

Продукты расчёта атмосферной динамики по содержанию диоксида азота на основе спутниковой информации в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Е. В. Пашинов, С. А. Втюрин, А. А. Бриль, А. М. Константинова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: pashinove@mail.ru

Проведена обработка суточных композитов измерений спектрометром TROPOMI (*англ.* TROPospheric Monitoring Instrument) интегрального содержания NO_2 в атмосфере. Источником данных является Центр коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>). В результате обработки были получены суточные глобальные поля интегрального содержания NO_2 без пропусков данных и векторы горизонтального переноса газа на регулярной сетке $0,25 \times 0,25^\circ$. Для заполнения отсутствующих данных внутри суточного глобального поля были применены методы контекстного заполнения изображений. Для восстановления горизонтальной динамики использовались методы оценки оптического потока. Данные обработаны за период с 01.05.2018 по 31.08.2025 и будут представлены в виде продукта в ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Ключевые слова: диоксид азота, горизонтальная динамика, спутниковый мониторинг, центр коллективного пользования, TROPOMI

Одобрена к печати: 01.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-431-437

Введение

Диоксид азота (NO_2) — один из основных атмосферных загрязнителей, возникающий в результате деятельности человека: сжигания топлива, промышленных процессов, работы двигателей внутреннего сгорания, а также лесных пожаров (Тронин и др., 2019). Диоксид азота является высокотоксичным газом, который вызывает раздражение дыхательных путей, и поэтому его содержание в атмосфере населённых пунктов тщательно контролируется, а также составляются карты качества воздуха городов, где фигурирует содержание NO_2 (<https://www.iqair.com/>, <https://mosecom.mos.ru/karta/>). В рамках климатических процессов NO_2 выступает как сильный окислитель и прекурсор тропосферного озона, который уже в свою очередь представляет собой сильный парниковый газ (Tadic et al., 2021). Таким образом, мониторинг атмосферного диоксида азота является актуальной научной задачей.

Спутниковые наблюдения NO_2 за последние десятилетия стали важнейшим инструментом для экологического мониторинга и научных исследований. В настоящее время на орбите присутствует более десятка инструментов для измерения концентрации NO_2 в атмосфере, из них можно отдельно выделить спектрометр OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) (<https://science.nasa.gov/mission/aura/>), который проводит измерения с 2004 г., и его обновлённую версию — TROPOMI (*англ.* TROPospheric Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P), работающий с 2018 г. (https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-nitrogen-dioxide). Оба этих инструмента измеряют интегральное содержание NO_2 в атмосфере с большой шириной полосы обзора — 2600 км и хорошим пространственным разрешением. Данные этих приборов накапливаются в Центре коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» в виде композитных изображений за произвольные периоды времени и пригодны для дальнейшей тематической обработки. В настоящий момент реализовано построение временных композитов за сутки, неделю, месяц, год и весь период наблюдения.

В рамках настоящей работы к имеющимся в ЦКП данным TROPOMI об интегральном содержании NO_2 , как наиболее качественным на сегодняшний день, была применена часть

технологической цепочки балансовой методики оценки вертикальных потоков парниковых газов (Ермаков и др., 2023; Пашинов и др., 2023), что позволило восстановить горизонтальную динамику газа.

Используемые спутниковые данные

13 октября 2017 г. Европейским космическим агентством ESA (*англ.* European Space Agency) на орбиту Земли был выведен космический аппарат Sentinel-5P в рамках космической программы Европейского союза «Коперник» (*англ.* Copernicus). На борту спутника установлен прибор TROPOMI — спектрометр, предназначенный для мониторинга различных малых газовых составляющих атмосферы. Этот инструмент обеспечивает получение данных о концентрации малых газовых составляющих, включая диоксид азота (NO_2), с измерениями, проводимыми в тропосферном и стратосферном атмосферном слоях, а также по всему вертикальному профилю атмосферы. Данные прибора доступны с апреля 2018 г. по настоящее время. Спектрометр TROPOMI обеспечивает ежедневное глобальное покрытие всей территории земного шара с пространственным разрешением $3,5 \times 7$ км ($3,5 \times 5,5$ км с августа 2019 г.) с пролётами примерно в 13:30 по местному времени. Данные прибора распространяются Европейским центром распространения данных Copernicus (dataspace.copernicus.eu) в трёх видах продуктов второго уровня: NRT (*англ.* NearRealTime), RPRO (*англ.* ReProcessing) и OFFL (*англ.* Offline) (https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-nitrogen-dioxide). При этом при пост-роении продуктов OFFL и RPRO используются дополнительные калибровки и верификации данных, что делает эти продукты предпочтительными для использования в анализе загрязнений. С применением информации о концентрации малых газовых составляющих, взятой из продуктов постобработки данных второго уровня RPRO и OFFL, были построены ежедневные композитные изображения, ставшие основой для проведения расчётов атмосферной динамики. При построении таких ежедневных изображений была использована информация о качестве данных в каждой точке, поставляемая совместно с оригинальным набором данных в поле «флаг качества». Применение такого признака при анализе данных TROPOMI важно для отбора только надёжных и точных измерений. Флаг качества помогает исключить данные, искажённые из-за облачности, высокого аэрозольного фона, недостаточной освещённости территории или других факторов, снижающих качество измерений. Для анализа концентрации были использованы только данные лучшего качества в каждой точке изображения. Данные ежедневные карты созданы с помощью технологии построения временных композитов (Бриль и др., 2023) на базе вычислительных мощностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) и доступны в его архивах.

Восстановление динамики NO_2 в атмосфере

Процедура восстановления векторов скорости горизонтального переноса газа в атмосфере является частью разрабатываемой в молодёжной лаборатории ИКИ РАН балансовой методики оценки вертикальных потоков парниковых газов. Подробно она рассмотрена в работах (Ермаков и др., 2023; Пашинов и др., 2023). В данный момент методика включает в себя следующие этапы: перевод исходных композитов TROPOMI, полученных из ЦКП, на регулярную сетку координат с квадратной ячейкой; заполнение пропусков данных; перевод глобальных полей интегрального содержания в 8-битные изображения; восстановление горизонтальной скорости переноса газа.

На первом этапе исходные суточные композиты TROPOMI разрешением $0,040 \times 0,063^\circ$ переводятся на сетку с квадратной ячейкой $0,25 \times 0,25^\circ$. Этот переход выполняется посредством усреднения исходных данных в квадрате 4×4 узла. В основном этот этап обработки продиктован соображениями методического единообразия, чтобы объединить на одной сетке как данные микроволновых измерений водяного пара, так и инфракрасные измерения содержания парниковых газов в атмосфере.

На следующем этапе происходит заполнение отсутствующих в композитах данных. Эта процедура необходима для корректной работы алгоритмов оценки оптического потока, иначе будет происходить ложное отслеживание движений пропусков данных, что приведёт к существенным артефактам. В данный момент заполнение выполняется с помощью функции `inpaint` из открытой библиотеки `opencv` с применением пирамидального многомасштабного подхода (Anandan, 1989). В кратком представлении — суточный композит представляется как изображение и лакуны в этом изображении стягиваются от краёв градиентным методом. Так можно довольно качественно заполнить небольшие области, что показано на *рис. 1*.

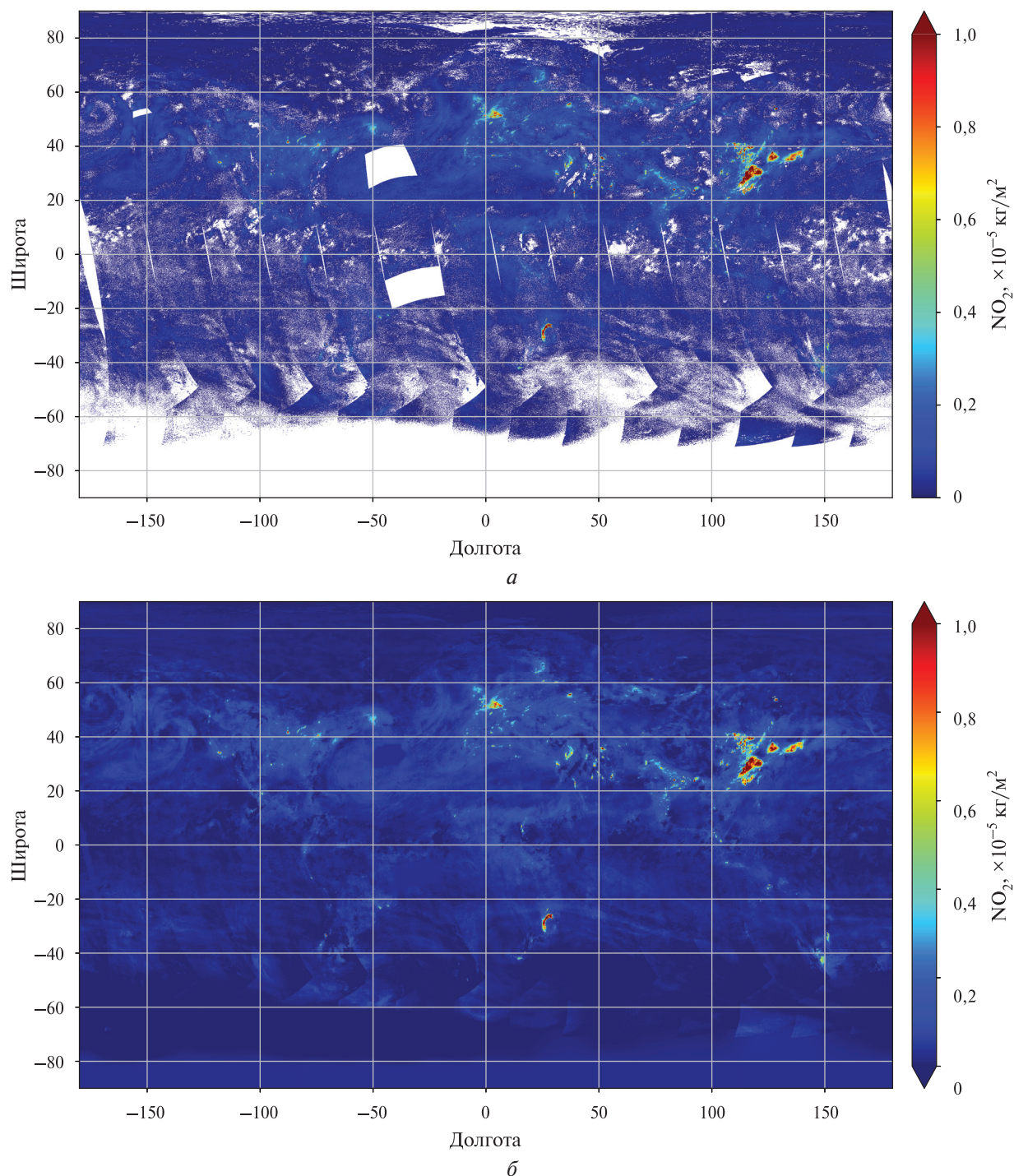


Рис. 1. Пример заполнения пропусков данных в суточном композите интегрального содержания NO_2 TROPOMI за 07.05.2018: *a* — исходный композит с пропусками; *б* — композит после процедуры заполнения

Алгоритмы оценки оптического потока, используемые для оценки горизонтальных смещений неоднородностей на изображениях, требуют на входе пары последовательных во времени кадров в 8-битном формате яркости. Это создаёт ряд трудностей, поскольку гистограмма интегрального содержания газа в суточном композите крайне неравномерна, а динамический диапазон изображения квантован и сильно ограничен. Подробнее эта проблема рассмотрена в работе (Втюрин и др., 2025). На сегодняшний день она решается процедурой компрессии гистограммы. Для пары суточных композитов строится общая гистограмма интегрального содержания газа и происходит пересчёт значений в диапазон от 0 до 255 так, что 86 % итогового динамического диапазона (значения от 0 до 219) пересчитываются с одним коэффициентом, а более высокие и редкие значения — с другим коэффициентом в оставшиеся градации от 220 до 255 включительно. Коэффициенты подбираются эмпирически.

Между парой 8-битных изображений проводится оценка горизонтального смещения яркости каждого пикселя с помощью алгоритмов оценки оптического потока. В текущей версии реализации методики используется алгоритм DIS (*англ.* Dense Inverse Search) (Kroeger et al., 2016). Преимуществами комбинированного метода DIS для нашей задачи становятся вычисление плотного оптического потока (в каждой точке исходного изображения); вариационная корректировка с критерием гладкости, уменьшающая число и величину «выбросов», что обеспечивает более высокую итоговую точность; возможность анализа широкого диапазона масштабов смещений за счёт субпиксельной интерполяции для малых масштабов и анализа пирамиды изображений (пространственного сглаживания) для больших масштабов; сравнительно высокая скорость обработки, что позволяет эффективно проводить анализ длинных рядов (Ермаков и др., 2023). Восстановленные таким образом векторы смещения пикселей далее однозначно переводятся в скорость горизонтального переноса газа.

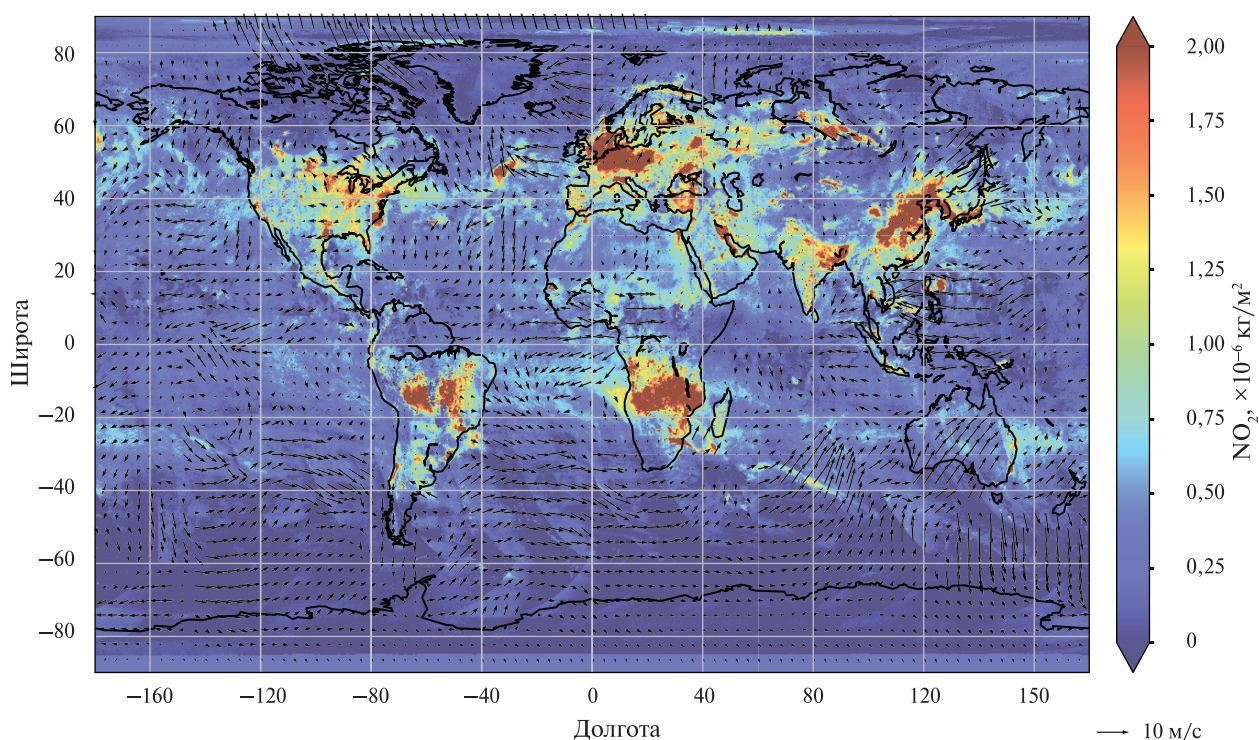


Рис. 2. Пример продукта восстановления атмосферной динамики по содержанию диоксида азота на основе данных TROPOMI за 14.09.2019

По описанной технологической цепочке были обработаны суточные композиты интегральной концентрации NO_2 по данным TROPOMI за период с 01.05.2018 по 31.08.2025. Результаты обработки представляют два продукта: суточные композиты в виде глобаль-

ных полей интегральной концентрации NO_2 с заполненными пропусками с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ и поля зональной и меридиональной компоненты горизонтального переноса газа на той же координатной сетке. Пример полученного продукта представлен на *рис. 2* (см. с. 434).

Полученные продукты планируется размещать в ЦКП «ИКИ-Мониторинг», а также использовать в полной методике балансовых оценок вертикального потока NO_2 (Ермаков и др., 2023, 2024; Пашинов и др., 2023).

Нужно отметить, что диоксид азота имеет достаточно короткое время жизни в атмосфере — от нескольких часов до суток (Lange et al., 2022). Этот факт нарушает приближение развиваемой балансовой методики о пренебрежимо малом вкладе химических реакций в изменение полного содержания газа в исследуемом объёме атмосферы. Поэтому для балансовых оценок в будущем необходимо будет тщательно выбирать исследуемые области и источники загрязнения. Также малая продолжительность жизни молекул NO_2 приводит к тому, что оценка его горизонтальной динамики вдали от источника будет иметь существенные погрешности. Оценке этих погрешностей будет посвящена дальнейшая работа.

Заключение

В работе показаны первые продукты расчёта атмосферной динамики по содержанию диоксида азота на основе спутниковой информации в ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Кратко описана технологическая цепочка их получения и возникающие при этом проблемы. Была проведена обработка суточных композитов измерений инфракрасным спектрометром TROPOMI интегрального содержания NO_2 в атмосфере. В результате обработки были получены суточные глобальные поля интегрального содержания NO_2 без пропусков данных и векторы горизонтального переноса газа на регулярной сетке $0,25 \times 0,25^\circ$. Данные обработаны за период с 01.05.2018 по 31.08.2025 и будут представлены в виде продукта в ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Полученные продукты, после оценок погрешностей и анализа качества, будут использоваться для восстановления вертикального потока диоксида азота в рамках балансовой методики для крупных городов и других сильных источников загрязнения атмосферы.

Работа выполнена в рамках темы «Эмиссия» государственного задания ИКИ РАН (гос. регистрация № 125111112878-8). В работе использованы данные и средства инфраструктурного обеспечения Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geos-mis.ru/>).

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. Втюрин С. А., Ермаков Д. М., Пашинов Е. В. Совершенствование методов предварительной обработки данных для расчёта горизонтальных потоков парниковых газов в атмосфере // Материалы 23-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2025. С. 21. DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
3. Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В. и др. Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 470–492. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
4. Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Лозин Д. В. и др. Погрешность расчёта выбросов угарного газа от крупных лесных пожаров по балансовой методике на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 143–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-143-155.
5. 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.
6. Пашинов Е. В., Втюрин С. А., Ермаков Д. М., Садовский И. Н. Отработка методики балансовых расчётов выбросов парниковых газов по данным спутникового мониторинга на примере крупных лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 313–325. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325.
 7. 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.
 8. Anandan P. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion // Intern. J. Computer Vision. 1989. V. 2. No. 3. P. 283–310.
 9. Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L. Fast optical flow using dense inverse search // Computer Vision — ECCV 2016. Proc. 14th European Conference on Computer Vision. Pt. 4. Springer, 2016. P. 471–488.
 10. Lange K., Richter A., Burrows J. P. Variability of nitrogen oxide emission fluxes and lifetimes estimated from Sentinel-5P TROPOMI observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022. V. 22. Iss. 4. P. 2745–2767.
 11. Tadic I., Nussbaumer C. M., Schlager H. et al. Central role of nitric oxide in ozone production in the upper tropical troposphere over the Atlantic Ocean and western Africa // Atmospheric Chemistry and Physics. 2021. V. 21. Iss. 10. P. 8195–8214. DOI: 10.5194/acp-21-8195-2021.

Atmospheric dynamics calculation products for nitrogen dioxide content based on satellite data at IKI-Monitoring Collective Use Center

E. V. Pashinov, S. A. Vturin, A. A. Bril, A. M. Konstantinova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: pashinove@mail.ru

Daily composites of measurements of the integral NO₂ content in the atmosphere obtained with the TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) spectrometer were processed. The data source was the IKI-Monitoring Collective Use Center (<http://ckp.geosmis.ru/>). The processing resulted in daily global fields of the integral NO₂ content without data gaps and horizontal gas transport vectors on a regular 0.25×0.25° grid. Contextual image filling methods were used to fill in missing data within the daily global field. Optical flow estimation methods were used to reconstruct the horizontal dynamics. The data were processed for the period from May 1, 2018, to August 31, 2025, and will be presented as a product at the IKI-Monitoring Collective Use Center.

Keywords: nitrogen dioxide, horizontal dynamics, satellite monitoring, shared use center, TROPOMI

Accepted: 01.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-431-437

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 component data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Vturin S. A., Ermakov D. M., Pashinov E. V., Improving data preprocessing methods for calculating horizontal fluxes of greenhouse gases in the atmosphere, *Materialy 23-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 23th Intern. Conf. “Current

- Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), Moscow: IKI RAS, 2025, p. 21 (in Russian), DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
3. Ermakov D. M., Pashinov E. V., Kuzmin A. V. et al., The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermovision, *Hydrometeorology and Ecology*, 2023, No. 72, pp. 470–492 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.
 4. Ermakov D. M., Pashinov E. V., Lozin D. V., Accuracy of calculating carbon monoxide emissions from large forest fires using the balance technique based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 143–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-143-155.
 5. 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, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
 6. Pashinov E. V., Vturin S. A., Ermakov D. M., Sadovsky I. N., Development of a methodology for balance calculations of greenhouse gas emissions based on satellite monitoring data using the example of large forest fires, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 313–325 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325.
 7. 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, V. 16, No. 2, pp. 259–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265.
 8. Anandan P., A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion, *Intern. J. Computer Vision*, 1989, V. 2, No. 3, pp. 283–310.
 9. Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L., Fast optical flow using dense inverse search, *Computer Vision — ECCV 2016. Proc. 14th European Conference on Computer Vision*, Pt. 4, Springer, 2016, pp. 471–488.
 10. Lange K., Richter A., Burrows J. P., Variability of nitrogen oxide emission fluxes and lifetimes estimated from Sentinel-5P TROPOMI observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, V. 22, Iss. 4, pp. 2745–2767.
 11. Tadic I., Nussbaumer C. M., Schlager H. et al., Central role of nitric oxide in ozone production in the upper tropical troposphere over the Atlantic Ocean and western Africa, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, V. 21, Iss. 10, pp. 8195–8214, DOI: 10.5194/acp-21-8195-2021.