

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco678829>

EDN: JRSOAX

Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Череповце по данным дистанционного зондирования Земли

С.А. Царева^{1,2}, Е.Г. Лилеева², Ю.В. Царев¹, Н.С. Дыбулина¹, С.Ф. Велиметова¹¹ Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия;² Ярославский государственный медицинский университет, Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время наряду с традиционными методиками определения концентраций загрязнителей атмосферного воздуха находит широкое применение спутниковый мониторинг содержания поллютантов в воздушной среде. Хотя спутниковые технологии позволяют получать данные о содержании загрязнителей в атмосфере для различных диапазонов географических координат, возникают вопросы релевантности использования подобных технологий, в том числе и основанных на них оценках качества воздуха селитебной территории.

Цель. Анализ загрязнения атмосферного воздуха Череповца на основании спутниковых данных Sentinel-5P и их сопоставления с данными наземного мониторинга.

Методы. Объектом исследования являются геопространственные данные состояния атмосферного воздуха Череповца. Спутниковые данные Sentinel-5P, предоставляемые Европейским космическим агентством в рамках программы Copernicus, анализировали в программном обеспечении, созданном на базе облачной платформы Google Earth Engine. Данные спутникового мониторинга сопоставляли с данными открытого сервиса ПАО «Северсталь» мониторинга качества атмосферного воздуха в Череповце.

Результаты. В облачной среде Google Earth Engine на языке программирования JavaScript разработано программное обеспечение для анализа данных спутникового мониторинга атмосферного воздуха Череповца. Получены цифровые карты загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота и диоксидом серы. Данные оценок концентраций спутникового мониторинга сопоставлены с данными наземного мониторинга ПАО «Северсталь».

Заключение. Разработано программное обеспечение, позволяющее строить цифровые карты загрязнения атмосферного воздуха критериальными загрязнителями (диоксидом серы и азота). Проанализировано различие данных спутникового мониторинга и наземного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха Череповца.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг; загрязнение воздуха; наземный мониторинг; сопоставление; оксид азота; оксид серы.

Как цитировать:

Царева С.А., Лилеева Е.Г., Царев Ю.В., Дыбулина Н.С., Велиметова С.Ф. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Череповце по данным дистанционного зондирования Земли // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. 714–722. DOI: 10.17816/humeco678829 EDN: JRSOAX

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco678829>

EDN: JRSOAX

Atmospheric Pollution in Cherepovets According to Remote Sensing

Sophia A. Tsareva^{1,2}, Elena G. Lileeva², Yuri V. Tsarev¹, Nataliya S. Dybulina¹,
Sabrina F. Velimetova¹

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;

² Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Satellite monitoring of air pollutant levels is currently widely used alongside conventional methods for assessing atmospheric pollution. Satellite technologies provide information on atmospheric pollutant levels for various geographic coordinate ranges; however, their applicability, notably for assessing air quality in residential areas, is disputed.

AIM: The work aimed to assess atmospheric pollution in Cherepovets by comparing Sentinel-5P satellite data with Earth-based monitoring data.

METHODS: The study assessed geospatial data on atmospheric air quality in Cherepovets. Sentinel-5P satellite data provided by the European Space Agency under the Copernicus program were analyzed using Google Earth Engine-based software. Satellite monitoring data were compared with those from the Severstal open service for atmospheric air quality monitoring in Cherepovets.

RESULTS: Software for analyzing satellite monitoring data on atmospheric air quality in Cherepovets was developed using Google Earth Engine and JavaScript. Digital maps of nitrogen dioxide and sulfur dioxide atmospheric pollution were created. Satellite monitoring data were compared with Severstal's Earth-based monitoring data.

CONCLUSION: Software for creating digital maps of atmospheric pollution by criteria pollutants (sulfur dioxide and nitrogen dioxide) has been developed. The differences between satellite and Earth-based monitoring data on atmospheric pollution in Cherepovets were analyzed.

Keywords: satellite monitoring; air pollution; Earth-based monitoring; comparison; nitrogen oxide; sulfur oxide.

To cite this article:

Tsareva SA, Lileeva EG, Tsarev YuV, Dybulina NS, Velimetova SF. Atmospheric Pollution in Cherepovets According to Remote Sensing. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):714–722. DOI: 10.17816/humeco678829 EDN: JRSOAX

Received: 23.04.2025

Accepted: 03.10.2025

Published online: 14.10.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco678829>

EDN: JRSOAX

基于对地遥感数据的Cherepovets市大气污染评估

Sophia A. Tsareva^{1,2}, Elena G. Lileeva², Yuri V. Tsarev¹, Nataliya S. Dybulina¹,
Sabrina F. Velimetova¹

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;

² Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia

摘要

论证。目前，除采用传统方法测定大气污染物浓度外，利用卫星遥感监测大气污染物含量的方法已得到广泛应用。尽管卫星技术能够在不同地理坐标范围内获取大气污染物含量数据，但在其适用性方面仍存在疑问，尤其是在基于此类数据对居民区空气质量进行评估时。

目的。基于Sentinel-5P卫星数据分析Cherepovets市大气污染状况，并将其与地面监测数据进行比较。

方法。研究对象为Cherepovets市大气环境的地理空间数据。使用欧洲航天局Copernicus计划提供的Sentinel-5P卫星数据，并在基于Google Earth Engine云平台构建的软件环境中进行分析。同时，将卫星监测数据与PJSC«Severstal»公开的空气质量地面监测数据进行对照。

结果。在Google Earth Engine环境中基于JavaScript编写了用于分析Cherepovets市大气污染遥感数据的软件。获得了二氧化氮和二氧化硫污染的数字分布图。将卫星监测浓度评估结果与PJSC«Severstal»地面监测数据进行了比较分析。

结论。本研究开发的软件可用于构建判定性污染物（硫氧化物与氮氧化物）的大气污染数字地图。对卫星监测与地面监测所得的Cherepovets市大气污染数据差异进行了分析。

关键词：卫星监测；空气污染；地面监测；数据对比；氮氧化物；硫氧化物。

引用本文：

Tsareva SA, Lileeva EG, Tsarev YuV, Dybulina NS, Velimetova SF. 基于对地遥感数据的Cherepovets市大气污染评估. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):714–722. DOI: 10.17816/humeco678829 EDN: JRSOAX

收到: 23.04.2025

接受: 03.10.2025

发布日期: 14.10.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Изучение того, как информация дистанционного зондирования может дополнять или даже заменять данные, полученные с помощью наземных сетей контроля качества воздуха, представляет большой интерес. Это особенно актуально, поскольку спутниковые снимки могут предоставить региональную перспективу распределения загрязнения с течением времени и не ограничиваются определёнными географическими точками. Понимание основных закономерностей, возникающих в результате внедрения зон с низким уровнем загрязнения (Low Emission Zone), может быть особенно полезным в районах с высоким и постоянным загрязнением или с ограниченными сетями контроля качества воздуха.

А.Э. Морозова и соавт. [1] рассматривают уровень загрязнения атмосферного воздуха в пределах территории 20 крупнейших по численности городов России за 2019–2020 гг. Исходными данными исследования служат измерения TROPOMI (спутник Sentinel-5P) таких поллютантов, как оксид углерода, формальдегид, диоксид азота, диоксид серы и аэрозоли (индекс аэрозольного загрязнения). Измерения получены с помощью облачной платформы Google Earth Engine для геопространственного анализа данных, в которой представлены данные уровня L3, доступные для непосредственного анализа. Для интегральной оценки качества атмосферного воздуха разработан индекс TAQI. Авторы отмечают, что оценка уровня загрязнения атмосферы в городских условиях на основе интегральных индексов с использованием дистанционных данных (на примере TAQI) представляется перспективным подходом и может рассматриваться как важное информационное дополнение для существующих наземных измерительных систем в рамках реализации мультисенсорной парадигмы.

Группа исследователей [2] разработала физическую информационную модель глубокого обучения, которая объединяет традиционную модель атмосферного переноса химических веществ и модель глубокого обучения на основе данных. Модель использует данные наблюдений из нескольких источников загрязнения атмосферы. Точность и пространственное разрешение модели были улучшены по сравнению с исходной моделью Weather Research and Forecasting (WRF-CHEM) благодаря использованию наземных и спутниковых наблюдений. По сравнению с результатами WRF-CHEM, для модели увеличивается коэффициент корреляции для концентраций NO_2 с 0,56 до 0,80, а для концентраций озона — с 0,57 до 0,76. Авторы использовали независимый мониторинг MAXDOAS для валидации результатов измерений концентраций. В работе резюмируется, что при использовании спутникового дистанционного зондирования Земли можно получить пространственное распределение загрязняющих веществ. Благодаря объединению спутниковых данных с другими данными мониторинга и оптимизации модели

повышается точность результатов измерений и устраняется мешающее влияние облаков.

B.A. Ababio и соавт. [3] оценивали годовые концентрации $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 и O_3 в окружающем воздухе 57 городов Ганы за два десятилетия с использованием исторических и прогнозируемых данных спутниковых измерений. Авторы анализировали качество городского воздуха, канцерогенные и неканцерогенные риски для здоровья населения. Результаты показали, что годовые медианные концентрации $\text{PM}_{2.5}$ (50,79–67,97 мкг/м^3) значительно превышают рекомендуемые Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) 5 мкг/м^3 . Концентрации тропосферного озона (72,21–92,58 мкг/м^3) также превысили годовой стандарт ВОЗ в 60 мкг/м^3 . Кроме того, концентрации NO_2 (3,65–12,15 мкг/м^3) превысили порог ВОЗ в 10 мкг/м^3 во многих городах. Индексы опасности показали, что $\text{PM}_{2.5}$ и O_3 представляют значительные неканцерогенные риски для здоровья.

Разработан индекс риска множественного загрязнения воздуха для CO , NO_2 и SO_2 на основе данных дистанционного зондирования Sentinel-5P с 2019 по 2020 г. [4]. Индекс разработан путём интеграции анализов опасности, уязвимости и воздействия. Анализ опасности учитывает данные о загрязнении воздуха, полученные с помощью дистанционного зондирования, анализ уязвимости — источники загрязнения воздуха, а анализ воздействия — плотность населения. Модель множественного риска учитывает веса, полученные из взаимосвязи между параметрами опасности и уязвимости. Самые высокие значения индекса риска загрязнения воздуха наблюдались в городских районах с высоким индексом воздействия, который возникает из-за загрязнения, вызванного деятельностью человека. Анализ множественного риска трёх загрязнителей воздуха показал, что Сингапур, Вьетнам и Филиппины имеют наибольший процент зон высокого риска, в то время как Индонезия — самую большую общую площадь высокого риска (4361 км^2).

N.R. Rahimi и соавт. [5] оценивали риск для здоровья при вдыхании NO_2 и озона в различных сценариях и интерполяции пространственно-временного распределения. Данные были собраны в Тегеранском центре контроля качества воздуха, охватывающем 18 станций мониторинга с марта 2019 по февраль 2022 г. Оценки риска для здоровья (HRA) проводили для взрослых возрастных групп по трём различным сценариям воздействия (3, 8 и 12 ч). Значения индекса опасности (HI) для NO_2 и озона во всех трёх сценариях составили от 0,24 до 1,56 и от 0,04 до 0,49 соответственно. Результаты интерполяции озона, NO_x и NO_2 с использованием подхода IDW с марта 2019 по февраль 2022 г. показали, что в целом на севере и северо-востоке Тегерана наблюдались самые высокие концентрации NO_2 и NO_x , а на севере и западе — самые высокие концентрации озона. Подчёркивается, что из-за высокой плотности населения Тегерана и постоянного загрязнения воздуха крайне важно внедрить

эффективную политику контроля для защиты общественного здоровья.

Е. Dammers и соавт. [6] анализировали возможность применения метода многоисточникового шлейфа (MSPM) для оценки выбросов NO_x над Германией в период COVID-19 с 2019 по 2021 г. Авторы отмечают, что различия между спутниковыми оценками и общими данными инвентаризации составляли 75–100 кт (NO₂) NO_x (<10% от значений инвентаризации). Значительное сокращение выбросов NO_x (~15%) одновременно с карантином из-за COVID-19 наблюдалось как в инвентарных, так и в спутниковых выбросах. Исследование иллюстрирует ценность наличия последовательной спутниковой методологии для более быстрой оценки выбросов, чтобы корректировать традиционную отчётность по инвентаризации выбросов. Метод также отвечает требованию независимой проверки официальных инвентаризаций выбросов, что позволит составителям инвентаризации выявлять потенциально проблемные вопросы отчётности, укрепляя прозрачность и сопоставимость, которые являются двумя ключевыми ценностями для отчётности по выбросам.

Цель исследования. Оценка загрязнения атмосферного воздуха Череповца на основании спутниковых данных Sentinel-5P и их сопоставление с данными наземного мониторинга.

МЕТОДЫ

В качестве объекта изучения определили Череповец. В 2023 г. он оказался в перечне 33 городов, где уровень загрязнения атмосферного воздуха характеризовался значением индекса загрязнённости атмосферы, превышающим или равным 14. Общая численность населения этих городов составляет 10,1 млн человек¹. Согласно информации Росгидромета, главными загрязнителями в данном городе являются марганец, фенол, взвешенные вещества, бенз(а)пирены и диоксид азота. Череповец представляет собой важный индустриальный центр в регионе, где промышленность базируется на металлургии и химическом производстве. Здесь работают такие крупные предприятия, как Череповецкий металлургический комбинат и производитель минеральных удобрений «ФосАгро»².

Для работы применяли данные спутникового мониторинга, поступающие со спутника Sentinel-5P³. Запуск спутников этой серии обеспечивает Европейское

космическое агентство в рамках программы Европейского союза Copernicus⁴. Ключевым инструментом спутника выступает сенсор Tropomi⁵, предназначенный для обнаружения различных веществ в атмосфере, таких как формальдегид, диоксид азота, озон, диоксид серы, метан, оксид углерода и аэрозоли. Разными исследованиями показано, что измерения атмосферного столба, полученные с помощью TROPOMI, демонстрируют сильную корреляцию с наземными результатами мониторинга атмосферного воздуха, особенно в городских условиях [7–9]. Аналогичные выводы можно найти в работе, связанной с исследованием качества воздуха Мадрида [10].

Для выполнения расчётов с использованием геопространственных данных и при оценке рисков здоровью населения написано приложение на языке JavaScript в облачной среде Google Earth Engine⁶. Конвертацию концентрации загрязнителя атмосферного воздуха из единиц измерения по данным спутникового мониторинга моль/м² в мг/м³ осуществляли по формуле:

$$C = \frac{\sigma \cdot M \cdot 1000}{H}, \quad (1)$$

где C — концентрация вещества, мг/м³; σ — столбцовая концентрация вещества, моль/м²; M — молярная масса вещества, г/моль; H — атмосферного столба, м.

Для проверки адекватности определяемых с помощью спутникового мониторинга концентраций загрязнителей атмосферного воздуха использовали концентрации, получаемые с помощью постов наземного наблюдения в Череповце. ПАО «Северсталь» в рамках политики экологической открытости с осени 2024 г. выводит данные созданной сети мониторинга качества атмосферного воздуха в Череповце на общедоступную online-платформу⁷. Станции обеспечивают непрерывное наблюдение за качеством воздуха (измерения осуществляются каждый час) по основным загрязняющим веществам: оксид углерода, диоксид азота, диоксид серы, сероводород, а также за взвешенными частицами PM_{2,5}, PM_{10,0}. В районах города размещены 6 постов (пост № 1 — район ДКС, пост № 2 — Привокзальный сквер, пост № 3 — стадион «Металлург», пост № 4 — район химико-технологического колледжа, пост № 5 — СОШ № 7, пост № 6 — аквапарк «Радужный»).

⁴ Copernicus. Europe's eyes on earth. Looking at our planet and its environment for the benefit of Europe's citizens. European Space Agency. Режим доступа: <https://www.copernicus.eu/en> Дата обращения: 12.04.2025.

⁵ TROPOMI monitors trace gases and aerosols relevant for air quality and climate. European Space Agency. Режим доступа: <https://www.tropomi.eu/> Дата обращения: 12.04.2025.

⁶ Google Earth Engine. A planetary-scale platform for Earth science data & analysis. Google. Режим доступа: <https://earthengine.google.com> Дата обращения: 12.04.2025.

⁷ Мониторинг качества воздуха в Череповце. Череповец: ПАО «Северсталь». 2024-. Режим доступа: https://severstal.com/rus/eco-monitoring/#_blank Дата обращения: 12.04.2025.

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». Режим доступа: <https://2023.ecology-gosdoklad.ru/doklad/atmosfernyy-vozdush/kachestvo-atmosfernogo-vozdusha/> Дата обращения: 12.04.2025.

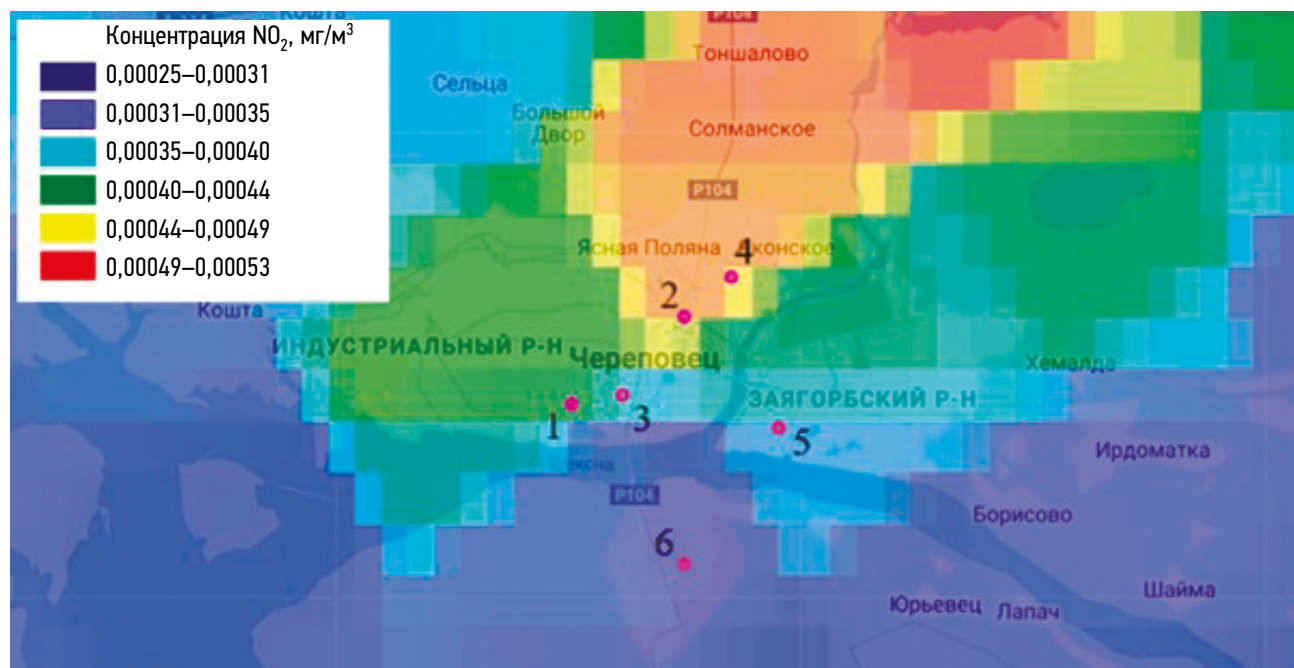
² Промышленность города. Череповец: МКУ ИМА «Череповец». 2003-. Режим доступа: <https://cherinfo.ru/32> Дата обращения: 12.04.2025.

³ Sentinel-5P. European Space Agency. Режим доступа: <https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-5p> Дата обращения: 12.04.2025.

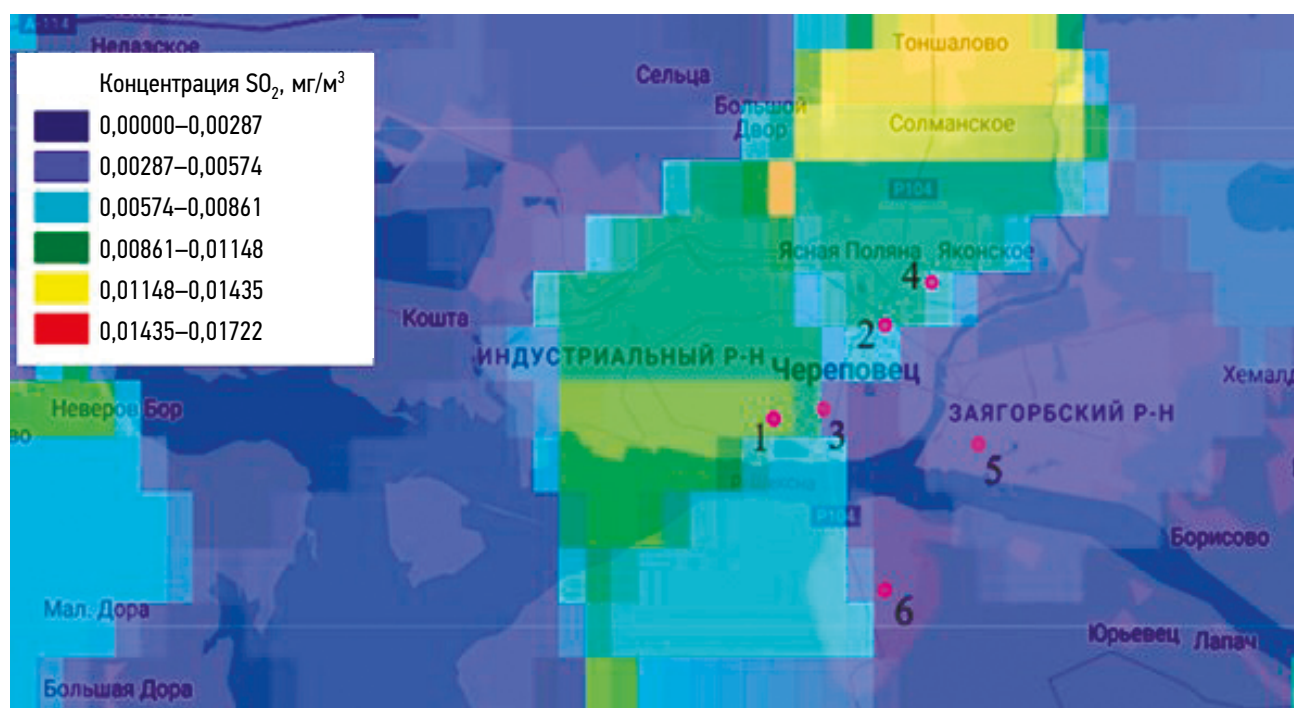
РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполненного анализа спутниковых данных Sentinel-5P с использованием программного обеспечения в среде Google Earth Engine получены цифровые

карты концентраций диоксида азота, диоксида серы, озона, метана в атмосферном воздухе Череповца. Цифровые карты загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота и диоксидом серы приведены на 30 марта 2025 г. на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Цифровая карта концентрации диоксида азота (а) и диоксида серы (б) по данным спутника Sentinel-5P в районе Череповца (30.03.2025). Точками обозначены станции наземного мониторинга: 1 — пост № 1 (район ДКС), 2 — пост № 2 (Привокзальный сквер), 3 — пост № 3 (стадион Металлург), 4 — пост № 4 (район химико-технологического колледжа), 5 — пост № 5 (СОШ № 7), 6 — пост № 6 (аквапарк «Радужный»).

