

УДК 911.5+504.54

UDC 911.5+504.54

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ
ДИНАМИКА NDVI ПОЛЕССКИХ
ЛАНДШАФТОВ КАК РЕАКЦИЯ
НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ****SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS
OF NDVI OF POLESYE LANDSCAPES
AS A REACTION TO THE
CLIMATIC CHANGES****А. П. Гусев,***кандидат геолого-минералогических
наук, декан геолого-географического
факультета ГГУ им. Ф. Скорины***A. Gusev,***PhD in Geological and Mineralogy,
Dean of the Faculty of Geology and
Geography, GGU named after F. Skoryna*

Поступила в редакцию 02.09.2021.

Received on 02.09.2021.

Цель работы – изучение пространственно-временной динамики NDVI в полесских ландшафтах как реакции на климатические изменения. Решаемые задачи: анализ трендов NDVI в 2000–2020 гг.; сопоставление динамики NDVI с изменениями урожайности, лесистости, площади лесных пожаров; регрессионный анализ влияния летних температуры и количества осадков на NDVI.

В сельскохозяйственных ландшафтах статистически значимый тренд NDVI отсутствует. В лесных и сельскохозяйственно-лесных природно-антропогенных ландшафтах установлен положительный тренд NDVI, обусловленный потеплением климата в регионе. Лесные пожары нарушают климатогенный положительный тренд NDVI в полесских ландшафтах.

Ключевые слова: природно-антропогенные ландшафты, индикатор, NDVI, изменения климата, тренд.

The goal of the article is the study of spatial and temporal dynamics of NDVI of Polesye landscapes as a reaction to the climatic changes. The objectives solved: analysis of NDVI trends in 2000–2020; comparison of NDVI dynamics with the changes in crop capacity, amount of forests, area of forest fires; regressive analysis of impact of summer temperatures and precipitation amount on NDVI. In agricultural landscapes the statistically significant trend NDVI is absent. In forest and agricultural-forest natural-anthropogenic landscapes the positive NDVI trend is established due to warming of climate in the region. Forest fires violate the climatogenic positive NDVI trend in Polesye landscapes.

Keywords: natural-anthropogenic landscapes, indicator, NDVI, climate changes, trend.

Введение. Белорусское Полесье является той частью Беларуси, где потепление климата и его последствия выражены наиболее сильно. Так, на территории Белорусского Полесья за последние 25 лет по сравнению с периодом 1881–1990 гг. средние температуры января и февраля выросли на 2,5 °С, марта – на 2,0 °С, июля и августа – на 1,3–1,4 °С. Годовая сумма температур выше 10 °С практически на всей территории региона превысила 2600 градусов. В связи с потеплением выделена новая агроклиматическая область, захватывающая значительную часть Белорусского Полесья [1; 2].

Лучший прогнозный индикатор климато-генной реакции ландшафтов – их биопро-дуктивность [3]. Это обусловлено тем, что основные климатогенные изменения – это сдвиги в функционировании геосистем, прежде всего в тесно связанных друг с другом биологическом круговороте и влагообороте

[3; 4]. Биопродуктивность ландшафтов, в свою очередь, может оцениваться по значениям нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), вычисляемого по соотношению коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, которые получают по данным космической многозональной съемки. Установлено, что NDVI имеет высокую степень корреляции с первичной продукцией и биомассой [5].

Наблюдения в разных регионах мира показывают рост значений NDVI в последние 30 лет, который объясняют повышением продуктивности растительного покрова под влиянием потепления климата и увеличения содержания углекислого газа в атмосфере. В глобальном масштабе рост продуктивности растительности и соответственно значений NDVI по данным моделирования может быть обусловлен в значительной степени

увеличением концентрации CO_2 в атмосфере [6]. На региональном уровне на динамику продуктивности влияют особенности землепользования, процессы деградации и восстановления растительного покрова, увеличение вегетационного периода и другие факторы [5; 7; 8].

Цель работы – изучение пространственно-временной динамики NDVI в полесских ландшафтах как реакции на климатические изменения. Для выяснения закономерностей динамики NDVI решались следующие задачи: анализ трендов усредненных за летний период значений NDVI в 2000–2020 гг.; сопоставление динамики NDVI с изменениями урожайности сельскохозяйственных земель, площади лесопокрытых земель, площади, пройденной лесными пожарами, площади погибших лесных насаждений; регрессионный анализ влияния средней температуры лета и летнего количества осадков на NDVI в пределах выделов родов ландшафтов.

Методические подходы. Район исследований – восточная часть Полесской ландшафтной провинции. Объектом исследования являлись полесские природно-антропогенные ландшафты (ПАЛ), представленные тремя классами – сельскохозяйственные, сельскохозяйственно-лесные и лесные (по классификации ПАЛ Беларуси Г. И. Марцинкевич [9]). Данные классы определяются по соотношению в структуре землепользования лесных, пахотных, луговых и болот-

ных геосистем. В качестве операционной территориальной единицы выступал выдел рода ландшафта (всего 70 выделов).

В работе использованы данные MOD13Q1, которые содержат значения NDVI, рассчитанные по результатам многозональной съемки спутника Terra (радиоспектрометр MODIS). Эти данные представляют собой растровый композит с пространственным разрешением 250 м, который формируется из максимальных значений NDVI за 16 суток, что позволяет уменьшить помехи, обусловленные изменчивостью свойств атмосферы. Продукт MOD13Q1 взят с ресурса NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov>).

Для устранения влияния сезонной вариабельности NDVI в процессе анализа использовались композиты только летнего сезона. Временной охват – 2000–2020 гг. Для оценки многолетнего тренда в пределах выделов ландшафтов рассчитывались усредненные значения NDVI по 6 композитам.

Результаты и их обсуждение. В целом на территории изучаемого региона в 2000–2020 гг. наблюдается положительный линейный тренд NDVI (рисунок 1). Однако динамика NDVI существенно различается в зависимости от класса ПАЛ (таблица 1). Для сельскохозяйственных ПАЛ характерно отсутствие статистически достоверных трендов (коэффициент детерминации $R^2 < 0,07$), при этом на 76,3 % площади этого класса ПАЛ тренд NDVI отрицательный.

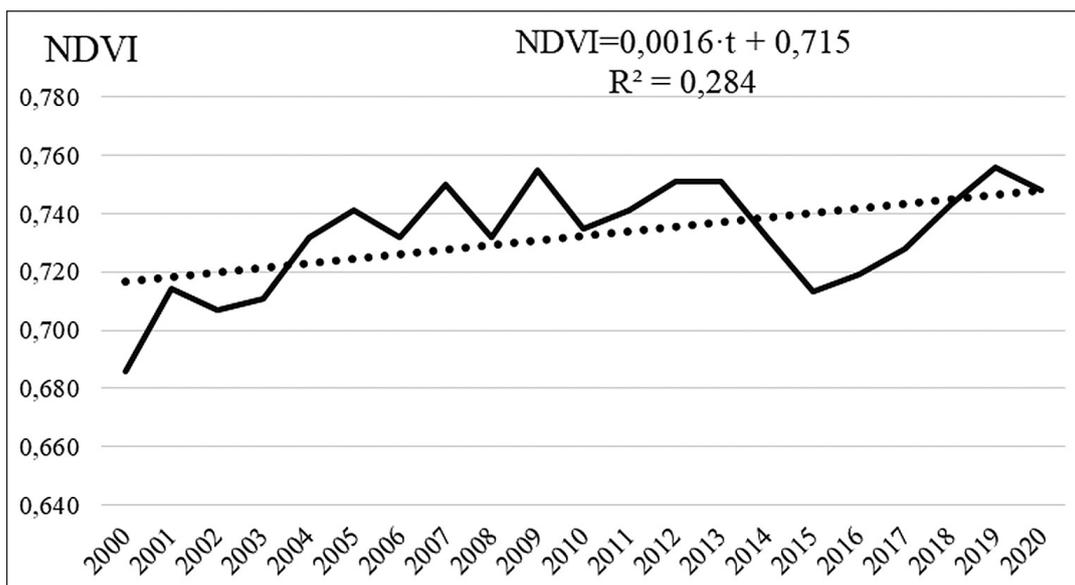


Рисунок 1. – Тренд усредненных за летний период NDVI полесских ландшафтов и его характеристики (обозначение точками – линия тренда)

Таблица 1. – Анализ трендов усредненных за летний период значений NDVI в 2000–2020 гг.

