



УДК 574.4+551.583+504.064.37  
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209

## **NDVI как индикатор климатогенных реакций геосистем (на примере юго-востока Беларуси)**

**Гусев А.П.**

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,  
Республика Беларусь, 246019, г. Гомель, ул. Советская, 104  
E-mail: andi\_gusev@mail.ru

**Аннотация.** Целью работы является изучение взаимосвязи между климатическими показателями и изменениями продуктивности (определяется по NDVI) в локальных геосистемах юго-востока Беларуси. Решаемые задачи: изучение временных трендов климатических показателей и NDVI локальных геосистем в 2000–2020 гг.; оценка статистической значимости связи между климатическими показателями и NDVI в различных геосистемах; выявление геосистем, наиболее чувствительных к быстрым климатическим изменениям. Объектами исследований: лесные ненарушенные, болотные ненарушенные и лесные нарушенные геосистемы. Для ненарушенных лесных и болотных геосистем установлен статистически значимый положительный тренд NDVI. Корреляция NDVI с летними температурой и осадками отсутствует. NDVI лесных геосистем положительно коррелирует со среднегодовой температурой (коэффициент корреляции Спирмена 0,27,  $p < 0,05$ ) и годовым количеством осадков (0,55,  $p < 0,001$ ). В лесных нарушенных геосистемах динамика NDVI обусловлена колебаниями проективного покрытия травяной и древесно-кустарниковой растительности; достоверная корреляция NDVI с климатическими показателями отсутствует.

**Ключевые слова:** лесные геосистемы, климатические показатели, NDVI, тренд, юго-восток Беларуси

**Для цитирования:** Гусев А.П. 2022. NDVI как индикатор климатогенных реакций геосистем (на примере юго-востока Беларуси). Региональные геосистемы, 46(2): 200–209. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209

---

## **NDVI as an Indicator of Climatogenic Responses of Geosystems (on the Example of the South-East of Belarus)**

**Andrei P. Gusev**

F. Skorina Gomel State University  
104 Sovetskaya St, Gomel, 246019, Republic of Belarus  
E-mail: andi\_gusev@mail.ru

**Abstract.** The aim of the work is to study the relationship between climatic indicators and productivity changes (determined by NDVI) in local geosystems of the southeast of Belarus. Research objectives: study of time trends of climatic indicators and NDVI of local geosystems in 2000–2020; assessment of the statistical significance of the relationship between climate indicators and NDVI in various geosystems; identification of geosystems most sensitive to rapid climate change. Research objects: undisturbed forest, undisturbed swamp and disturbed forest geosystems. For undisturbed forest and swamp geosystems, a statistically significant positive NDVI trend has been established. There is no correlation between NDVI and summer temperature and precipitation. The NDVI of forest geosystems is positively correlated with mean annual temperature (Spearman correlation coefficient 0.27,  $p < 0.05$ ) and annual precipitation (0.55,  $p < 0.001$ ). In disturbed forest geosystems, the dynamics of NDVI is due to fluctuations in the projective cover of herbaceous and tree-shrub vegetation; there is no significant correlation of NDVI with climatic indicators.

**Keywords:** wood geosystems, climatic indicators, NDVI, trend, southeast of Belarus

**For citation:** Gusev A.P. 2022. NDVI as an Indicator of Climatogenic Responses of Geosystems (on the Example of the South-East of Belarus). *Regional Geosystems*, 46(2): 200–209 (in Russian). DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209

## Введение

Глобальное потепление – одна из главных экологических проблем современного мира, которой посвящено значительное количество исследований, в основном касающихся результатов инструментальных наблюдений за климатом, прогнозного моделирования климата, оценки последствий климатических изменений для сельского хозяйства, водных ресурсов и т. д. Такие исследования охватывают в основном глобальный и региональный уровни, однако, слабо изучены механизмы передачи воздействия глобальных климатических изменений на локальный уровень, не ясны их механизмы, не разработаны вопросы динамики геосистем в условиях меняющегося климата [Коломыц, 2009; Коломыц, Шарая, 2012].

В результате климатических изменений возникают негативные экологические процессы – обезлесивание, опустынивание, таяние вечной мерзлоты и т.д. [Brink, Eva, 2009; Цепелев и др., 2015; Медведков, 2018]. Эти процессы обуславливают трансформацию спектрально-отражательных свойств земной поверхности, что позволяет использовать для их оценки и мониторинга методы дистанционного зондирования Земли [Yengoh et al., 2015].

Важную роль в изучении климатогенных реакций геосистем играет нормализованный разностный вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), представляющий собой важный индикатор продуктивности растительного покрова. NDVI рассчитывается по данным многозональной космической съемки по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR – значения отражения в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра [Yengoh et al., 2015].

В многочисленных исследованиях установлена корреляция NDVI с зеленой фитомассой, а также первичной чистой и валовой продукцией, которая обуславливает использование данного индекса как индикатора продуктивности и устойчивости экосистем [Raynolds et al., 2006; Yengoh et al., 2015].

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 [Gauthier et al., 2015; Zhu et al., 2016; Зуев и др., 2019]. Глобальное моделирование показало, что рост продуктивности растительности и соответственно значений NDVI может быть обусловлен в значительной степени увеличением концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере [Zhu et al., 2016]. На региональном уровне на изменения продуктивности ландшафтов влияют особенности землепользования, процессы деградации и восстановления растительного покрова и другие факторы, что позволяет использовать NDVI как индикатор их экологического состояния [Гусев, 2020; Гусев и др., 2020; Гусев и др., 2021].

Влияние изменений климата на продуктивность экосистем в разных природных зонах неодинаково и может зависеть от различных факторов. Так, в тундровых ландшафтах Югорского полуострова наблюдаются положительные тренды NDVI, которые предположительно объясняются деградацией многолетнемерзлых пород [Елсаков и др., 2013]. «По-зеленение» тундры выражается в увеличении покрытия трав, кустарников и деревьев [Тишков и др., 2018]. Однако этот процесс пространственно неоднороден: в одних районах имеет место рост NDVI, в других, наоборот – падение [Виноградова и др., 2015; Gauthier et al., 2015; Зуев и др., 2019]. Связь NDVI лесных экосистем с характеристиками климата нелинейна и сильно изменяется в зависимости от лесной формации [Шарый и др.,

2020]. В сельскохозяйственных ландшафтах лесостепной и степной зон Восточной Европы отсутствуют тренды NDVI, имеющие четкую направленность или высокий уровень значимости [Дронин и др., 2014; Тельнова, 2017].

Цель работы – изучение взаимосвязи между климатическими показателями и изменениями продуктивности, индицируемой по NDVI, локальных геосистем юго-востока Беларуси. В ходе выполнения решались следующие задачи: 1) изучение временных трендов климатических показателей и NDVI локальных геосистем в 2000–2020 гг. 2) оценка статистической значимости связи между климатическими показателями и NDVI в различных геосистемах (ненарушенные лесные и болотные, нарушенные лесные); 3) выявление геосистем, наиболее чувствительных к быстрым климатическим изменениям.

### Объекты и методы исследований

Исследования выполнялись на юго-востоке Беларуси (рис. 1). По ландшафтному районированию район исследований относится к восточной части Полесской провинции озерно-аллювиальных, болотных и вторичных водно-ледниковых ландшафтов с сосновыми, широколиственно-сосновыми и дубовыми лесами на дерново-подзолистых, часто заболоченных почвах, болотами. По геоботаническому районированию – к Полесско-Приднепровскому округу подзоны широколиственно-сосновых лесов.



Рис. 1. Район исследований в пределах территории Беларуси  
Fig. 1. Research area within the territory of Belarus

Климат умеренно-континентальный. В г. Гомеле средняя температура самого холодного месяца (январь) составляет  $-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; средняя температура самого теплого месяца (июль) –  $+20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; среднегодовая температура  $+8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; годовая сумма температур выше  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $2650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков –  $635\text{ мм/год}$  (годовой максимум осадков приходится на июнь-июль). Коэффициент увлажнения –  $1,1$ . По климатическим показателям территория относится к суббореальным гумидным ландшафтам.

Природные геосистемы представлены сосновыми, березовыми, осиновыми, черноольховыми, широколиственными и смешанными лесами, верховыми, переходными и низинными болотами. Значительная часть территории (более 50 %) – антропогенные геосистемы (пашни, пастбища и сенокосы, водохранилища и т. д.).

Объектами исследований являлись:

– лесные ненарушенные геосистемы: сосновые, мелколиственные и широколиственные леса (54 тестовых участка, общей площадью 134,6 км<sup>2</sup>);

– болотные ненарушенные геосистемы: низинные и верховые болота (7 тестовых участков, 510 км<sup>2</sup>).

– лесные нарушенные геосистемы, представленные сосновыми и мелколиственными лесами, в которых имели место санитарные и другие рубки, пожары, рекреационной воздействие, влияние выбросов (5 участков, 6,9 км<sup>2</sup>).

Средняя площадь тестовых участков – 9,8 км<sup>2</sup> (от 0,5 до 50 км<sup>2</sup>). Оценку состояния растительности тестовых участков выполняли на основе космической съемки *Landsat 4-5 TM* (2000–2010 гг.) и *Sentinel-2 MSI* (2017–2020 гг.).

Изучаемый временной интервал – 2000–2020 гг.

Значения NDVI были взяты из MOD13Q1 (обработанные результаты съемки сенсора MODIS спутника Terra), который представляет собой растр максимальных значений NDVI за 16 суток. Пространственное разрешение 250 м. Для устранения влияния сезонных колебаний NDVI для анализа использовали только летние композиты.

Обработка и дешифрирование космических снимков *Landsat 4-5* и *Sentinel-2*, создание векторного слоя тестовых участков, зональная статистика по композитам MOD13Q1 выполняли в геоинформационной системе QGIS 3.14.

Климатические показатели (средняя температура лета, летнее количество осадков, средняя температура года, годовое количество осадков) определяли на основе данных по 6 метеостанциям, расположенным в пределах региона.

Изучение динамики климатических показателей и NDVI проводили с помощью статистических методов. Для оценки точности подбора уравнения тренда использовали коэффициент детерминации ( $R^2$ ). Статистическую значимость коэффициента детерминации и уравнения тренда оценивали с помощью критерия Фишера. Для оценки связи между изменениями NDVI и климатическими показателями использованы непараметрический корреляционный анализ (рассчитывался коэффициент ранговой корреляции Спирмена) и метод множественной регрессии. Для статистического анализа применяли программу *STATISTICA 6.0*.

### Результаты и их обсуждение

Анализ данных метеостанций, расположенных в изучаемом регионе, показал, что изменения климатических показателей в 2000–2020 гг. характеризуются следующими особенностями. Для температурных показателей установлены статистически значимые положительные тренды, имеющие линейный характер. Так, среднегодовая температура увеличивалась на 0,07 °C в год ( $R^2 = 0,41$ ), средняя температура лета – также на 0,07 °C в год ( $R^2 = 0,20$ ). Рост температур пространственно неоднороден. Так, например, на метеостанции «Гомель» температуры увеличивались соответственно на 0,064 и 0,055 °C в год; на метеостанции «Василевичи» – на 0,061 и 0,045 °C в год; на метеостанции «Мозырь» – на 0,083 и 0,077 °C в год.

Годовое количество осадков изменялось от 542 мм (2015 г.) до 868 мм (2012 г.); летнее количество осадков – от 135 мм (2015 г.) до 341 мм (2012 г.). Для показателей осадков характерен отрицательный, но статистически незначимый тренд ( $R^2 = 0,01–0,02$ ). Так, на метеостанции «Гомель» наблюдалось статистически незначимое снижение годового количества осадков на 3,4 мм в год и летнего количества осадков на 1,3 мм в год.

Изучение изменений NDVI в геосистемах региона в период 2000–2020 гг. показало следующее. Средние по региону летние NDVI лесных ненарушенных геосистем колебались в пределах 0,775–0,821 (рис. 2). Эти изменения характеризуются статистически значимым линейным трендом – увеличение NDVI на 0,0017 в год (при  $R^2 = 0,49$ ). При этом на

уровне лесных формаций характеристики тренда NDVI различаются (табл. 1). Так, например, значения коэффициентов детерминации варьируют от 0,36 (сосновые леса) до 0,60 (широколиственные леса); значения коэффициентов линейного тренда – от 0,00148 (сосновые леса) до 0,00234 (мелколиственные леса). В болотных геосистемах средние значения NDVI изменялись в интервале 0,603–0,733, наблюдался статистически значимый положительный тренд (коэффициент тренда – 0,003 в год,  $R^2 = 0,38$ ).

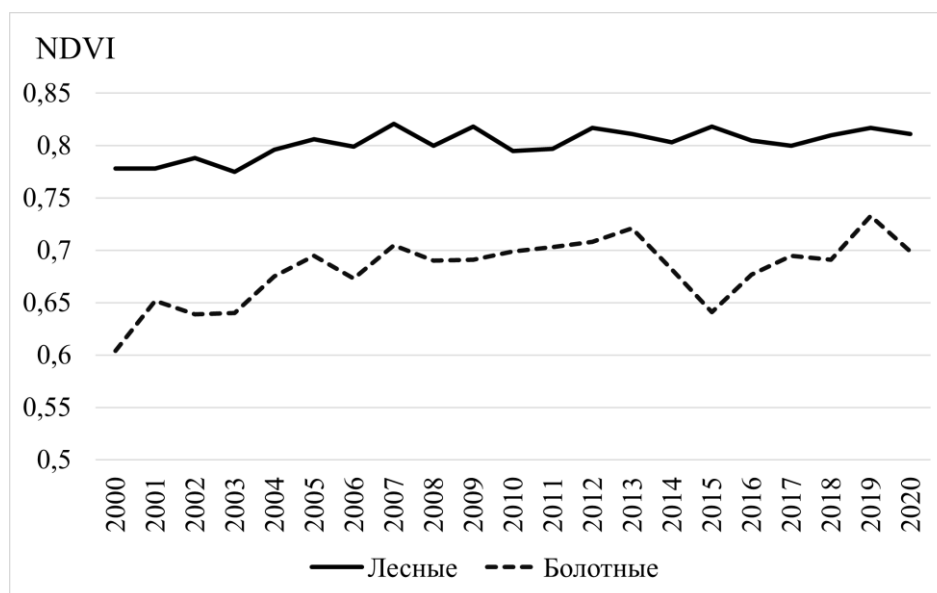


Рис. 2. Многолетняя динамика NDVI в ненарушенных геосистемах юго-востока Беларуси  
Fig. 2. Long-term dynamics of NDVI in undisturbed geosystems of the south-east of Belarus

Таблица 1  
Table 1

Тренды NDVI в ненарушенных и нарушенных геосистемах (2000–2020 гг.)  
NDVI trends in undisturbed and disturbed geosystems (2000–2020)

Геосистемы	Уравнение тренда	Коэффициент детерминации $R^2$	Критерий Фишера F
Сосновые леса	$y = 0,00148 t - 2,224$	0,36	10,8
Мелколиственные леса	$y = 0,00234 t - 3,85$	0,58	26,4
Широколиственные леса	$y = 0,00192 t - 2,994$	0,60	27,9
Все ненарушенные леса	$y = 0,0017 t - 2,676$	0,49	18,4
Болотные геосистемы	$y = 0,003 t - 5,246$	0,38	9,6

Для изучения связи между NDVI и климатическими показателями были применены корреляционный анализ и метод множественной регрессии, результаты которых приведены соответственно табл. 2 и табл. 3.

Видно, что статистически достоверная корреляция между NDVI на уровне отдельных формаций и климатическими показателями года отсутствует (табл. 2). Для полной выборки лесов обнаружена достоверная корреляция с количеством летних осадков. Для сосновых лесов связи между NDVI и климатическими показателями года также не установлено. Выявлена корреляция NDVI мелколиственных и широколиственных лесов со среднегодовой температурой (коэффициенты корреляции Спирмена составили соответственно 0,47 и 0,44). Для полной выборки лесных геосистем установлено, что NDVI положительно коррелирует со среднегодовой температурой (коэффициент корреляции Спирмена 0,27,  $p < 0,05$ ) и годовым количеством осадков (0,55,  $p < 0,001$ ). Для болотных геосистем достоверная корреляция NDVI с климатическими показателями отсутствует (табл. 2).