Fig. 1. Digital map of nitrogen dioxide (a) and sulfur dioxide (b) levels in Cherepovets according to Sentinel-5P satellite data (as of March 30, 2025). Dots indicate Earth-based monitoring stations: 1, station No. 1 (Stroitel Community Center); 2, station No. 2 (Privokzalny Square); 3, station No. 3 (Metallurg Stadium); 4, station No. 4 (Chemical Engineering College); 5, station No. 5 (Secondary School No. 7); 6, station No. 6 (Raduzhny Waterpark).

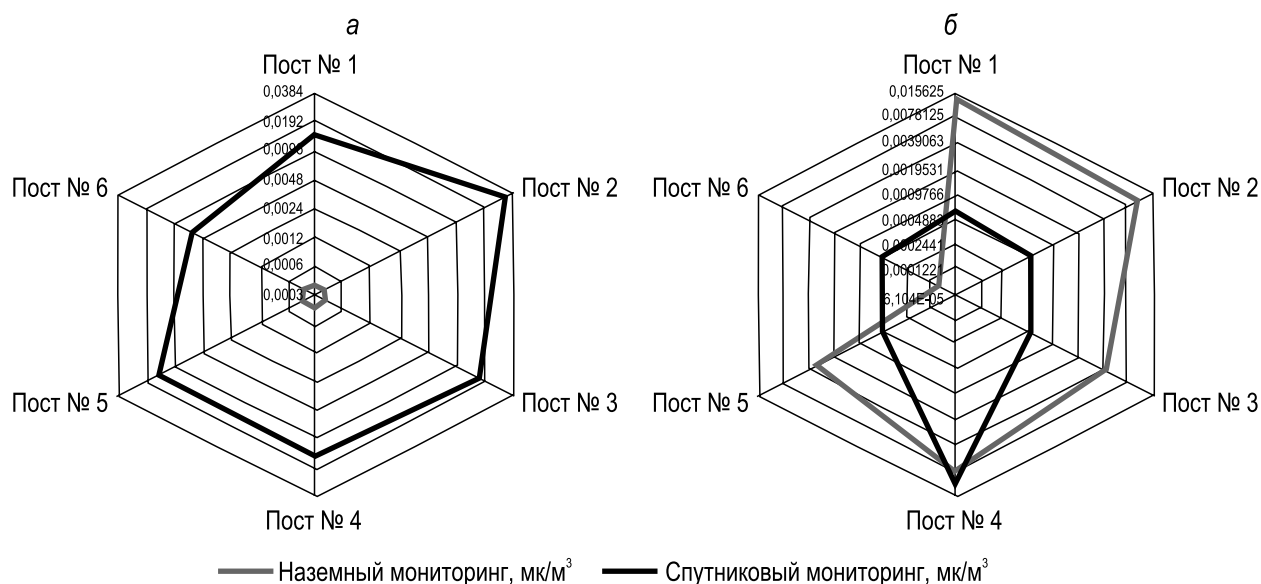


Рис. 2. Значения концентраций диоксида азота (а) и диоксида серы (б), полученные путём наземного и спутникового мониторинга (30.03.2025).
Fig. 2. Nitrogen dioxide (a) and sulfur dioxide (b) levels according to Earth-based and satellite monitoring (as of March 30, 2025).

Для сопоставления концентраций диоксида азота и серы в атмосферном воздухе Череповца, полученных по данным спутникового мониторинга, использовали данные открытого сервиса наземного мониторинга качества атмосферного воздуха в Череповце, предоставляемого ПАО «Северсталь». Значения концентраций диоксида азота и диоксида серы, полученные путём наземного и спутникового мониторинга для шести постов наблюдения, приведены на рис. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Цифровые карты концентраций загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота и диоксидом серы по данным спутника Sentinel-5P в районе Череповца за 30 марта 2025 г. (см. рис. 1), позволяют заключить, что основная часть воздушного пространства города подвержена интенсивному воздействию загрязнителей. По диоксиду азота в атмосферном воздухе наблюдаются концентрации свыше $4,0 \cdot 10^{-4} \text{ мг}/\text{м}^3$, а по диоксиду серы — свыше $8,6 \cdot 10^{-4} \text{ мг}/\text{м}^3$. Исключением является Зашекснинский район города, где концентрации диоксида азота составляют менее $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ мг}/\text{м}^3$, а диоксида серы менее $8,6 \cdot 10^{-4} \text{ мг}/\text{м}^3$. По состоянию на 30 марта 2025 г. в Череповце наблюдалось юго-западное направление ветра, поэтому зона загрязнения атмосферного воздуха рассматриваемыми поллютантами сдвигается на северо-восток от города, в сторону населённых пунктов Солманское, Тоншалово.

Заключительным этапом исследования является сопоставление концентраций диоксида азота и серы, полученных наземным и спутниковым мониторингом (см. рис. 2). Возможные причины расхождений данных спутникового и наземного мониторинга могут объясняться

тем, что спутниковые данные представляют собой усреднённые значения для ячеек размером 7 км^2 , в то время как наземные станции фиксируют концентрацию загрязняющих веществ в конкретной точке, что особенно важно для промышленных зон, в которых уровни загрязнения могут сильно меняться на небольших расстояниях из-за локальных выбросов. Примечательными являются различия в концентрациях NO_2 , измеренных при спутниковых наблюдениях и наземном мониторинге (см. рис. 2а). При спутниковом мониторинге в ходе построения цифровых карт загрязнения атмосферного воздуха мы использовали профили столбцовой концентрации вещества ($\text{моль}/\text{м}^2$). Столбцовая концентрация изменяется по высоте атмосферного столба. В слое атмосферы у поверхности земли она максимальная, а при подъёме над поверхностью земли значение столбцовой концентрации вещества в атмосферном воздухе уменьшается. В расчётах принимали среднее значение по всей высоте атмосферного столба. Высота источника выброса загрязнителей атмосферного воздуха также может вносить определённый вклад. Это, в частности, определяет различие между данными концентраций спутникового наблюдения и наземного мониторинга диоксида азота и серы. Выбросы диоксида азота в атмосферный воздух определяются в большей степени наземным транспортом, что и фиксируется по максимуму постами наблюдения, расположенными у поверхности земли. При спутниковом наблюдении эта концентрация усредняется по высоте атмосферного столба и даёт меньшие значения. Выбросы диоксида серы в атмосферный воздух дают в основном промышленные объекты, которые осуществляют выброс через трубы на определённой высоте от поверхности земли (10–50 м). При выбросе происходит диффузионное рассеяние загрязнителя в атмосферном воздухе, и температура выбрасываемой смеси,

температура окружающего воздуха, высота источника выброса определяют то, как будет распределяться загрязнитель в атмосферном воздухе. Это наглядно демонстрируют данные измерения на постах концентрации SO_2 . На посту № 4 наблюдаются максимальные значения концентраций. Это определяется метеоусловиями на момент измерения концентрации диоксида серы: направление ветра юго-западное. Данный пост как раз располагается в северо-восточной части города от ПАО «Северсталь», что и определяет максимальные концентрации для этого поста наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ спутникового и наземного мониторингов позволил выявить сильные и слабые стороны каждого метода. Спутниковый мониторинг охватывает большие территории, включая труднодоступные зоны, но имеет низкое пространственное разрешение, зависит от погоды и имеет временные лаги, что может приводить к занижению локальных пиков загрязнения. Наземный же мониторинг обеспечивает высокую точность измерений в конкретных точках и непрерывный сбор данных, но имеет ограниченный охват и высокую стоимость, что затрудняет мониторинг в удалённых районах. Совместное использование методов позволит повысить точность спутниковых данных благодаря их калибровке с помощью наземных измерений, а также оперативно выявлять источники выбросов, заполняя пробелы наземного мониторинга. Комбинированный подход позволит более эффективно использовать преимущества обоих методов и скомпенсирует их недостатки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.А. Царева — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; Е.Г. Лилеева — анализ данных, подготовка и написание текста статьи; Ю.В. Царев — написание кода программного обеспечения на языке JavaScript в среде Google Earth Engine, анализ геопространственных данных; Н.С. Дыбулина — подготовка и написание текста статьи; С.Ф. Велиметова — сбор и анализ литературных источников. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо, т.к. проводилась оценка загрязнения атмосферного воздуха на основании спутниковых данных и наземного мониторинга.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

Благодарность. Авторы выражают признательность компании ПАО «Северсталь» за предоставленные данные наземного мониторинга критерияльных загрязнителей атмосферного воздуха Череповца, Европейскому космическому агентству за предоставленные данные спутника Sentinel-5P, компании Google за предоставленный облачный сервис Google Earth Engine.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: S.A. Tsareva: investigation, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing; E.G. Lileeva: formal analysis, writing—original draft; Yu.V. Tsarev: software, formal analysis; N.S. Dybulina: writing—original draft; S.F. Velimetova: investigation, formal analysis. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable, because an assessment of atmospheric air pollution was carried out based on satellite data and ground-based monitoring.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Severstal for providing access to Earth-based monitoring data on atmospheric pollution by criteria pollutants in Cherepovets; the European Space Agency for providing access to Sentinel-5P satellite data; and Google for providing access to Google Earth Engine.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Morozova AE, Sizov OS, Elagin PO, et al. Integrated assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019–2020. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022;19(4):23–39. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39 EDN: AKKSYT
- Li B, Hu Q, Gao M, et al. Physical informed neural network improving the WRF–CHEM results of air pollution using satellite-based remote sensing data. *Atmospheric Environment*. 2023;311:120031. doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.120031

3. Ababio BA, Ashong GW, Agyekum ThP, et al. Comprehensive health risk assessment of urban ambient air pollution (PM_{2.5}, NO₂ and O₃) in Ghana. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2025;289:117591. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.117591
4. Sakti AD, Anggraini TS, Ihsan KTN, et al. Multi-air pollution risk assessment in Southeast Asia region using integrated remote sensing and socio-economic data products. *Sci Total Environ.* 2023;854:158825. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158825
5. Rahimi NR, Azhdarpoor A, Fouladi-Fard R. Exposure to tropospheric ozone and NO₂ in the ambient air of Tehran metropolis: Spatiotemporal distribution and inhalation health risk assessment. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C.* 2024;136:103777. doi: 10.1016/j.pce.2024.103777
6. Dammers E, Tokaya J, Mielke C, et al. Can TROPOMI NO₂ satellite data be used to track the drop in and resurgence of NO_x emissions in

Germany between 2019–2021 using the multi-source plume method (MSPM)? *Geosci Model Dev.* 2024;17(12):4983–5007. doi: 10.5194/gmd-17-4983-2024 EDN: BALS GF

7. Cersosimo A, Serio C, Masiello G. TROPOMI NO₂ tropospheric column data: regridding to 1 km grid-resolution and assessment of their consistency with in situ surface observations. *Remote Sensing.* 2020;12(14):2212. doi: 10.3390/rs12142212
8. Goldberg DL, Anenberg SC, Kerr GH, et al. TROPOMI NO₂ in the United States: a detailed look at the annual averages, weekly cycles, effects of temperature, and correlation with surface NO₂ concentrations. *Earth's Future.* 2021;9(4):e2020EF001665. doi: 10.1029/2020EF001665
9. Jeong U, Hong H. Assessment of tropospheric concentrations of NO₂ from the TROPOMI/Sentinel-5 precursor for the estimation of long-term exposure to surface NO₂ over South Korea. *Remote Sens.* 2021;13(10):1877. doi: 10.3390/rs13101877

ОБ АВТОРАХ

* **Царева Софья Александровна**, канд. хим. наук, доцент;
адрес: Россия, 150000, Ярославль, Московский пр-кт, д. 88,
каб. 920;
ORCID: 0000-0003-2099-4885;
eLibrary SPIN: 5279-4175;
e-mail: zarew@rambler.ru

Лилеева Елена Георгиевна, канд. мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-6048-8974;
eLibrary SPIN: 4287-6652;
e-mail: elileeva2006@yandex.ru

Царев Юрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент;
ORCID: 0000-0002-4337-2897;
eLibrary SPIN: 7991-3530;
e-mail: tsarevyy@ystu.ru

Дыбулина Наталия Сергеевна;
ORCID: 0009-0006-4139-639X;
eLibrary SPIN: 2758-5320;
e-mail: dybulinans@gmail.com.

Велиметова Сабрина Фаиковна;
ORCID: 0009-0007-7891-2682;
e-mail: sabrinavelimetova@icloud.com

AUTHORS' INFO

* **Sophia A. Tsareva**, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor;
address: 88 Moskovsky ave, room 920, Yaroslavl, Russia,
150000;
ORCID: 0000-0003-2099-4885;
eLibrary SPIN: 5279-4175;
e-mail: zarew@rambler.ru

Elena G. Lileeva, MD, Cand. Sci. (Medicine), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-6048-8974;
eLibrary SPIN: 4287-6652;
e-mail: elileeva2006@yandex.ru

Yuri V. Tsarev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
ORCID: 0000-0002-4337-2897;
eLibrary SPIN: 7991-3530;
e-mail: tsarevyy@ystu.ru

Nataliya S. Dybulina;
ORCID: 0009-0006-4139-639X;
eLibrary SPIN: 2758-5320;
e-mail: dybulinans@gmail.com.

Sabrina F. Velimetova;
ORCID: 0009-0007-7891-2682;
e-mail: sabrinavelimetova@icloud.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author