



УДК 551.24+504.5+504.064.37  
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-2-210-220

## Пространственная и сезонная изменчивость содержаний NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO над территорией Беларуси

Гусев А.П., Флерко Т.Г.

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,  
Республика Беларусь, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104  
E-mail: andi\_gusev@mail.ru; tflerco@mail.ru

**Аннотация.** Цель исследований – изучение изменений тропосферных содержаний NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO на территории Беларуси, измеряемых с помощью космической съемки. По результатам съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI (зима и лето 2022 года) получены усредненные концентрации над городами, особо охраняемыми природными территориями и для Беларуси в целом. Установлены значительные сезонные колебания содержаний NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO. Зимой средние и медианные концентрации SO<sub>2</sub> выше летних в 23,77 и 17,9 раза соответственно; NO<sub>2</sub> – в 3,35 и 2,69 раза, CO – в 1,16 и 1,17 раза. Содержание NO<sub>2</sub> над городами выше, чем над особо охраняемыми природными территориями в 1,2 раза. В летний период наибольшие концентрации NO<sub>2</sub> наблюдались над Гомелем, Гродно, Брестом, Минском, Речицей, Светлогорском; в зимний период – над Минском, Гомелем, Новополоцком, Витебском. Концентрации SO<sub>2</sub> характеризуются сильной пространственно-временной изменчивостью. Концентрации SO<sub>2</sub> и CO над городами и ООПТ близки и статистически значимо от фона не отличаются.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, Sentinel-5P TROPOMI, диоксид серы, диоксид азота, угарный газ, Беларусь

**Благодарности:** Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X23КИ-022).

**Для цитирования:** Гусев А.П., Флерко Т.Г. 2024. Пространственная и сезонная изменчивость содержаний NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO над территорией Беларуси. Региональные геосистемы, 48(2): 210–220. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-2-210-220

## Spatial and Seasonal Variability of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO Contents over the Territory of Belarus

Andrei P. Gusev, Tatsiana G. Flerko

F. Skorina Gomel State University  
104 Sovetskaya St, Gomel 246028, Republic of Belarus  
E-mail: andi\_gusev@mail.ru; tflerco@mail.ru

**Abstract.** The purpose of the research is to study changes in the tropospheric contents of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO on the territory of Belarus, measured using satellite imagery. Based on the results of the Sentinel-5P TROPOMI satellite (winter and summer 2022), average concentrations were obtained over cities, specially protected natural areas and for Belarus as a whole. Significant seasonal fluctuations in the contents of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO have been established. In winter, average and median SO<sub>2</sub> concentrations are 23,77 and 17,9 times higher than summer ones, respectively; NO<sub>2</sub> – by 3,35 and 2,69 times, CO – by 1,16 and 1,17 times. The NO<sub>2</sub> content over cities is 1,2 times higher than over specially protected natural areas. In summer, the highest concentrations of NO<sub>2</sub> were observed over Gomel, Grodno, Brest, Minsk, Rechitsa, Svetlogorsk; in winter – over Minsk, Gomel, Novopolotsk, Vitebsk. SO<sub>2</sub> concentrations are characterized by strong spatiotemporal variability. The concentrations of SO<sub>2</sub> and CO over cities and protected areas are close and do not differ statistically significantly from the background.



**Keywords:** air pollution, Sentinel-5P TROPOMI, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, carbon monoxide, Belarus

**Acknowledgements:** The research was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project No. X23KI-022).

**For citation:** Gusev A.P., Flerko T.G. 2024. Spatial and Seasonal Variability of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO contents over the territory of Belarus. *Regional geosystems*, 48(2): 210–220. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-2-210-220

## Введение

Загрязнение атмосферы – острая экологическая проблема, которая проявляется как на локальном, так и на региональном уровнях<sup>1</sup> [Битюкова, Шимунова, 2020]. Важное экологическое значение среди техногенных загрязнителей за счет массовости и токсичности имеют выбросы диоксида серы (SO<sub>2</sub>), диоксида азота (NO<sub>2</sub>), угарного газа (CO). Источниками выбросов диоксида серы являются теплоэлектростанции на угле и мазуте, предприятия металлургии и нефтеперерабатывающей промышленности, из природных источников наиболее важны извержения вулканов [Filonchuk et al., 2022]. Антропогенные источники выбросов диоксида азота – автотранспорт, теплоэлектростанции на углеводородном топливе, химическая и нефтехимическая промышленность, металлургия; природные – лесные пожары [Ионов, 2010, Силаев, Силаева, 2018, Тронин и др., 2021]. Источниками угарного газа служат лесные и степные пожары, деятельность живых организмов, выбросы автомобильного транспорта, промышленных предприятий [Курсов, 2015, Бондур и др., 2020].

Совершенствование космических методов привело к появлению спутников, способных осуществлять дистанционные измерения содержания загрязнителей в атмосфере [Palongo et al. 2019, Filonchuk et al., 2020, Cersosimo et al., 2020, Makineci et al., 2021, Zhu et al., 2021, Khan et al., 2021, Морозова и др., 2022, Shen et al., 2022, Ивлиева, 2023]. Космические методы изучения загрязнения атмосферы имеют как преимущества, так и недостатки по сравнению с наземными измерениями. Среди преимуществ космических методов изучения загрязнения атмосферы: возможность оценки загрязнения в режиме реального времени; оценка загрязнения на региональном уровне; выявление несанкционированных источников выбросов; получение усредненных за любой временной период данных; изучение трансграничного перемещения загрязненного воздуха; оценка загрязнения на труднодоступных территориях. Среди недостатков можно указать: низкое пространственное разрешение, из-за которого нельзя оценивать выбросы от локальных источников; влияние на качество данных метеоусловий, в частности облачности; тропосферные концентрации загрязнителей не могут оцениваться с помощью системы ПДК.

Применение дистанционного зондирования Земли, в частности данных спутника *Sentinel-5P TROPOMI*, для изучения загрязнения атмосферы на территории Беларуси до настоящего времени не имело широкого использования [Прогноз состояния природной..., 2022], а представлено только в единичных работах [Катковский, 2020, Гусев, 2023].

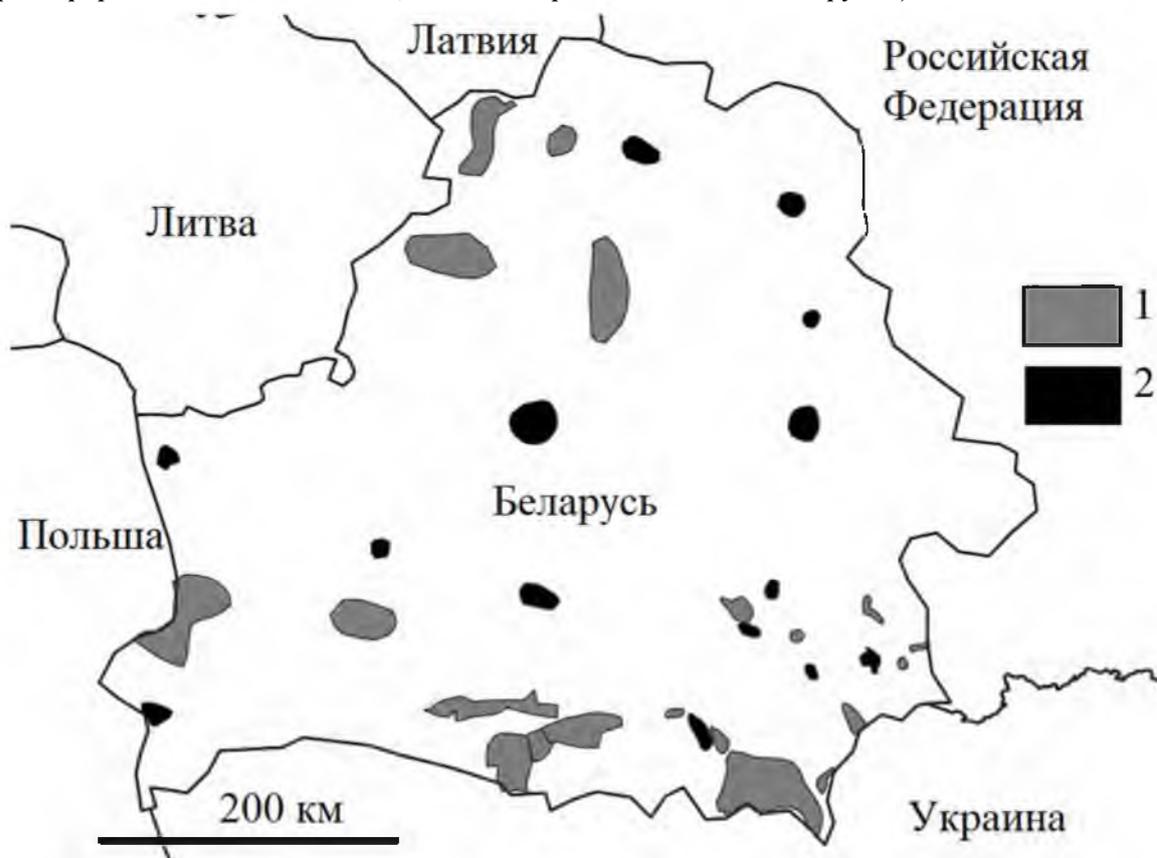
Цель наших исследований – изучение пространственной неоднородности и сезонных колебаний содержаний NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO в атмосфере над территорией Беларуси на основе съемки спутника *Sentinel-5P TROPOMI*. Решаемые задачи: 1) обработка и преобразование данных дистанционного зондирования (съемка сенсора *TROPOMI* спутника *Sentinel-5P*); 2) определение усреднённых содержаний NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO над различными территориальными единицами (города, особо охраняемые природные территории); 3) изучение сезонных изменений содержаний NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO; 4) выяснение вероятных природных и ан-

<sup>1</sup> Акимова Т.А., Кузьмин А.П., Хаскин В.В. 2001. Экология. Природа-Человек-Техника. М., ЮНИТИ-ДАНА, 343 с.

тропогенных факторов, влияющих на пространственную неоднородность содержаний изучаемых компонентов.

### Объекты и методы исследования

Район исследования – Республика Беларусь (рис. 1). Согласно физико-географическому районированию территория находится в пределах двух природных зон: подтаежных смешанных лесов (север и центр страны) и широколиственных лесов (юг) умеренного пояса. Климат умеренно-континентальный, на западной окраине переходный от морского к континентальному. Средняя годовая температура изменяется от 5,5 °С (северо-восток) до 8,0 °С (юго-запад). Количество осадков колеблется от 550 до 700 мм/год. Рельеф равнинный. Более половины территории характеризуется абсолютными отметками в интервале 150–200 м. В почвенном покрове преобладают дерново-подзолистые (37 % территории) и дерново-подзолистые заболоченные (33 %) почвы. Растительный покров формируется хвойными, смешанными, лиственными лесами, лугами, болотами. Более половины территории занимают сельскохозяйственные угодья. Численность населения составляет 9,2 млн чел. Плотность населения – 45,3 чел./км<sup>2</sup>. Самыми крупными городами являются Минск (1,995 млн чел.) и Гомель (0,537 млн человек). Наиболее развитые отрасли хозяйства – энергетика, машиностроение, сельское хозяйство, химическая, лесная, добывающая промышленность. Значительное воздействие на окружающую среду оказывают разработка месторождений калийных солей (ОАО «Беларуськалий»), предприятия химической и нефтеперерабатывающей промышленности (Гомельский химический завод, «Гродно Азот», Новополоцкий и Мозырский нефтеперерабатывающие заводы, «СветлогорскХимволокно» и другие).



Объекты: 1 – ООПТ; 2 – города

Рис. 1. Район исследований и расположение территориальных объектов

Fig. 1. Study area and location of territorial objects

Спутник *Sentinel-5P* с сенсором *TROPOMI* (*TROPospheric Monitoring Instrument*), измеряет атмосферные концентрации  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}$  в моль/ $\text{м}^2$ . Наблюдения ведутся ежедневно с октября 2017 года. Пространственное разрешение 5,5 x 3,5 км (7 x 5,5 км – до августа 2019 года). Данные размещены в свободном доступе на сайте NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) и представлены в виде архива (xxx.nc).

При обработке использован метод осреднения измерений в заданном временном отрезке, с целью сглаживания случайных колебаний и выделения регулярной составляющей потоков изучаемых компонентов от земной поверхности. Временные интервалы исследований – зима и лето 2022 года. Операционными территориальными единицами являлись города и особо охраняемые природные территории (ООПТ) Беларуси. Для анализа были выбраны 15 городов и 19 ООПТ (для которых удалось набрать представительную выборку измерений каждого поллютанта). Расположение объектов показано на рис. 1.

Обработку данных *Sentinel-5P TROPOMI*, растровые операции, построение картосхем проводили с помощью геоинформационной системы *QGIS*.

Группировка суточных значений каждого показателя в пределах ареала соответствующих объектов и статистическая обработка данных выполнены в программе *MS Excel*. Статистическая обработка включала определение среднего, медианного, среднеквадратичной ошибки, стандартного отклонения, минимального, максимального значений.

### Результаты и их обсуждение

Для территории Беларуси в зимний и летний периоды были установлены фоновые содержания поллютантов, измеряемых сенсором *TROPOMI* (табл. 1). Видно, что концентрации всех рассмотренных загрязнителей испытывают существенные сезонные колебания. Средняя концентрация диоксида азота зимой выше, чем летом в 3,35 раза, медианная – в 2,69 раза. В зимний период существенно больше интервал колебаний концентраций. Среднее содержание диоксида серы зимой выше в 23,77 раза, медианное – в 17,9 раза. Интервал колебаний зимой больше в 17,8 раза. Концентрации угарного газа отличаются гораздо меньшей вариабельностью. Однако в зимний период они выше летних (средняя – в 1,17 раза, медианная – в 1,17 раза).

Таблица 1  
Table 1

Содержания загрязняющих веществ над территорией Беларуси  
(по данным съемки *Sentinel-5P TROPOMI*)

Contents of pollutants over the territory of Belarus (according to *Sentinel-5P TROPOMI* survey data)

| Компонент                                     | Сезон | Среднее и ошибка среднего | Медиана | Интервал колебаний | Коэффициент вариации, % |
|---|-------|---------------------------|---------|--------------------|-------------------------|
| $\text{NO}_2$ , $10^{-3}$ моль/ $\text{см}^2$ | Лето  | $0,017 \pm 0,001^*$       | 0,016   | 0,088              | 51,1                    |
|   | Зима  | $0,057 \pm 0,001^{**}$    | 0,043   | 0,589              | 89,9                    |
| $\text{SO}_2$ , $10^{-3}$ моль/ $\text{см}^2$ | Лето  | $0,293 \pm 0,02$          | 0,199   | 5,769              | 111,3                   |
|   | Зима  | $6,964 \pm 0,045$         | 3,562   | 102,937            | 124,4                   |
| $\text{CO}$ , моль/ $\text{см}^2$             | Лето  | $0,0296 \pm 0,0001$       | 0,0297  | 0,0315             | 10,0                    |
|   | Зима  | $0,0348 \pm 0,0001$       | 0,0348  | 0,0300             | 7,9                     |

Рассмотрим изменения содержаний поллютантов над объектами, которые наиболее сильно отличаются друг от друга по наличию в их пределах антропогенных источников выбросов, – над городами и ООПТ (табл. 2).



Таблица 2  
Table 2

Содержания загрязняющих веществ над городами и ООПТ  
(по данным съемки *Sentinel-5P TROPOMI*)  
Contents of pollutants over cities and protected areas (according to *Sentinel-5P TROPOMI* survey data)

| Статистика              | Сезон | Компонент   |       |   |       |                          |        |
|-------------------------|-------|---|-------|---|-------|--------------------------|--------|
|                         |       | NO <sub>2</sub> , 10 <sup>-3</sup> моль/см <sup>2</sup> |       | SO <sub>2</sub> , 10 <sup>-3</sup> моль/см <sup>2</sup> |       | CO, моль/см <sup>2</sup> |        |
|                         |       | Города  | ООПТ  | Города  | ООПТ  | Города                   | ООПТ   |
| Среднее                 | Лето  | 0,021   | 0,017 | 0,320   | 0,301 | 0,0295                   | 0,0303 |
|                         | Зима  | 0,065   | 0,055 | 7,450   | 7,860 | 0,0351                   | 0,0352 |
| Медианное               | Лето  | 0,021   | 0,017 | 0,230   | 0,216 | 0,0296                   | 0,0300 |
|                         | Зима  | 0,054   | 0,039 | 4,70  | 4,960 | 0,0351                   | 0,0352 |
| Минимальное             | Лето  | 0,001   | 0,001 | 0,001   | 0,001 | 0,0210                   | 0,0192 |
|                         | Зима  | 0,001   | 0,001 | 0,020   | 0,001 | 0,0255                   | 0,0267 |
| Максимальное            | Лето  | 0,072   | 0,077 | 2,390   | 5,670 | 0,0392                   | 0,0421 |
|                         | Зима  | 0,455   | 0,295 | 70,560  | 69,58 | 0,0449                   | 0,0456 |
| Ошибка среднего         | Лето  | 0,001   | 0,001 | 0,054   | 0,035 | 0,0006                   | 0,0005 |
|                         | Зима  | 0,006   | 0,008 | 1,360   | 1,070 | 0,0005                   | 0,0004 |
| Коэффициент вариации, % | Лето  | 42,8  | 52,9  | 96,9  | 101,7 | 8,8                      | 10,2   |
|                         | Зима  | 73,8  | 85,4  | 124,4   | 105,9 | 8,0                      | 7,9    |

Для диоксида азота имеет место хорошо выраженная закономерность: над территориями городов его средняя концентрация выше, чем над ООПТ в 1,2 раза (и летом, и зимой), а медианная – в 1,2 раза летом и в 1,4 раза зимой. В летний период 13 из 15 городов характеризуются концентрациями этого загрязнителя, превышающими фоновый уровень, в зимний – 5 из 15. Наибольшие средние и медианные концентрации летом наблюдались над Гомелем, Гродно, Брестом, Минском, Речицей, Светлогорском. Зимой наибольшие средние и медианные концентрации – над Минском, Гомелем, Новополоцком, Витебском. Максимальные разовые концентрации обнаружены зимой над Новополоцком ( $0,455 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>), Минском ( $0,379 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>) и Гомелем ( $0,285 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). На рис. 2 показаны концентрации диоксида азота в августе 2022 года, превышающие  $0,05 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>. Четко выделяются участки с часто повторяемыми высокими концентрациями, преимущественно приуроченные к городам – Минску, Гомелю, Бресту, Гродно.

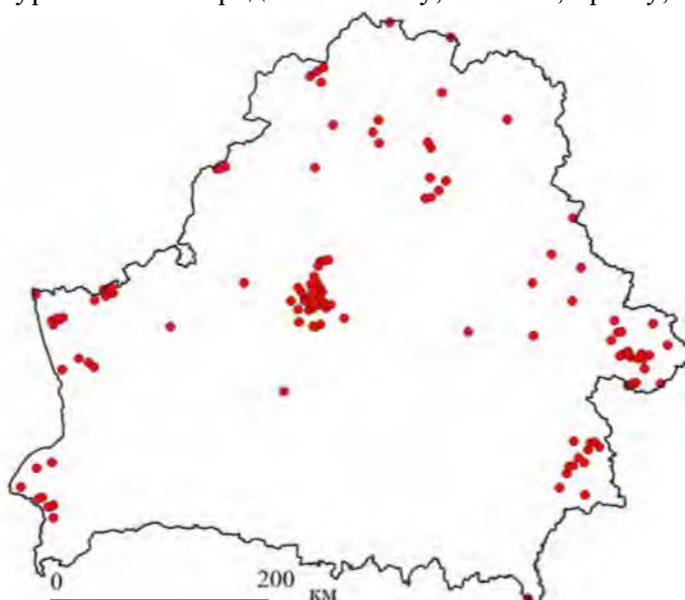


Рис. 2. Высокие (более  $0,05 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>) концентрации диоксида азота в августе 2022 года  
Fig. 2. High (more than  $0,05 \times 10^{-3}$  mol/cm<sup>2</sup>) concentrations of nitrogen dioxide in August 2022

Над ООПТ средние и медианные содержания  $\text{NO}_2$  не отличаются от фоновых (как зимой, так и летом), что объясняется отсутствием на охраняемых территориях источников выбросов данного вещества.

Выявленные различия в концентрациях  $\text{NO}_2$  над городами и ООПТ объясняются тем, что источниками выбросов являются энергетика на углеводородном топливе, автотранспорт, химическая и нефтехимическая промышленность. В случае ООПТ потенциальным источником поступления  $\text{NO}_2$  в атмосферу могут служить пожары.

Для содержания диоксида серы характерна сильная пространственно-временная изменчивость. Его средняя и медианная концентрации над городами выше фоновых значений для Беларуси, однако различия статистически недостоверны. В летний период над 10 городами из 15 среднее содержание  $\text{SO}_2$  превышает фон. Статистически достоверные отличия от фона наблюдаются только для 2 городов (Новополоцк, Светлогорск). Максимальные усредненные содержания  $\text{SO}_2$  отмечены над Новополоцком (в 1,35 раза выше фона), Светлогорском (в 1,33 раза), Добрушом (1,29 раза), Жлобином (1,29 раза), Минском (1,2 раза). Наибольшие разовые концентрации имели место над Минском (в 8,2 раз выше фона), Брестом (в 8,1 раза), Гродно (в 7,4 раза), Новополоцком (в 6,8 раза). В зимний период статистически значимые превышения фона не отмечены вообще. Наибольшие концентрации имели место над Могилевом, Новополоцком, Речицей, Витебском.

Летом среднее и медианное содержания диоксида серы над ООПТ также оказалось несколько выше фона (отличия статистически недостоверны). Причем превышение фона наблюдалось над 11 ООПТ из 19. Наибольшая усредненная за летний период величина была характерна для Березинского биосферного заповедника (в 1,38 раза выше фона), для национального парка «Браславские озера» (в 1,3 раза), для ландшафтного заказника «Выдрица» (в 1,26 раза), для водно-болотного заказника «Днепр» (в 1,22 раза). Наибольшие разовые концентрации имели место над национальным парком «Браславские озера» (19,3 раза выше фона), Березинским биосферным заповедником (в 17,6 раза), над заказником «Выгонощанским» (в 16,7 раза), над национальным парком «Беловежская Пуща» (в 8,1 раза). В зимний период как средняя, так и медианная концентрации над ООПТ оказались даже выше, чем над городами. Так, высокие средние и медианные концентрации имели место над национальным парком «Браславские озера», заказниками «Ельня», «Смычок», «Ипуть». Максимальные разовые концентрации – над Березинским биосферным заповедником ( $69,58 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>), национальным парком «Браславские озера» ( $68,89 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>), национальным парком «Нарочанский» ( $52,92 \times 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). Выявленные закономерности объясняются тем, что пространственно-временные колебания содержания  $\text{SO}_2$  над территорией Беларуси обусловлены преимущественно трансграничным переносом, то есть влиянием источников выбросов, находящихся за пределами страны [Гусев, 2023].

В летний период содержание угарного газа над городами изменялось от 0,0278 до 0,0313 моль/см<sup>2</sup>. Средняя и медианная величина над городами не отличалась от фоновых значений. Наибольшие средние концентрации  $\text{CO}$  отмечены над Гомелем (0,0307 моль/см<sup>2</sup>), Речицей (0,0313), Жлобином (0,0304), Светлогорском (0,0302). Тогда как над самым крупным городом Минском – 0,0292 моль/см<sup>2</sup>. Средняя и медианная величина концентрации  $\text{CO}$  над ООПТ превышает фоновые значения, однако отличия статистически недостоверны. Максимальные разовые концентрации  $\text{CO}$  обнаружены над национальным парком «Беловежская Пуща» (0,0421), водно-болотным заказником «Средняя Припять» (0,0411), заказником «Ольманские болота» (0,0398), национальным парком «Припятский» (0,0396), а также над городами – Речицей (0,0393) и Светлогорском (0,0392). В зимний период концентрация  $\text{CO}$  повышалась относительно лета в 1,19 раза над городами и в 1,16 раза над ООПТ. Содержания над городами и ООПТ очень близки. Полученные данные свидетельствуют, что в условиях Беларуси поток  $\text{CO}$ , вызванный



биологическими процессами и, вероятно, в определенной мере лесными пожарами, больше потока, обусловленного выбросами промышленности и транспорта.

На рис. 3 и 4 показаны соответственно максимальные концентрации  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}$  в августе 2022 года. Видно, что их пространственное распределение не имеет привязки к городам. Высокие содержания  $\text{SO}_2$  распределены по территории относительно равномерно, а высокие концентрации  $\text{CO}$  приурочены к югу Беларуси, находятся на значительном удалении от промышленно развитых регионов.

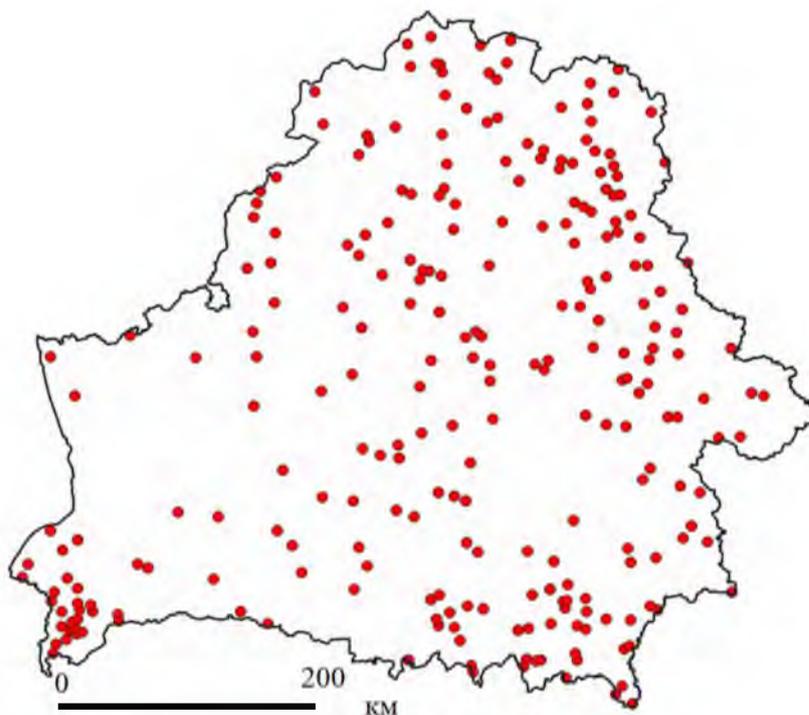


Рис. 3. Высокие (более  $1,0 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>) концентрации диоксида серы в августе 2022 года  
Fig. 3. High (more than  $1,0 \cdot 10^{-3}$  mol/cm<sup>2</sup>) concentrations of sulfur dioxide in August 2022

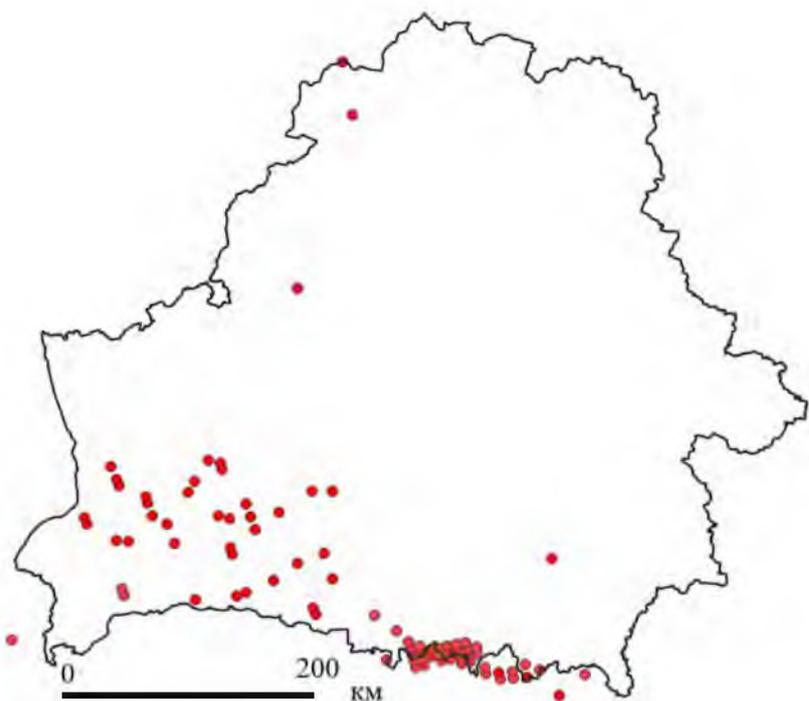


Рис. 4. Высокие (более 0,04 моль/см<sup>2</sup>) концентрации угарного газа в августе 2022 года  
Fig. 4. High (more than 0,04 mol/cm<sup>2</sup>) concentrations of carbon monoxide in August 2022

### Заключение

Таким образом, на основе анализа космической съемки спутника *Sentinel-5P TROPOMI* территории Беларуси установлено следующее:

- имеют место значительные сезонные колебания содержаний диоксида серы, диоксида азота и угарного газа; зимние средние и медианные концентрации диоксида серы выше летних в 23,77 и 17,9 раза соответственно; диоксида азота – в 3,35 и 2,69 раза, угарного газа – в 1,16 и 1,17 раза;
- содержание диоксида азота над городами выше, чем над ООПТ в 1,2 раза летом и зимой; над ООПТ концентрации  $\text{NO}_2$  не отличаются от фоновых; выявленные различия в концентрациях  $\text{NO}_2$  над городами и ООПТ обусловлены преобладанием антропогенных потоков данного компонента; в летний период наибольшие концентрации  $\text{NO}_2$  наблюдались над Гомелем, Гродно, Брестом, Минском, Речицей, Светлогорском; в зимний период – над Минском, Гомелем, Новополоцком, Витебском;
- концентрации диоксида серы характеризуются сильной пространственно-временной изменчивостью; между содержаниями  $\text{SO}_2$  над городами и ООПТ различия статистически незначимые; содержания  $\text{SO}_2$ , превышающие фон, наблюдались над ООПТ;
- в зимний и летний периоды содержания  $\text{CO}$  над городами и ООПТ близки и статистически значимо от фона не отличаются; в зимний период концентрация  $\text{CO}$  повышалась относительно лета в 1,19 раза над городами и в 1,16 раза над ООПТ.

Выявленные закономерности объясняются тем, что пространственно-временные колебания содержания  $\text{SO}_2$  над территорией Беларуси обусловлены преимущественно трансграничным переносом, то есть влиянием внешних источников выбросов. На потоки  $\text{CO}$ , вероятно, в значительной степени оказывают влияние биологические процессы. Исходя из полученных результатов видно, что каждый из рассмотренных поллютантов имеет свои особенности пространственного распределения концентраций в пределах Беларуси.

### Список литературы

- Битюкова В.Р., Шимунова А.А. 2020. Региональный анализ дифференциации промышленного загрязнения атмосферы на постсоветском пространстве. Региональные исследования, 4: 82–96. <https://doi.org/10.5922/1994-5280-2020-4-7>.
- Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. 2020. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным. Исследования Земли из космоса, 4: 3–17. <https://doi.org/10.31857/S0205961420040028>.
- Гусев А.П. 2023. Оценка риска деградации лесных геосистем под воздействием загрязнения атмосферы на основе съемки сенсора TROPOMI спутника Sentinel-5P (на примере восточной части Белорусского Полесья). Российский журнал прикладной экологии, 1: 10–15. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.10.15>.
- Ивлиева М.С. 2023. Исследование загрязнения приземной атмосферы в Тульской области с использованием сервисов Copernicus. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 3: 551–554.
- Катковский Л.В. 2020. Определение загрязнения атмосферы мегаполисов по данным космической съемки. Журнал Белорусского государственного университета. Физика, 3: 4–16. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-4-16>.
- Курсов С.В. 2015. Монооксид углерода: физиологическое значение и токсикология. Медицина неотложных состояний, 6(69): 9–16.
- Морозова А.Э., Сизов О.С., Елагин П.О., Агзамов Н.А. 2022. Интегральная оценка качества атмосферного воздуха в крупнейших городах России на основе данных TROPOMI (Sentinel-5P) за 2019-2020 гг. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 19(4): 23–39. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39>.
- Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года. 2022. Минск, Беларуская навука, 332 с.



- Силаева П.Ю., Силаев А.В. 2018. Особенности рассеивания выбросов диоксида азота предприятиями энергокомплекса и их влияние на население мегаполисов. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 26(1): 63–72. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72>.
- Тронин А.А., Киселёв А.В., Васильев М.П., Седеева М.С., Неробелов Г.М. 2021. Мониторинг содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным в условиях пандемии COVID-19. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 18(3): 309–313. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-309-313>.
- Cersosimo A., Serio C., Masiello G. 2020. TROPOMI NO<sub>2</sub> Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observation. Remote Sensing, 12(14): 2212–2235. <https://doi.org/10.3390/rs12142212>.
- Filonchik M., Hurynovich V., Yan H., Gusev A., Shpilevskaya N. 2020. Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO and AOD over East China. Aerosol and Air Quality Research, 20: 1530–1540. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0226>.
- Filonchik M., Peterson M.P., Gusev A., Fengning H., Haowen Ya., Liang Zh. 2022. Measuring Air Pollution from the 2021 Canary Islands Volcanic Eruption. Science of the Total Environment, 849: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157827>.
- Ialongo I., Virta H., Eskes H., Hovila J., Douros J. 2019. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO<sub>2</sub> Observation with Ground-Based Measurements in Helsinki. Atmospheric Measurement Techniques, 13: 205–218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>.
- Ionov D.V. 2010. Tropospheric NO<sub>2</sub> Trend Over St. Petersburg (Russia) as Measured from Space. Russian Journal of Earth Sciences, 11(4): ES4004. <https://doi.org/10.2205/2010ES000437>.
- Khan R., Kumar K.R., Zhao T. 2021. Assessment of Variations of Air Pollutant Concentrations During the COVID-19 Lockdown and Impact on Urban Air Quality in South Asia. Urban Climate, 38: 100908. <https://doi.org/j.uclim.2021.100908>.
- Makineci H.B., Arkan D., Alkan D., Karasaka L. 2021. Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019–2021. Harita Dergisi, 170: 23–40.
- Shen L., Gautam R., Omara M., Zavala-Araiza D., Maasackers J.D., Scarpelli T.R., Lorente A., Lyon D., Sheng J., Varon D.J., Nesser H., Qu Zh., Lu X., Sulprizio M.P., Hamburg S.P., Jacob D.J. 2022. Satellite Quantification of Oil and Natural Gas Methane Emissions in the US and Canada Including Contributions from Individual Basins. Atmospheric Chemistry and Physics, 22: 11203–11215. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11203-2022>.
- Zhu Z., Chen B., Zhao Y., Ji Y. 2021. Multi-Sensing Paradigm Based Urban Air Quality Monitoring and Hazardous Gas Source Analyzing: a Review. Journal of Safety Science and Resilience, 2(3): 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr>.

## References

- Bitjukova V.R., Shimunova A.A. 2020. Regional Analysis of Differentiation in Air Pollution from Manufacturing at the Post-Soviet Territories. Regional Studies, 4: 82–96 (in Russian). <https://doi.org/10.5922/1994-5280-2020-4-7>.
- Bondur V.G., Voronova O.S., Cherepanova E.V., Tsidilina M.N., Zima A.L. 2020. The Spatiotemporal Analysis of Multiannual Wildfires and Trace Gas and Aerosol Emissions in Russia Based of Satellite Data. Earth Observation and Remote Sensing, 4: 3–17 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961420040028>.
- Gusev A.P. 2023. 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). Russian Journal of Applied Ecology, 1: 10–15 (in Russian). <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.10.15>.
- Ivlieva M.S. 2023. Investigation of Surface Atmosphere Pollution in the Tula Region Using Copernicus Services. Izvestiya Tula State University. Tekhnicheskkiye nauki, 3: 551–554 (in Russian).
- Katkovsky L.V. 2020. Determination of Atmospheric Pollution of Megapolis by Space Data. Journal of the Belarusian State University. Physics, 3: 4–16 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-4-16>.
- Kursov S.V. 2015. Monooksid ugleroda: fiziologicheskoye znacheniyе i toksikologiya [Carbon Monoxide: Physiological Significance and Toxicology]. Meditsina neotlozhnyy sostoyaniy, 6(69): 9–16.



- Morozova A.E., Sizov O.S., Elagin P.O., Agzamov N.A. 2022. Integral Assessment of Atmospheric Air Quality in the Largest Cities of Russia Based on Tropomi (Sentinel-5p) Data for 2019-2020. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*, 19(4): 23–39 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39>
- Prognoz sostoyaniya prirodnoy sredy Belarusi na period do 2035 goda [Forecast of the State of the Natural Environment in Belarus for the Period Until 2035]. 2022. Minsk, Publ. Belaruskaya nauka, 332 p.
- Silaeva P.Yu., Silaev A.V. 2018. Peculiarities of Dispersion of Nitrogen Dioxide Emissions by the Energy Complex Enterprises and Their Impact on the Population of Megapolises. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 26(1): 63–72 (in Russian). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72>.
- Tronin A.A., Kiselev A.V., Vasiliev M.P., Sedeeva M.S., Nerobelov G.M. 2021. Monitoring NO<sub>2</sub> content in the atmosphere of Russia using satellite data during COVID-19 pandemic. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*, 18(3): 309–313 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-309-313>.
- Cersosimo A., Serio C., Masiello G. 2020. TROPOMI NO<sub>2</sub> Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observation. *Remote Sensing*, 12(14): 2212–2235. <https://doi.org/10.3390/rs12142212>.
- Filonchik M., Huryovich V., Yan H., Gusev A., Shpilevskaya N. 2020. Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO and AOD over East China. *Aerosol and Air Quality Research*, 20: 1530–1540. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0226>.
- Filonchik M., Peterson M.P., Gusev A., Fengning H., Haowen Ya., Liang Zh. 2022. Measuring Air Pollution from the 2021 Canary Islands Volcanic Eruption. *Science of the Total Environment*, 849: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157827>.
- Ialongo I., Virta H., Eskes H., Hovila J., Douros J. 2019. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO<sub>2</sub> Observation with Ground-Based Measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13: 205–218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>.
- Ionov D.V. 2010. Tropospheric NO<sub>2</sub> Trend Over St. Petersburg (Russia) as Measured from Space. *Russian Journal of Earth Sciences*, 11(4): ES4004. <https://doi.org/10.2205/2010ES000437>.
- Khan R., Kumar K.R., Zhao T. 2021. Assessment of Variations of Air Pollutant Concentrations During the COVID-19 Lockdown and Impact on Urban Air Quality in South Asia. *Urban Climate*, 38: 100908. <https://doi.org/j.uclim.2021.100908>.
- Makineci H.B., Arkan D., Alkan D., Karasaka L. 2021. Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019-2021. *Harita Dergisi*, 170: 23–40.
- Shen L., Gautam R., Omara M., Zavala-Araiza D., Maasackers J.D., Scarpelli T.R., Lorente A., Lyon D., Sheng J., Varon D.J., Nesser H., Qu Zh., Lu X., Sulprizio M.P., Hamburg S.P., Jacob D.J. 2022. Satellite Quantification of Oil and Natural Gas Methane Emissions in the US and Canada Including Contributions from Individual Basins. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22: 11203–11215. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11203-2022>.
- Zhu Z., Chen B., Zhao Y., Ji Y. 2021. Multi-Sensing Paradigm Based Urban Air Quality Monitoring and Hazardous Gas Source Analyzing: a Review. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2(3): 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr>.

*Поступила в редакцию 16.04.2024;  
поступила после рецензирования 27.04.2024;  
принята к публикации 25.05.2024*

*Received April 16, 2024;  
Revised April 27, 2024;  
Accepted May 25, 2024*

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

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

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гусев Андрей Петрович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии и географии, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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



---

**Флерко Татьяна Григорьевна**, кандидат географических наук, доцент кафедры геологии и географии, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь

**Tatsiana G. Flerko**, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Geology and Geography of Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus