

ТРЕНДЫ ПРОДУКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ В БЕЛОРУССКОМ ПОЛЕСЬЕ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

А.П. Гусев

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

Эл. почта: andi_gusev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.12.2023; принята к печати 30.01.2024

Цель работы – анализ многолетней динамики нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) природных и антропогенных экосистем как реакции на климатические изменения. Район исследований – Белорусское Полесье. Используются данные спектрорадиометрии изображения среднего разрешения (MODIS) спутника Тера (продукт MOD13Q1). Временной интервал – 2000–2022 годы. Объекты исследований: ненарушенные лесные экосистемы; нарушенные лесные экосистемы; болотные экосистемы; пахотные экосистемы. Как индикатор продуктивности использован NDVI. Проведен анализ и оценка статистической значимости трендов NDVI в природных и антропогенных экосистемах. Установлено положительное влияние роста теплообеспеченности и содержания CO₂ в атмосфере на NDVI природных лесных и болотных экосистем. В нарушенных лесных и пахотных экосистемах положительное влияние компенсируется негативным эффектом – снижением влагообеспеченности.

Ключевые слова: Белорусское Полесье, экосистемы, NDVI; тренд; MODIS; изменения климата.

TRENDS IN THE PRODUCTIVITY OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC ECOSYSTEMS IN BELARUSIAN POLESYE UNDER CLIMATIC CHANGES

A.P. Gusev

Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus

E-mail: andi_gusev@mail.ru

The purpose of the work is to analyze the long-term dynamics of NDVI of natural and anthropogenic ecosystems as a response to climate change. The research area is Belarusian Polesye. Survey data from the MODIS sensor of the Terra satellite (product MOD13Q1) was used. Time interval – 2000–2022. Objects of research: undisturbed forest ecosystems; disturbed forest ecosystems; wetland ecosystems; arable ecosystems. NDVI was used as an indicator of productivity. An analysis and assessment of the statistical significance of NDVI trends in natural and anthropogenic ecosystems was carried out. The positive influence of increased heat supply and CO₂ content in the atmosphere on the NDVI of natural forest and swamp ecosystems has been established. In disturbed forest and arable ecosystems, the positive effect is compensated by a negative effect – a decrease in moisture supply.

Keywords: Belarusian Polesie, ecosystems, NDVI; trend; MODIS; climate change.

Введение

Климатические изменения – одна из наиболее злободневных и обсуждаемых экологических проблем современности, которой уделяется значительное количество разнообразных исследований, охватывающих в основном глобальный и региональный уровни. Однако взаимосвязь между изменениями на биосферном уровне и динамикой состояния локальных экосистем изучены слабо, неясны механизмы ответных реакций локальных экосистем на глобальные сигналы [7]. Неоднозначность взаимодействий в системе «региональный климат – локальная экосистема» приводит к ошибкам экологического прогнозирования. Сложно отделить климатогенные

изменения от влияния других факторов – как природных, так социально-экономических и техногенных.

Предполагается, что наиболее чувствительны к изменениям климата ландшафты, находящиеся на границах природных зон (зональные экотоны). Здесь возникают острые экологические проблемы, вызванные развитием негативных экологических процессов, – обезлесивание, опустынивание, таяние вечной мерзлоты и т. д. [3–5, 7]. Многие из указанных процессов обуславливают изменения спектрально-отражательных свойств земной поверхности, что позволяет использовать для их мониторинга методы дистанционного зондирования Земли [12]. Важной и актуальной

задачей является разработка системы экологических индикаторов на базе спутниковых съемок для прогноза неблагоприятных последствий климатических изменений.

Одним из важнейших индикаторов состояния экосистемы служит нормализованный дифференцированный вегетационный индекс (normalized difference vegetation index, NDVI) [9, 12]. NDVI определяют по соотношению коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, которые получают по данным космической многозональной съемки.

