

УДК 911.2+504.54

**ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ЛЕТОМ 2022 ГОДА  
НА ОСНОВЕ СЪЕМКИ СПУТНИКА SENTINEL-5P TROPOMI**

*Гусев А. П.<sup>1</sup>, Флерко Т. Г.<sup>2</sup>*

*<sup>1,2</sup>Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Республика Беларусь  
E-mail: <sup>1</sup>andi\_gusev@mail.ru, <sup>2</sup>tflerco@mail.ru*

Работа посвящена оценке загрязнения атмосферы на территории Беларуси на основе данных космической съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI. Решаемые задачи: сравнение концентраций SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO в атмосфере на территории Беларуси и сопредельных стран; определение средних концентраций SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO в атмосфере над городами и особо охраняемыми природными территориями Беларуси; выяснение закономерностей пространственной неоднородности концентраций SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO. Выполнен сравнительный анализ средних значений концентрации указанных загрязнителей над территориями Беларуси и сопредельных стран (Литва, Латвия, Польша, Украина, Российская Федерация), также в пределах Беларуси — над городами и особо охраняемыми природными территориями. Установлено, что колебания содержания SO<sub>2</sub> над территорией Беларуси определяются трансграничным переносом, а пространственная дифференциация концентраций NO<sub>2</sub> зависит от местных источников выбросов.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, Sentinel-5P TROPOMI, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Беларусь.

**ВВЕДЕНИЕ**

Загрязнение атмосферы — важный фактор формирования качества окружающей среды как на локальном, так и региональном уровнях [1]. Среди разнообразных техногенных загрязнителей наиболее существенное экологическое значение имеют выбросы диоксида серы (SO<sub>2</sub>), диоксида азота (NO<sub>2</sub>), угарного газа (CO). Экологическая опасность этих поллютантов обусловлена их массовостью, токсичностью и высокой продолжительностью нахождения в атмосфере.

Источниками выбросов NO<sub>2</sub> являются энергетика на углеводородном топливе, автотранспорт, химическая и нефтехимическая промышленность, металлургия, пожары. Источники выбросов SO<sub>2</sub> — тепловые электростанции на угле и мазуте, нефтеперерабатывающие и металлургические заводы, а также извержения вулканов. Дальность переноса SO<sub>2</sub> составляет 300–400 км. В атмосфере SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> вступают в химические реакции с парами воды и превращаются соответственно в серную и азотную кислоты, что приводит к закислению осадков. Повышенные содержания SO<sub>2</sub> вызывают нарушения физиологических процессов, оказывают мутагенное влияние. Последствиями закисления являются поражение растительности за счет изменения метаболических процессов в почве и соответствующей трансформации питания растений, активизации миграции токсичных химических элементов [1, 2].

Источниками CO являются лесные и степные пожары, деятельность живых организмов, выбросы промышленных предприятий (прежде всего металлургии, нефтехимической промышленности), автомобильный транспорт (содержание CO в выхлопных газах может составлять до 12%; на долю автотранспорта приходится 56-

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ЛЕТОМ 2022 ГОДА  
НА ОСНОВЕ СЪЕМКИ СПУТНИКА SENTINEL-5P TROPOMI

---

62% его антропогенных выбросов). Главным процессом удаления СО из атмосферы является его разложение почвенными грибами. Среднее время пребывания в атмосфере составляет около 35 суток. Для человека угарный газ — это яд общетоксического действия, который угнетает тканевое дыхание в коре головного мозга [3].

С развитием дистанционного зондирования Земли появились и постоянно совершенствуются методы оценки загрязнения атмосферы с помощью многозональной космической съемки [4, 5, 6]. При этом спутниковый мониторинг загрязнения атмосферы имеет как недостатки, так и преимущества по сравнению с наземными инструментальными наблюдениями. Преимуществами спутникового мониторинга атмосферы являются: пространственная оценка загрязнения на региональном уровне; выявление реальных (в том числе несанкционированных) источников выбросов; возможность получения усредненных за любой временной период данных; возможность ежесуточной (т.е. в режиме реального времени) оценки загрязнения на региональном уровне; выяснение направлений трансграничного движения масс загрязненного воздуха и их временной изменчивости; охват труднодоступных территорий.

К недостаткам спутникового мониторинга загрязнения следует отнести: 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 NO<sub>2</sub> установлена связь величин, полученных дистанционными и наземными измерениями, с коэффициентом корреляции 0,66 [7]; в работе Cersosimo et al. (2020) коэффициент корреляции составил 0,5–0,9 [8].

Так, спутниковый мониторинг показал существенное снижение концентраций SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> и СО (до 20–30%) во время короновирусного (COVID-19) карантина, в ходе которого резко сократилось производство и транспортные потоки [6]. В работе приводится помесячный анализ изменений концентраций SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> и СО в 2019–2021 гг. над территорией Турции, который также выявил снижение содержаний указанных компонентов во время карантина. Установлены закономерности сезонных колебаний концентраций поллютантов [5].

Отмечается, что концентрации, определяемые по данным дистанционной съемки TROPOMI, не могут оцениваться с помощью санитарно-гигиенических нормативов (ПДК), поэтому предлагаются различные относительный индексы. Так, для оценки интегрального загрязнения воздуха используется универсальный нормализованный индекс загрязнения TAQI (TROPOMI Air Quality Index), который учитывает 5 компонентов (СО, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, НСНО, аэрозоли). При этом нормированные (в диапазоне от 0 до 1) содержания указанных компонентов умножаются на класс опасности и суммируются [4].

Применение спутниковых методов для изучения загрязнения атмосферы на территории Беларуси до настоящего времени не имело широкого использования. Имеются лишь единичные работы, касающиеся отдельных регионов страны [9].

Цель нашей работы – оценка загрязнения атмосферы на территории Беларуси на основе данных космической съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI. Решаемые задачи: сравнение концентраций  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  в атмосфере над территорией Беларуси и сопредельных стран; определение средних концентраций  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  в атмосфере над городами и особо охраняемыми природными территориями Беларуси; выяснения закономерностей пространственной неоднородности концентраций  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на территории Восточной Европы: Беларусь и сопредельные страны (рис. 1).



Области Российской Федерации: 1 — Псковская; 2 — Смоленская; 3 — Брянская

Рис. 1. Район исследований.

Составлено авторами.

Использованы данные съемки спутника Sentinel-5P с сенсором TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), который определяет атмосферные концентрации (общее содержание в вертикальном столбе тропосферы) озона, метана, формальдегида, угарного газа, диоксида серы, диоксида азота. Измерения ведутся ежедневно с октября 2017 г. Пространственное разрешение 5,5x3,5 км (7x5,5 км — до августа 2019 г.). Содержание диоксида серы, монооксида углерода, диоксида азота измеряются и предоставляются в единицах моль/м<sup>2</sup>. Данные находятся в свободном доступе на сайте NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) и представлены в виде архива (xxx.nc). Архив преобразовывался нами с помощью модуля Sentinel-5P data explorer для QGIS в векторные слои точечного типа.

**ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ЛЕТОМ 2022 ГОДА  
НА ОСНОВЕ СЪЕМКИ СПУТНИКА SENTINEL-5P TROPOMI**

Поскольку атмосферные циркуляции на разных высотах рассеивают и перемешивают по горизонтали поток загрязняющих веществ, то использовался метод осреднения измерений в заданном временном отрезке, что позволяет сгладить случайные колебания и выделить регулярную составляющую потока того или иного поллютанта от земной поверхности.

Операционными территориальными единицами являлись страны (Беларусь, Литва, Латвия, Эстония, Польша, Украины, Смоленская, Брянская и Псковская области Российской Федерации), на территории Беларуси — города и особо охраняемые природные территории (ООПТ).

Для обработки данных Sentinel-5P TROPOMI, растровых операций, построения картосхем использовалась геоинформационная система QGIS.

Группировка суточных содержаний  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  в пределах ареала соответствующих территориальных единиц выполнялась в программе MS Excel, статистическая обработка данных — в MS Excel и STATISTICA. Статистическая обработка включала определение среднего, медианного, минимального, максимального значений, стандартного отклонения, среднеквадратичной ошибки, дисперсии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим колебания концентраций  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  в тропосфере над территорией Беларуси и сопредельных стран (табл. 1). Среднее содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере над территорией Беларуси с течение июля-августа 2022 г. изменялось от  $0,0141 \cdot 10^{-3}$  до  $0,0210 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>.

Таблица 1.

Средние содержания  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  в тропосфере над территорией Беларуси и сопредельных стран (июль-август 2022 г.)

Регион	Компонент		
	$\text{NO}_2$ , $10^{-3}$ моль/см <sup>2</sup>	$\text{SO}_2$ , $10^{-3}$ моль/см <sup>2</sup>	$\text{CO}$ , моль/см <sup>2</sup>
Беларусь	0,0177±0,0008	0,299±0,032	0,0290±0,0001
Польша	0,0277±0,0029	0,435±0,110	0,0288±0,0001
Эстония	0,0175±0,0017	0,301±0,049	0,0280±0,0001
Латвия	0,0176±0,0010	0,383±0,064	0,0280±0,0001
Литва	0,0186±0,0015	0,484±0,105	0,0290±0,0001
Украина	0,0229±0,0010	0,378±0,053	0,0290±0,0001
Россия (Смоленская, Брянская, Псковская области)	0,0191±0,0023	0,391±0,089	0,0290±0,001

Составлено авторами.

В странах Прибалтики наблюдались близкие концентрации это поллютанта. Так, над территорией Эстонии среднее содержание  $\text{NO}_2$  составляло от  $0,0104 \cdot 10^{-3}$  до  $0,0274 \cdot 10^{-3}$ , над территорией Латвии — от  $0,0135 \cdot 10^{-3}$  до  $0,0222 \cdot 10^{-3}$ , над

территорией Литвы — от  $0,0133 \cdot 10^{-3}$  до  $0,0269 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>. Над территориями Польши и Украины концентрации NO<sub>2</sub> были несколько выше. Так, над Польшей содержание колебалось от 0,0146 до 0,0403 (среднее —  $0,0277 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). Над территорией Украины — от 0,0202 до 0,0273 (среднее —  $0,0229 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). Над российскими регионами концентрации изменялись от 0,0100 до 0,0322 (среднее —  $0,0191 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>).

Среднее содержание SO<sub>2</sub> над территорией Беларуси изменялось от  $0,145 \cdot 10^{-3}$  до  $0,520 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup> (средняя величина за июль-август —  $0,299 \cdot 10^{-3}$ , медианная —  $0,286 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). Близкую величину имеет содержание диоксида серы над территорией Эстонии (среднее —  $0,301 \cdot 10^{-3}$ , медианное —  $0,262 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). В других соседних странах среднее содержание SO<sub>2</sub> выше, чем в Беларуси. Так, над территорией Польши содержание SO<sub>2</sub> колебалось от  $0,170 \cdot 10^{-3}$  до  $1,570 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup> (средняя величина за июль-август —  $0,435 \cdot 10^{-3}$ , медианная —  $0,312 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). Над территорией Литвы концентрация диоксида серы варьировала от  $0,05 \cdot 10^{-3}$  до  $1,17 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup> (среднее —  $0,484 \cdot 10^{-3}$ , медианное —  $0,349 \cdot 10^{-3}$  моль/см<sup>2</sup>). Различия в средних и медианных величина содержания диоксида серы объясняется особенностями структуры теплоэнергетики рассматриваемых стран. Так, в Беларуси доминирует теплоэнергетика на природном газе, значительный вклад в производство электроэнергии вносит Белорусская АЭС. В структуре энергетики Польши, Литвы и других соседних с Беларусью стран, велика доля тепловой энергетики на угле и мазуте, которая является ведущим источником выбросов диоксида серы [1].

Исходя из полученных данных видно, что фон SO<sub>2</sub> на территории Беларуси в рассматриваемый временной период обусловлен преимущественно трансграничным переносом от окружающих государств (прежде всего Польши и Литвы).

Среднее содержание CO над территорией Беларуси в течение июля-августа 2022 г. колебалось от 0,025 до 0,032 моль/см<sup>2</sup>. Суточные минимальные значения составляли 0,014–0,022, суточные максимальные — 0,033–0,047 моль/см<sup>2</sup>. Средние концентрации CO в соседних странах также находились в пределах 0,028–0,029 моль/см<sup>2</sup>. Суточные максимальные концентрации над территорией Эстонии составляли 0,031–0,047, Латвии — 0,033–0,047, Литвы — 0,034–0,045, Польши — 0,035–0,047, Украины — 0,038–0,051, Псковской области — 0,032–0,048, Брянской области — 0,030–0,041, Смоленской области — 0,032–0,040 моль/см<sup>2</sup>. Таким образом, дифференциация содержания CO в тропосфере региона весьма слабая.

Для выяснения влияния локальных источников выбросов на содержание NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO в тропосфере были выбраны следующие объекты: Минск (население — 1,975 млн. человек; крупный промышленный центр, производящий 18,8% промышленной продукции всей страны), областные центры (города с населением 300–500 тысяч человек), а также города, в которых расположены крупные промышленные предприятия (Новополоцк, Мозырь, Светлогорск, Солигорск). Для сравнения были выбраны особо охраняемые природные территории — Березинский биосферный заповедник, Полесский радиационно-экологический заповедник, национальные парки «Припятский» и «Беловежская Пуща», заказники — Выгонощанский, Ольманские болота, Ельня и другие.

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ЛЕТОМ 2022 ГОДА  
НА ОСНОВЕ СЪЕМКИ СПУТНИКА SENTINEL-5P TROPOMI

Над каждым объектом были определены средние значения концентраций NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CO июле-августе 2022 г.

Среднее содержание NO<sub>2</sub> над городами составило 0,23·10<sup>-3</sup> моль/см<sup>2</sup>. Наибольшие величины наблюдались над Гродно и Минском (0,29·10<sup>-3</sup>). Наименьшие — над Солигорском (0,17·10<sup>-3</sup>), Новополоцком (0,19·10<sup>-3</sup>), Могилевом (0,19·10<sup>-3</sup>). Среднее содержание NO<sub>2</sub> над ООПТ составило 0,16·10<sup>-3</sup> моль/см<sup>2</sup>. Наибольшая величина отмечена над национальным парком «Беловежская пуца» (0,18·10<sup>-3</sup> моль/см<sup>2</sup>), наименьшая — над заказником «Ольманские болота» (0,14·10<sup>-3</sup> моль/см<sup>2</sup>). Различия между городами и ООПТ по содержанию NO<sub>2</sub> статистически достоверны (табл. 2). Это указывает на то, что пространственное распределение концентраций NO<sub>2</sub> определяется преимущественно местными источниками выбросов.

Таблица 2

Сравнительная характеристика содержания NO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> над городами и ООПТ  
Беларуси (июль-август 2022 г.)

Статистика	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	0,023	0,016	0,32	0,31	0,030	0,030
Медианное	0,022	0,016	0,23	0,20	0,030	0,030
Минимальное	0,001	0,001	0,01	0,01	0,021	0,021
Максимальное	0,072	0,077	2,37	0,52	0,036	0,042
Стандартная ошибка	0,001	0,001	0,06	0,02	0,0006	0,0003

Среднее содержание SO<sub>2</sub> над городами составило 0,32·10<sup>-3</sup> моль/см<sup>2</sup>. Наибольшая величина отмечена над Светлогорском (0,43·10<sup>-3</sup>), Минском (0,36·10<sup>-3</sup>), Жлобыным (0,36·10<sup>-3</sup>). Наименьшая — над Солигорском (0,22·10<sup>-3</sup>), Мозырем (0,27·10<sup>-3</sup>). Над ООПТ среднее значение концентрации было 0,31·10<sup>-3</sup> моль/см<sup>2</sup>. Минимальные значения отмечены над заказниками «Ельня» (0,25·10<sup>-3</sup>) и «Ольманские болота» (0,28·10<sup>-3</sup>); наибольшие – над Березинским заповедником (0,40·10<sup>-3</sup>). Разница в концентрации SO<sub>2</sub> над различными объектами статистически недостоверна. Этот факт может быть объяснен тем, что колебания концентрации диоксида серы над территорией Беларуси обусловлены трансграничными переносом (поскольку наиболее мощные источники выбросов находятся за пределами страны).

Над городами среднее содержание CO изменялось от 0,029 (Витебск, Гродно, Могилев, Брест) до 0,031 (Гомель) моль/см<sup>2</sup>. Максимальное содержание отмечено над городами Гомель (0,035 моль/см<sup>2</sup>) и Жлобин (0,036 моль/см<sup>2</sup>). Над ООПТ среднее содержание CO аналогично колебалось от 0,29·10<sup>-1</sup> (Березинский заповедник, заказник «Ельня») до 0,031 (заказник «Ольманские болота», национальный парк «Припятский») моль/см<sup>2</sup>. Различия между городами и ООПТ по содержанию данного компонента отсутствуют (табл. 2). Возможно, что для

выявления значимой разницы в содержаниях тропосферного СО между городами и ООПТ требуется анализ более длительного временного интервала.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе выполненных исследований установлено:

– в рассматриваемый период времени наибольшие концентрации диоксида азота наблюдались над Польшей и Украиной; содержания этого компонента над другими странами статистически достоверных отличий между собой не имели;

– по среднему содержанию СО статистически значимые различия между странами отсутствовали;

– по среднему содержанию SO<sub>2</sub> отмечена существенная дифференциация: концентрация диоксида серы над территорией Беларуси ниже, чем над территориями сопредельных государств, что объясняется особенностями структуры теплоэнергетики рассматриваемых стран;

– сравнительный анализ концентраций NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, СО над городами и ООПТ Беларуси показал, что статистически значимые отличия имеют место только для содержания диоксида азота, по другим компонентами различия отсутствуют.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

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

### Список литературы

1. Акимова Т.А., Кузьмин А.П., Хаскин В.В. Экология. Природа-Человек-Техника: Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 343 с.
2. Силаева П.Ю., Силаев А.В. Особенности рассеивания выбросов диоксида азота предприятиями энергокомплекса и их влияние на население мегаполисов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 63–72.
3. Курсов С.В. Монооксид углерода: физиологическое значение и токсикология // Медицина неотложных состояний. 2015. №6. С. 9–16.
4. Морозова А.Э., Сизов О.С., Елагин П.О., Агзамов Н.А. Интегральная оценка качества атмосферного воздуха в крупнейших городах России на основе данных TROPOMI (Sentinel-5P) за 2019-2020 гг. // Современные проблемы дистанционных зондирований Земли из космоса. 2022. т. 19 (4). С. 23–39.
5. Makineci H.B., Arkan D., Alkan D., Karasaka, L. Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019-2021 // Harita Dergisi. 2021. V. 170. P. 23–40.
6. Filonchik M., Hurynovich V., Yan H., Gusev A., Shpilevskaya N. 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. 2020. Vol. 20. P. 1530–1540.
7. Ialongo I., Virta H., Eskes H., Hovila J., Douros J. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO<sub>2</sub> observation with ground-based measurements in Helsinki // Atmospheric Measurement Techniques. 2019. V. 13. P. 205–218.
8. Cersosimo A., Serio C., Masiello G. 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. 2020. V.12 (14). P. 2212–2235.

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ЛЕТОМ 2022 ГОДА  
НА ОСНОВЕ СЪЕМКИ СПУТНИКА SENTINEL-5P TROPOMI

---

9. Гусев А.П. 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. 2023. №1. С. 10–15.

**ASSESSMENT OF ATMOSPHERE POLLUTION IN THE TERRITORY OF  
BELARUS IN THE SUMMER OF 2022 BASED  
ON SENTINEL-5P TROPOMI SATELLITE IMAGING**

*Gusev A. P.<sup>1</sup>, Flerko T. G.<sup>2</sup>*

*Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus.  
E-mail: <sup>1</sup>andi\_gusev@mail.ru, <sup>2</sup>tflerco@mail.ru*

The purpose of the work is to assess air pollution on the territory of Belarus based on satellite imagery data from the Sentinel-5P TROPOMI satellite. Problems to be solved: comparison of concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO in the atmosphere on the territory of Belarus and neighboring countries; determination of average concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO in the atmosphere over cities and specially protected natural areas of Belarus; clarification of the patterns of spatial heterogeneity of concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO. A comparative analysis of the average concentration values of these pollutants over the territories of Belarus and neighboring countries (Lithuania, Latvia, Poland, Ukraine, the Russian Federation), also within Belarus – over cities and specially protected natural areas was carried out. The QGIS was used to process Sentinel-5P TROPOMI data, raster operations, and construct map diagrams. Statistical processing included determination of the mean, median, minimum, maximum values, standard deviation, root-mean-square error, and dispersion.

Based on a comparative analysis of countries, it was established: during the period under review, the highest concentrations of nitrogen dioxide were observed over Poland and Ukraine; the content of this component compared to other countries did not have statistically significant differences among themselves; there were no statistically significant differences between countries in the average CO content.

It has been established that over the territory of Belarus the content of sulfur dioxide is lower than over the territories of neighboring countries (maximum concentrations are typical for Poland, Lithuania, Ukraine). In terms of average content, a significant differentiation was noted: the concentration of SO<sub>2</sub> over the territory of Belarus is lower than over the territories of neighboring states, which is explained by the peculiarities of the structure of the thermal power industry of the countries under consideration.

The influence of local emission sources on the content of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO in the troposphere was studied. Compared cities (Minsk, regional centers, cities where large industrial enterprises are located) and specially protected natural areas (Berezinsky Biosphere Reserve, Prip'yatsky and Belovezhskaya Pushcha national parks, reserves Vygonoshchansky, Olmansky swamps, Yelnya and others). The differences between cities and protected areas in NO<sub>2</sub> content are statistically significant. This indicates that the spatial distribution of NO<sub>2</sub> concentrations is determined primarily by local emission sources. The highest levels of nitrogen dioxide were observed over Grodno and Minsk. The difference in SO<sub>2</sub> concentration over different objects is statistically insignificant.

This fact may be explained by the fact that fluctuations in the concentration of sulfur dioxide over the territory of Belarus are caused by transboundary transport (since the most powerful sources of emissions are located outside the country). There are no differences between cities and protected areas in terms of the content of the CO component. It is possible that to identify a significant difference in the content of tropospheric CO between cities and protected areas, an analysis of a longer time interval is required.

Thus, it has been established that fluctuations in SO<sub>2</sub> content over the territory of Belarus are determined by transboundary transport, and spatial differentiation of NO<sub>2</sub> concentrations depends on local emission sources.

**Keywords:** air pollution, Sentinel-5P TROPOMI, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Belarus.

### References

1. Akimova T.A., Kuzmin A.P., Khaskin V.V. *Ekologiya. Priroda-Chelovek-Tekhnika: Uchebnik dlya vuzov* (Ecology. Nature-Man-Technology: Textbook for Universities). Ed. Moscow: UNITY-DANA (Publ.), 2001. 343 p. (in Russian).
2. Silaeva P.Yu., Silaev A.V. *Osobennosti rassevaniya vybrosov dioksida azota predpriyatiyami energokompleksa i ikh vliyaniye na naseleniye megapolisov* (Features of the dispersion of nitrogen dioxide emissions by energy complex enterprises and their impact on the population of megacities). *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2018, t. 26, no 1, pp. 63–72 (in Russian).
3. Courses S.V. *Monooksid ugleroda: fiziologicheskoye znachenie i toksikologiya* (Carbon monoxide: physiological significance and toxicology). *Meditsina neotlozhnyy sostoyaniy*. 2015, no 6, pp. 9–16 (in Russian).
4. Morozova A.E., Sizov O.S., Elagin P.O., Agzamov N.A. *Integral'naya otsenka kachestva atmosfernogo vozdukh v krupneyshikh gorodakh Rossii na osnove dannykh TROPOMI (Sentinel-5P) za 2019-2020 gg.* (Integral assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019-2020.). *Sovremennyye problemy distantsionnykh zondirovaniy Zemli iz kosmosa*. 2022, t. 19 (4), pp. 23–39 (in Russian).
5. Makineci H.B., Arıkan D., Alkan D., Karasaka, L. *Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019-2021*. *Harita Dergisi*. 2021, V. 170. pp. 23–40.
6. Filonchik M., Hurynovich V., Yan H., Gusev A., Shpilevskaya N. *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*. 2020, V. 20, pp. 1530–1540.
7. Ialongo I., Virta H., Eskes H., Hovila J., Douros J. *Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO<sub>2</sub> observation with ground-based measurements in Helsinki*. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2019, V. 13, pp. 205–218.
8. Cersosimo A., Serio C., Masiello G. *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*. 2020, V.12 (14), pp. 2212–2235.
9. Gusev A.P. *Otsenka riska degradatsii lesnykh geosistem pod vozdeystviyem zagryazneniya atmosfery na osnove s'yemki sensora TROPOMI sputnika Sentinel-5P (na primere vostochnoy chasti Belorusskogo Poles'ya)* (Assessment of the risk of degradation of forest geosystems under the influence of atmospheric pollution based on imaging from the TROPOMI sensor of the Sentinel-5P satellite (using the example of the eastern part of Belarusian Polesie)). *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2023, no 1, pp. 10–15 (in Russian).

*Поступила в редакцию 04.03.2024 г.*