

Новые информационные продукты о распределении диоксида азота с учётом ветровых условий

А. А. Бриль, Е. А. Лупян, А. М. Константинова,
Ю. С. Крашенинникова, И. А. Уваров

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: bril@d902.iki.rssi.ru*

В последние десятилетия активно развиваются спутниковые системы мониторинга малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере. На основе получаемых ими данных сегодня формируется значительное число различных информационных продуктов, которые используются для решения широкого круга научных и прикладных задач, включая мониторинг и контроль крупных источников загрязнения, анализ антропогенных воздействий на различные территории и др. Для решения многих подобных задач необходим учёт условий, при которых проводятся наблюдения МГС, в первую очередь метеорологических. Поэтому возникает потребность создания различных комплексных информационных продуктов, учитывающих как данные, полученные в результате спутниковых наблюдений МГС, так и метеоусловия, в которых проводились наблюдения. Настоящая работа посвящена описанию новых информационных продуктов такого класса, созданных в Институте космических исследований РАН и доступных для использования в Центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://skr.geosmis.ru/>). Эти продукты позволяют анализировать информацию о среднемноголетней концентрации диоксида азота с учётом локальных ветровых условий (скорости ветра в районе наблюдения). Они сформированы на основе данных о концентрации диоксида азота в тропосфере, восстановленных по данным наблюдений прибора TROPOMI (*англ.* Tropospheric Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P). В работе кратко описаны технология построения обсуждаемых продуктов, возможные направления их использования и возможности получения доступа к архивам данных продуктов и инструментам, позволяющим проведение их анализа с помощью системы «Vega-Science» (<http://sci-vega.ru/>).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, малые газовые составляющие, диоксид азота, мониторинг крупных источников загрязнения, многолетние спутниковые наблюдения, качество воздуха, загрязнение атмосферы, технология построения композитных изображений

Одобрена к печати: 28.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-301-307

Введение

Объективный мониторинг малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере, которые во многих случаях связаны с антропогенным воздействием, и оценка их динамики на больших территориях — важная задача контроля состояния окружающей среды (United..., 2023). Решение подобных задач фактически невозможно без использования спутниковых систем наблюдения, которые активно развиваются в последние десятилетия (Садовский и др., 2023; Stratoulis et al., 2024). Также активно развиваются методы и технологии восстановления на основе спутниковых наблюдений различных характеристик, в том числе концентраций МГС в атмосфере (Kim et al., 2020; Qu et al., 2020). Всё это позволяет использовать информацию, получаемую на основе спутниковых данных о МГС, для решения широкого круга научных и прикладных задач, в том числе для мониторинга и контроля крупных источников загрязнения, анализа антропогенных воздействий на различные территории и др. При этом следует отметить, что при решении многих таких задач необходим учёт условий, при которых проводятся наблюдения МГС, в первую очередь метеорологических. Поэтому возникает потребность создания различных комплексных информационных продуктов, учитывающих как данные, полученные в результате спутниковых наблюдений МГС, так и метеоусловия, в которых проводились наблюдения. Настоящее краткое сообщение посвящено описанию новых информационных продуктов такого класса. Они предоставляют данные о среднемноголетней

концентрации диоксида азота с учётом локальных ветровых условий (скорости ветра в районе наблюдения). Продукты сформированы на основе данных о концентрации диоксида азота (NO_2) в тропосфере, восстановленных по измерениям прибора TROPOMI (*англ.* Tropospheric Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P) (Copernicus..., 2021), полученным на территории Северной Евразии за период с 2018 по 2023 г. Следует отметить, что для решения широкого спектра задач вопросы использования информации о концентрации NO_2 , получаемой на основе спутниковых данных, лежат в области интереса достаточно большого числа научных коллективов (например, (Силаева, Силаев, 2018; Тронин и др., 2019; Beirle et al., 2011; Lamsal et al., 2008; Richter et al., 2005)), которым в том числе могут быть интересны представляемые продукты.

В сообщении кратко описаны технология построения обсуждаемых продуктов, возможные направления их использования и возможности получения доступа к архивам данных продуктов и инструментам, позволяющим проведение их анализа.

Краткое описание технологии построения продуктов и возможностей работы с ними

Для работы с информацией о концентрации малых газовых составляющих атмосферы Земли (в том числе NO_2) в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019; <http://ckp.geosmis.ru/>) создана специальная подсистема обработки данных, получаемых приборами OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) (спутник Aura) и TROPOMI (спутник Sentinel-5P). Возможности данной подсистемы достаточно подробно описаны в работе (Бриль и др., 2023). Она позволяет за различные временные интервалы формировать данные о средней концентрации МГС, наблюдавшихся в узлах регулярной сетки исходных данных, например, для NO_2 приборов OMI и TROPOMI с шагом 13×25 и $5,5 \times 3,5$ км соответственно, по всей территории земного шара. Как основа для расчётов используются стандартные продукты о концентрации различных МГС, предоставляемые центром распространения спутниковых данных Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). В подсистеме реализована возможность расчёта средних значений только с учётом наблюдений, которые были выполнены в определённых метеоусловиях. Для учёта метеоусловий используется информация, получаемая на основе данных реанализа NCEP/NCAR (*англ.* National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) (NCEP..., 2015) на сетке с шагом $0,25^\circ$. Для работы с данными на сетке, которая используется при расчёте средней концентрации МГС, проводится аппроксимация метеоданных на эту сетку. В частности, подсистема позволяет осуществлять усреднение только с учётом дней, для которых средние значения выбранных метеоданных попадают в заданный интервал. Например, позволяет строить карты средних значений NO_2 в безветренные сутки (средняя скорость ветра в которых не превышала $1,5$ м/с). Особенности и возможности использования таких карт, сформированных за летние (с мая по сентябрь) месяцы 2018–2023 гг., описаны, в частности, в работе (Константинова и др., 2024).

Отметим, что для построения подобных карт за заданный период должен быть проанализирован весь ряд имеющихся метеоданных для каждого узла сетки, на которой производился расчёт среднего значения концентрации NO_2 , и выбраны только безветренные данные, по которым и будет проведён расчёт средних значений. Для больших территорий и периодов подобные операции могут требовать значительных вычислительных и временных затрат. Для обеспечения ускорения данных процедур был разработан специальный алгоритм, в основе которого лежит формирование наборов ежедневных битовых масок, в которых единицами отмечены точки, удовлетворяющие заданным условиям. Данные маски в дальнейшем используются для построения карт средних значений за весь выбранный период наблюдений.

В настоящее время на основе такого же подхода для территории Северной Евразии (с 20° в.д. по 175° з.д. и с 33° с.ш. по 82° с.ш.) сформирована серия карт средних значений NO_2 за летний период 2018–2023 гг. Карты формировались для разных условий среднесуточ-

ного ветра с шагом 0,5 м/с в диапазоне от 0 до 4 м/с. Таким образом было сформировано восемь карт (информационных продуктов), которые соответствуют различной среднесуточной скорости ветра.

Сформированные информационные продукты были помещены в архивы результатов обработки спутниковых данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг», созданные на основе UNISAT (Прошин и др., 2016). Это обеспечило возможность их использования в различных информационных системах дистанционного мониторинга, создаваемых на основе технологий, разработанных в ИКИ РАН, и возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Для специалистов, ведущих научные и/или образовательные проекты, данные продукты доступны в системе «Вега-Science» (Лупян и др., 2021; <http://sci-vega.ru/>). Это позволяет не только получить информацию по регионам исследований, но и проводить анализ данной информации с использованием различных инструментов обработки данных, реализованных в системе, в том числе обеспечивающих возможность долговременного дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов (Константинова и др., 2021).

Примеры возможного использования информационных продуктов

Пространственное распределение средней концентрации NO_2 , рассчитанное для ситуаций с разной скоростью ветра, например, позволяют проводить анализ различных особенностей источников данного газа и процессов его распространения. Приведём лишь несколько примеров визуального анализа таких особенностей.

На *рис. 1* представлен пример сравнения распределения средней концентрации, построенной без учёта ветровых условий и по безветренным наблюдениям. Хорошо видно, что распределение, построенное для безветренной ситуации, позволяет гораздо более чётко выделять устойчивые источники NO_2 , чем распределение, построенное без учёта ветровых условий.

В то же время анализ распределения средней концентрации, полученной при большой среднесуточной скорости ветра (*рис. 2*, см. с. 304), хотя и не позволяет выделить отдельные устойчивые источники NO_2 , даёт возможность проанализировать преимущественное направление распространения загрязнений в изучаемом регионе.

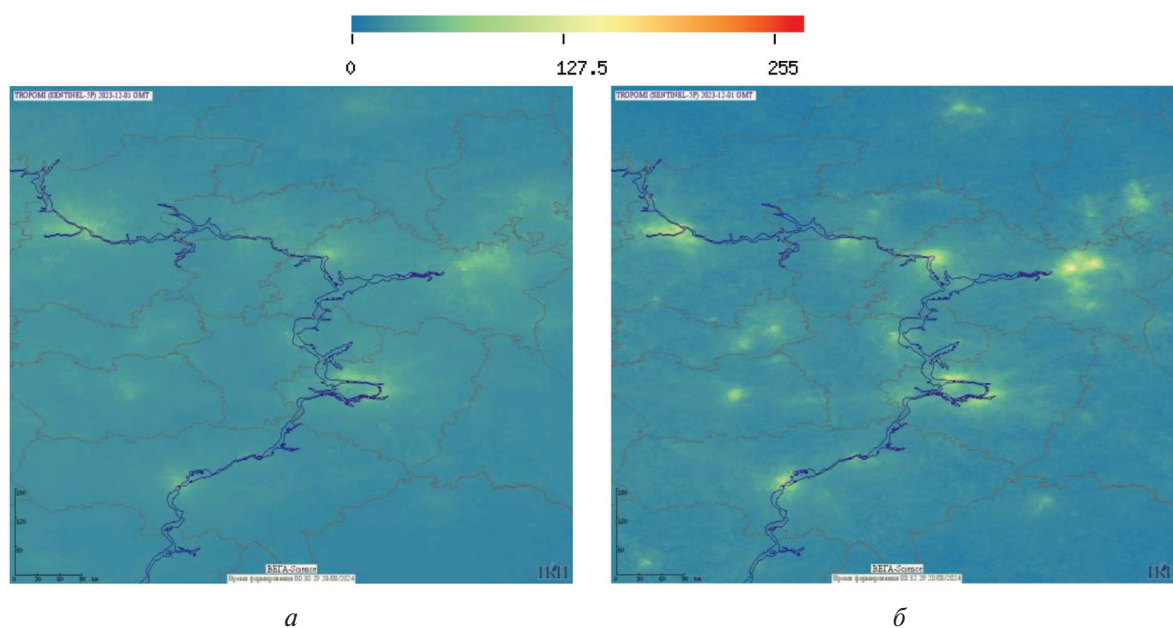


Рис. 1. Средняя концентрация NO_2 в регионе среднего Поволжья за летние периоды 2018–2023 гг., рассчитанная: *а* — без учёта среднесуточной скорости ветра; *б* — при среднесуточной скорости ветра менее 0,5 м/с. Размерность в легенде — $\mu\text{кмоль}/\text{м}^2$

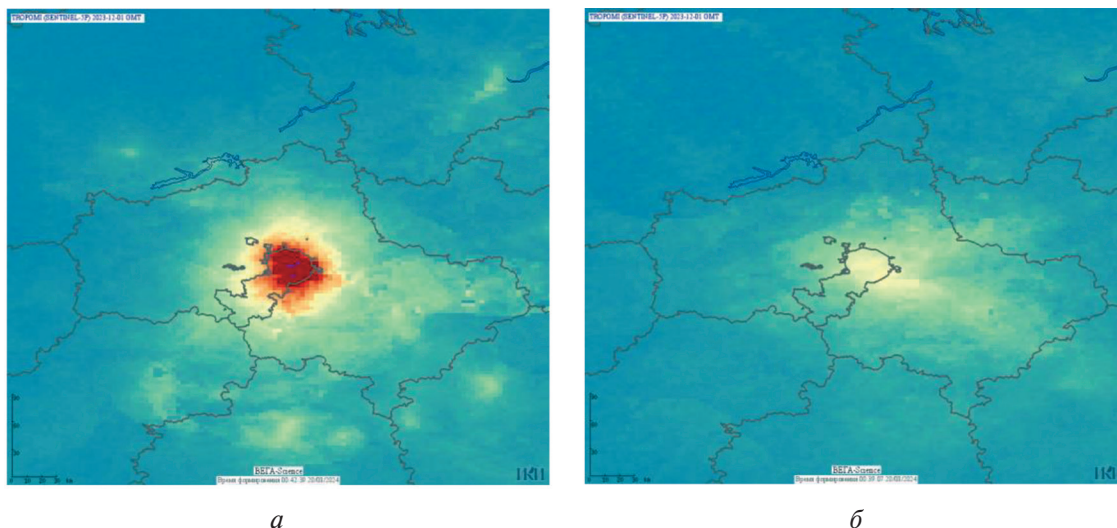


Рис. 2. Средняя концентрация NO₂ в Московском регионе за летний период 2018–2023 гг., рассчитанная при среднесуточной скорости ветра: а — от 0,5 до 1,0 м/с; б — от 3,5 до 4,0 м/с. Легенда соответствует приведённой на рис. 1

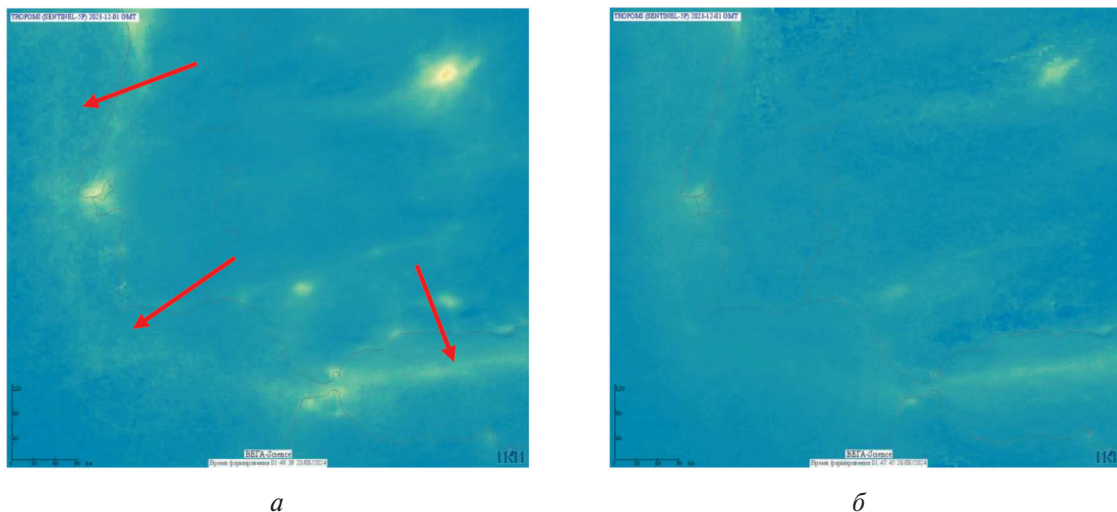


Рис. 3. Средняя концентрация NO₂ на юге Испании в районе Гибралтарского пролива за летний период 2018–2023 гг., рассчитанная при среднесуточной скорости ветра: а — от 0,5 до 1,0 м/с; б — от 3,0 до 3,5 м/с. Легенда соответствует приведённой на рис. 1. Красными стрелками указаны районы прохода трасс морских грузовых судов

Также анализ распределения средней концентрации, полученной при малой среднесуточной скорости ветра, позволяет анализировать особенности загрязнений даже для таких относительно слабо локализованных источников, как трассы морских судов (рис. 3а), в то время как эти особенности не проявляются на картах распределения средней концентрации, полученной при большой среднесуточной скорости ветра (рис. 3б)

Заключение

Таким образом, в настоящий момент в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» появилась возможность работы с новыми информационными продуктами, полученными за период с 2018 по 2023 г. на территорию Северной Евразии на основе информации о концентрации диоксида азота, восстановленной по данным прибора TROPOMI, установленного на спутнике Sentinel-5P.

Данные продукты могут быть полезны, в том числе, для анализа особенностей распространения загрязнений в районах расположения крупных стационарных источников NO_2 . В настоящее время в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ведутся работы по формированию подобных информационных продуктов на территорию всего мира.

Работы выполнены при поддержке в рамках темы «Эмиссия» (госрегистрация № 122101700045-7). Для выполнения работы и организации доступа к сформированным продуктам и проведения их анализа в интересах различных проектов использовались возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг», который развивается и поддерживается в рамках темы «Мониторинг» Минобрнауки (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Бриль А.А., Константинова А.М., Лупян Е.А., Бурцев М.А. Возможности работы ЦКП «ИКИ Мониторинг» с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 85–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Константинова А.М., Балашов И.В., Кашицкий А.В. и др. Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 41–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.
3. Константинова А.М., Бриль А.А., Лупян Е.А. и др. Возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа концентраций диоксида азота в атмосфере крупных источников загрязнений // Вычислительные технологии. 2024. Т. 29. № 3. С. 92–102. DOI: 10.25743/IST.2024.29.3.008.
4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
6. Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В. и др. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
7. Садовский И.Н., Пашинов Е.В., Сазонов Д.С. Анализ возможности расчёта элементов баланса атмосферных парниковых газов по современным данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 117–128. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128.
8. Силаева П.Ю., Силаев А.В. Особенности рассеивания выбросов диоксида азота предприятиями энергокомплекса и их влияние на население мегаполисов // Вестн. Российского ун-та дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 63–72. DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72.
9. Тронин А.А., Крицук С.Г., Киселев А.В. Многолетние тренды содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 259–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265.
10. Beirle S., Boersma K.F., Platt U. et al. Megacity emissions and lifetimes of Nitrogen Oxides probed from space // Science. 2011. V. 333. No. 6050. P. 1737–1739. DOI: 10.1126/science.1207824.
11. Copernicus Sentinel-5P data products. TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02 (2021b) / European Space Agency. 2021. <https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8>.
12. Kim J., Ahn M.H., Kim J.H. et al. New era of air quality monitoring from space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS) // Bull. American Meteorological Society. 2020. V. 101(1). P. E1–E22. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0013.1.
13. Lamsal L., Martin R., Donkelaar A. et al. Ground-level Nitrogen Dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument // J. Geophysical Research Atmospheres. 2008. V. 113. Iss. D16. Article D16308. DOI: 10.1029/2007JD009235.

14. NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree global tropospheric analyses and forecast grids / National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. 2015. DOI: 10.5065/D65Q4T4Z.
15. Qu Z., Henze D. K., Cooper O. R., Neu J. L. Improving NO₂ and ozone simulations through global NO_x emission inversions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. V. 20. Iss. 21. P. 13109–13130. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13109-2020>.
16. Richter A., Burrows J. P., Nüss H. et al. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space // *Nature*. 2005. V. 437. No. 7055. P. 129–132. DOI: 10.1038/nature04092.
17. Stratoulis D., Nuthammachot N., Dejchanchaiwong R. et al. Recent developments in satellite remote sensing for air pollution surveillance in support of sustainable development goals // *Remote Sensing*. 2024. V. 16(16). Article 2932. <https://doi.org/10.3390/rs16162932>.
18. United Nations Environment Programme: Guide on ambient air quality legislation — Air pollution series / United Nations Environment Programme. 2023. 105 p. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42536>.

New data products on nitrogen dioxide distribution with consideration of wind conditions

A. A. Bril, E. A. Loupian, A. M. Konstantinova, Yu. S. Krasheninnikova, I. A. Uvarov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: bril@d902.iki.rssi.ru

In recent decades, satellite monitoring systems for trace gases in the atmosphere have been actively developed. Based on the data they collect, a significant number of various information products are currently being created, which are used to address a wide range of scientific and applied tasks, including monitoring and controlling major pollution sources, analyzing anthropogenic impacts on various territories, and more. To solve many such tasks, it is necessary to consider the conditions under which trace gases observation is conducted, primarily meteorological conditions. Therefore, there is a need to create various comprehensive information products that take into account both the data obtained from satellite observations of trace gases and the meteorological conditions under which the observations were made. The paper is dedicated to describing new information products of this class, developed at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences and available for use in the CKP “IKI-Monitoring” (<http://ckp.geosmis.ru/>). These products allow analyzing information on multi-year average concentration of nitrogen dioxide taking into account local “wind conditions” (wind speed in the observation area). They are based on the data on nitrogen dioxide concentration in the troposphere reconstructed from observations by the TROPOMI instrument (Sentinel-5P satellite). The paper briefly describes the technology for constructing the discussed products, possible areas of their application, and the means of accessing the archives of these products and tools for conducting analysis using the Vega-Science system (<http://sci-vega.ru/>).

Keywords: remote sensing, trace gases, nitrogen dioxide, monitoring major pollution sources, multi-year satellite observations, air quality, atmospheric pollution, composite imaging technology

Accepted: 28.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-301-307

References

1. Bril A. A., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Burtsev M. A., Capabilities of IKI-Monitoring Shared Use Center operation with satellite monitoring-based trace gas components data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Konstantinova A. M., Balashov I. V., Kashnitskii A. V. et al., Unified technology for remote monitoring of natural and anthropogenic objects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 41–52 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-41-52.

3. Konstantinova A. M., Bril A. A., Loupian E. A. et al., Abilities of object monitoring technology for analyzing nitrogen dioxide concentrations in areas where major sources of pollution are located, *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2024, Vol. 29, No. 3, pp. 92–102 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2024.29.3.008.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
6. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
7. Sadovsky I. N., Pashinov E. V., Sazonov D. S., Analysis of the possibility to calculate atmospheric greenhouse gas balance elements using modern satellite remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 117–128 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128.
8. Silaeva P., Silaev A. V., Peculiarities of dispersion of nitrogen dioxide emissions by the energy complex enterprises and their impact on the population of megapolises, *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2018, Vol. 26, No. 1, pp. 63–72 (in Russian), DOI 10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72.
9. Tronin A. A., Kritsuk S. G., Kiselev A. V., Estimation of multiyear changes in nitrogen oxide concentrations over Russia from satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 259–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265.
10. Beirle S., Boersma K. F., Platt U. et al., Megacity emissions and lifetimes of Nitrogen Oxides probed from space, *Science*, 2011, Vol. 333, No. 6050, pp. 1737–1739, DOI: 10.1126/science.1207824.
11. *Copernicus Sentinel-5P data products, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products, Version 02* (2021b), European Space Agency, 2021, <https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8>.
12. Kim J., Ahn M. H., Kim J. H. et al., New era of air quality monitoring from space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), *Bull. American Meteorological Society*, 2020, Vol. 101(1), pp. E1–E22, DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0013.1.
13. Lamsal L., Martin R., Donkelaar A. et al., Ground-level Nitrogen Dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument, *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2008, Vol. 113, Issue D16, Article D16308, DOI: 10.1029/2007JD009235.
14. *NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree global tropospheric analyses and forecast grids*, National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U. S., 2015. DOI: 10.5065/D65Q4T4Z.
15. Qu Z., Henze D. K., Cooper O. R., Neu J. L., Improving NO₂ and ozone simulations through global NO_x emission inversions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, Vol. 20, Issue 21, pp. 13109–13130, <https://doi.org/10.5194/acp-20-13109-2020>.
16. Richter A., Burrows J. P., Nüss H. et al., Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 2005, Vol. 437, No. 7055, pp. 129–132, DOI: 10.1038/nature04092.
17. Stratoulis D., Nuthammachot N., Dejchanchaiwong R. et al., Recent developments in satellite remote sensing for air pollution surveillance in support of sustainable development goals, *Remote Sensing*, 2024, No. 16(16), Article 2932, <https://doi.org/10.3390/rs16162932>.
18. *United Nations Environment Programme: Guide on ambient air quality legislation — Air pollution series*, United Nations Environment Programme, 2023, 105 p., <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42536>.