В разных природно-географических условиях доказана корреляция между NDVI и первичной продукцией [9, 12]. Имеется тесная взаимосвязь NDVI с наземной фитомассой [12], подтверждаемая для разных регионов мира. Высокая степень корреляции между NDVI и чистой первичной продукцией обуславливает использование данного индекса как индикатора продуктивности и тесно связанной с последней – устойчивости экосистем [1, 2, 7, 12]. NDVI является важным индикатором климатогенных реакций ландшафтов, которые отражают сдвиги в тесно взаимосвязанных друг с другом биологическом круговороте и влагообороте [7]. Многолетние космические наблюдения показывают, что в последние десятилетия в разных природных зонах происходит рост NDVI или «озеленение» ландшафтов, которое не имеет простого и однозначного объяснения [5, 10, 11].

Цель работы – анализ многолетней динамики NDVI природных и антропогенных экосистем как реакции на глобальные изменения в Белорусском Полесье. Решаемые задачи: изучение изменений климата Белорусского Полесья в 2000–2022 годах; анализ трендов NDVI в ненарушенных и нарушенных лесных, болотных и пахотных экосистемах; изучение корреляции между климатическими показателями и NDVI; выяснение вероятных причин выявленных изменений NDVI. Предполагается ответить на два вопроса: 1) есть ли статистически значимая взаимосвязь между изменениями NDVI локальных экосистем и климатических показателей? 2) каковы отличия в динамике NDVI природных и антропогенных экосистем?

Материалы и методы исследования

Район исследований находится на территории Беларуси и представляет собой восточную часть Полесской ландшафтной провинции подзоны полесских (широколиственно-лесных) ландшафтов. По геоботаническому районированию территория относится к Полесско-Приднепровскому округу подзоны широколиственно-сосновых лесов. Природные экосистемы представлены сосновыми, березовыми, осиновыми, черноольховыми, широколиственными и смешанными лесами, верховыми, переходными и низинными болотами. Значительная

часть территории (более 50% площади) – антропогенные экосистемы (пашни, пастбища и сенокосы, водохранилища и т. д.).

Объектами исследований являлись:

- ненарушенные лесные экосистемы (сосновые, широколиственные и мелколиственные леса без видимых следов повреждений);
- нарушенные лесные экосистемы (сосновые, широколиственные и мелколиственные леса, поврежденные пожарами, рубками, техногенным подтоплением, токсичными выбросами);
- болотные экосистемы;
- пахотные экосистемы.

Ненарушенные лесные экосистемы представляют 18 тестовых участков (общая площадь 190,4 км²), нарушенные лесные экосистемы – 8 тестовых участков (33 км²), болотные экосистемы – 5 тестовых участков (231,7 км²), пахотные экосистемы – 15 тестовых участков (208,3 км²).

В работе использован продукт MOD13Q1 (обработанные результаты спектрорадиометрии изображения среднего разрешения (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) со спутника Terra), который представляет собой растр максимальных значений NDVI за 16 суток. Пространственное разрешение 250 м. Для исключения влияния сезонных колебаний NDVI в работе использовались только летние значения.

Величина NDVI измеряется в относительных единицах от –1,0 до +1,0. Вначале для каждого тестового участка определялись средние значения NDVI за летний сезон каждого года, после чего на основе всех тестовых участков средние значения рассчитывались для соответствующего объекта в целом.

Уточнение границ локальных экосистем и их типа проводилось по космическим снимкам спутника Landsat 8. Атмосферная коррекция, привязка, дешифрирование космических снимков выполнялись в геоинформационной системе QGIS 3.6.

Показатели климата (средняя температура лета, летнее количество осадков, средняя температура года, годовое количество осадков) определялись на основе данных 8 метеостанций, расположенных в регионе. Для корреляционного анализа показателей климата с колебаниями NDVI использовались усредненные данные по всем имеющимся метеостанциям региона. Данные по динамике CO₂ были взяты с сайта Global Monitoring Laboratory (<https://gml.noaa.gov/ccgg/>).

Изучение изменений климатических показателей и NDVI проводили с помощью статистических методов: оценка точности подбора уравнения тренда – по коэффициенту детерминации (R²); оценка статистической значимости коэффициента детерминации и уравнения тренда – по критериям Стьюдента и Фишера; оценки связи между изменениями NDVI и климатическими

показателями – непараметрический корреляционный анализ (коэффициент ранговой корреляции Спирмена).

Результаты и их обсуждение

Полесье является частью Беларуси, где потепление климата и его последствия выражены наиболее сильно. Здесь за последние 20–25 лет по сравнению с периодом 1881–1990 годов средние температуры января и февраля выросли на 2,50 °С, марта – на 2,0 °С, июля и августа – на 1,3–1,4 °С. Годовая сумма активных температур (выше 10 °С) практически на всей территории Белорусского Полесья превысила 2600 градусов, в связи с чем была выделена новая агроклиматическая зона [4, 8].

Проведенный нами анализ показал, что на метеостанциях региона (Гомель, Василевичи, Мозырь, Жлобин, Житковичи, Брагин, Октябрь) зафиксированы достоверные положительные тренды температур, но отсутствуют значимые изменения осадков (табл. 1). Среднегодовая температура в Полесье изменялась от 7,1 в 2003 году до 9,7 °С в 2020 году (среднее значение – 8,1 °С). Коэффициент линейного тренда составил 0,057 °С в год. Средняя температура лета колебалась от 17,6 в 2000 году до 21,9 °С в 2010 году (среднее значение – 19,3 °С). Коэффициент линейного тренда – 0,08 °С в год. Годовое количество осадков изменялось от 519 мм в 2015 году до 847 мм в 2012 году (средняя величина – 653 мм/год). Летнее количество осадков в ландшафтах Полесья колебалось от 134 мм в 2015-м до 332 мм в 2009 году (средняя величина – 225 мм). Уравнения трендов для осадков статистически незначимы (табл. 1).

В течение рассматриваемого временного интервала в ненарушенных лесных экосистемах наблюдался статистически значимый рост NDVI (коэффициент линейного тренда составил 0,0021 в год, при коэффи-

циенте детерминации $R^2 = 0,68$). В нарушенных лесных экосистемах величина NDVI колебалась без выраженной закономерности (табл. 1, рис. 1). В болотных экосистемах имел место рост значений NDVI (0,0029 в год, $R^2 = 0,40$), в пахотных экосистемах – снижение NDVI, однако статистически недостоверное (рис. 4).

В табл. 2 приводятся многолетние изменения средних значений, среднеквадратичной ошибки, минимальных и максимальных значений NDVI по изучаемым объектам.

Каковы же вероятные причины выявленных изменений NDVI и соответственно продуктивности экосистем? Можно предположить, что основными факторами, вызывающими наблюдаемые тренды NDVI, могут являться:

- 1) изменение структуры землепользования;
- 2) климатические изменения (повышение температуры);
- 3) увеличение содержания CO_2 в атмосфере, способствующее фотосинтезу («fertilization effect») [10].

Влияние изменения структуры землепользования были исключены подбором тестовых участков (критерий – отсутствие существенных изменений структуры земель в 2000–2022 годах). Для выяснения влияния на NDVI изменений климатических показателей и содержания CO_2 был выполнен корреляционный анализ (табл. 3).

В ненарушенных лесных экосистемах NDVI положительно коррелирует со среднегодовой и летней температурами, а наиболее тесная связь наблюдается с содержанием CO_2 . Потепление положительно сказывается на NDVI лесов за счет увеличения вегетационного периода, снижения риска повреждения деревьев морозами и снегопадами зимой. Следует отметить также положительное влияние роста концентрации CO_2 в атмосфере на фотосинтез ненарушенной лесной растительности Полесья.

Табл. 1

Тренды климатических показателей и NDVI (2000–2022 годы)

Показатель	Уравнение тренда	Коэффициент детерминации R^2
<i>Климат</i>		
Среднегодовая температура, °С	$T_g = 0,057 \cdot t + 7,46; p < 0,05$	0,31
Годовое количество осадков, мм	$O_g = 0,27 \cdot t + 649,5; p > 0,05$	0,0004
Средняя температура лета, °С	$T_l = 0,08 \cdot t + 18,31; p < 0,05$	0,30
Летнее количество осадков, мм	$O_l = 1,70 \cdot t + 245,73; p > 0,05$	0,05
<i>NDVI</i>		
Ненарушенные лесные экосистемы	$NDVI = 0,0021 \cdot t + 0,797; p < 0,05$	0,68
Нарушенные лесные экосистемы	$NDVI = 0,0006 \cdot t + 0,702; p > 0,05$	0,05
Болотные экосистемы	$NDVI = 0,0029 \cdot t + 0,6619; p < 0,05$	0,40
Пахотные экосистемы	$NDVI = -$	0,001

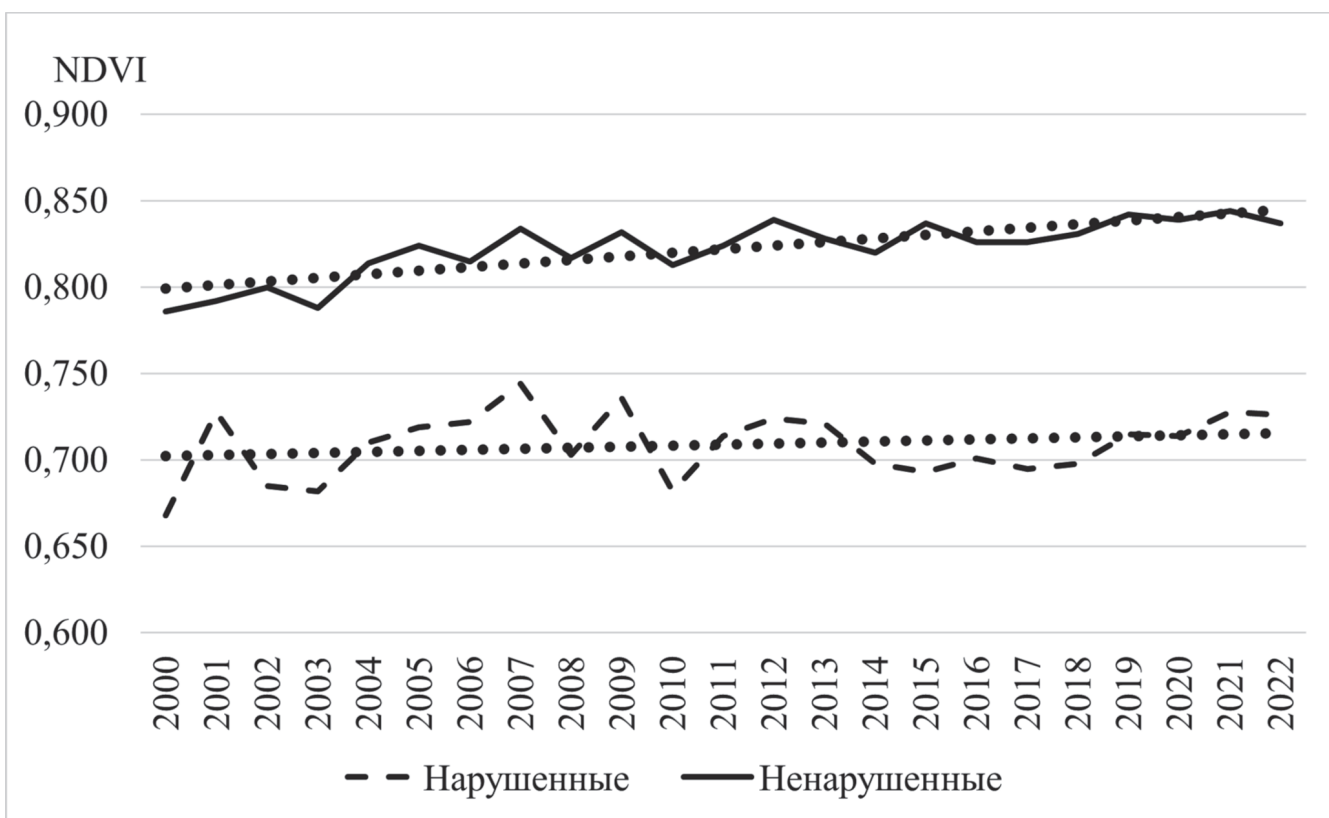


Рис. 1. Многолетние изменения средних значений NDVI в лесных экосистемах (точками показаны линии тренда)

