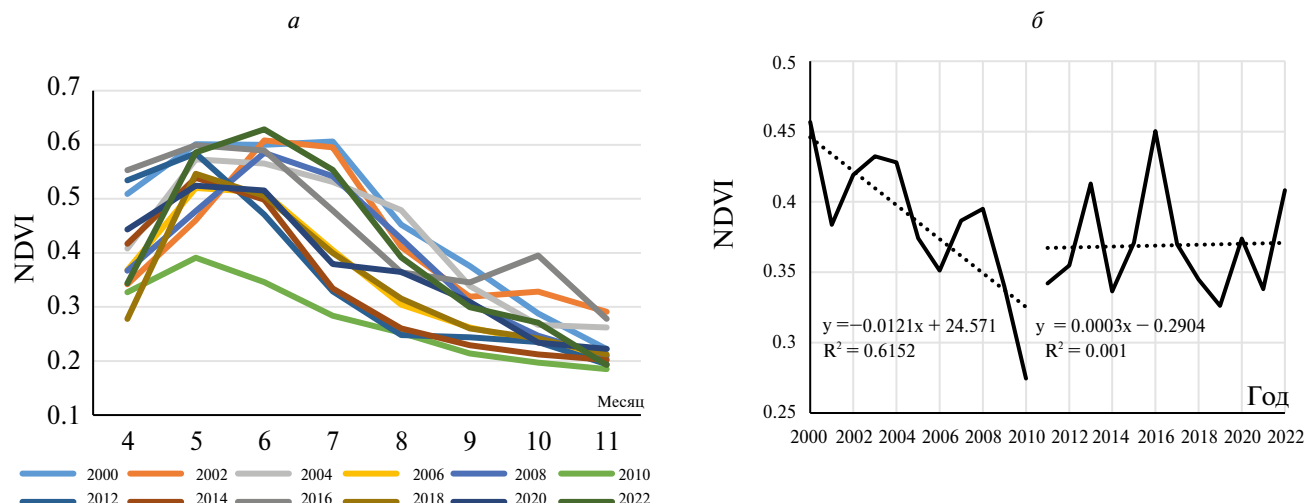


Рис. 5. Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации NDVI для Буртинской степи за период 2000–2022 гг.

период 2011–2022 гг. отмечается слабо положительный тренд, связанный с восстановлением растительности степи. Так, для 2016 г. межгодовое значение NDVI (0.45) почти достигло уровня 2000 г.

ВАРИАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ПОЧВЫ ПО 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 (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. Ежемесячные результаты моделирования FLDAS за более чем 40 лет с 1982 г. по настоящее время находятся в открытом доступе. Дополнительной особенностью FLDAS является то, что эти данные могут быть визуализированы с помощью онлайн-инструмента Giovanni.

Для начала определим, есть ли корреляция вычисленных по модели FLDAS значений влажности почвы (ВП) с наземными измерениями для станции RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 в Оренбургской области, данные которой по ВП доступны на сайте ISMN (International Soil Moisture Network) (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>) с 1958 по 1998 гг. (апрель–сентябрь).

Станция RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 имеет координаты 52.17° с.ш., 55.08° в.д. Расположение станции показано на рис. 6 (указано красной стрелкой). Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение 0.51 ($\text{м}^3 \times \text{м}^{-3}$), глина – 23%, песок – 23%, ил – 54%, organic carbon – 0.89%, пахотные земли, орошаемые дождем. В наземные измерения входит влажность почвы (sm – soil moisture) на глубине 0–20 см и 0–100 см.

На рис. 7а приведены графики сезонных вариаций (три значения в месяц) наземных измерений влажности почвы на глубине 0–20 см на станции

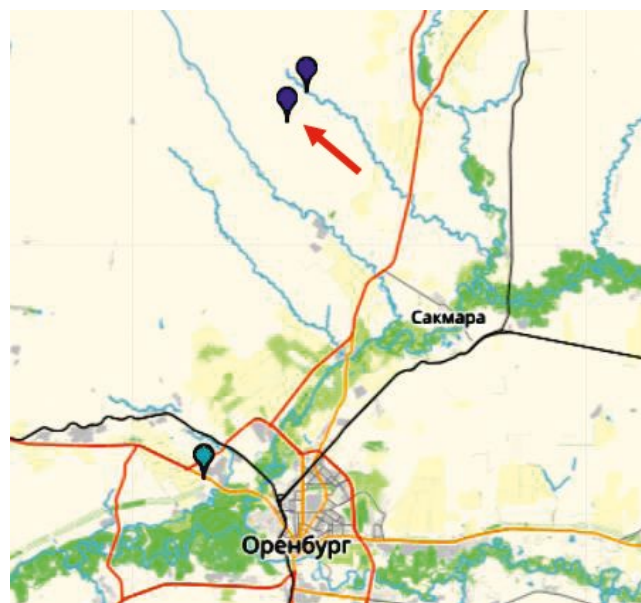


Рис. 6. Расположение станции RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 на карте Оренбургской области.

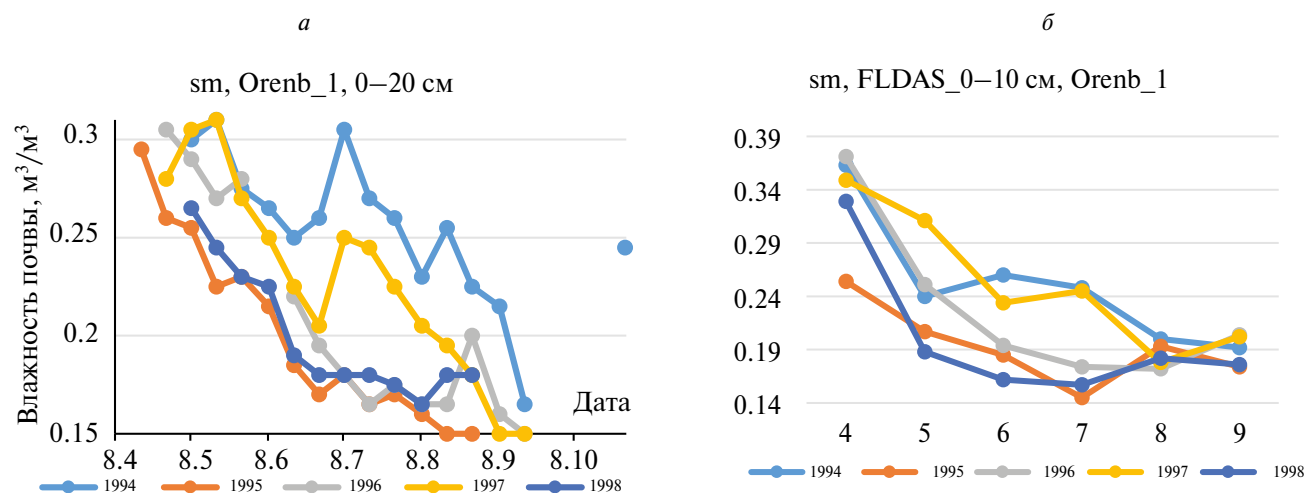


Рис. 7. а – сезонные вариации наземных измерений влажности почвы на глубине 0–20 см и б – среднемесячные значения ВП на глубине 0–10 см по модели FLDAS за 1994–1998 гг. на станции Orenburgskaya_#1.

Orenburgskaya_#1 и на рис. 7б – графики среднемесячных значений ВП на глубине 0–10 см по модели FLDAS (продукт Model FLDAS_NOAH01_C_GL_M v001, $PR = 0.1^\circ$, усреднение по площадке с центром 52.15° с.ш., 55.05° в.д.) за 1994–1998 гг.

График среднемесячных вариаций наземных и FLDAS измерений ВП для станции Orenburgskaya_#1 приведен на рис. 8.

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

Достаточно высокое значение ККС между наземными и FLDAS значениями ВП дает возможность использовать модель FLDAS для оценки ВП в районе Буртинской степи за период 2000–2022 гг. На рис. 9а показаны графики сезонных 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.). Отмечаем два максимума значений ВП: весной (март–апрель) и осенью (ноябрь). Минимум значений ВП принадлежит летним месяцам. Межгодовые вариации значений ВП по модели FLDAS (0–10 см) для Буртинской степи при усреднении значений ВП за май–октябрь показаны на рис. 9б за период 2000–2022 гг. (показаны только четные годы). Абсолютный минимум межгодовых значений ВП принадлежит 2010 году (0.18). Минимум ВП в 2010 году коррелирует с минимумом ГТК (рис. 2) и NDVI (рис. 5), т.е. слабая влагообеспеченность территории способствует усилению степных пожаров (крупный степной пожар 2010 года (Буйолов и др., 2014)) с выгоранием травянистой растительности и уменьшением влажности верхнего слоя почвы. По мере возрастания значений следующие минимумы ВП принадлежат 2021, 2014 и 2015 гг. Линия тренда межгодовых значений влажности почвы отрицательная как для периода с 2000 по 2010 гг., так и для периода 2011–2022 гг., но для второго цикла наклон линии тренда незначительный.

В таблице 1 приведены значения ККС между ГТК, ВС, NDVI и ВП (FLDAS) для Буртинской степи (ρ_s – коэффициент корреляции Спирмена, p – уровень статистической значимости ККС, N – число лет). В условиях разнообразия используемых данных (метеоданные, спутниковые, наземные измерения, модели), в результате получено, что между этими данными есть корреляция со значениями ККС от средних до умеренных при высоком уровне статистической значимости.

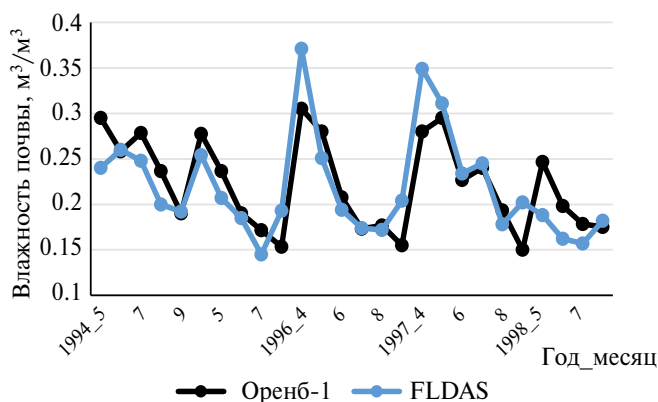


Рис. 8. Среднемесячные вариации значений ВП по наземным и FLDAS данным для станции Orenburgskaya_#1.

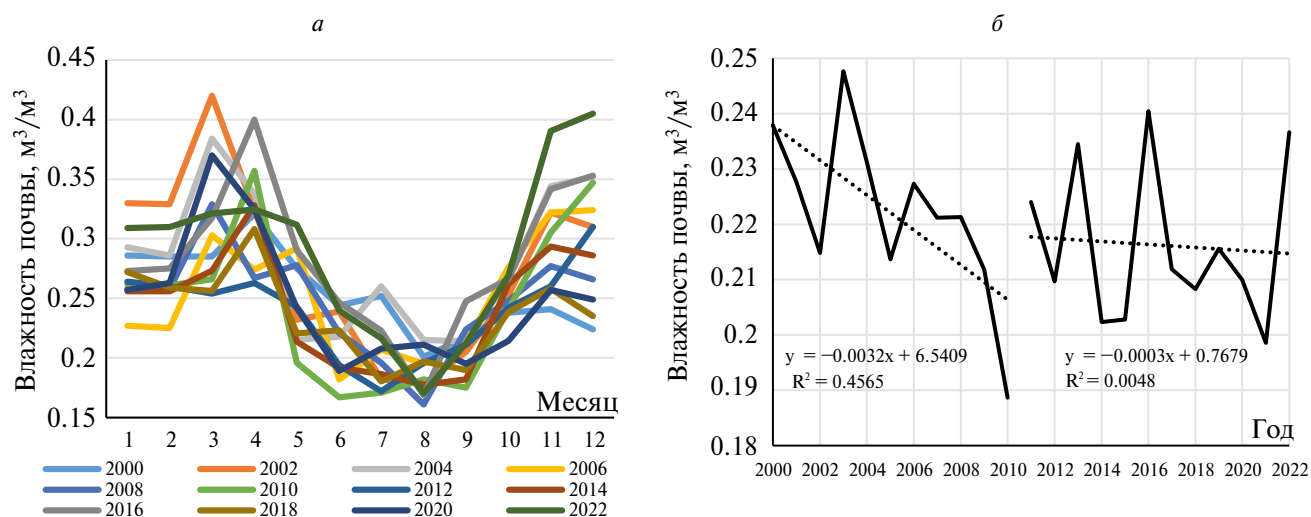


Рис. 9. Графики сезонных (а) и межгодовых (б) вариаций среднеемесячных значений ВП на глубине 0–10 см для района Буртинской степи по модели FLDAS.

Таблица 1. Значение ККС между ГТК, ВС, NDVI и ВП (FLDAS).

	ГТК↔ВС	ГТК↔NDVI	ГТК↔ВП	NDVI↔ВС	ВП↔ВС	NDVI↔ВП
ρ_s	–0.51	0.43	0.75	–0.53	–0.41	0.77
p	0.01	0.04	0.0002	0.005	0.03	0.000007
N	18	18	18	23	23	23

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя полученные результаты по сезонным и межгодовым вариациям значений ГТК, ВС, NDVI и ВП для Буртинской степи за период 2000–2022 гг., можно выделить следующие моменты:

1. Отрицательный тренд значений ГТК за 2005–2022 гг. свидетельствует о тенденции к ослаблению влагообеспеченности территории, что способствует возникновению степных пожаров. Следствием климатических вариаций является положительный тренд содержания черного углерода в атмосфере исследуемой территории, а также тенденция к некоторому уменьшению влажности верхнего слоя почвы. Для межгодовых вариаций NDVI характерны два тренда: отрицательный за период 2000–2010 гг. и слабо положительный за период 2011–2022 гг., что свидетельствует о стремлении к восстановлению степной растительности после степных пожаров 2010 года.

2. Абсолютными межгодовыми данными выделился пирогенный 2010 год: абсолютный минимум значений NDVI (0.27), ВП ($0.188 \text{ м}^3/\text{м}^3$) и абсолютный максимум значений ВС ($3.8 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$), а также второй по значению минимум ГТК (0.26) (после

2014 года (0.21)) и осадков 87.7 мм (измерения за май–сентябрь).

3. Корреляция между значениями ГТК, ВС, NDVI и ВП в условиях разнообразия используемых для их получения данных (метеоданные, спутниковые, наземные измерения, модели) есть со значениями ККС от средних до умеренных при высоком уровне статистической значимости.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакиев А.Г., Балкин А.С., Барбазюк Е.В., Галактионова Л.В., Горелов Р.А., Дусаева Г.Х., Калмыкова О.Г. и др. // Опыт организации мониторинговых исследований изменений степных экосистем после пожара: подходы и методы. Оренбург: ООО “Типография “Южный Урал” 2017. 108 с.
- Буйволлов Ю.А., Быкова Е.П., Гавриленко В.С. и др. Анализ отечественного и зарубежного опыта управления пожарами в степях и связанных с ними экосистемах, в частности, в условиях ООПТ // [Электронный ресурс] (URL: <http://www.>

biodiversity.ru/programs/steppe/docs/pozhar/fires-in-steppe_review21012012.pdf).

Павлейчик В.М. Многолетняя динамика природных пожаров в степных регионах (на примере Оренбургской области) // Вестник Оренбургского Государственного Университета. 2016. № 6 (194). С. 74–80.

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.

Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y. et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmen-

tal 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. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017. 30 (14). P. 5419–5454.

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.

Changes in NDVI, Black Carbon and Soil Moisture in the “Burtinskaya Steppe” of the Orenburg Nature Reserve According to Satellite and Ground Data in 2000–2022

N. V. Rodionova¹

¹Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino, Moscow Region, Russia

In this work, the dynamics of changes and trends in climatic conditions, the vegetation index NDVI, the humidity of the upper soil layer and the content of black carbon in the atmosphere in the conditions of steppe fires by ground and satellite measurements for the period 2000–2022 are traced for the “Burtinskaya Steppe” in the Orenburg region. The negative trend in the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) indicates a tendency to weaken the moisture supply of the territory, which contributes to the occurrence of steppe fires. The consequence of climatic trends is a positive trend in the values of black carbon in the atmosphere of the studied area, as well as a tendency to decrease the biomass and humidity of the upper soil layer. Absolute interannual values were marked in 2010: minimum values of NDVI, soil moisture and maximum values of black carbon.

Keywords: steppe, ground and satellite measurements, HTC, NDVI, soil moisture, black carbon, correlation

REFERENCES

- Bakiev A.G., Balkin A.S., Barbazyuk E.V., Galaktionova L.V., Gorelov R.A., Dusaeva G.X., Kalmykova O.G. et al. // Opyt organizatsii monitoringovykh issledovaniy izmeneniy stepnykh ekosistem posle pozhara: podkhody i metody. Orenburg: OOO “Tipografiya “Yuzhnyj Ural”. 2017. 108 p. (In Russian).
- Bujvolov Yu.A., Bykova E.P., Gavrilenko V.S. et al. Analiz otechestvennogo i zarubezhnogo opyta upravleniya pozharemi v stepyax i svyazannykh s nimi ekosistemax, v chastnosti, v usloviyax OOPT / [Elektr. resurs] (URL: http://www.biodiversity.ru/programs/steppe/docs/pozhar/fires-in-steppe_review21012012.pdf). (In Russian).
- 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: 10.1029/2002JD003296.
- 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.
- 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.
- Pavlejchik V.M. Mnogoletnyaya dinamika prirodnih pozharov v stepnykh regionah (na primere Orenburgskoj oblasti) // Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2016. № 6 (194). P. 74–80. (In Russian).
- 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 agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR [Principles of agro-climatic zoning of the USSR] // Voprosy agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR. M.: MSKH SSSR. 1958. P. 7–14. (In Russian).