

УДК 911.5+504.54

UDC 911.5+504.54

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

ASSESSMENT OF THE STATE OF THE ATMOSPHERE ON THE TERRITORY OF BELARUS BASED ON REMOTE SENSING DATA

А. П. Гусев,
кандидат

геолого-минералогических наук,
заведующий кафедрой геологии
и географии ГГУ им. Ф. Скорины

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1169-1172>;

Т. Г. Флерко,

кандидат географических наук,
доцент кафедры геологии
и географии ГГУ им. Ф. Скорины

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5782-0067>

A. Gusev,

candidate of geological
and mineralogical sciences,

head of the department of geology
and geography, GSU named after F. Skorina

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1169-1172>;

T. Flerko,

candidate of geographical sciences,

associate professor, department of geology
and geography, GSU named after F. Skorina

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5782-0067>

Поступила в редакцию 19.03.2024.

Received on 19.03.2024.

Цель работы – оценка загрязнения атмосферы на территории Беларуси на основе данных космической съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI. Решаемые задачи: определение фоновых концентраций загрязняющих веществ (NO_2 , SO_2 , CO, CH_4 , аэрозоль, HCHO) в атмосфере территории Беларуси; сравнительный анализ содержаний загрязняющих веществ в атмосфере над городами и особо охраняемыми природными территориями. Установлено, что максимальные концентрации NO_2 наблюдаются над городами, что обусловлено антропогенными эмиссиями этого компонента. Содержания SO_2 характеризуются высокой степенью пространственно-временной изменчивости, не имеют четкой приуроченности к городам, зависят от трансграничного переноса из соседних стран. Распределение содержания CH_4 имеет сложный характер, обусловленный взаимодействием природных и антропогенных его источников. Содержание CO, аэрозолей и HCHO в летний период обусловлено преимущественно природными источниками.

Ключевые слова: Sentinel-5P TROPOMI, загрязнение атмосферы, города, особо охраняемые природные территории, Беларусь.

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. Research objectives: determination of background concentrations of pollutants (NO_2 , SO_2 , CO, CH_4 , aerosol, HCHO) in the atmosphere of the territory of Belarus; comparative analysis of the content of pollutants in the atmosphere over cities and specially protected natural areas. It has been established that maximum NO_2 concentrations are observed over cities, which is due to anthropogenic emissions of this component. SO_2 contents are characterized by a high degree of spatiotemporal variability, are not clearly confined to cities, and depend on transboundary transport from neighboring countries. The distribution of CH_4 content is complex, determined by the interaction of natural and anthropogenic sources. The contents of CO, aerosols and HCHO in summer are mainly due to natural sources.

Keywords: Sentinel-5P TROPOMI, air pollution, cities, specially protected natural areas, Belarus.

Введение. Развитие космических методов сделало возможным дистанционное изучение загрязнения атмосферы [1–5]. При этом использование космической съемки для решения задач оценки загрязнения атмосферы имеет как недостатки, так и преимущества по сравнению с наземными инструментальными наблюдениями. Так, преимуществами космической съемки являются: получение усредненных за определенный временной отрезок данных; ежесуточная (т. е. в режиме реального времени) оценка загрязнения; пространственный охват; выявление реальных (в том числе несанкционированных) источников выбросов; изучение трансграничного перемещения загрязненного воздуха; получение инфор-

мации об атмосфере труднодоступных территорий. К недостаткам космических методов относятся: низкое пространственное разрешение, не позволяющее оценивать выбросы от локальных источников; зависимость качества данных от облачности; измеренные содержания загрязнителей в столбе стратосферы не могут оцениваться с помощью имеющейся системы ПДК (хотя и коррелируют с данными наземных методов [2; 3]).

Использование космических методов для изучения загрязнения атмосферы на территории Беларуси до настоящего времени не имело широкого использования. Имеются лишь единичные работы, касающиеся отдельных регионов страны [6].

Цель нашей работы – оценка загрязнения атмосферы на территории Беларуси на основе данных космической съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI. Решались две основные задачи: определение фоновых концентраций загрязняющих веществ в атмосфере на территории Беларуси; сравнительный анализ содержаний загрязняющих веществ в атмосфере над городами и особо охраняемыми природными территориями.

Методические подходы. Спутник Sentinel-5P с сенсором TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) дистанционно определяет атмосферные концентрации (общее содержание в вертикальном столбе тропосферы) озона (O_3), метана (CH_4), формальдегида (HCHO), угарного газа (CO), диоксида серы (SO_2), диоксида азота (NO_2) и аэрозоля. Съемка проводится в ультрафиолетовом (UV), видимом (VIS), ближнем инфракрасном (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах.

Измерения осуществляются ежедневно с октября 2017 г. Пространственное разрешение съемки изменяется в зависимости от изучаемого компонента; для рассматриваемых в настоящей статье – 5,5x3,5 км (7x5,5 км – до августа 2019 г.). Содержания диоксида серы, угарного газа, диоксида азота, формальдегида измеряются и предоставляются в единицах моль/м²; содержание метана – в миллиардных долях от объема (ppb); аэрозольный индекс – в относительных единицах. Данные находятся в свободном доступе на сайте NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>). Для преобразования архива в векторные слои точечного типа используется модуль Sentinel-5P data explorer для QGIS.

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

Временной охват исследований – лето 2022 г. 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 из химических компонентов).

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

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

Результаты и их обсуждение. Для территории Беларуси в летний период были установлены фоновые содержания загрязняющих веществ, определяемых сенсором TROPOMI (таблица 1). Видно, что наибольший интервал колебаний характерен для диоксида серы, аэрозольного индекса и формальдегида.

Исследования содержания загрязнителей над городами и ООПТ показали следующее (таблица 2). Для диоксида азота имеет место хорошо выраженная закономерность: над территориями городов его концентрация выше, чем для ООПТ и Беларуси в целом (в 1,2 раза). В случае 13 из 15 городов концентрация этого поллютанта превышает фоновый уровень. Над 6 городами (Гомель, Гродно, Брест, Минск, Речица, Светлогорск, Витебск) превышения статистически достоверны. Максимальные усредненные содержания NO_2 отмечены над Гродно (в 1,7 раза выше фона), Минском (в 1,6 раза), Гомелем (в 1,5 раза) и Брестом (в 1,5 раза). Аналогично разовые максимальные концентрации – над Минском (в 4,2 раза выше фона), Брестом (в 3,7 раза), над Гродно (в 3,5 раза).

Таблица 1 – Содержания загрязняющих веществ над территорией Беларуси летом 2022 г. (по данным съемки Sentinel-5P TROPOMI)

Компонент	Среднее и ошибка среднего	Медиана	Интервал колебаний
NO_2 , 10^{-3} моль/см ²	0,017 ± 0,001	0,016	0,088
SO_2 , 10^{-3} моль/см ²	0,293 ± 0,02	0,199	5,769
CO, моль/см ²	0,0296 ± 0,0001	0,0297	0,0315
CH_4 , ppb	1840,5 ± 0,5	1881,0	642,3
Аэрозольный индекс (AI), относительные единицы	0,436 ± 0,003	0,352	2,290
HCHO, 10^{-3} моль/см ²	0,170 ± 0,01	0,128	5,548

Таблица 2 – Сравнительная характеристика содержания NO₂, SO₂, CO над городами и ООПТ Беларуси (лето 2022 г.)

Статистика	Компонент					
	NO ₂ , 10 ⁻³ моль/см ²		SO ₂ , 10 ⁻³ моль/см ²		CO, моль/см ²	
	города	ООПТ	города	ООПТ	города	ООПТ
Среднее	0,021	0,017	0,320	0,301	0,0295	0,0303
Медиана	0,021	0,017	0,230	0,216	0,0296	0,0300
Минимальное	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0210	0,0192
Максимальное	0,072	0,077	2,390	5,670	0,0392	0,0421
Стандартная ошибка	0,001	0,001	0,054	0,035	0,0006	0,0005

Над ООПТ средние и медианные содержания NO₂ не отличаются от фоновых, что объясняется отсутствием на охраняемых территориях источников выбросов данного вещества.

Выявленные различия в концентрациях NO₂ над городами и ООПТ объясняются тем, что источниками выбросов являются энергетика на углеводородном топливе, автотранспорт, химическая и нефтехимическая промышленность. В случае ООПТ основным источником поступления NO₂ в атмосферу могут служить пожары.

Для содержания диоксида серы характерна сильная пространственно-временная изменчивость. Его среднее и медианная концентрации над городами выше фоновых значений для Беларуси, однако различия статистически недостоверны. Над 10 городами из 15 среднее содержание SO₂ превышает фон. Статистически достоверные отличия от фона наблюдаются только для двух городов (Новополоцк, Светлогорск). Максимальные усредненные содержания SO₂ отмечены над Новополоцком (в 1,35 раза выше фона), Светлогорском (в 1,33 раза), Добрушом (1,29 раза), Жлобином (в 1,29 раза), Минском (в 1,2 раза). Наибольшие разовые концентрации имели место над Минском (в 8,2 раза выше фона), Брестом (в 8,1 раза), Гродно (в 7,4 раза), Новополоцком (в 6,8 раза).

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 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» (в 19,3 раза выше фона), Березинским заповедником (в 17,6 раза), над заказником «Выгоноцанским» (в 16,7 раза), над национальным парком «Беловежская Пуща» (в 8,1 раза). Таким образом, разовые концентрации SO₂, наблюдаемые над ООПТ, оказываются выше, чем над городами. Данный факт объясняется тем, что пространственно-временные колебания содержания SO₂ над территорией Беларуси обусловлены преимущественно трансграничным переносом, т. е. влиянием источников выбросов, находящихся за пределами страны [6].

Усредненное за летний период содержание угарного газа над городами изменялось от 0,0278 до 0,0313 моль/см². Средняя и медианная величина для городов не отличается от фоновых значений. Наибольшие средние концентрации CO отмечены над Гомелем (0,0307 моль/см²), Речицей (0,0313), Жлобином (0,0304), Светлогорском (0,0302), тогда как над самым крупным городом – Минском – 0,0292 моль/см². Для этого компонента связь концентрации с численностью населения города отсутствует. Средняя и медианная величина концентрации CO над ООПТ превышает фоновые значения, но отличия статистически недостоверны. Максимальные разовые концентрации 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). Полученные данные свидетельствуют о том, что в условиях Беларуси поток CO, вызванный биологическими процессами и, вероятно, в определенной мере

лесными пожарами, больше потока, обусловленного выбросами промышленности и транспорта.

Содержание метана над городами выше фонового, однако отличия статистически не достоверны (таблица 3). Усредненное за летний период содержание CH_4 достоверно превышало фон только над Светлогорском, Солигорском, Жлобином. Максимальные разовые концентрации имели место над Солигорском (1931,8 ppb), Гомелем (1931,7 ppb), Могилевом (1926,9 ppb). Концентрация метана над ООПТ была в среднем ниже фоновой. Однако над некоторыми ООПТ наблюдались относительно высокие концентрации – над национальным парком «Беловежская Пуща» (1877,5 ppb), заказником «Смычок» (1864,8), заказником «Выдрица» (1862,4 ppb). Источники поступления в атмосферу метана разнообразны [7–9]. Значительный вклад вносят микробиологические процессы и дегазация земных недр [7, 8]. Среди антропогенных источников – утечки метана при добыче нефти и газа, при транспортировке и использовании природного газа [9].

Изучение загрязнения атмосферы аэрозолями, поглощающими ультрафиолетовое излучение (дым, пыль), с помощью аэрозольного индекса (AI) показало, что в условиях Беларуси его величина над городами меньше, чем над ООПТ и для страны в целом. Наибольшая усредненная за летний период величина AI наблюдалась над национальным парком «Припятский» (0,733), водно-болотным заказником «Днепр» (0,665), водно-болотным заказником «Алес» (0,664), Мозырем (0,662), водно-болотным заказником «Старый Жаден» (0,614) и Жлобином (0,605). Максимальные разовые величины AI зарегистрированы над водно-болотным заказником «Алес» (1,976), Полесским радиационно-экологическим заповедником (1,874), Витебском (1,755), национальным парком «Припятский»

(1,612), Мозырем (1,598). Выявленный факт может объясняться тем, что в условиях ландшафтов Беларуси региональный фон в летний период формируется преимущественно природными источниками аэрозоля. Мощными источниками аэрозоля являются пыльные бури [10] и пожары [11], которые в наблюдаемый нами период вероятно могли вызвать значительное повышение величины аэрозольного индекса на локальных участках.

Еще один дистанционно регистрируемый TROPOMI компонент, для которого связь с антропогенными процессами в пределах территории Беларуси не обнаруживается – формальдегид (HCHO), представляющий собой короткоживущий газ, обладающий канцерогенным воздействием (2 класс опасности). Источниками поступления формальдегида в атмосферу могут являться как антропогенные (выбросы транспорта, химической и нефтехимической промышленности), так и природные (лесные пожары, жизнедеятельности организмов) процессы.

Над территорией Беларуси усредненное за летний период содержание составило $0,170 \cdot 10^{-3}$ моль/см², что выше, чем над городами ($0,143 \cdot 10^{-3}$) и ООПТ ($0,151 \cdot 10^{-3}$). Причем для всех рассмотренных городов характерно содержание HCHO ниже фонового. Наибольшая усредненная за летний период величина наблюдалась над национальным парком «Беловежская Пуща» ($0,172 \cdot 10^{-3}$ моль/см²). Максимальные разовые концентрации над городами составляли: Мозырь – $0,884 \cdot 10^{-3}$ моль/см²; Гомель – $0,699 \cdot 10^{-3}$ моль/см²; Минск – $0,617 \cdot 10^{-3}$ моль/см²; Новополоцк – $0,612 \cdot 10^{-3}$ моль/см². Над ООПТ: Полесский радиационно-экологический заповедник – $1,154 \cdot 10^{-3}$ моль/см²; национальный парк «Беловежская Пуща» – $0,971 \cdot 10^{-3}$ моль/см²; национальный парк «Браславские озера» – $0,888 \cdot 10^{-3}$ моль/см².

Таблица 3 – Сравнительная характеристика содержания CH_4 , аэрозоля (Aerosol Index) и формальдегида (HCHO) над городами и ООПТ Беларуси (лето 2022 г.)

Статистика	Компонент					
	CH_4 , ppb		аэрозольный индекс (AI), относительные единицы		HCHO , 10^{-3} моль/см ²	
	города	ООПТ	города	ООПТ	города	ООПТ
Среднее	1855,5	1833,2	0,425	0,444	0,143	0,151
Медиана	1877,7	1872,3	0,366	0,418	0,114	0,124
Минимальное	1519,4	1464,2	0,002	0,001	0,000	0,000
Максимальное	1931,8	1988,5	1,755	1,976	0,884	1,154
Стандартная ошибка	13,5	13,8	0,096	0,071	0,013	0,010

Заключение. Таким образом, на основе космической съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI для веществ, являющихся опасными загрязнителями атмосферы, в пределах территории Беларуси установлены следующие закономерности: максимальные концентрации диоксида азота наблюдаются над городами, что обусловлено антропогенными эмиссиями этого компонента; содержания диоксида серы характеризуются высокой степенью пространственно-временной изменчивости, не имеют четкой приуроченности к городам, зависят от трансграничного переноса

из соседних стран; распределение содержания метана имеет сложный характер, обусловленный взаимодействием природных и антропогенных его источников; содержание угарного газа, аэрозолей и формальдегида в летний период обусловлено преимущественно природными источниками (концентрации над ООПТ превышают концентрации над городами).

Данные Sentinel-5P TROPOMI могут использоваться как дополнительные при оценке состояния атмосферного воздуха как в городах, так и на более обширных территориях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральная оценка качества атмосферного воздуха в крупнейших городах России на основе данных TROPOMI (Sentinel-5P) за 2019–2020 гг. / А. Э. Морозова [и др.] // Современные проблемы дистанционных зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19 (4). – С. 23–39.
2. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observation with ground-based measurements in Helsinki / I. Ialongo [и др.] // Atmospheric Measurement Techniques – 2019. – V. 13. – P. 205–218.
3. Cersosimo, A. TROPOMI NO₂ Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observation / A. Cersosimo, C. Serio, G. Masiello // Remote Sensing. – 2020. – V.12 (14). – P. 2212–2235.
4. Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019–2021 / H. B. Makineci [и др.] // Harita Dergisi. – 2021. – V. 170. – P. 23–40.
5. Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO₂, NO₂, CO and AOD over East China / M. Filonchuk [и др.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2020. – Vol. 20. – P. 1530–1540.
6. 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) / А. П. Гусев // Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – №1. – С. 10–15.
7. Елисейев, А. В. Глобальный цикл метана: обзор / А. В. Елисейев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – №1. – С. 52–70.
8. Гусев, А. П. Потоки метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI) / А. П. Гусев // Региональная геосистемы. – 2023. – Т. 47. – № 4. – С. 580–592.
9. Шевелева, Н. А. Управление выбросами метана в нефтегазовом секторе / Н. А. Шевелева // Научный журнал Российского газового общества. – 2020. – № 3 (26). – С. 48–56.
10. Шинкоренко, С. С. Спутниковые наблюдения пыльных бурь на юге России в 2022 году / С. С. Шинкоренко, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т.19. – № 6. – С. 293–300.
11. Бондур, В. Г. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга / В. Г. Бондур, А. С. Гинзбург // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466. – № 4. – С. 473–477.

REFERENCES

1. Integral'naya otsenka kachestva atmosfernogo vozdukh v krupneyshikh gorodakh Rossii na osnove dannykh TROPOMI (Sentinel-5P) za 2019-2020 gg. / A. E. Morozova [i dr.] // Sovremennyye problemy distantsionnykh zondirovaniy Zemli iz kosmosa. – 2022. – Tom 19 (4). – S. 23–39.
2. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observation with ground-based measurements in Helsinki / I. Ialongo [i dr.] // Atmospheric Measurement Techniques – 2019. – V. 13. – P. 205–218.
3. Cersosimo, A. TROPOMI NO₂ Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observation / A. Cersosimo, C. Serio, G. Masiello // Remote Sensing. – 2020. – V.12 (14). – P. 2212–2235.
4. Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019-2021 / H. B. Makineci [i dr.] // Harita Dergisi. – 2021. – V. 170. – P. 23–40.
5. Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO₂, NO₂, CO and AOD over East China / M. Filonchuk [i dr.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2020. – Vol. 20. – P. 1530–1540.
6. 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) / A. P. Gusev // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii. – 2023. – №1. – S. 10–15.
7. Yeliseyev, A. V. Global'nyy tsikl metana: obzor / A. V. Yeliseyev // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. – 2018. – №1. – S. 52–70.
8. Gusev, A. P. Potoki metana v troposfere: geologicheskiye i antropogennyye istochniki (po dannym Sentinel-5P TROPOMI) / A. P. Gusev // Regional'naya geosistemy.– 2023. – T. 47. – № 4. – S. 580–592.
9. Sheveleva, N. A. Upravleniye vybrosami metana v neftegazovom sektore / N. A. Sheveleva // Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva. – 2020. – № 3 (26). – S. 48–56.
10. Shinkorenko, S. S. Sputnikovyye nablyudeniya pyl'nykh bur' na yuge Rossii v 2022 godu / S. S. Shinkorenko, S. A. Bartalev // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2022. – Tom 19. – № 6. – S. 293–300.
11. Bondur, V. G. Emissiya uglerodsoderzhashchikh gazov i aerorozoley ot prirodnykh pozharov na territorii Rossii po dannym kosmicheskogo monitoringa / V. G. Bondur, A. S. Ginzburg // Doklady Akademii nauk. – 2016. – T. 466. – № 4. – S. 473–477.