

ТРЕНДЫ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ В 2000–2022 ГГ. (ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ СЕНСОРА MODIS СПУТНИКА TERRA)

Цель работы – анализ многолетней динамики NDVI сельскохозяйственных и лесных ландшафтов Белорусского Полесья как реакции на глобальные изменения. Изучены изменения климата и землепользования в тестовых районах в 2000–2022 гг. Проведен анализ и оценка статистической значимости трендов NDVI в сельскохозяйственных и лесных ландшафтах. Обнаружена положительная корреляция NDVI сельскохозяйственных ландшафтов с летними осадками; NDVI лесных ландшафтов положительно коррелирует со среднегодовой и летней температурами. Установлена положительная корреляция NDVI лесных ландшафтов с содержанием CO₂ в атмосфере; в сельскохозяйственных ландшафтах корреляция NDVI с содержанием CO₂ отсутствует.

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

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.28.33>

Введение

Важным индикатором состояния ландшафтов является их продуктивность (Дронин и др., 2014), оценка которой в настоящее время основана на использовании дистанционного зондирования Земли. В условиях различных природных зон и регионов мира было установлено, что высокую степень корреляции с первичной продукцией и зеленой биомассой имеет нормализованный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), определяемый 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 (Box et al., 1989; Yengoh et al., 2014).

Величина NDVI отображает экологическое состояние растительного покрова и ландшафтов в целом (Гусев, 2020, 2022; Gusev, 2022). Использование космических съемок позволяет оценить процессы антропогенной трансформации, последствия стихийных бедствий, влияние изменений климата (Yengoh et al., 2014).

Цель работы – анализ многолетней динамики NDVI сельскохозяйственных и лесных ландшафтов Белорусского Полесья как реакции на глобальные изменения. Решаемые задачи: изучение изменений климата и землепользования в тестовых районах Белорусского Полесья в 2000–2022 гг.; анализ трендов NDVI в сельскохозяйственных и лесных ландшафтах; изучение корреляции меж-

ду климатическими показателями и NDVI; выяснение вероятных причин выявленных изменений NDVI. Предполагается ответить на три основных вопроса: 1) имеются ли в регионе статистически значимые временные тренды NDVI; 2) есть ли статистически значимая взаимосвязь между изменениями NDVI и климатических показателей; 3) есть ли отличия климатогенных реакций продуктивности сельскохозяйственных и лесных ландшафтов и какие из них наиболее чувствительны к климатическим изменениям.

Материалы и методы исследования

Район исследований находится на территории Беларуси и представляет собой восточную часть Полесской ландшафтной провинции подзоны полесских (широколиственно-лесных) ландшафтов, а согласно геоботаническому районированию – Полесско-Приднепровский округ подзоны широколиственно-сосновых лесов. По классификации природно-антропогенных ландшафтов (Марцинкевич, 2007) на территории региона выделяют следующие классы: сельскохозяйственные, сельскохозяйственно-лесные, лесные и природоохранные. Преобладают сельскохозяйственно-лесные ландшафты (77.7% от общей площади). Сельскохозяйственные ландшафты представлены пахотными (76.3% площади класса) и лугово-пахотными (23.7%) подклассами. Сельскохозяйственно-лесные ландшафты – пахотно-лесными (63.3%), лесопольевыми (16.2%), лесолуговыми (9.5%), сенокосно-лесопольевыми (13.3%) под-

классами. Лесные ландшафты – лесохозяйственными (85.5%) и лесоболотными (14.5%) подклассами.

Изучение трендов продуктивности и оценка влияния климатических изменений выполнялась в природно-антропогенных ландшафтах двух классов – сельскохозяйственных (9.2% площади региона) и лесных (13.1%).

Значения NDVI получены из MOD13Q1 (обработанные результаты съемки сенсора MODIS спутника Тетра), который представляет собой растр максимальных значений NDVI за 16 суток. Пространственное разрешение 250 м. Продукт MOD13Q1 находится в свободном доступе на сайте NASA. Для исключения влияния сезонных колебаний NDVI в работе использовались только летние значения. Изучение изменений структуры землепользования проводилось по космическим снимкам спутников Landsat (лето 2000 и лето 2022 гг.). Снимки получены с сайта Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Атмосферная коррекция, привязка, дешифрирование космических снимков выполнялись в QGIS 3.6.

Показатели климата (средняя температура лета, летнее количество осадков, средняя температура года, годовое количество осадков) определялись на основе данных 8 метеостанций. Данные по динамике CO₂ в атмосфере были взяты с сайта Global Monitoring Laboratory.