Таблица 2  
Table 2Корреляция NDVI с климатическими показателями в ненарушенных геосистемах  
(коэффициент ранговой корреляции Спирмена)  
Correlation of NDVI with climate indicators in undisturbed geosystems  
(Spearman's rank correlation coefficient)

Геосистемы	Климатические показатели*			
	Тл, °С	Ол, мм	Тг, °С	Ог, мм
Сосновые леса	0,15	0,12	0,28	0,12
Мелколиственные леса	0,26	0,16	<u>0,47</u>	0,18
Широколиственные леса	0,09	0,02	<u>0,44</u>	0,08
Все ненарушенные леса	0,04	<u>0,38</u>	<u>0,27</u>	<u>0,55</u>
Болота	0,29	0,28	0,22	0,18

\*Тл – средняя температура лета; Ол – летнее количество осадков; Тг – средняя температура года; Ог – годовое количество осадков. Подчеркнуты статистически достоверные значения ( $p < 0,05$ )

Метод множественной регрессии, в котором зависимым фактором выступал NDVI, а независимыми факторами – средняя температура лета и летнее количество осадков, статистически значимой связи не выявил, как в случае полной выборки лесных геосистем, так и отдельно по формациям (табл. 3). Статистически значимое уравнение множественной регрессии для NDVI лесов было получено, когда в качестве независимых факторов выступали среднегодовая температура и годовое количество осадков (при  $R^2 = 0,44$ , т. е. 44 % вариальности NDVI лесов обусловлено изменениями климатических показателей).

Таблица 3  
Table 3Результаты метода множественной регрессии для ненарушенных геосистем  
Results of the Multiple Regression Method for undisturbed Geosystems

Геосистемы	Уравнение множественной регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$	Критерий Фишера F
Сосновые	$NDVI = 0,17 \times Tл + 0,16 \times Oл + 0,71$	0,04	0,8
	$NDVI = 0,35 \times Tг + 0,29 \times Oг + 0,70$	0,11	2,5
Мелколиственные	$NDVI = 0,30 \times Tл + 0,25 \times Oл + 0,74$	0,11	2,4
	$NDVI = 0,74 \times Tг + 0,51 \times Oг + 0,66$	<u>0,47</u>	<u>17,5</u>
Широколиственные	$NDVI = 0,12 \times Tл + 0,11 \times Oл + 0,81$	0,02	0,4
	$NDVI = 0,52 \times Tг + 0,29 \times Oг + 0,71$	<u>0,25</u>	<u>6,6</u>
Все ненарушенные леса	$NDVI = 0,01 \times Tл + 0,37 \times Oл + 0,77$	0,13	4,7
	$NDVI = 0,42 \times Tг + 0,66 \times Oг + 0,54$	<u>0,44</u>	<u>23,2</u>
Болота	$NDVI = 0,38 \times Tл + 0,33 \times Oл + 0,37$	0,21	2,6
	$NDVI = 0,22 \times Tг + 0,23 \times Oг + 0,54$	0,08	0,8

Условные обозначения смотри в табл. 2.

Аналогичные результаты получены также для мелколиственных и широколиственных лесов (коэффициенты детерминации  $R^2$  соответственно составили 0,47 и 0,25). Для сосновых лесов оба уравнения множественной регрессии оказались недостоверны.

Для болотных геосистем статистически значимой связи NDVI с климатическими показателями не установлено ни корреляционным анализом (см. табл. 2), ни методом множественной регрессии (см. табл. 3).

Положительный тренд NDVI в лесных ненарушенных геосистемах может объясняться как потеплением климата (благоприятно влияют на продуктивность увеличение вегетационного периода и «мягкие» зимы), так и ростом содержания  $CO_2$  в атмосфере,



способствующим фотосинтезу [Zhu et al., 2016]. Так, взаимосвязь изменений NDVI лесов (мелколиственных и широколиственных) со среднегодовой температурой и годовым количеством осадков объясняется тем, что летний NDVI лесов зависит не только от характеристик собственно лета, но от характеристик зимы (повреждение деревьев морозами, эффект «зимней засухи») и весны (заморозки, засуха). Схожая закономерность зафиксирована в Волжском регионе [Шарый и др., 2020].

Наличие положительного тренда NDVI указывает на рост продуктивности болот, связь которой с климатическими изменениями в пространственно-временном масштабе исследований не обнаружена. Вероятно, продуктивность болот, тестовые участки которых находятся в пределах особо охраняемых природных территорий, отражает глобальную тенденцию «озеленения», обусловленную ростом содержания углекислого газа в атмосфере [Zhu et al., 2016].

