

### **Балансовые оценки выброса NO<sub>2</sub> крупными источниками загрязнения по данным ДЗЗ**

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

*Институт космических исследований РАН*

*117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32*

*E-mail: [pashinove@mail.ru](mailto:pashinove@mail.ru)*

*Проведены тестовые оценки выбросов диоксида азота крупными городами Российской Федерации с помощью данных ДЗЗ. Восстановление величины выбросов проводилось с помощью оригинальной разработанной балансовой методики оценок. В качестве данных ДЗЗ были использованы суточные композиты спутникового спектрометра TROPOMI, измеряющего интегрального содержания NO<sub>2</sub> в атмосфере. Источником данных является ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>). Были обработаны спутниковые данные за период с 1.05.2018 по 31.08.2025. Результаты оценок выброса сравнивались с данными кадастра ECMWF CAMS global emission inventories.*

*Ключевые слова: диоксида азота, балансовые оценки, выбросы, крупные источники загрязнения, спутниковый мониторинг, центр коллективного пользования, TROPOMI*

### **Balance estimates of NO<sub>2</sub> emissions from large pollution sources based on remote sensing data**

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

*Space Research Institute RAS*

*Test estimates of nitrogen dioxide emissions from major cities in the Russian Federation were obtained using remote sensing data. Emissions were retrieved using a new balance estimation methodology. Daily composites from the TROPOMI satellite spectrometer, which measures the integrated NO<sub>2</sub> content in the atmosphere, were used as remote sensing data. The data source is the IKI-Monitoring Center for Collective Use (<http://ckp.geosmis.ru/>). Satellite data for the period from May 1, 2018, to August 31, 2025, were processed. The emission estimates were compared with data from the ECMWF CAMS global emission inventories.*

*Keywords: nitrogen dioxide, balance estimates, emissions, major pollution sources, satellite monitoring, collective use center, TROPOMI*

### **Введение**

Диоксид азота (NO<sub>2</sub>) - один из основных атмосферных загрязнителей, возникающий в результате деятельности человека: сжигания топлива, промышленных процессов, работы двигателей внутреннего сгорания, а также лесных пожаров [11]. 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<sub>2</sub> (<https://www.iqair.com/>, <https://mosecom.mos.ru/karta/>). В рамках климатических процессов, NO<sub>2</sub> выступает как сильный окислитель и прекурсор тропосферного озона, который уже в свою очередь является сильным парниковым газом [18]. Таким образом, мониторинг атмосферного диоксида азота является актуальной научной задачей.

Спутниковые наблюдения NO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> в атмосфере, из них можно отдельно выделить спектрометр TROPOMI (англ. Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P), который работает с 2018 [15]. Этот инструмент измеряет интегральное содержание NO<sub>2</sub> в атмосфере с большой шириной полосы обзора – 2600 км и хорошим пространственным разрешением. Данные этого прибора накапливаются в ЦКП «ИКИ – Мониторинг» в виде композитных изображений за произвольные периоды времени и пригодны для дальнейшей тематической обработки [1,6].

К глобальным суточным композитам интегрального содержания NO<sub>2</sub> TROPOMI за период с 2018 по 2025 годы была применена оригинальная балансовая методика [3] для того, чтобы определить выбросы загрязнителя крупными городами РФ. Полученные результаты сравнивались с данными кадастра ECMWF CAMS global emission inventories [14]. Полученные результаты подробно будут продемонстрированы в докладе.

### **Описание методики**

Использованная в работе балансовая методика расчёта выбросов парниковых газов (ПГ) и её оценочные погрешности подробно описаны в работах [3,4,8,9]. Кратко можно сказать, что это перспективный подход, замкнутый относительно данных спутниковых измерений концентрации (ПГ). Методика опирается на предположение о том, что влияние химических реакций с участием рассматриваемого ПГ на его концентрацию в атмосфере пренебрежимо мало на выбранном интервале наблюдений. В этом случае из закона сохранения вещества следует, что изменение содержания ПГ в замкнутом объёме атмосферы возможно только за счёт его притока (оттока) через граничную поверхность этого объёма. Если мы знаем поток вещества через боковые границы области и изменение содержания газа внутри области, то можно вычислить поток через нижнюю границу- границу подстилающая поверхность – атмосфера. Содержание газа внутри области нам известно непосредственно из спутниковых измерений интегрального содержания газа, а горизонтальный поток через границы рассчитывается с помощью алгоритмов анализа оптического потока [12,16]. Для расчёта горизонтальных потоков используется последовательный во времени ряд глобальных суточных композитов интегрального содержания газа TROPOMI, который рассматривается как видеоряд последовательных изображений и может быть обработан методами технического зрения. В результате получается плотная сетка векторов смещения пикселей данных, которые имеют физический смысл горизонтального перемещения газа и могут быть пересчитаны в поток.

Данная методика уже была отработана на примере крупных лесных пожаров [7] и показала случайную погрешность оценки баланса угарного газа менее 30%.

Для применения данной методики к данным TROPOMI по NO<sub>2</sub> суточные композиты, полученные из ЦКП «ИКИ – Мониторинг» были пересчитаны на регулярную координатную сетку с ячейкой 0,25x0,25 градуса и предварительно обработаны по методике, подробно описанной в работах [2,8], в результате чего были получены продукты расчёта атмосферной динамики по содержанию диоксида азота [10].

Далее были отобраны крупные источники загрязнений (КИЗ) в виде крупных городов РФ (таблица 1) [5], для которых по прямоугольной границе 2x2 градуса по балансовой методике были рассчитаны ежесуточные балансы за период с 1.05.2018 по 31.08.2025.

Стоит отметить, что диоксид азота быстро распадается в атмосфере и его время жизни составляет от нескольких часов до суток, в зависимости от температуры, влажности и освещённости [5,17]. Этот факт представляет трудность для балансовой методики, поскольку на данный момент она пренебрегает химическими превращениями

внутри исследуемой области. Распад газа предположительно приведёт к заниженным значениям расчётного баланса

**Таблица 1. Список городов – КИЗ, используемых в работе**

Город	ID
Москва	1
Санкт-Петербург	2
Липецк	3
Воронеж	4
Старый Оскол	5
Краснодар	6
Пермь	7
Магнитогорск	8
Омск	9
Барнаул	10
Ачинск	11
Красноярск	12
Казань	13
Уфа	14
Тюмень	15
Белгород	16
Волгореченск	17
Череповец	18
Саратов	19
Сургут	20
Ярославль	21
Невинномысск	22
Орск	23
Чита	24

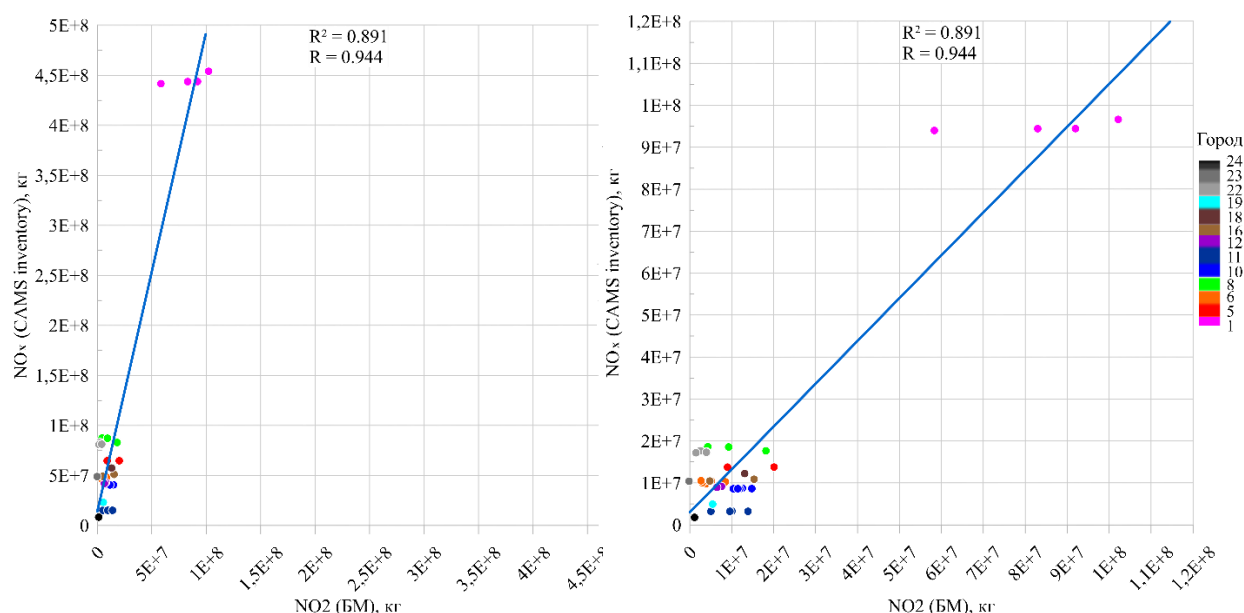
Поэтому было решено на данном этапе работы рассматривать суммарный баланс за холодные месяцы (октябрь – апрель) с 2019 по 2024 год, поскольку зимой время жизни NO<sub>2</sub> существенно больше. Также, были отобраны только случаи, где за исследуемый период наблюдался стабильный рост накопленного баланса NO<sub>2</sub>.

Сравнение полученных результатов проводилось с кадастровыми данными ECMWF CAMS global emission inventories который учитывает эмиссию от 14 типов источников (энергетика, транспорт, агрокомплекс и.т.д). При этом кадастр содержит значения эмиссии не NO<sub>2</sub>, а NO<sub>x</sub> – это создаёт некоторые трудности для количественного сравнения, но связь NO<sub>x</sub> и NO<sub>2</sub> предполагается линейной [13]. Соответственно в конечном итоге сравнивался суммарный баланс NO<sub>2</sub> за зимние месяцы, посчитанный по балансовой методике и суммарная эмиссия NO<sub>x</sub> за тот же период времени из кадастра

### **Результаты**

Всего за период с 1.05.2018 по 31.08.2025 было получено 36 значений суммарного баланса за зимние месяцы, удовлетворяющих условиям отбора. Сравнение между полученными значениями по балансовой методике (БМ) и данными кадастра

выполнялось с помощью регрессии и вычисления коэффициента корреляции Пирсона (рис. 1)



**Рис.1. Сравнение суммарного баланса за зимние месяцы, полученного по балансовой методике (БМ) и по кадастру (слева – без корректирующего коэффициента, справа – с коэффициентом). Номера КИЗ соответствуют таблице 1**

При прямом сравнении (рис.1. – левый) видно, что значения кадастра существенно превышают значения балансовой методики, но при этом между ними имеется хорошая корреляция – 0,89. Коэффициент наклона регрессии – 4,7 может быть вызван тем, что  $\text{NO}_x$  содержит в себе помимо  $\text{NO}_2$  и другие оксиды азота, что приводит к завышению значений кадастра относительно БМ. Также недоучёт балансовой методикой распада  $\text{NO}_2$  может быть причиной занижения оценок баланса. Поделив значения кадастра на 4,7 можно выровнять данные относительно диагонали для более удобного дальнейшего анализа (рис.1. – справа).

Нужно отметить, что суммарная эмиссия от выбранных КИЗ по данным кадастра изменятся очень слабо от года к году -примерно на 1% и погрешности балансовой методики на данный момент превышают это значение. Однако, из рис.1. видно, что точки для отдельных КИЗ группируются достаточно кучно и разброс относительно диагонали большой именно для группы точек. Это говорит о том, что значения полученный по БМ для отдельных городов за разные годы досочно стабильны. Этот факт может говорить о том, что для отдельных КИЗ в балансовую методику можно ввести собственные калибровочные коэффициенты, которые существенно улучшат корреляцию с кадастром. Эти калибровочные коэффициенты, предположительно, можно обосновать значениями средней температуры воздуха, либо освещённостью, но подробно это вопрос будет рассмотрен в последующих работах.

### Заключение

В результате проделанной работы была исследована возможность применения балансовой методики для восстановления выбросов диоксида азота крупным источниками загрязнения по данным TROPOMI. За период с 1.05.2018 по 31.08.2025 был восстановлен суммарный баланс  $\text{NO}_2$  за зимние месяцы для 24 крупных городов РФ. Полученные балансы были сопоставлены с данными эмиссии  $\text{NO}_x$  кадастра ECMWF CAMS global emission inventories. Корреляционный анализ показал, что оценки

балансовой методики неплохо коррелируют с данными кадастра (коэффициент корреляции 0,89), однако данные кадастра систематически - в 4,7 раза превышают оценки балансовой методики. Это может быть вызвано несоответствием эмиссии сравниваемых загрязнителей – NO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>, а так же быстрым распадом NO<sub>2</sub>, который приводит к недооценки по балансовой методике. Также результаты работы показывают, что соответствие результатов расчёта между балансовой методикой и кадастром можно улучшить, введя в балансовую методику поправочные коэффициенты для отдельных КИЗ. Обоснование подбора таких поправочных коэффициентов будет рассмотрено в следующих работах

*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.geosmis.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 Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2025 г. 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. Константинова А. М., Бриль А. А., Лупян Е. А. Оценки выбросов диоксида азота по данным прибора TROPOMI и с учётом метеоусловий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 153-167. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-153-167.
6. 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.
7. 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.
8. Пашинов Е. В., Ермаков Д.М., Втюрин С.А. Повышение точности расчёта эмиссии угарного газа в балансовой методике, основанной на данных спутниковых

- наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С.353-364. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-353-364
9. Пашинов Е. В., Ермаков Д.М., Втюрин С.А. Погрешности расчета баланса угарного газа в атмосфере над территориями крупных пустынь по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С.419-425. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-419-425.
  10. Пашинов Е. В., Втюрин С.А., Бриль А. А., Константинова А. М. Продукты расчёта атмосферной динамики по содержанию диоксида азота на основе спутниковой информации в ЦКП "ИКИ-Мониторинг" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С.431-437. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-431-437.
  11. 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.
  12. 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.
  13. Beirle S., Boersma K. F., Platt U. et al. Megacity emissions and lifetimes of Nitrogen Oxides probed from space // Science. 2011. V. 333. Iss. 6050. P. 1737–1739. DOI: 10.1126/science.1207824.
  14. Granier, C., Darras S., Denier van der Gon H., Doubalova J., Elguindi N., Galle B., Gauss M., Guevara M., Jalkanen J.-P., Kuenen J., Liousse C., Quack B., Simpson D., Sindelarova K The Copernicus Atmosphere Monitoring Service global and regional emissions (April 2019 version) // Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) report, 2019, doi:10.24380/d0bn-kx16.
  15. Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2021, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02. European Space Agency. <https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8>.
  16. Kroeger Till, Timofte Radu, Dai Dengxin, Van Gool Luc. Fast optical flow using dense inverse search // European conference on computer vision. Springer. 2016. P. 471–488.
  17. Lange K., Richter A. Burrows J. P. Variability of nitrogen oxide emission fluxes and lifetimes estimated from Sentinel-5P TROPOMI observations // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. Iss. 4. P. 2745 —2767.
  18. Tadic I., Nussbaumer C.M., Schlager H., Marno D., Martinez M., Marafioti A., Hofzumahaus A., Crowley J.N., Harder H., Ernst L., Fischer H. 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. 22. Iss. 4. P. 8195–8214. DOI:10.5194/acp-21-8195-2021.