Изучение трендов NDVI проводили с помощью статистических методов. Для оценки точности подбора уравнения тренда использовали коэффициент детерминации R². Статистическую значимость коэффициента детерминации и уравнения тренда оценивали с помощью критерия Фишера. Для оценки связи между изменениями NDVI и климатическими показателями использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Результаты и их обсуждение

В течение рассматриваемого временного интервала наблюдались следующие изменения величины NDVI в изучаемых ландшафтах Полесья. Средняя величина NDVI в сельскохозяйственных ландшафтах Полесья изменялась от 0.623 в 2003 г. до 0.694 в 2009 г. (рис. 1). Медианные значения NDVI колебались от 0.625 в 2002 и 2003 гг. до

0.692 в 2006 г. Максимальные значения NDVI – от 0.659 в 2017 г. до 0.746 в 2009 г. Статистически значимый тренд NDVI в сельскохозяйственных ландшафтах Полесья отсутствует. Однако, в случае максимальных значений коэффициент тренда имеет отрицательную величину.

Для лесных ландшафтов Полесья характерны следующие особенности. Средние значения NDVI изменяются с 0.709 в 2000 г. до 0.785 в 2019 г. (рис. 1). Для средних значений наблюдалась положительный тренд (коэффициент тренда составил 0.002), который являлся статистически достоверным. Медианные и максимальные значения NDVI лесных ландшафтов Полесья также испытывали положительный тренд (коэффициенты тренда составляли соответственно 0.0025 и 0.0015 в год).

Можно предположить, что основными факторами, вызывающими наблюдаемые тренды NDVI, являются:

- 1) изменение структуры землепользования;
- 2) климатические изменения (повышение температуры);
- 3) увеличение содержания CO₂ в атмосфере, способствующее фотосинтезу («fertilization effect»).

Изменения структуры землепользования могут оказать значительное воздействие на величины NDVI. Так, например, анализ территории провинции Гуандун (Нао, 2022) показал, что наиболее важным фактором, обуславливающим пространственно-временные колебания NDVI в 2000–2021 гг., является изменение землепользования (79.4%), тогда как вклад климатического фактора существенно ниже (20.6% дисперсии значений NDVI).

В ходе исследований нами были получены

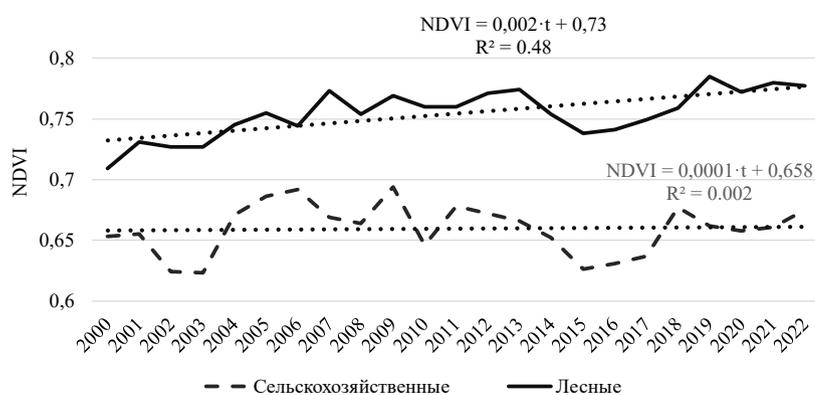


Рис. 1. Многолетние изменения величины NDVI в полесских ландшафтах
Fig. 1. Long-term NDVI changes in Polesia landscapes

Таблица 1. Структура землепользования в ландшафтах Полесья в 2000 и 2022 гг. (% от общей площади)
Table 1. The structure of land use in the landscapes of Polesie in 2000 and 2022 (% of total area)

Типы земель Land use/land cover	Сельскохозяйственные ландшафты Agricultural landscapes		Лесные ландшафты Forest landscapes	
	2000	2022	2000	2022
Леса Forests	15.5	15.2	61.9	62.2
Луга, кустарники, болота Meadows, bushes, swamps	9.1	9.2	18.5	17.7
Обрабатываемые земли Arable lands	64.4	64.5	17.5	18.0
Водоёмы Reservoirs	0.2	0.2	0.1	0.1
Застроенные и нарушенные земли Built-up and disturbed lands	10.8	10.9	2.0	2.0

удельные площади типов земель на двух временных срезах: 2000 и 2022 г. В сельскохозяйственных ландшафтах за рассматриваемый период на 0.3% снизилась удельная площадь лесов и соответственно увеличились удельные площади обрабатываемых земель – на 0.1%, застроенных и нарушенных земель – на 0.1%, лугов, кустарников и болот – на 0.1%. В лесных ландшафтах удельная площадь лесов увеличилась на 0.3%, удельная площадь обрабатываемых земель – на 0.5%, площадь лугов, кустарников и болот, напротив, снизилась на 0.8%. Изменения удельных площадей других типов земель не превышали 0.05% (табл. 1). Таким образом, существенных изменений структуры землепользования за рассматриваемый период не произошло, поэтому влиянием данного фактора на динамику NDVI можно пренебречь.

В регионе за последние 20–25 лет по сравнению с периодом 1881–1990 гг. средние температуры января и февраля выросли на 2.5 °C, марта – на

Таблица 2. Корреляция NDVI ландшафтов Полесья с климатическими показателями
Table 2. Correlation of NDVI landscapes of Polesia with climatic parameters

Климатические показатели Climate indicators	Сельскохозяйственные ландшафты Agricultural landscapes	Лесные ландшафты Forest landscapes
Среднегодовая температура, °C Average annual temperature, °C	-0.14	0.15
Годовое количество осадков, мм Annual precipitation, mm	0.09	0.02
Средняя температура лета, °C Average summer temperature, °C	-0.05	0.26
Летнее количество осадков, мм Summer precipitation, mm	0.27	0.04

Примечание: жирным шрифтом отмечены статистически достоверные значения коэффициентов корреляции Спирмена.

Note: Statistically significant values of Spearman's correlation coefficients are marked in bold.

2.0 °C, июля и августа – на 1.3–1.4 °C. Годовая сумма активных температур (выше 10 °C) в 2006–2013 гг. практически на всей исследуемой территории превысила 2600 градусов, в связи с чем была выделена новая агроклиматическая зона (Мельник и др., 2018; Данилович и др., 2020). Можно предположить, что наблюдаемая динамика NDVI обусловлена этими климатическими изменениями.

Однако, корреляция между изученными климатическими показателями и NDVI сельскохозяйственных ландшафтов оказалась статистически недостоверна, за исключением положительной корреляции с летними осадками (табл. 2). Повышение температуры при незначительном изменении осадков ведет к снижению влагообеспеченности и, соответственно, к ухудшению условий роста сельскохозяйственных культур (Мельник и др., 2018). В сельскохозяйственных ландшафтах Полесья, вероятно, этот механизм объясняет отсутствие положительного тренда NDVI.

Для сельскохозяйственных ландшафтов изменения климата имеют как положительные, так и отрицательные последствия. В число положительных последствий входят: более ранняя весна и более продолжительный вегетационный период, улучшение условий перезимовки сельскохозяйственных культур и сеянных многолетних трав, менее частые зимы с опасной для озимых культур температурой, более долгий безморозный период, смещение сроков сева яровых культур на более раннее время, продвижение на север зоны выращивания теплолюбивых культур и т.д. К отрицательным последствиям можно отнести:

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. (Мельник и др., 2018; Данилович и др., 2020; Гусев, 2022а).

В лесных ландшафтах имеет место положительная корреляция NDVI с температурой (табл. 2), что, вероятно, является одной из причин положительного тренда NDVI, наблюдаемого в Полесье. Потепление положительно сказывается

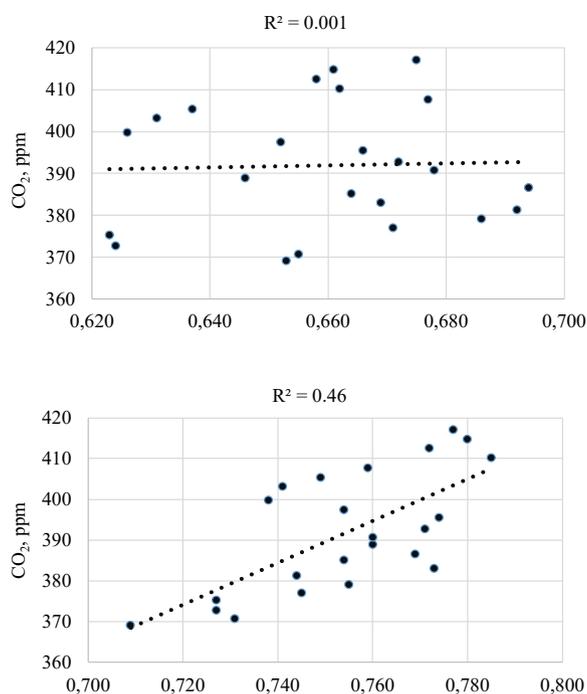


Рис. 2. Влияние роста содержания углекислого газа на величину NDVI в сельскохозяйственных (А) и лесных (В) ландшафтах

Fig. 2. Effect of increased carbon dioxide content on NDVI in agricultural (A) and forest (B) landscapes

на NDVI лесов за счет увеличения вегетационного периода, снижения риска повреждения деревьев морозами и снегопадами зимой.

Еще одним фактором, действие которого ведет к росту NDVI, является увеличение содержания CO_2 в атмосфере. Так, согласно проведенному на глобальном уровне моделированию, рост продуктивности растительности, наблюдаемый с 1980-х гг. (и соответственно значений NDVI), в значительной степени (до 70%) обусловлен увеличением концентрации CO_2 в атмосфере (Greening ..., 2016).

Анализ корреляционных связей между величиной NDVI лесных и сельскохозяйственных ландшафтов Белорусского Полесья и содержанием CO_2 в атмосфере показал следующее (рис. 2). В сельскохозяйственных ландшафтах связь между NDVI и изменениями концентрации углекислого газа отсутствует. В лесных ландшафтах NDVI положительно коррелирует с содержанием углекислого газа (рис. 2). Таким образом, положительное влияние роста концентрации CO_2 в атмосфере на фотосинтез, вероятно, имеет место (достоверно фиксируется) только в лесных ландшафтах. В сельскохозяйственных ландшафтах положительный эффект компенсируется негативными изменениями, связанными с увеличением засушливости климата в регионе (рост темпера-

тур при незначительных колебаниях количества осадков).

Таким образом, реакции сельскохозяйственных и лесных ландшафтов на климатические изменения и рост содержания CO_2 в атмосфере существенно отличаются. Установленные закономерности следует учитывать при прогнозировании и разработке соответствующих адаптационных мероприятий (Гусев, 2022а).

Заключение

Таким образом, в ходе выполненных исследований восточной части Белорусского Полесья установлено:

1) в лесных ландшафтах региона имеет место статистически значимый положительный тренд NDVI, в сельскохозяйственных ландшафтах подобный тренд отсутствует;

2) существенных изменений структуры землепользования за рассматриваемый период не произошло, что позволяет считать влияние данного фактора на динамику NDVI незначительным;

3) установлена положительная корреляция NDVI сельскохозяйственных ландшафтов с летними осадками (коэффициент корреляции 0.27); NDVI лесных ландшафтов положительно коррелирует со среднегодовой и летней температурами (коэффициенты корреляции, соответственно, 0.15 и 0.26);

4) установлена положительная корреляция NDVI лесных ландшафтов с содержанием CO_2 в атмосфере; в сельскохозяйственных ландшафтах корреляция NDVI с содержанием CO_2 отсутствует.

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

Список 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. С. 101–107. <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. Т. 46, №2. С. 200–209. 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. 2022а. №4. С. 13–19. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.13.19>.
4. Данилович И.С., Мельник В.И., Гейер Б. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причина, следствия, прогнозы // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2020. №1. С. 3–13.

<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-3-13>.

5. Дронин Н.М., Тельнова Н.О., Калуцкова Н.Н. Анализ многолетних трендов продуктивности агроландшафтов юга Восточной Европы по материалам дистанционного зондирования // Геополитика и геоэкодинамика регионов. 2014. Т. 10, №1. С. 529–538.

6. Марцинкевич Г.И. Ландшафтоведение. Минск: БГУ, 2007. 206 с.

7. Мельник В.И., Данилович И.С., Кулешова И.Ю., Комаровская Е.В., Мельчакова Н.В. Оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси за период 1989–2015 гг. // Природные ресурсы. 2018. №2. С. 88–101.

8. Box E.O., Holben B.N., Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux // *Vegetatio*. 1989. Vol. 80. P. 71–89.

9. Gusev A.P. Impact of climate change on ecosystem productivity of the Belarusian Polesia according to remote data // *Contemporary problems of ecology*. 2022. Vol. 15, No 4. P. 345–352. doi: 10.1134/S1995425522040060.

10. Hao L., Kunxi L., Xiang Z., Jiacheng Z. Changes in vegetation greenness and their influencing factors in Southern China // *Remote sensing*. 2022. Vol. 14. P. 1–18. doi: 10.1134/S1995425522040060.

11. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. 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. 80 p.

References

1. Gusev A.P. Izmeneniya NDVI kak indikator dinamiki ekologicheskogo sostoyaniya landshaftov (na primere vostochnoy chasti Poles'skoy provintsii) [Changes in NDVI as an indicator of the dynamics of the ecological state of landscapes (on the example of the eastern part of the Poles'sky province)] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]. 2020. No 1. P. 101–107. <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>.

2. Gusev A.P. NDVI kak indikator klimatogennykh reaktivnykh geosistem (na primere yugo-vostoka Belarusi) [NDVI as an indicator of climatogenic responses of geosystems (on the example of the southeast of Belarus)] // *Regional'nyye geosistemy* [Regional geosystems]. 2022. Vol. 46, No 2. P. 200–209. doi: 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209.

3. Gusev A.P. Otsenka riska negativnykh klimatogennykh reaktivnykh poles'skikh landshaftov [Assessing the risk of negative climatogenic reactions in Polesia landscapes] // *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian journal of applied ecology]. 2022a. No 4. P. 13–19. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.13.19>.

4. Danilovich I.S., Melnik V.I., Geyer B. Modern climate changes in the Belarusian Polesie: cause, consequences, forecasts [Sovremennyye izmeneniya klimata Belorusskogo Poles'ya: prichina, sledstviya, prognozy] // *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya* [Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology]. 2020. No 1. P. 3–13. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-3-13>.

5. Dronin N.M., Telnova N.O., Kalutskova N.N. Analiz mnogoletnikh trendov produktivnosti agrolandschaftov

yuga Vostochnoy Yevropy po materialam distantsionnogo zondirovaniya [Analysis of long-term trends in the productivity of agricultural landscapes in the south of Eastern Europe based on remote sensing data] // *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]. 2014. Vol. 10, No 1. P. 529–538.

6. Martsinkevich G.I. Landshaftovedeniye [Landscape science]. Minsk: BSU, 2007. 206 p.

7. Melnik V.I., Danilovich I.S., Kuleshova I.Yu., Komarovskaya E.V., Melchakova N.V. Otsenka agroklimaticheskikh resursov territorii Belarusi za period 1989–2015 gg. [Assessment of agroclimatic resources of the territory of Belarus for the period 1989–2015] // *Prirodnyye resursy* [Natural resources]. 2018. No 2. P. 88–101.

8. Box E.O., Holben B.N., Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux // *Vegetatio*. 1989. Vol. 80. P. 71–89.

9. Gusev A.P. Impact of climate change on ecosystem productivity of the Belarusian Polesia according to remote data // *Contemporary problems of ecology*. 2022. Vol. 15, No 4. P. 345–352. doi: 10.1134/S1995425522040060.

10. Hao L., Kunxi L., Xiang Z., Jiacheng Z. Changes in vegetation greenness and their influencing factors in Southern China // *Remote sensing*. 2022. Vol. 14. P. 1–18. doi: 10.1134/S1995425522040060.

11. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. 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. 80 p.

Gusev A.P. Productivity trends of agricultural and forest landscapes in Belarussian Polesia in 2000–2022 (according to the MODIS Terra Data).

The purpose of this work is to analyze the long-term dynamics of NDVI in agricultural and forest landscapes of the Belarusian Polesia as a response to global changes). Changes in climate and land use in test areas in 2000–2022 were studied. An analysis and assessment of the statistical significance of NDVI trends in agricultural and forest landscapes were carried out. A positive correlation of NDVI of agricultural landscapes with summer precipitation was found (correlation coefficient 0.27); NDVI of forest landscapes is positively correlated with mean annual and summer temperatures (correlation coefficients are 0.15 and 0.26, respectively). A positive correlation has been established between the NDVI of forest landscapes and the content of CO₂ in the atmosphere; in agricultural landscapes, there is no correlation between NDVI and CO₂ content.

Keywords: landscape; NDVI; trend; MODIS; climate change; Belarusian Polesia.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 28.08.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 08.09.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 15.09.2023

Информация об авторах

Гусев Андрей Петрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, декан геолого-географического факультета, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь, 246019, г. Гомель, ул. Советская, 104, E-mail: andi_gusev@mail.ru.

Information about the authors

Andrei P. Gusev, Ph.D. in Geology, Associate Professor, Dean, F. Skorina Gomel State University, 104, Sovetskaya str., Gomel, 246019, Belarus, E-mail: andi_gusev@mail.ru.