Класс ПАЛ	Тренд (% от общей площади класса)		
	Положительный статистически достоверный	Статистически недостоверный	Отрицательный статистически достоверный
Сельскохозяйственные	0	100,0	0
Сельскохозяйственно-лесные	48,5	51,5	0
Лесные	93,1	6,9	0
Весь регион	50,6	49,4	0

В сельскохозяйственно-лесных ПАЛ статистически достоверный положительный тренд наблюдается на 48,5 % площади данного класса (значения $R^2 = 0,22-0,58$). В лесных ПАЛ достоверный положительный тренд характерен для 93,1 % их площади. Такие результаты в целом близки к выводам, полученным в работе С. А. Лысенко [10] для всей территории Беларуси на основе другого методического подхода.

Каковы же причины пространственной неоднородности выявленных трендов NDVI и соответственно биопродуктивности полесских ландшафтов? Для ответа на этот вопрос мы сопоставили динамику NDVI с изменениями урожайности сельскохозяйственных земель, площади лесопокрытых земель, площади, пройденной лесными пожарами, и другими данными государственной статистики по Беларуси в целом и Гомельской области в частности.

В сельскохозяйственных ПАЛ, вероятно, важную роль в динамике NDVI может играть урожайность агрофитоценозов, которые здесь занимают более 50 % площади. Анализ имеющихся данных показал, что динамика урожайности сельскохозяйственных культур, характеризующихся в регионе наибольшими площадями, не имеет выраженной закономерности. Так, урожайность зерновых и зернобобовых культур (занимают около 40% посевной площади) в 2000–2020 гг. практически не изменялась (установлен статистически недостоверный положительный тренд). Достоверный положительный тренд наблюдался в случае урожайности картофеля ($R^2 = 0,21$) и особенно овощей ($R^2 = 0,72$), посевные

площади которых в сумме не превышают 10 %. Вероятно, отсутствие статистически значимого тренда NDVI может быть обусловлено соответствующей динамикой урожайности сельскохозяйственных культур.

В сельскохозяйственно-лесных и лесных ландшафтах, где велика доля лесных геосистем, повышение NDVI отражает рост зеленой фитомассы (положительное влияние увеличения содержания углекислого газа и температуры [6]), а также увеличение удельной площади древесных насаждений (лесистость территории Беларуси в 2000–2020 гг. увеличилась с 37,8 до 39,9 %), увеличение возраста и соответственно фитомассы лесов, восстановление растительного покрова в сельскохозяйственных ландшафтах, выведенных из оборота после аварии на Чернобыльской АЭС [7; 8].

На фоне общего положительного тренда выделяется аномальное снижение NDVI в 2015–2017 гг. (рисунок 1). Это снижение NDVI зафиксировано на 82,1 % площади региона. При этом на 38 % площади снижение NDVI статистически достоверно. Падение NDVI проявляется в разных родах ландшафтов (в моренно-зандровом, водноледниковом, аллювиальном террасированном, пойменном и т. д.). На 10,8 % площади в 2015 г. имеет место минимум NDVI за весь период наблюдений в XXI веке. Это событие совпадает по времени с максимумом лесных пожаров, который приходится на 2015 г. В этом году площадь, пройденная лесными пожарами, увеличилась по сравнению со средними значениями за 2010–2014 гг. в 70,5 раза, площадь погиб-

ших лесных насаждений – в 4,3 раза, объемом поврежденной древесины на корню – в 67,9 раза. Таким образом, можно предположить, что наблюдаемое падение NDVI в 2015 г. обусловлено именно пирогенным воздействием.

В полесских ландшафтах рост пирогенной трансформации лесных геосистем компенсирует увеличение NDVI, вызванное потеплением климата. Важная роль пирогенного фактора в Полесье обусловлена доминированием здесь сосновых лесов, характеризующихся высокой пожарной опасностью [11].

Нами был проведен анализ методом множественной регрессии влияния климатических факторов на изменения NDVI. Для каждого выдела рода ландшафта рассчитывались среднее значение NDVI, средняя температура, количество осадков за летний сезон. Метеоданные брались с близлежащей к данному выделу метеостанции.

Для всех выделов сельскохозяйственных ПАЛ установлено, что статистически достоверным членом уравнений регрессии является количество осадков. Значения коэффициентов детерминации находятся в пределах 0,41–0,52, то есть доля дисперсии NDVI, объясняемая изменчивостью осадков, составляет 41–52 %. Исходя из этого, можно предположить, что в летний сезон динамика NDVI сельскохозяйственных ПАЛ определяется в большей степени осадками, чем температурой (таблица 2).

Почти половина (46,9 %) выделов сельскохозяйственно-лесных ПАЛ статистически достоверных уравнений регрессии не имеет. Для значительной части (44,2 %) достоверным членом уравнения регрессии также оказалось количество осадков ($R^2 = 0,21–0,52$). Для небольшой части территории (5,4 %) – температура. Кроме того, для 3,5 % площади класса в уравнение регрессии вошли оба фактора.

Таблица 2. – Влияние климатических факторов на изменения NDVI региональных геосистем (удельная площадь класса ПАЛ, %)

Класс ПАЛ	Влияние статистически недостоверно	Влияние статистически достоверно		
		Температура	Количество осадков	Температура и количество осадков
Сельскохозяйственные	0	0	100	0
Сельскохозяйственно-лесные	46,9	5,4	44,2	3,5
Лесные	20,3	51,7	28,0	0
Регион в целом	40,1	12,2	45,0	2,7

В лесных ландшафтах более половины территории (51,7 %) характеризуется уравнением регрессии, в котором статистически достоверным членом оказывается температура ($R^2 = 0,20–0,25$). Влияние осадков на NDVI статически достоверно для 28,0 % площади этого класса ($R^2 = 0,23–0,31$). По коэффициентам детерминации видно, что вариабельность значений NDVI, объясняемая изменениям температуры и осадков, в основном составляет 20–30 %. На 20,3 % территории лесных ландшафтов достоверного влияния на NDVI рассматриваемых климатических показателей не установлено.

Таким образом, видно, что в разных классах ПАЛ влияние изменений климата на NDVI не одинаково. Так, для значительной части лесных ландшафтов потепление климата (то есть рост температур) может сопровождаться увеличением NDVI, что, вероятно, будет обусловлено повышением биопродуктивности этих ландшафтов.

В сельскохозяйственных ПАЛ главным фактором, влияющим на NDVI, является количество осадков, поэтому потепление климата, выражающееся в росте температур, но без увеличения количества осадков, вы-

зывает снижение NDVI, которое индицирует падение их биопродуктивности.

Если рассматривать весь регион, можно констатировать, что на значительной части территории (45 %) установлено статистически достоверное влияние на динамику NDVI количества осадков за летний период (рисунок 2). На втором месте по площади (40,1 %) ландшафты, для которых достоверную связь между NDVI и климатическими факторами установить не удалось. Ландшафты, для которых выявлена положительная связь

NDVI с температурой, концентрируются на юго-западе региона и представлены преимущественно лесными ПАЛ.

Исходя из полученных результатов сельскохозяйственные ПАЛ являются наиболее уязвимыми к климатическим изменениям, которые выражаются в увеличении температуры при незначительном росте осадков [10] и, соответственно, в снижении коэффициента увлажнения, тесно связанного с биопродуктивностью и другими важными характеристиками ландшафтов [3; 4].

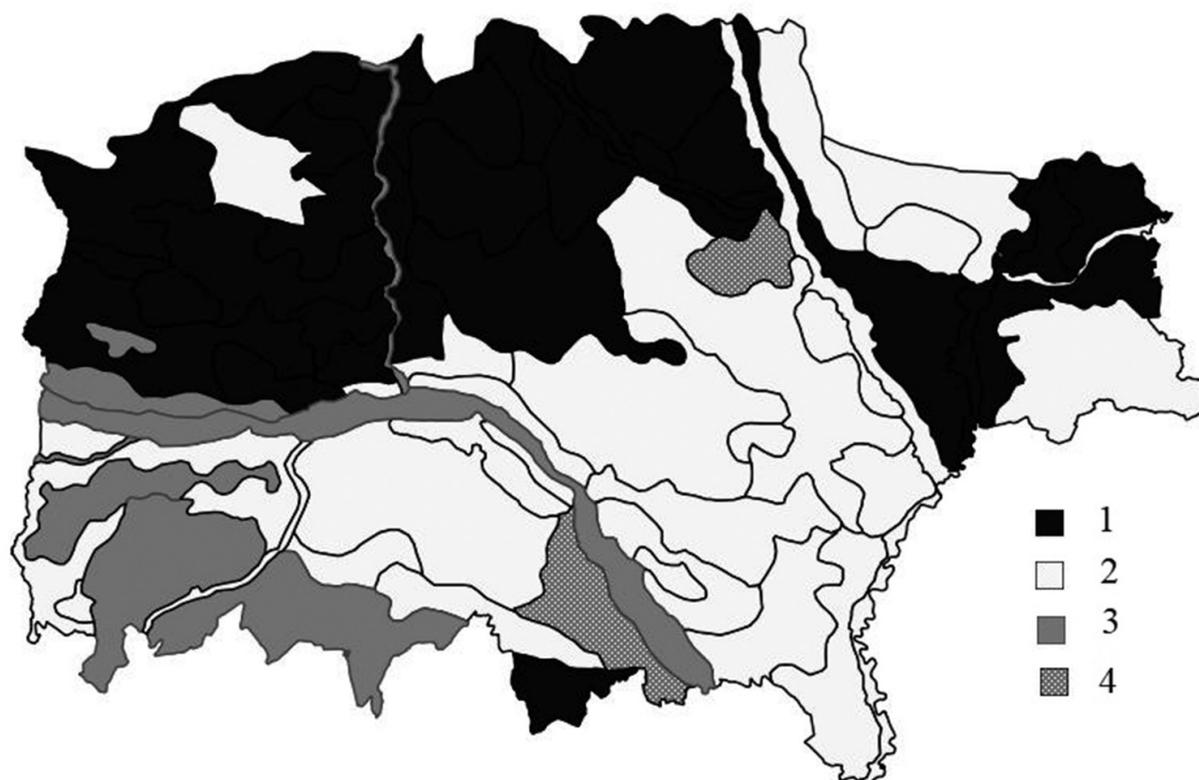


Рисунок 2. – Влияние климатических факторов на динамику NDVI по результатам метода множественной регрессии:
1 – достоверного влияния не обнаружено; 2 – осадки;
3 – температура; 4 – осадки и температура

Заключение. Таким образом, в полесских ландшафтах зафиксирован статистически значимый положительный тренд NDVI, вероятно обусловленный потеплением климата в регионе. При этом установлено, что в разных классах ПАЛ влияние изменений климата на NDVI не одинаково. В сельскохозяйственных ПАЛ главным фактором, влияющим на NDVI, является количество осадков, поэтому потепление климата, выражающееся в росте температур, но без увеличения

количества осадков, вызывает снижение NDVI, которое индицирует падение их биопродуктивности. В значительной части сельскохозяйственно-лесных и лесных ПАЛ потепление климата сопровождается увеличением NDVI. Ведущим фактором, который нарушает климатогенный положительный тренд NDVI в полесских ландшафтах, являются лесные пожары. Полученные результаты следует учитывать при прогнозировании последствий потепления климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Логинов, В. Ф.* Климатические условия Беларуси за период инструментальных наблюдений / В. Ф. Логинов // Наука и инновации. – 2016. – № 9. – С. 25–29.
2. *Логинов, В. Ф.* Изменение площадей агроклиматических областей на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, Т. Г. Табальчук // Природопользование. – 2014. – Вып. 25. – С. 47–52.
3. *Коломыц, Э. Г.* Количественная оценка функциональной устойчивости лесных экосистем / Э. Г. Коломыц, Л. С. Шарая // Экология. – 2015. – № 2. – С. 83–94.
4. *Исаченко, А. Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование / А. Г. Исаченко. – М. : Высшая школа, 1991. – 366 с.
5. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations / G. T. Yengoh, D. Dent, L. Olsson, A. E. Tengberg, C. J. Tucker. – Lund: LUCSUS, 2014. – 80 p.
6. Greening of the Earth and its drivers / Z. Zhu, S. Piao, R. B. Myneni et al. // Nature climate change. – 2016. – Vol. 6. – P. 791–795.
7. *Гусев, А. П.* Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) / А. П. Гусев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2020. – № 1. – С. 101–107.
8. *Гусев, А. П.* Многолетние изменения вегетационных индексов как индикатор динамики состояния природных и антропогенных геосистем / А. П. Гусев // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2021. – Том 7 (17). – Вып. 2. – С. 202–209.
9. *Марцинкевич, Г. И.* Ландшафтоведение : учебник / Г. И. Марцинкевич. – Минск : БГУ, 2007. – 206 с.
10. *Лысенко, С. А.* Климатообусловленные изменения продуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // Исследования Земли из космоса. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
11. *Усеня, В. В.* Лесные пожары на территории Республики Беларусь и минимизация их последствий / В. В. Усеня, Е. Н. Каткова // Природные ресурсы. – 2007. – № 2. – С. 33–40.

REFERENCES

1. *Loginov, V. F.* Klimaticheskie usloviya Belarusi za period instrumental'nyh nablyudenij / V. F. Loginov // Nauka i innovacii. – 2016. – № 9. – S. 25–29.
2. *Loginov, V. F.* Izmenenie ploshchadej agroklimaticheskikh oblastej na territorii Belarusi / V. F. Loginov, T. G. Tabal'chuk // Prirodopol'zovanie. – 2014. – Vyp. 25. – S. 47–52.
3. *Kolomyc, E. G.* Kolichestvannaya ocenka funkcional'noj ustojchivosti lesnyh ekosistem / E. G. Kolomyc, L. S. Sharaya // Ekologiya. – 2015. – № 2. – S. 83–94.
4. *Isachenko, A. G.* Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie / A. G. Isachenko. – M. : Vysshaya shkola, 1991. – 366 s.
5. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations / G. T. Yengoh, D. Dent, L. Olsson, A. E. Tengberg, C. J. Tucker. – Lund: LUCSUS, 2014. – 80 p.
6. Greening of the Earth and its drivers / Z. Zhu, S. Piao, R. B. Myneni et al. // Nature climate change. – 2016. – Vol. 6. – P. 791–795.
7. *Gusev, A. P.* Izmeneniya NDVI kak indikator dinamiki ekologicheskogo sostoyaniya landshaftov (na primere vostochnoj chasti Polesskoj provincii) / A. P. Gusev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. – 2020. – № 1. – S. 101–107.
8. *Gusev, A. P.* Mnogoletnie izmeneniya vegetacionnyh indeksov kak indikator dinamiki sostoyaniya prirodnyh i antropogennyh geosistem / A. P. Gusev // Geopolitika i ekogeodinamika regionov. – 2021. – Tom 7 (17). – Vyp. 2. – S. 202–209.
9. *Marcinkevich, G. I.* Landshaftovedenie : uchebnik / G. I. Marcinkevich. – Minsk : BGU, 2007. – 206 s.
10. *Lysenko, S. A.* Klimatoobuslovlennye izmeneniya produktivnosti nazemnyh ekosistem Belarusi / S. A. Lysenko // Issledovaniya Zemli iz kosmosa. – 2019. – № 6. – S. 77–88.
11. *Usenya, V. V.* Lesnye pozhary na territorii Respubliki Belarus' i minimizaciya ih posledstvij / V. V. Usenya, E. N. Katkova // Prirodnye resursy. – 2007. – № 2. – S. 33–40.