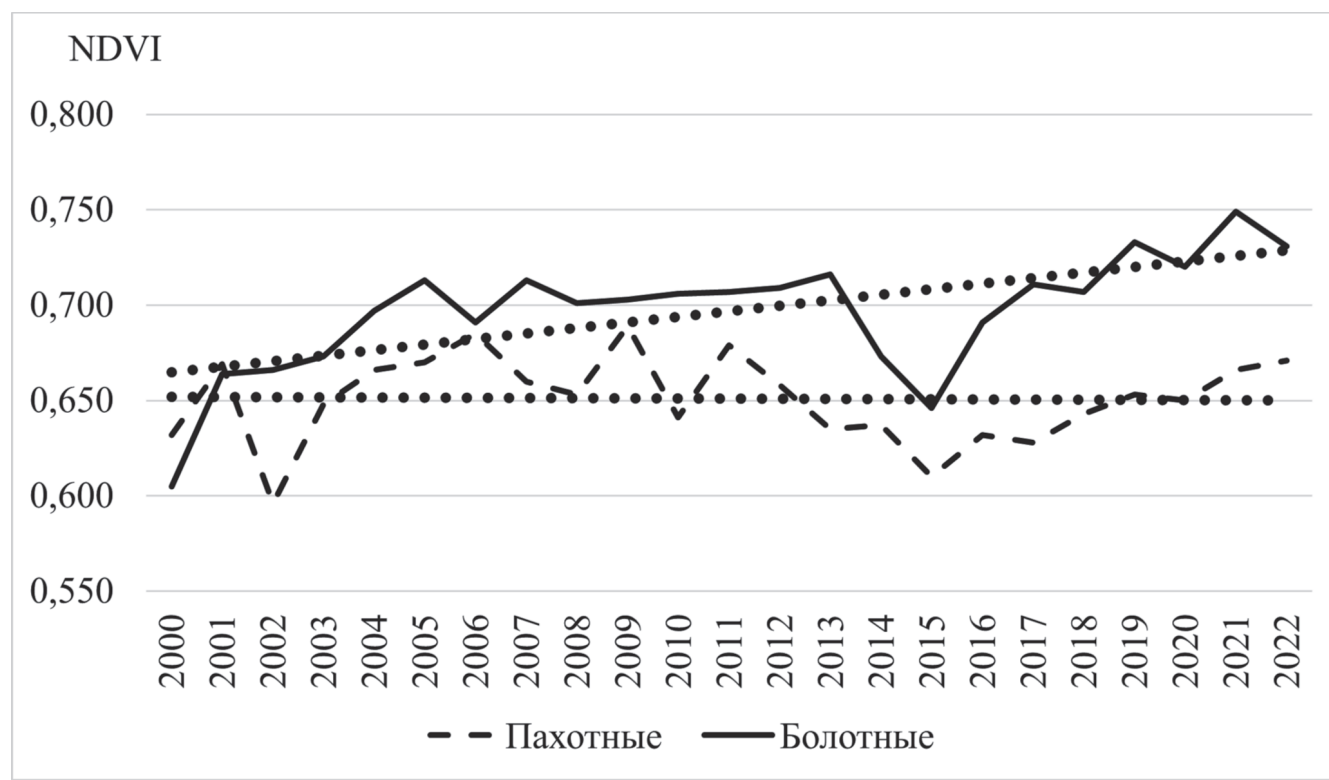


Рис. 2. Многолетние изменения средних значений NDVI в болотных и пахотных экосистемах (точками показаны линии тренда)

Характеристика многолетних изменений NDVI в различных типах экосистем

Год	Экосистемы			
	Лесные ненарушенные	Лесные нарушенные	Болотные	Пахотные
2000	0,786 ± 0,011* 0,699–0,867**	0,688 ± 0,017 0,594–0,718	0,605 ± 0,023 0,558–0,635	0,632 ± 0,015 0,504–0,702
2001	0,792 ± 0,013 0,685–0,866	0,728 ± 0,012 0,661–0,769	0,664 ± 0,019 0,632–0,699	0,668 ± 0,015 0,579–0,765
2002	0,800 ± 0,010 0,726–0,860	0,685 ± 0,026 0,588–0,770	0,666 ± 0,011 0,651–0,687	0,596 ± 0,019 0,490–0,730
2003	0,788 ± 0,011 0,695–0,846	0,682 ± 0,023 0,603–0,764	0,673 ± 0,017 0,640–0,699	0,648 ± 0,15 0,543–0,746
2004	0,814 ± 0,011 0,725–0,863	0,710 ± 0,022 0,635–0,789	0,697 ± 0,011 0,678–0,718	0,666 ± 0,017 0,533–0,768
2005	0,824 ± 0,011 0,730–0,877	0,719 ± 0,017 0,649–0,789	0,713 ± 0,015 0,686–0,740	0,670 ± 0,016 0,557–0,779
2006	0,815 ± 0,011 0,704–0,881	0,722 ± 0,019 0,659–0,788	0,691 ± 0,021 0,654–0,728	0,685 ± 0,014 0,592–0,764
2007	0,834 ± 0,011 0,754–0,885	0,744 ± 0,020 0,648–0,811	0,713 ± 0,015 0,684–0,735	0,660 ± 0,017 0,542–0,776
2008	0,817 ± 0,010 0,727–0,863	0,703 ± 0,016 0,641–0,771	0,701 ± 0,015 0,674–0,724	0,653 ± 0,016 0,517–0,739
2009	0,832 ± 0,010 0,757–0,879	0,736 ± 0,015 0,767–0,792	0,703 ± 0,007 0,690–0,712	0,689 ± 0,015 0,550–0,767
2010	0,813 ± 0,013 0,712–0,877	0,682 ± 0,029 0,518–0,769	0,706 ± 0,020 0,669–0,740	0,641 ± 0,019 0,483–0,736
2011	0,824 ± 0,010 0,736–0,866	0,714 ± 0,025 0,577–0,789	0,707 ± 0,026 0,659–0,751	0,678 ± 0,010 0,607–0,735
2012	0,839 ± 0,009 0,766–0,890	0,724 ± 0,027 0,568–0,795	0,709 ± 0,030 0,650–0,751	0,658 ± 0,015 0,537–0,746
2013	0,827 ± 0,007 0,768–0,873	0,721 ± 0,021 0,628–0,786	0,716 ± 0,030 0,642–0,775	0,635 ± 0,016 0,522–0,720
2014	0,820 ± 0,008 0,762–0,860	0,698 ± 0,028 0,567–0,786	0,673 ± 0,021 0,632–0,696	0,637 ± 0,020 0,487–0,755
2015	0,837 ± 0,011 0,730–0,893	0,693 ± 0,028 0,592–0,809	0,646 ± 0,003 0,640–0,650	0,610 ± 0,025 0,368–0,731
2016	0,826 ± 0,009 0,760–0,869	0,701 ± 0,025 0,578–0,797	0,691 ± 0,005 0,684–0,702	0,632 ± 0,017 0,515–0,718
2017	0,826 ± 0,010 0,750–0,878	0,695 ± 0,024 0,591–0,790	0,711 ± 0,011 0,700–0,733	0,628 ± 0,018 0,521–0,758
2018	0,831 ± 0,009 0,739–0,877	0,698 ± 0,027 0,565–0,785	0,707 ± 0,012 0,694–0,731	0,643 ± 0,017 0,515–0,735
2019	0,842 ± 0,010 0,764–0,901	0,715 ± 0,024 0,594–0,777	0,733 ± 0,025 0,686–0,773	0,652 ± 0,018 0,527–0,768
2020	0,839 ± 0,010 0,759–0,895	0,714 ± 0,023 0,596–0,787	0,720 ± 0,014 0,699–0,748	0,650 ± 0,017 0,564–0,770
2021	0,844 ± 0,012 0,748–0,900	0,728 ± 0,022 0,626–0,814	0,749 ± 0,018 0,727–0,786	0,666 ± 0,015 0,595–0,759
2022	0,837 ± 0,012 0,735–0,901	0,726 ± 0,022 0,613–0,793	0,731 ± 0,012 0,713–0,755	0,671 ± 0,015 0,523–0,742

* – среднее и ошибка среднего; ** – минимальное и максимальное значения.

Корреляция NDVI экосистем с климатическими показателями (подчеркнуты статистически достоверные значения коэффициентов корреляции Спирмена)

Экосистемы	Климатические показатели				Содержание CO ₂ , ppm
	Среднегодовая температура, °С	Годовое количество осадков, мм	Средняя температура лета, °С	Летнее количество осадков, мм	
Лесные ненарушенные	<u>0,43</u>	0,03	<u>0,47</u>	–	<u>0,82</u>
Лесные нарушенные	–0,09	0,33	0,03	0,40	0,17
Болотные	0,23	0,13	0,33	–	<u>0,65</u>
Пахотные	–0,39	–0,38	–0,20	<u>0,57</u>	–0,07

В нарушенных лесных экосистемах статистически достоверная корреляция с каким-либо из рассматриваемых показателей отсутствует. Однако наибольшую величину имеют коэффициенты корреляции с годовыми и летними осадками. Вероятно, колебания NDVI в нарушенных лесах обусловлены в первую очередь динамикой нарушающих факторов, но чувствительны к осадкам.

В болотных экосистемах NDVI не имеет статистически достоверной корреляции с климатическими показателями, но положительно коррелирует с содержанием CO₂ (коэффициент корреляции +0,65 при $p < 0,001$).

В пахотных экосистемах колебания NDVI достоверно коррелируют только с величиной летних осадков (коэффициент корреляции +0,57 при $p < 0,005$). С другими климатическими показателями значения коэффициентов корреляции недостоверны. Вероятно, что именно в пахотных экосистемах в наибольшей степени сказываются отрицательные последствия изменения климата: увеличение частоты экстремальных и неблагоприятных метеорологических условий, увеличение частоты и интенсивности засух, рост пожарной опасности в прилегающих к полям лесах и на торфяниках, дефицит воды в вегетационный период, снижение уровня грунтовых вод, рост экстремальных осадков, появление новых вредителей и болезней растений и т. д. [3, 4, 6, 8]. В пахотных экосистемах положительный эффект увеличения вегетационного сезона ком-

пенсируется негативными изменениями, связанными с увеличением засушливости климата в регионе (рост температур при незначительных колебаниях количества осадков).

Заключение

Таким образом, на локальном уровне мы наблюдаем неоднородную реакцию различных экосистем на действие одного и того же фактора. Из полученных результатов видно, что положительное влияние роста теплообеспеченности и содержания CO₂ в атмосфере на продуктивность (NDVI) имеет место только в природных экосистемах – ненарушенных лесных и болотных. В нарушенных лесных и пахотных экосистемах положительное влияние роста содержания CO₂, вероятно, не проявляется, поскольку более значительное воздействие оказывает негативный эффект, связанный с уменьшением влагообеспеченности. Продуктивность пахотных экосистем в наибольшей степени чувствительна к количеству летних осадков.

Установленные закономерности следует учитывать при прогнозировании климатогенных реакций экосистем и ландшафтов, при разработке адаптационных мероприятий [3].

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Х23КИ-022).

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Гусев А.П. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции). Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. 2020;(1):101-7. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>.
2. Гусев А.П. NDVI как индикатор климатогенных реакций геосистем (на примере юго-востока Беларуси). Региональные геосистемы. 2022;46(2):200-9. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209.
3. Гусев А.П. Оценка риска негативных климатогенных реакций полесских ландшафтов. Российский журнал прикладной экологии. 2022;(4):13-9. DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.13.19>.
4. Данилович ИС, Мельник ВИ, Гейер Б. Современные изменения климата Белорусского По-

лесья: причина, следствия, прогнозы. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2020;(1):3-13. DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-3-13>.

5. Дронин НМ, Тельнова НО, Калуцкова НН. Анализ многолетних трендов продуктивности агроландшафтов юга Восточной Европы по материалам дистанционного зондирования. Геополитика и геоэкодинамика регионов. 2014;10(1):529-38.
6. Лысенко СА, Логинов ВФ, Бондаренко ЮА. Взаимосвязь современных изменений испарения и количества осадков в южных регионах. Природопользование. 2020;(1):20-9.
7. Коломыйц ЭГ. Лесные экосистемы Волжского бассейна в условиях глобального потепления (локальный экологический прогноз). Экология. 2009;(1):9-21.
8. Мельник ВИ, Данилович ИС, Кулешова ИЮ, Комаровская ЕВ, Мельчакова НВ. Оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси за период 1989–2015 гг. Природные ресурсы. 2018;(2):88-101.
4. Danilovich IS, Melnik VI, Geyer B. [Modern climate changes in Belarusian Polesye: causes, consequences, forecasts]. Zhurnal Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Geografiya Geologiya. 2020;(1):3-13. DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-3-13>. (In Russ.)
5. Dronin NM, Telnova NO, Kalutskova NN. [Analysis of long-term trends in the productivity of agricultural landscapes in the south of Eastern Europe based on remote sensing materials]. Geopolitika i Geoekodinamika Regionov. 2014;(1):529-38. (In Russ.)
6. Lysenko SA, Loginov VF, Bondarenko YA. [The relationship between modern changes in evaporation and precipitation in the southern regions of Belarus]. Prirodopolzovaniye. 2020;(1):20-9. (In Russ.)
7. Kolomyts EG. [Forest ecosystems of the Volga basin under conditions of global warming (local environmental forecast)]. Ekologiya. 2009;(1):9-21. (In Russ.)
8. Melnik VI, Danilovich IS, Kuleshova IY, Komarovskaya EV, Melchakova NV. [Assessment of agroclimatic resources of the territory of Belarus for the period 1989–2015]. Prirodnyye resursy. 2018;(2):88-101. (In Russ.)

Общий список литературы/References

1. Gusev AP. [Changes in NDVI as an indicator of the dynamics of the ecological state of landscapes (using the example of the eastern part of Polesne province)]. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta Ser Geografiya Geoekologiya 2020;(1):101-7. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>. (In Russ.)
2. Gusev AP. [NDVI as an indicator of climatogenic reactions of geosystems (using the example of south-east Belarus)]. Regionalnye Geosistemy. 2022;(2):200-9. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209. (In Russ.)
3. Gusev AP. [Assessment of the risk of negative climatogenic reactions of Polesye landscapes]. Rossiyskiy Zhurnal Prikladnoy Ekologii. 2022;(4):13-9. DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.13.19>. (In Russ.)
9. Box EO, Holben BN, Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. Vegetatio. 1989;80:71-89.
10. Zhu Z, Piao S, Myneni RB et al. Greening of the Earth and its drivers. Nat Clim Change. 2016;6:791-5. DOI: 10.1038/NCLIMATE3004.
11. Gusev AP. Impact of climate change on ecosystem productivity of the Belarusian Polesia according to remote data. Contemp Probl Ecol. 2022;15(4):345-52. DOI: 10.1134/S1995425522040060.
12. Yengoh GT, Dent D, Olsson L, Tengberg AE, Tucker CJ. 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. Lund University Centre for Sustainability Studies LUCSUS; 2014.