Нарушенные лесные геосистемы в течение 2000–2020 гг. испытывали значительные изменения, вызванные дигрессивными процессами (преимущественно рубки), которые можно оценить по соотношению проективных покрытий травяной и древесно-кустарниковой растительности. Для таких геосистем наблюдается тесная положительная корреляция между NDVI и величиной проективного покрытия древесно-кустарниковой растительности (табл. 4). С величиной проективного покрытия травяной растительности имеет место отрицательная корреляция (коэффициент корреляции составил от  $-0,37$  до  $-0,77$  в зависимости от формации). При этом теснота корреляционной связи в мелколиственных лесах существенно выше, чем в сосновых. С температурами корреляционная связь отрицательная, с осадками – положительная (во всех случаях коэффициенты корреляции статистически недостоверны).

Таблица 4  
Table 4

Корреляция NDVI с показателями растительного покрова и климата в нарушенных лесных геосистемах (коэффициент ранговой корреляции Спирмена)  
Correlation of NDVI with indicators of vegetation cover and climate in disturbed geosystems (Spearman's rank correlation coefficient)

Геосистемы	ППТР, %	ППДР, %	Климатические показатели			
			Тл, °С	Ол, мм	Тг, °С	Ог, мм
Сосновые нарушенные леса	<u><math>-0,37</math></u>	<u><math>0,36</math></u>	$-0,26$	$0,21$	$-0,32$	$0,21$
Мелколиственные нарушенные леса	<u><math>-0,77</math></u>	<u><math>0,77</math></u>	$-0,19$	$0,27$	$-0,21$	$0,13$
Все нарушенные леса	<u><math>-0,63</math></u>	<u><math>0,62</math></u>	$-0,24$	$0,26$	$-0,36$	$0,26$

ППТР – проективное покрытие травяной растительности; ППДР – проективное покрытие древесно-кустарниковой растительности. Условные обозначения смотри в табл. 2.

Таким образом, в лесных геосистемах рост проективного покрытия травяной растительности индицирует их деградацию (снижение сомкнутости древостоя, рост площади вырубок и полян) и соответственно снижение NDVI. И наоборот, увеличение покрытия древесно-кустарниковой растительности и снижение покрытия травяной растительности ведет к росту значений NDVI. С климатическими показателями в таких геосистемах статистически достоверная корреляция NDVI отсутствует.

Схожие результаты показал метод множественной регрессии. В статистически значимые уравнения множественной регрессии вошли только показатели проективного покрытия растительности.

Таким образом, в геосистемах, испытывающих дигрессивные смены, главным фактором, обуславливающим изменения NDVI, являются колебания проективного покрытия

травяной и древесно-кустарниковой растительности. Действие на продуктивность таких геосистем климатических факторов маскируется более мощным влиянием процессов, связанных с ростом или снижением антропогенной нагрузки.

### Заключение

Выполненные исследования показали, что локальные геосистемы юго-востока Беларуси различаются по своей реакции на глобальные климатические изменения. Отклик NDVI и соответственно продуктивности на изменения климата зависит от лесной формации и особенностей режима антропогенных нарушений.

В ненарушенных лесных и болотных геосистемах наблюдается достоверный положительный тренд NDVI, который, вероятно, в основном отражает глобальную тенденцию «озеленения», обусловленную ростом содержания углекислого газа в атмосфере. В ненарушенных лесных геосистемах многолетняя динамика NDVI также связана с действием климатических факторов и дифференцирована в зависимости от типа геосистемы и особенностей растительности. Так, в сосновых лесах достоверная связь NDVI с климатическими показателями отсутствует. В мелколиственных и широколиственных лесах имеет место достоверная положительная корреляция NDVI со среднегодовой температурой. Исходя из полученных данных наименее чувствительны к климатическим изменениям болота и сосновые леса.

В геосистемах, испытывающих дигрессивную динамику, главным фактором, детерминирующим изменения NDVI, являются колебания соотношения проективных покрытий травяной и древесно-кустарниковой растительности, обусловленные влиянием антропогенных нарушений.

### Список литературы

- Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Белоновская Е.А., Грачева Р.Г. 2015. Воздействие изменения климата на горные ландшафты Северного. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 12 (6): 35–47.
- Гусев А.П. 2020. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции). Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология, 1: 101–107. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667.
- Гусев А.П., Филончик Н.Н., Шпилевская Н.С. 2020. Многолетние тренды состояния растительности в природных и антропогенных ландшафтах Белорусского Полесья по данным MODIS (2000–2019). Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология, 6 (3): 200–209.
- Гусев А.П., Шпилевская Н.С., Филончик Н.Н. 2021. Нормализованный дифференцированный вегетационный индекс охраняемых ландшафтов юга Беларуси. Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология, 2: 13–19. DOI: 10.17308/geo.2021.2/3442.
- Дронин Н.М., Тельнова Н.О., Калущкова Н.Н. 2014. Анализ многолетних трендов продуктивности агроландшафтов юга Восточной Европы по материалам дистанционного зондирования. Геополитика и экогеодинамика регионов, 10 (1): 529–538.
- Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е., Шанов В.М. 2013. Тренды изменений растительного покрова Югорского полуострова последнего десятилетия: сопоставление результатов дистанционных и полевых исследований. Геоботаническое картографирование, 2013: 93–111.
- Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В. 2019. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений. Исследование Земли из космоса, 6: 66–76. DOI: 10.31857/S0205-96142019666-76.
- Коломыц Э.Г. 2009. Лесные экосистемы Волжского бассейна в условиях глобального потепления (локальный экологический прогноз). Экология, 1: 9–21.
- Коломыц Э.Г., Шарая Л.С. 2012. Влияние глобального потепления на ландшафтную структуру Северного Кавказа. Известия РАН. Серия географическая, 4: 45–61. DOI: 10.15356/0373-2444-2012-4-45-61.
- Медведков А.А. 2018. Индикация состояния мерзлотно-таежных ландшафтов на южной периферии криолитозоны в условиях изменяющегося климата. Вестник Московского государственного





- областного университета. Серия: Естественные науки, 1: 18–28. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-18-28.
- Тишков А.А., Белонувская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Тертицкий Г.Н. 2018. «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты. Арктика: экология и экономика, 2 (30): 31–44. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44.
- Тельнова Н.О. 2017. Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 14 (6): 97–107. DOI: 10.21046/20707401201714697107.
- Шарый П.А., Шарая Л.С., Сидякина Л.В. 2020. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 17 (4): 154–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163.
- Цепелев В.Ю., Паниди Е.А., Торлопова Н.В., Бобков А.А. 2015. Использование характеристик растительного покрова таежной зоны для мониторинга климатических изменений XXI в. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 40: 221–235.
- Brink A.B., Eva H.D. 2009. Monitoring 25 Years of Land Cover Change Dynamics in Africa: A Sample Based Remote Sensing Approach. Applied Geography, 29 (4): 501–512. DOI: 10.1016/j.apgeog.2008.10.004.
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. 2015. Boreal Forest Health and Global Change. Science, 349 (6250): 819–822. DOI: 10.1126/science.aaa9092.
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sitch S., Friedlingstein P., Arneth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian X., Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B.D., Viovy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Zaehle S., Zenget N. 2016. Greening of the Earth and Its Drivers. Nature Climate Change. 6: 791–795. DOI: 10.1038/nclimate3004.
- Raynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A. 2006. NDVI Patterns and Phytomass Distribution in the Circumpolar Arctic. Remote Sensing of Environment, 102 (3–4): 271–281. DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.016.
- Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. 2015. 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. Springer Cham, 110 p.

## References

- Vinogradova V.V., Titkova T.B., Belonovskaya E.A., Gracheva R.G. 2015. The Impact of Climate Change on the Mountain Landscapes of the North Caucasus. Current problems in remote sensing of the Earth from space, 12 (6): 35–47 (in Russian).
- Gusev A.P. 2020. NDVI Changes as an Indicator of the Dynamics of the Ecological State of Landscapes (on the Example of the Eastern Part of the Polesie Province). Bulletin of VSU. Series: Geography. Geoecology, 1: 101–107 (in Russian). DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667.
- Gusev A.P., Filonchik N.N., Shpilevskaya N.S. 2020. Long-Term Trends of State of Vegetation in Natural and Anthropogenic Landscapes of the Belarusian Polesya According to Modis Data (2000–2019). Scientific notes of V. I. Vernadsky Crimean federal university . Geography. Geology, 6 (3): 200–209 (in Russian).
- Gusev A.P., Shpilevskaya N.S., Filonchik N.N. 2021. Normalized Difference Vegetation Index in Specially Protected Natural Areas of Southern Belarus. Bulletin of VSU. Series: Geography. Geoecology, 2: 13–19 (in Russian). DOI: 10.17308/geo.2021.2/3442.
- Dronin N.M., Telnova N.O., Kalutskova N.N. 2014. Perennial Trends in Biological Productivity of East European Agrolandscapes: Remote Sensing Data Analysis. Geopolitics and Ecogeodynamics of regions, 10 (1): 529–538 (in Russian).
- Elsakov V.V., Kulyugina E.E., Shanov V.M. 2013. Trends of Vegetation Cover Changes of the Yugorsky Peninsula in the Last Decades: Comparison of Remote and Field Studies. Geobotanical mapping, 2013: 93–111 (in Russian).
- Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinskiy A.V. 2019. Climate-Related Changes in the Vegetation Cover of the Taiga and Tundra of Western Siberia in 1982–2015 According to Satellite Observations. Earth Observation and Remote Sensing, 6: 66–76 (in Russian). DOI: 10.31857/S0205-96142019666-76.



- Kolomyts E.G. 2009. Forest Ecosystems of the Volga Basin Under Conditions of Global Climate Warming: Local Ecological Prediction. Russian Journal of Ecology, 40 (1): 6–17 (in Russian). DOI: 10.1134/S1067413609010020.
- Kolomyts E.G., Sharaya L.S. 2012. The Effect of Global Warming on the Landscape Structure of North Caucasus. Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya, 4: 45–61 (in Russian). DOI: 10.15356/0373-2444-2012-4-45-61.
- Medvedkov A.A. 2018 Indication of the State of Tiaga Permafrost Landscapes on the Southern Periphery of Cryolithozone Under Conditions of a Changing Climate. Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Natural Sciences, 1: 18–28 (in Russian). DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-18-28.
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Weisfeld M.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Tertitsky G.N. 2018. "The Greening" of the Tundra as a Driver of the Modern Dynamics of Arctic Biota. Arctic: Ecology and Economics, 2 (30): 31–44 (in Russian). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44.
- Telnova N.O. 2017. Revealing and Mapping Long-Term NDVI Trends for the Analysis of Climate Change Contribution to Agroecosystems' Productivity Dynamics in the Northern Eurasian Forest-Steppe and Steppe. Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space, 14 (6): 97–107 (in Russian). DOI: 10.21046/20707401201714697107.
- Shary P.A., Sharaya L.S., Sidiyakina L.V. 2020. The Relation of Forest NDVI to Climate in Volga Basin. Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space, 17 (4): 154–163 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163.
- Tsepelev V.Yu., Panidi E.A., Torlopova N.V., Bobkov A.A. 2015. Using of Vegetation Cover Characteristics for Monitoring of XX Century Climate Changing. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 40: 221–235 (in Russian).
- Brink A.B., Eva H.D. 2009. Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: A sample based remote sensing approach. Applied Geography, 29 (4): 501–512. DOI: 10.1016/j.apgeog.2008.10.004.
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. 2015. Boreal forest health and global change. Science, 349 (6250): 819–822. DOI: 10.1126/science.aaa9092.
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sitch S., Friedlingstein P., Arneeth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian X., Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B.D., Viogy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Zaehle S., Zenget N. 2016. Greening of the Earth and its drivers. Nature climate change. 6: 791–795. DOI: 10.1038/nclimate3004.
- Raynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A. 2006. NDVI Patterns and Phytomass Distribution in the Circumpolar Arctic. Remote Sensing of Environment, 102 (3–4): 271–281. DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.016.
- Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. 2015. 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. Springer Cham, 110 p.

*Поступила в редакцию 02.02.2022;*

*поступила после рецензирования 02.03.2022;*

*принята к публикации 27.04.2022*

*Received February 02, 2022;*

*Revised March 02, 2022;*

*Accepted April 27, 2022*

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Гусев Андрей Петрович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологии, декан геолого-географического факультета, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Andrei P. Gusev**, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology, Dean of the Faculty of Geology and Geography of Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus