

## ОЦЕНКА РИСКА ДЕГРАДАЦИИ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ СЪЕМКИ СЕНСОРА TROPOMI СПУТНИКА SENTINEL-5P (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ)

Цель работы – оценка риска деградации лесных геосистем под воздействием загрязнения атмосферы (по данным съемки TROPOMI Sentinel-5P). Как индикаторы риска использованы содержания  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$ , измеряемые TROPOMI. Район исследований – восточная часть Белорусского Полесья. Определены фоновые значения содержаний  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  в летний период. Изучены особенности загрязнения атмосферы  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  в сельскохозяйственных, сельскохозяйственно-лесных и лесных ландшафтах. Установлено, что динамика  $\text{SO}_2$  преимущественно определяется трансграничным переносом. Аномалии повышенного содержания  $\text{NO}_2$  приурочены к крупным техногенным геосистемам. Риск деградации лесных ландшафтов под воздействием загрязнения атмосферы оценивается как очень низкий (80.3% территории) и низкий (19.7% территории).

*Ключевые слова:* геосистема; загрязнение атмосферы; индикатор риска; TROPOMI; Sentinel-5P; Белорусское Полесье.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.10.15>

### Введение

Загрязнение атмосферы – один из ведущих факторов деградации лесных ландшафтов как на локальном, так и региональном уровнях (Гусев, 2005). Известно, что среди разнообразных техногенных загрязнителей наиболее существенное воздействие на лесную растительность оказывают выбросы диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) и диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ), играющие ведущую роль в формировании кислотных осадков (Илькун, 1978; Кислотные дожди..., 1989). Опасность данных поллютантов обусловлена их массовостью, токсичностью и «продолжительность жизни» в атмосфере. Источниками выбросов  $\text{NO}_2$  являются энергетика на углеводородном топливе, автотранспорт, химическая и нефтехимическая промышленность, металлургия, пожары. Источники выбросов  $\text{SO}_2$  – тепловые электростанции на угле и мазуте, нефтеперерабатывающие и металлургические заводы, а также извержения вулканов. Дальность переноса  $\text{SO}_2$  составляет 300–400 км. В атмосфере  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  вступают в химические реакции с парами воды и превращаются, соответственно, в серную и азотную кислоты, что приводит к закислению осадков. Фитотоксичность  $\text{SO}_2$  обусловлена воздействием на скорость транспирации, дыхания и фотосинтеза растений. Повышенные концентрации  $\text{SO}_2$  в атмосфере вызывают у них нарушения физиологических процессов, оказывают

мутагенное воздействие. Последствиями закисления являются поражения растительности за счет изменения метаболических процессов в почвах и соответствующей трансформации питания растений, активизации миграции токсичных химических элементов (например, алюминия). Установлено, что в условиях загрязнения  $\text{SO}_2$  исчезают чувствительные к его воздействию лишайники, мхи, хвойные породы деревьев, наблюдается усыхание и гибель лесобразующих пород, понижается устойчивость лесной экосистемы к погодным аномалиям, вредителям и болезням (Кислотные дожди..., 1989).

С развитием дистанционного зондирования Земли появились и постоянно совершенствуются методы оценки загрязнения атмосферы с помощью многозональной космической съемки. При этом спутниковый мониторинг загрязнения атмосферы имеет как недостатки, так и преимущества по сравнению с наземными инструментальными наблюдениями. Преимущества: пространственная оценка загрязнения на региональном уровне; выявление реальных (в том числе несанкционированных) источников выбросов; возможность получения усредненных за любой временной период данных; возможность ежесуточной оценки загрязнения на региональном уровне; выяснение направлений трансграничного движения масс загрязненного воздуха и их временной измен-

чивости. Недостатки: низкое пространственное разрешение, не позволяющее оценивать выбросы от локальных источников; зависимость качества данных от облачности; полученные концентрации поллютантов в столбе стратосферы не могут оцениваться с помощью имеющейся системы ПДК. Однако дистанционно измеряемые концентрации поллютантов коррелируют с их концентрациями, определяемыми наземными методами. Например, в работе (Ialongo et al., 2019) для  $\text{NO}_2$  установлена связь величин, полученных дистанционными и наземными измерениями, с коэффициентом корреляции 0.66; в работе (Cersosimo et al., 2020) коэффициент корреляции составил 0.5–0.9.

Содержания поллютантов, измеренные спутниковой съемкой в столбе тропосферы, а также производные от них показатели могут использоваться как индикаторы загрязнения атмосферы на региональном уровне. В свою очередь, дистанционно измеренные содержания таких веществ как  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  рассматриваются нами как индикаторы риска деградации лесных геосистем под воздействием загрязнения атмосферы.

Цель работы – оценка риска деградации лесных геосистем под воздействием загрязнения атмосферы (по данным съемки TROPOMI Sentinel-5P). Решаемые задачи: обработка данных TROPOMI Sentinel-5P; оценка фоновых для региона концентраций  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  в тропосфере; анализ пространственной структуры загрязнения  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$ ; оценка риска деградации лесных геосистем под воздействием загрязнения  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$ .

### Материалы и методы исследования

Район исследования находится на юго-востоке Беларуси, являясь восточной частью Белорусского Полесья (рис. 1). По природно-ландшафтному районированию данную территорию относят к восточноевропейским широколиственно-лесным ландшафтам, рода которых выделяют по особенностям морфолитогенной основы (выделены холмисто-моренно-эрозионный, вторично-моренный, водно-ледниковый, аллювиальный террасированный, озерно-аллювиальный, озерно-болотный рода ландшафтов). В зависимости от степени антропогенной трансформации (определяется по соотношению площадей пахотных, луговых, лесных, болотных геосистем) выделяют природно-антропогенные ландшафты (ПАЛ), которые представлены 3 классами: сельскохозяйственным, сельскохозяйственно-лесным и лесным. Операционной территориальной единицей в наших исследованиях служит ландшафтный выдел, соответствующий границам родов природных ландшафтов с учетом их антропогенной транс-

формации.

В работе использованы данные съемки спутника Sentinel-5P с сенсором TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), который измеряет атмосферные концентрации (общее содержание в вертикальном столбе тропосферы) озона, метана, формальдегида, угарного газа, диоксида серы, диоксида азота. Содержание диоксида серы, угарного газа, диоксида азота измеряются и предоставляются в моль/м<sup>2</sup>. Sentinel-5P проводит съемку ежедневно с октября 2017 г. Пространственное разрешение съемки Sentinel-5P составляет 5.5×3.5 км (7×5.5 км – с августа 2019 г.). Данные преобразованы с помощью модуля Sentinel-5P data explorer для QGIS.

Концентрации газов, определяемые по данным дистанционной съемки TROPOMI, не могут оцениваться с помощью санитарно-гигиенических нормативов (ПДК), поэтому предлагаются различные относительные индексы.

Наибольшую опасность для лесных геосистем представляют  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , для оценки которых нами предложен относительный показатель  $C$ , определяемый по формуле  $C=C_i/C_0$ , где  $C_i$  – среднее содержание загрязнителя в пределах  $i$ -ой геосистемы;  $C_0$  – фоновое содержание загрязнителя в регионе. По мере роста концентрации поллютанта возрастает риск его негативного воздействия на лесную геосистему. Предлагаются следующие градации риска по величине показателя  $C$  (с учетом среднеквадратичного отклонения летних значений в регионе): очень низкий риск –  $C < 1.1$ ; низкий риск –  $C = 1.1–1.5$ ; средний риск –  $C = 1.5–2.5$ ; высокий риск –  $C > 2.5$ .



Рис. 1. Район исследований  
Fig. 1. Research area

Таблица 1. Содержание  $NO_2$  и  $SO_2$  в тропосфере над полесскими природно-антропогенными ландшафтами (среднее значение и его ошибка)  
Table 1. The content of  $NO_2$  and  $SO_2$  in the troposphere above the Polesie natural-anthropogenic landscapes (average value and its error)

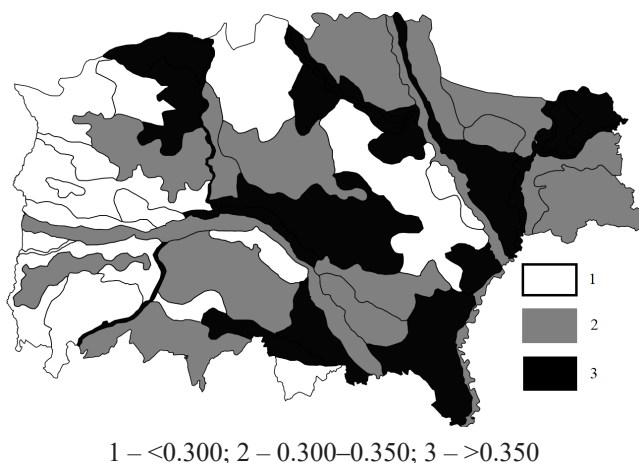
Класс природно-антропогенного ландшафта Natural-anthropogenic landscape class	Загрязняющие вещества Pollutants	
	$NO_2$ , $\times 10^{-3}$ моль/м <sup>2</sup>	$SO_2$ , $\times 10^{-3}$ моль/м <sup>2</sup>
Сельскохозяйственные Agricultural	0.0209±0.0007	0.303±0.025
Сельскохозяйственно-лесные Agricultural forestry	0.0172±0.0008	0.299±0.060
Лесные Forest	0.0164±0.0011	0.291±0.040
Региональный фон Regional background	0.0176±0.0009	0.296±0.024

### Результаты и их обсуждение

По данным съемки сенсора TROPOMI спутника Sentinel-5P в период июнь-август 2022 г. были получены усредненные значения показателей содержания  $NO_2$  и  $SO_2$  над ландшафтами района исследований (табл. 1). Летом 2022 г. их фоновые для региона значения были относительно низки.

Установлено, что в зависимости от ландшафтного выдела усредненные за летний период содержание  $SO_2$  варьировало от 0.208 до  $0.377 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>. Карта-схема средних содержаний  $SO_2$  по выделам ландшафтов приведена на рисунке 2. Медианные значения составляли от 0.102 до  $0.300 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>. Вариабельность содержаний  $SO_2$  высокая. В отдельных замерах отмечается увеличение содержания диоксида серы в 1.7–8.8 раза по сравнению с фоном. Так, максимальные значения  $SO_2$  в зависимости от ландшафтного выдела изменяются в пределах  $0.5\text{--}2.6 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup> (превышение фона в 1.7–8.8 раза). Причем, в границах выдела, в котором наблюдалась максимальное содержание  $SO_2$  ( $2.6 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>), отсутствуют какие-либо энергетические или промышленные объекты.

Однако разница в усредненных концентрациях  $SO_2$  над различными объектами статистически недостоверна. Пространственная связь между ареалами с повышенным содержанием  $SO_2$  и потенциальными объектами, которые могут (теоретически) являться источником выбросов (города, крупные промышленные предприятия), не установлена. Хотя и прослеживаются закономерные



1 –  $<0.300$ ; 2 –  $0.300\text{--}0.350$ ; 3 –  $>0.350$

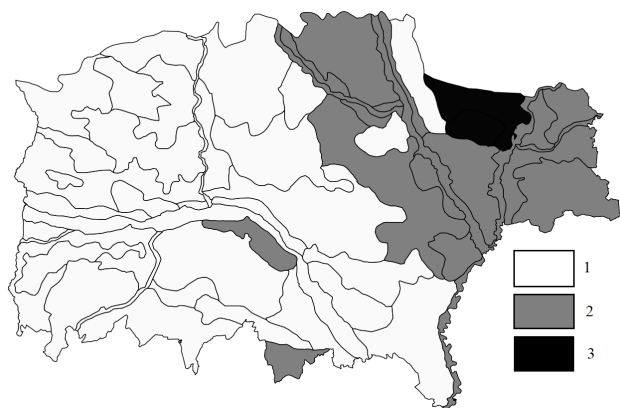
Рис. 2. Содержание  $SO_2$  ( $\times 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>) в тропосфере восточной части Белорусского Полесья (по данным съемки TROPOMI Sentinel-5P, лето 2022 г.)

Fig. 2. The content of  $SO_2$  ( $\times 10^{-3}$  mol/m<sup>2</sup>) in the troposphere of the eastern part of the Belarusian Polesie (according to the shooting of TROPOMI Sentinel-5P, summer 2022)

изменения содержания  $SO_2$  в ряду ПАЛ: от сельскохозяйственных ландшафтов (средняя концентрация –  $0.303 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>) к лесным ландшафтам ( $0.291 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>), однако указанные различия статически не достоверны ( $p > 0.05$ ). Можно предположить, что как региональный фон, так и пространственно-временные колебания содержания  $SO_2$  в пределах территории Беларуси определяются преимущественно трансграничным переносом от окружающих государств. Так, например, в летний сезон 2022 г. по данным съемки TROPOMI среднее содержания  $SO_2$  на территории Польши составило 0.435, Литвы – 0.484, Украины – 0.378, прилегающих к Беларуси областей России (Брянская, Смоленская, Псковская) –  $0.391 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>.

Содержание  $NO_2$  в зависимости от ландшафтного выдела в изучаемом регионе колебалось от 0.0137 до  $0.0240 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup> (среднее значение – 0.0173, медианное значение – 0.0168). В единичных замерах в зависимости от выдела содержания  $NO_2$  увеличивалось до  $0.0288\text{--}0.0602 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>, что превышает фоновые значения в 1.6–3.4 раза. Вариабельность содержаний диоксида азота характеризуется величинами среднеквадратичного отклонения в зависимости от выдела  $0.0063\text{--}0.0115 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup>. Карта-схема средних содержаний  $NO_2$  по выделам ландшафтов приведена на рисунке 3.

В отдельных ландшафтах усредненные содержания диоксида азота превышают региональный фон в 1.1–1.4 раза. Ареал с повышенным содер-



1 –  $<0.018$ ; 2 –  $0.018-0.021$ ; 3 –  $>0.021$

Рис. 3. Содержание  $\text{NO}_2$  ( $\times 10^{-3}$  моль/ $\text{м}^2$ ) в тропосфере восточной части Белорусского Полесья (по данным съемки TROPOMI Sentinel-5P, лето 2022 г.)

Fig. 3. The content of  $\text{NO}_2$  ( $\times 10^{-3}$  mol/ $\text{m}^2$ ) in the troposphere of the eastern part of the Belarusian Polesie (according to the shooting of TROPOMI Sentinel-5P, summer 2022)



1 – очень низкий риск; 2 – низкий риск  
1 – very low risk; 3 – low risk

Рис. 4. Карта-схема оценки риска воздействия  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  на лесные геосистемы  
Fig. 4. The map of the risk assessment of the effects of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  on forest geosystems

жанием  $\text{NO}_2$  приурочен к крайнему юго-востоку Белорусского Полесья, где находится наиболее крупный промышленный центр региона – город Гомель (предприятия химической промышленности и машиностроения, международный транспортный узел). В этом районе имели место замеры максимальных для региона концентраций диоксида азота ( $0.05-0.06 \cdot 10^{-3}$  моль/ $\text{м}^2$ ).

В ряду ПАЛ среднее содержание  $\text{NO}_2$  изменяется от  $0.0209$  до  $0.0164 \cdot 10^{-3}$  моль/ $\text{м}^2$ . Различия между классами ПАЛ статистически значимы

( $p < 0.05$ ). Анализ локальных аномалий повышенного содержания  $\text{NO}_2$  показал, что они, как правило, приурочены к техногенным геосистемам. Над лесным и болотными ландшафтами концентрации  $\text{NO}_2$  не превышают регионального фона.

Был выполнен корреляционный анализ (по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена) между усредненными содержаниями загрязняющих веществ и удельными площадями природных и антропогенных геосистем (пахотных, луговых, болотных, лесных, техногенных). Установлено, что содержание диоксида серы не имеет статистически достоверной корреляции с удельными площадями различных типов геосистем. Содержание диоксида азота имеет достоверную положительную корреляцию с удельной площадью техногенных геосистем (коэффициент корреляции составил  $0.43$ ,  $p < 0.05$ ) и отрицательную с удельной площадью лесных геосистем ( $-0.26$ ,  $p < 0.05$ ).

На основе установленных фоновых значений концентраций  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$  были рассчитаны значения показателя  $C$  для каждого ландшафтного выдела (рис. 4), которые изменялись от  $0.76$  до  $1.19$ . Таким образом, на территории изучаемого региона ландшафты со средним и высоким риском деградации лесных геосистем под влиянием атмосферных выбросов отсутствуют. В ландшафтах, окружающих г. Гомель, величина показателя  $C$  составляет  $1.11-1.19$ . Западнее р. Днепр значение  $C > 1$  зафиксировано только в одном ландшафтном выделе, в котором расположен г. Светлогорск (центр химической промышленности). В целом низкий риск отмечается на  $19.7\%$  территории, очень низкий риск – на  $80.3\%$  территории.

В зоне низкого риска деградация лесных геосистем возможна только на локальных участках, в непосредственной близости к источникам выбросов, и в значительной степени зависит от устойчивости преобладающих древесных пород к рассматриваемым загрязняющим веществам (Гусев, 2005; Гусев, Шпилевская, 2020). На локальных участках риск деградации лесов может возрастать при комплексном влиянии загрязнения атмосферы и других факторов (пожары, повреждения древостоя вредителями и болезнями).

### Заключение

Таким образом, в ходе выполненных исследований установлено:

1) пространственно-временная динамика содержания  $\text{SO}_2$  в ландшафтах восточной части Белорусского Полесья преимущественно определяется трансграничным переносом (статистически значимые отличия между различными по степени



антропогенной преобразованности ландшафтами отсутствуют);

2) аномалии повышенного содержания  $\text{NO}_2$  приурочены к зонам высокой концентрации техногенных геосистем, в которых имеются многочисленные локальные источники выбросов;

3) вероятность деградации лесных ландшафтов региона под воздействием атмосферного загрязнения оценивается как незначительная (площадь ландшафтов с очень низким риском деградации по критерию С составляет 80.3%, с низким риском – 19.7% площади региона).

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

### Список литературы

1. Гусев А.П. Индикаторы деградации лесных ландшафтов Белорусского Полесья в зоне влияния химического производства // География и природные ресурсы. 2005. №4. С. 145–147.
2. Гусев А.П., Шпилевская Н.С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на лесной ландшафт // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6, вып. 1. С. 192–198.
3. Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наукова думка, 1978. 247 с.
4. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 269 с.
5. Кулагин З.Ю. Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука, 1974. 125 с.
6. Cersosimo A., Serio C., Masiello G. TROPOMI  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observation // Remote sensing. 2020. Vol. 12 (14). P. 2212–2235. <https://doi.org/10.3390/rs12142212>.
7. Ialongo I., Virta H., Eskes H., Hovila J., Douros J. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor  $\text{NO}_2$  observation with ground-based measurements in Helsinki // Atmospheric measurement techniques. 2019. Vol. 13. P. 205–218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>.

### References

1. Gusev A.P. Indikatory degradatsii lesnykh landshaftov Belorusskogo Poles'ya v zone vliyaniya khimicheskogo proizvodstva [Indicators of degradation of forest landscapes of Belarusian Polesie in the zone of influence of chemical production] // Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and natural resources]. 2005. No 4. P. 145–147.
2. Gusev A.P., Shpilevskaya N.S. Fitoindikatory tekhnogenogo khimicheskogo vozdeystviya na lesnoy landshaft [Phythy-indicators of technogenic chemical exposure to the forest land-

scape] // Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]. 2020. Vol. 6., No 1. P. 192–198.

3. Ilkun G.M. Zagryazniteli atmosfery i rasteniya [Atmospheric pollutants and plants]. Kyiv: Naukova dumka, 1978. 247 p.

4. Kislotnyye dozhdi [Acid rains]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989. 269 p.

5. Kulagin Z.Yu. Drevesnyye rasteniya i promyshlennaya sreda [Wood plants and industrial environment]. Moscow: Nauka, 1974. 125 p.

6. Cersosimo A., Serio C., Masiello G. TROPOMI  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observation // Remote sensing. 2020. Vol. 12 (14). P. 2212–2235. <https://doi.org/10.3390/rs12142212>.

7. Ialongo I., Virta H., Eskes H., Hovila J., Douros J. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor  $\text{NO}_2$  observation with ground-based measurements in Helsinki // Atmospheric measurement techniques. 2019. Vol. 13. P. 205–218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>.

---

### Gusev A.P. Evaluation of the risk of degradation of forest geosystems under the influence of atmospheric pollution based on the shooting of the sensor of the TROPOMI Sentinel-5P (on the example of the eastern part of the Belarusian Polesie).

The purpose of the work is to evaluate the risk of degradation of forest geosystems under the influence of atmospheric pollution (according to TROPOMI Sentinel-5P shooting). As risk indicators, the content of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  are used, measured by TROPOMI. The research area is the eastern part of the Belarusian Polesie. The background values of the content of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  are determined in the summer. The features of the atmosphere of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  in agricultural, agricultural and forest landscapes have been studied. It has been established that the dynamics of  $\text{SO}_2$  is mainly determined by cross-border transfer. Anomalies of increased  $\text{NO}_2$  content are confined to large technogenic geosystems. The risk of degradation of forest landscapes under the influence of atmospheric pollution is estimated as very low (80.3% of the territory) and low (19.7% of the territory).

*Keywords:* geosystem; air pollution; risk indicator; TROPOMI; Sentinel-5P; Belarusian Polesie.

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: 28.02.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 09.03.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 10.03.2023

**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

