

## Оценки выбросов диоксида азота по данным прибора TROPOMI и с учётом метеоусловий

А. М. Константинова, А. А. Брилль, Е. А. Лупян

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*E-mail: konstantinova@d902.iki.rssi.ru*

Рассматривается проблема объективного мониторинга выбросов диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) от крупных источников загрязнения на территории России с использованием спутниковых данных прибора TROPOMI (*англ.* Tropospheric Monitoring Instrument) спутника Sentinel-5P (*англ.* Sentinel-5 Precursor). Особое внимание уделено учёту метеоусловий, в частности ветра и температуры, которые существенно влияют на точность оценки интенсивности выбросов. Показано, что игнорирование ветровых выносов может приводить к занижению оценок выбросов до 50 % и искажать сравнительный анализ источников загрязнения. В работе предложена технология коррекции данных с учётом метеоусловий, позволяющая получать сопоставимую информацию о различных источниках загрязнений. Также описывается метод выделения крупных стационарных источников  $\text{NO}_2$  для спутникового наблюдения. Разработанные подходы могут служить основой для постоянного объективного спутникового мониторинга крупных локализованных источников загрязнения атмосферы. Приводятся результаты применения обсуждаемой технологии для анализа некоторых городов на территории России. В работе используются и создаются различные продукты о наблюдениях  $\text{NO}_2$ , формируемые в Центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) на основе данных прибора TROPOMI.

**Ключевые слова:** диоксид азота, загрязнения атмосферы, TROPOMI, малые газовые составляющие, спутниковый мониторинг

Одобрена к печати: 06.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-153-167

### Введение

Проблема объективного мониторинга различных примесей в атмосфере — одна из важных задач экологического мониторинга. В частности, ключевым направлением является контроль выбросов разных крупных источников загрязнений (городов, ведущих промышленных предприятий, транспортной инфраструктуры и т.д.) и сравнение их влияния на окружающую среду. При этом требуется вести постоянный мониторинг таких источников, расположенных в различных регионах. В силу территориальных особенностей России организация такого контроля во многих случаях невозможна без использования технологий спутникового мониторинга. В то же время особенно важно обеспечить получение оценок выбросов от различных источников с учётом условий, в которых проводится их наблюдение, поскольку неоднородность таких условий по территории страны может привести к существенным ошибкам при сравнении источников и анализе их влияния на окружающую среду. Одним из факторов, оказывающим значительное воздействие на наблюдение различных выбросов, безусловно являются метеоусловия. В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с учётом влияния метеоусловий на оценки интенсивности выбросов диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) крупными источниками, и описана схема проведения такого учёта. Также в работе представлены результаты выполнения оценок выбросов  $\text{NO}_2$  для некоторых крупных источников на территории Российской Федерации и показано, что учёт метеоусловий, в первую очередь ветра, существенно влияет как на оценки мощности выбросов, так и на сравнение уровня влияния источников на окружающую среду.

## Диоксид азота и спутниковые данные, используемые для наблюдения его концентрации в атмосфере

Диоксид азота представляется хорошим трассером антропогенного воздействия на атмосферу (Тронин и др., 2019). Этот газ один из наиболее распространённых и опасных загрязнителей атмосферы, который часто присутствует в атмосферном воздухе промышленных городов и мегаполисов. Кроме того, диоксид азота является опасным для человека (Huang et al., 2021), поэтому задачу организации его постоянного, в том числе спутникового, мониторинга можно считать достаточно важной.

Один из наиболее широко используемых источников данных для восстановления концентрации  $\text{NO}_2$  в атмосфере — прибор TROPOMI (*англ.* TROPOspheric Monitoring Instrument) спутника Sentinel-5P ([https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset\\_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-nitrogen-dioxide](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-nitrogen-dioxide)), который 13 октября 2017 г. был выведен на орбиту Земли Европейским космическим агентством ESA (*англ.* European Space Agency). Спектрометр TROPOMI предназначен для мониторинга различных малых газовых составляющих атмосферы. Этот прибор 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. На основе получаемых данных восстанавливается концентрация различных малых газовых составляющих, включая  $\text{NO}_2$ , измеряемая как в тропосферном, так и в стратосферном слое атмосферы, а также в полном вертикальном столбе. Результаты восстановления формируются в том числе в продукты второго уровня NRT (*англ.* NearRealTime), RPRO (*англ.* ReProcessing) и OFFL (*англ.* Offline). Для анализа концентрации, а также построения различных трендов для научных исследований рекомендуется использовать именно данные RPRO и OFFL, поскольку данные продукты содержат значительно лучшую коррекцию данных, в отличие от продукта NRT ([https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset\\_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-nitrogen-dioxide](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-nitrogen-dioxide)). Стоит отметить, что построение продуктов RPRO завершилось в середине июля 2022 г. С августа 2022 г. по настоящее время используются только данные OFFL. Данные прибора доступны с апреля 2018 г. по настоящее время.

В Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) для проведения постоянного мониторинга различных малых газовых составляющих на основе продуктов RPRO и OFFL, получаемых из Европейского центра распространения данных Copernicus (<https://dataspace.copernicus.eu/>), разработана технология построения временных, в том числе ежедневных, карт концентрации малых газовых составляющих (подробно данная технология описана в работе (Бриль и др., 2023)). Для построения таких карт использована информация о качестве данных в каждой точке, поставляемая совместно с набором продуктов в поле «флаг качества». Использование 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. При построении карт в каждой точке выбирались данные лучшего качества. На основе разработанной технологии, возможностей Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) и накопленных в его архивах продуктов обработки прибора TROPOMI был сформирован архив ежедневных карт (временных композитов) за период с 2018 г. по настоящее время. Набор этих данных стал основой для проведения настоящей работы.

Следует также отметить, что в исследовании использовались интегрированные в продукты RPRO и OFFL данные о ветре. В каждой точке измерений прибора доступны две компоненты ветра  $w = (u, v)$ , полученные с помощью пятого поколения атмосферного реанализа (*англ.* ECMWF Reanalysis 5<sup>th</sup> Generation — ERA5, <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>), разработанного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). По двум ветровым компонентам для высоты 10 м рассчитываются модуль скорости и направление ветра. Также в работе использовалась информация о температуре, полученная из дан-

ных реанализа NCEP/NCAR (англ. National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) (<https://gdex.ucar.edu/datasets/d083003/listopt/glade/>).

### Некоторые особенности динамики диоксида азота в атмосфере и влияние на неё метеоусловий

Основные антропогенные источники загрязнения диоксидом азота — автотранспорт и предприятия энергетики. В процессе высокотемпературного сгорания органического топлива происходят реакции двух типов: между кислородом воздуха и азотом в топливе (содержание азота в угле составляет около 1 %, в нефти и природном газе — порядка 0,2–0,3 %) и между кислородом и азотом, содержащимися в воздухе. При этом в атмосферный воздух поступает оксид азота (NO), который в присутствии кислорода и озона трансформируется в диоксид азота NO<sub>2</sub> по схеме:  $\text{NO} + \text{O}_3 = \text{NO}_2 + \text{O}_2$  (Тронин и др., 2019).

В среднем время жизни NO<sub>2</sub> в атмосфере составляет от двух до нескольких часов (Beirle et al., 2011; Lange et al., 2022). Поэтому, работая со спутниковыми данными, обеспечивающими ежедневное покрытие, имеется возможность оценивать текущую концентрацию данного газа, поступающего от достаточно стабильных во времени источников.

Изменение концентрации NO<sub>2</sub> в районах источников определяется фактически двумя основными факторами: его распадом и переносом (вынос из района).

**Распад NO<sub>2</sub>** в основном происходит в результате двух типов реакций (Seinfeld, 1989):

- NO<sub>2</sub> участвует в фотохимических реакциях, которые происходят под воздействием солнечного света. В этих условиях солнечный свет может способствовать образованию озона O<sub>3</sub> на уровне земли, что является частью процесса формирования смога:  $\text{NO}_2 + h\nu = \text{NO} + \text{O}$ , где  $h\nu$  — фотон света;
- реакции NO<sub>2</sub> с водяным паром с образованием азотной (HNO<sub>3</sub>) и азотистой (HNO<sub>2</sub>) кислоты, которые затем оседают на землю в виде кислотного дождя, что может приводить к дополнительному экологическому ущербу:  $2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HNO}_3 + \text{HNO}_2$ .

Эти реакции и время жизни NO<sub>2</sub> во многом определяются освещённостью и температурой в районе источника. При этом с увеличением времени жизни NO<sub>2</sub> естественно должна увеличиваться его концентрация в районе источника загрязнений. Это хорошо видно из данных, приведённых на *рис. 1* (см. с. 156), на котором представлены зависимости среднемесячной концентрации, нормированной на минимальную среднемесячную концентрацию, от среднемесячной температуры для нескольких городов-источников за период с 2018 по 2025 г. Хорошо видно, что при отрицательной температуре наблюдается значительный рост концентрации. Это, в том числе, может объясняться «вымораживаем» водяного пара при отрицательной температуре, что, как следствие, приводит к увеличению времени жизни NO<sub>2</sub>. Следует отметить, что в зимний период, когда температура опускается в районах многих источников и становится отрицательной, также падает и освещённость, что приводит к ещё большему увеличению времени жизни NO<sub>2</sub> и, соответственно, повышению его концентрации в районе источника. Видимо именно этим объясняется то, что при рассмотрении среднемесячной концентрации выбросов в зимний период, включающий в себя позднюю осень, зиму и раннюю весну, наблюдается многократное (до 25 раз) увеличение относительно выбросов в летнее время (*рис. 2а*, см. с. 156). Поэтому выводы некоторых исследований вызывают определённые сомнения (см., например, (Артемов и др., 1993; Асфандиярова и др., 2013; Гусев, Флерко, 2025)), согласно которым резкое повышение концентрации NO<sub>2</sub> в атмосфере связано с началом отопительного сезона и интенсификацией работы теплоэлектростанций, являющихся одним из источников выбросов NO<sub>2</sub>. Видимо, данный рост больше обусловлен понижением температуры и освещённости. Косвенно это подтверждает тот факт, что в данных, полученных по г. Краснодару (см. *рис. 2б*), где практически не бывает отрицательной температуры, а также выше инсоляция даже в зимний период (<https://realsolar.ru/article/solnechnye-batarei/kolichestvo-solnechnoy-energii-v-regionah-rossii/>), такой рост отсутствует.

В заключение обсуждения влияния температуры и освещённости на концентрацию  $\text{NO}_2$  в районах крупных источников отметим, что такие зависимости достаточно сложные и пока нет хорошо разработанного механизма их учёта, поэтому в случаях, когда стоит задача анализа интенсивности различных источников и сравнения их между собой, следует использовать данные, полученные в летние месяцы, в которые влияние обсуждаемых факторов на оцениваемые интенсивности разных источников будет минимально.

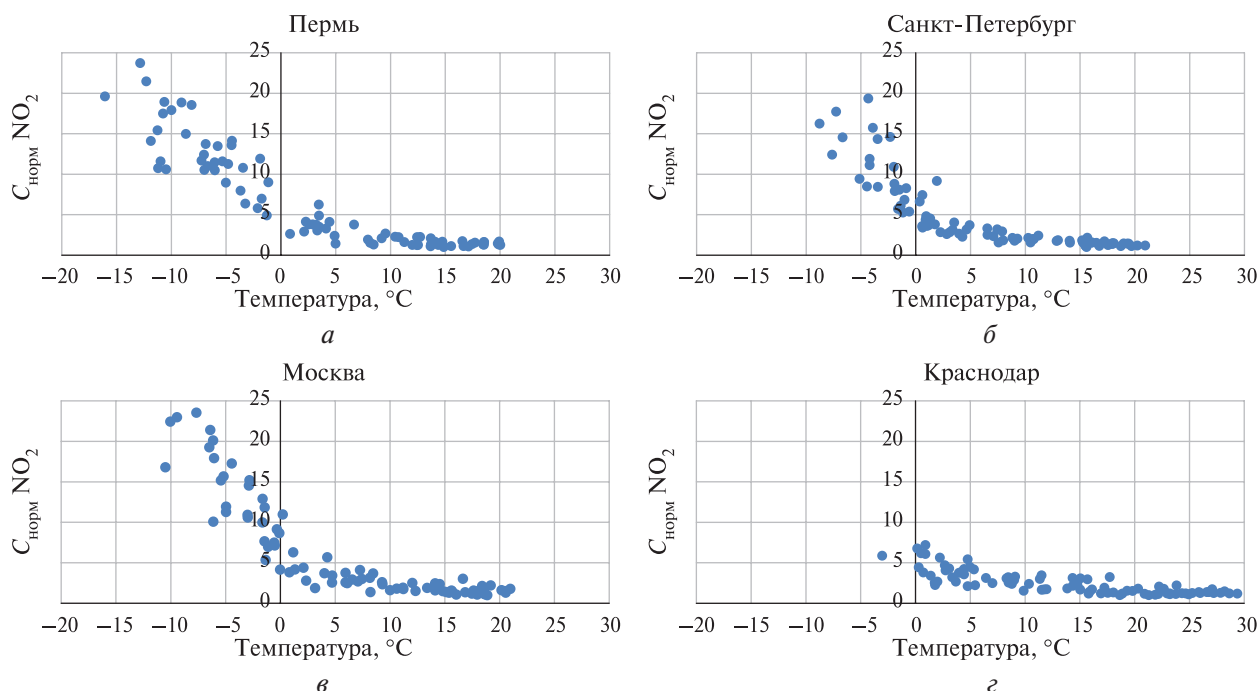


Рис. 1. Нормированная среднемесячная концентрация  $\text{NO}_2$  по данным TROPOMI в зависимости от среднемесячной температуры: а — Пермь, б — Санкт-Петербург, в — Москва, г — Краснодар

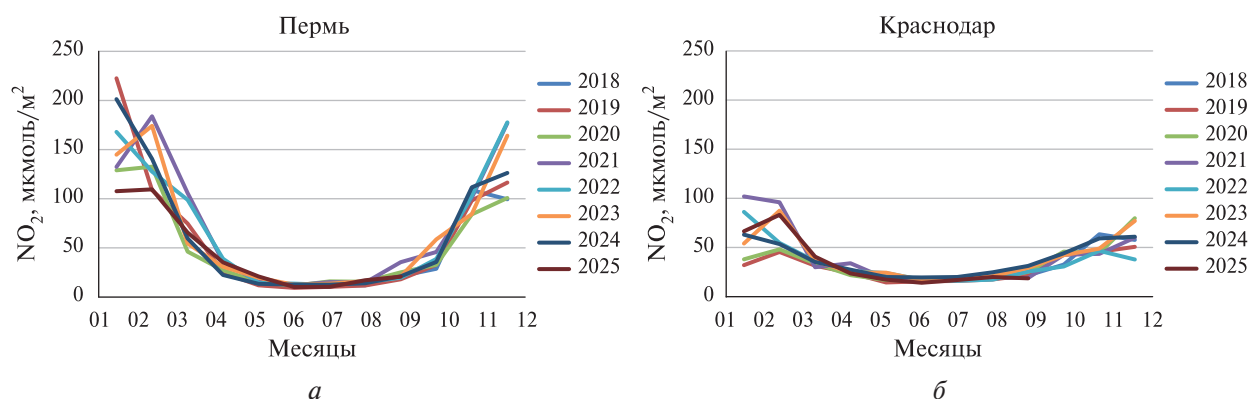


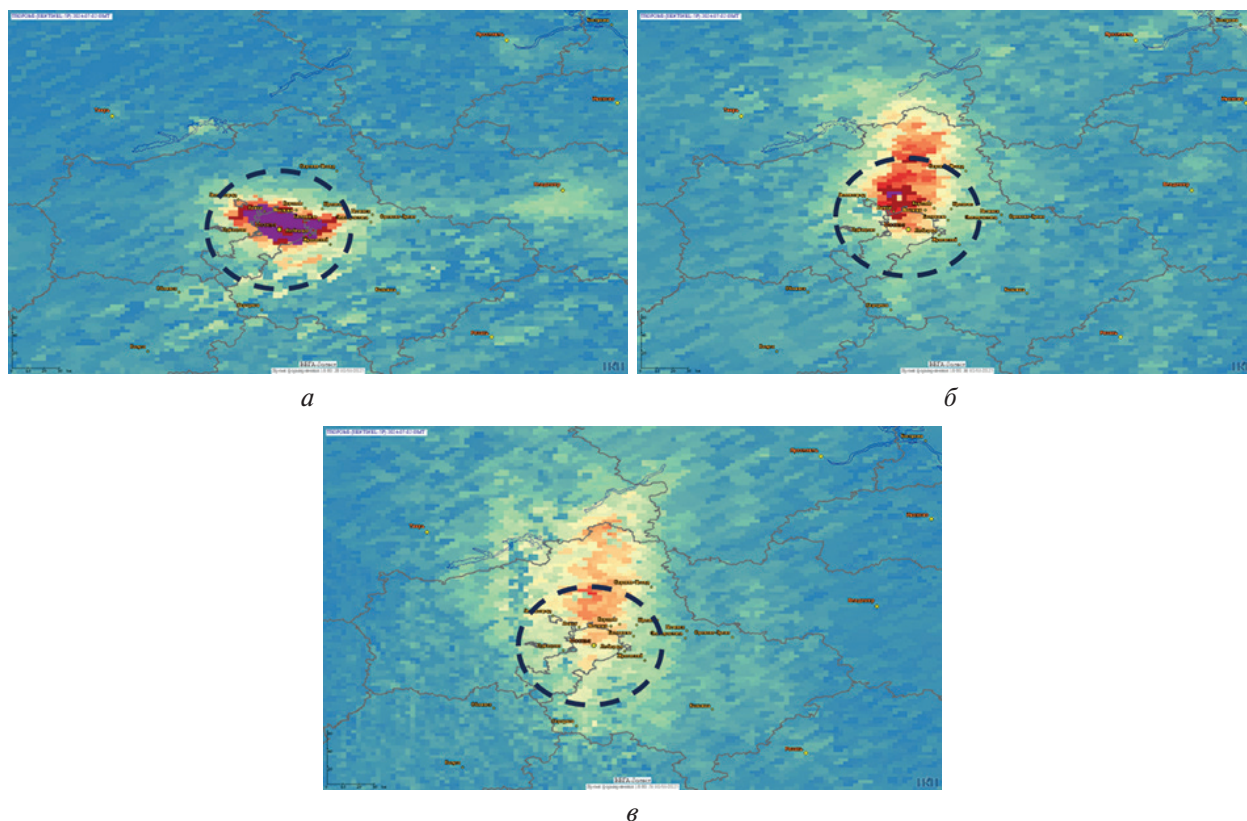
Рис. 2. Среднемесячная концентрация  $\text{NO}_2$  по данным TROPOMI: а — Пермь, б — Краснодар

**Вынос  $\text{NO}_2$  из района источника** определяется двумя факторами: диффузионным переносом и переносом ветрового потока, при этом скорость переноса ветровым потоком обычно значительно выше. Кроме того, в районах разных источников ветровые условия могут существенно различаться, поэтому в данной работе мы остановимся на рассмотрении именно этого фактора, т. е. рассмотрении влияния ветра на изменения концентрации в районе источника и учёте этих изменений при оценке интенсивности источника.

На рис. 3 (см. с. 157) представлены ежедневные карты с разным значением скорости (от 0 до 5 м/с), но одинаковым направлением ветра (на север) в районе Москвы. На представ-



ленных картах хорошо видно изменения пространственного распространения шлейфа  $\text{NO}_2$  в зависимости от увеличения скорости ветра. Поэтому, если мы будем оценивать интенсивность источника на основе расчёта суммарной концентрации в некоторой его окрестности (например, в круге, обозначенном на *рис. 3*), то при одной и той же интенсивности источника, но при разных ветровых условиях мы будем получать разные оценки выбросов, часть из которых не будет соответствовать действительности.



*Рис. 3.* Распределение концентрации  $\text{NO}_2$  в районе Москвы в дни с разной скоростью ветра, но одинаковым направлением (на север): *а* — 0,18 м/с, *б* — 3,48 м/с, *в* — 5,05 м/с

Рассмотрим пример влияния ветровой ситуации на распределение среднесуточной концентрации  $\text{NO}_2$  в районе Москвы. Москва является достаточно стационарным источником, у которого наблюдаются незначительные вариации мощности выбросов, обусловленные, например, изменениями интенсивности дорожного трафика в будние и выходные дни, а также изменениями интенсивности перемещений, например, в период локдауна, вызванного пандемией COVID-19 (Константинова и др., 2024). Для учёта влияния ветра на усреднённые во времени поля концентрации были построены усреднённые за период с 2018 по 2023 г. карты концентрации, соответствующие различным скоростям ветра, представленные на *рис. 4* (см. с. 158). Для этого ежедневные карты со средней концентрацией  $\text{NO}_2$  были сгруппированы для разных диапазонов скорости от 0 до 4 м/с с шагом 1 м/с и более 4 м/с, а также развёрнуты по направлению ветра таким образом, что вектор скорости был направлен на север. Ветер учитывался только в центре источника. На картах хорошо видно значительное влияние скорости ветра на концентрацию загрязняющих веществ, динамику распространения шлейфа и смещение его максимума. Данные наблюдения ещё раз подчёркивают важность учёта скорости ветра при оценке концентрации непосредственно вблизи источника выброса. Схема такого учёта будет предложена нами ниже. Она ориентирована на ежедневную оценку интегральной средней концентрации  $\text{NO}_2$  в окрестности источника, которая полностью покрывает источник (контрольная окрестность, далее КО), корректирование концентрации с учётом текущей ветровой обстановки и оценку общего выброса  $\text{NO}_2$  в анализируемой

окрестности. Применение такого подхода сначала требует выделение для анализа локализованных источников и определение параметров КО, в которых будут проводиться оценки. Этим вопросам будет посвящён следующий раздел работы.

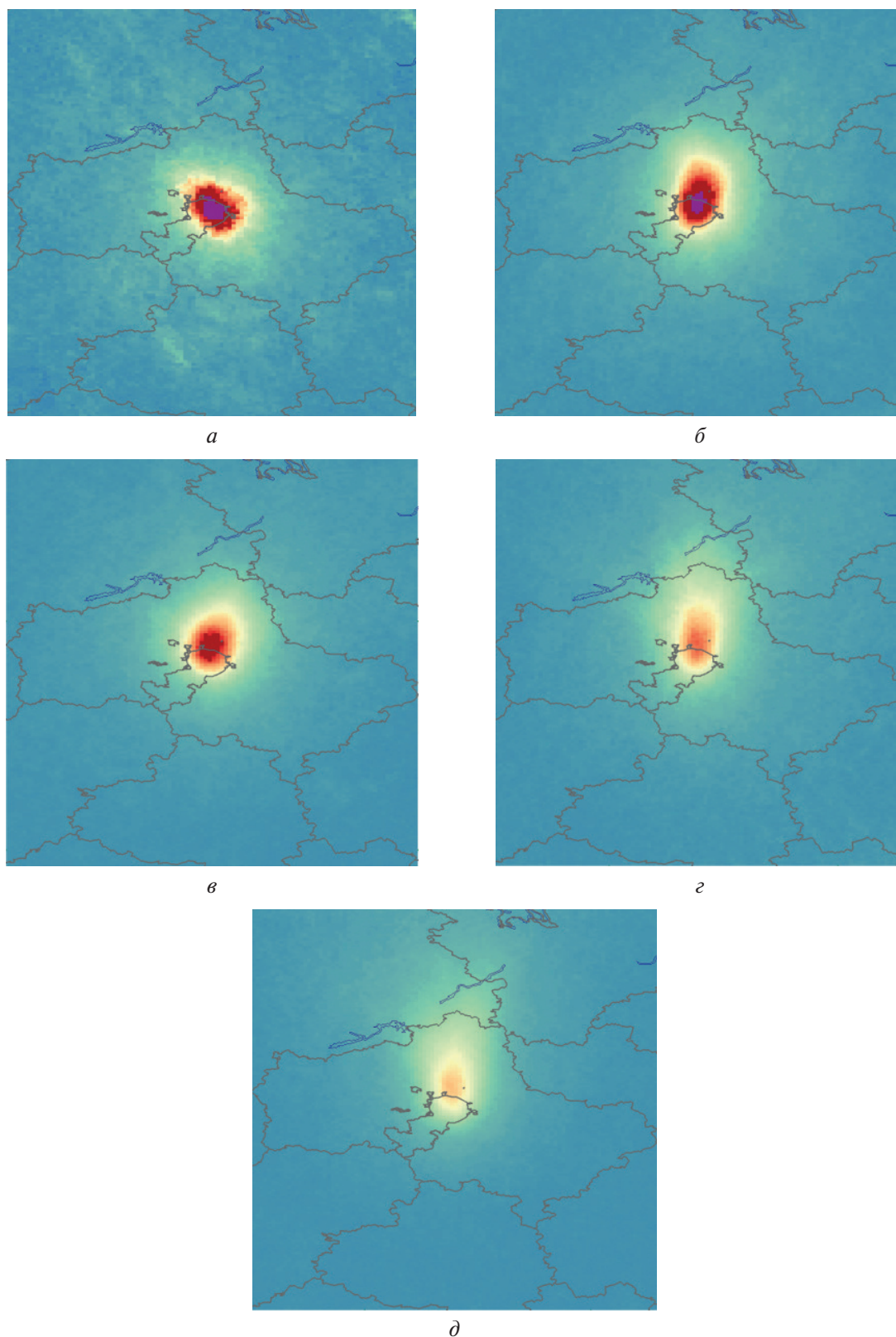


Рис. 4. Средняя концентрация  $\text{NO}_2$  по прибору TROPOMI для источника Москвы за 2018–2023 гг. (май–сентябрь) с шагом скорости ветра 1 м/с: *а* — 0–1 м/с, *б* — 1–2 м/с, *в* — 2–3 м/с, *г* — 3–4 м/с, *д* — более 4 м/с

## Выделения крупных локализованных стационарных источников и контрольных окрестностей для проведения их анализа

Для упрощения решаемой задачи в настоящей работе мы будем рассматривать только локализованные источники, т.е. отдельно стоящие источники, в чьей окрестности нет источников, сопоставимых с ними по мощности, иначе говоря, заметные выбросы от которых могут достигнуть рассматриваемых источников при ветре 5–10 м/с. Это ограничение необходимо для того, чтобы в КО не учитывать выбросы  $\text{NO}_2$ , которые могут быть вынесены в неё от расположенных рядом источников.

Также с учётом анализа многолетнего распределения концентрации  $\text{NO}_2$  в картах, построенных для источников при различном ветре, на наш взгляд, можно считать, что КО может быть выбрана таким образом, что вынос  $\text{NO}_2$  из неё за счёт диффузии пренебрежимо мал по сравнению с ветровым выносом. Кроме того, в случае малых (нулевых) ветров может быть выбрана такая КО в районе конкретного источника, за пределы которой за время своего распада  $\text{NO}_2$  выйти фактически не сможет. Поэтому для выделения источников создано многолетнее «безветренное» композитное изображение со средней концентрацией  $\text{NO}_2$ , в каждом пикселе которого в осреднении учитывались только те измерения, для которых скорость ветра не превышала 1,5 м/с на момент пролёта спутника. Подробно метод построения такого покрытия описан в работе (Бриль и др., 2024). Значение 1,5 м/с выбрано на основе анализа соотношения наличия данных и процента выноса концентрации (см. публикацию (Константинова и др., 2024)). В результате было построено многолетнее композитное изображение на территорию Северной Евразии. На таком изображении удалось локализовать точечные источники выбросов  $\text{NO}_2$ . Для выделения источников и локализации их центров был применён итерационный пороговый алгоритм, заключающийся в выделении кластеров пикселей, значения концентрации в которых превосходит динамически подбираемый для конкретных источников порог. Для этого изначально устанавливается высокий порог, постепенно снижающийся на следующих шагах с исключением кластеров, выявленных на предыдущих итерациях. Это позволило идентифицировать уникальные источники загрязнения различной интенсивности: от городов-миллионников до государственных районных электростанций, угольных разрезов и цементных заводов (Константинова и др., 2024).

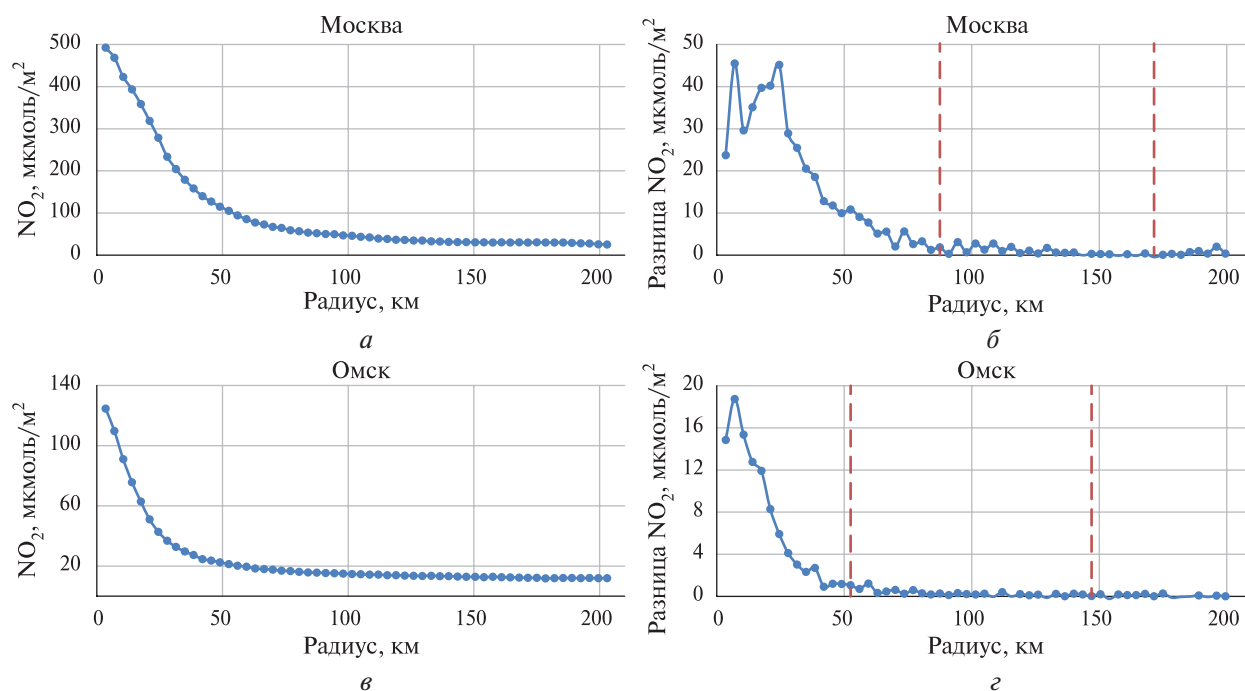


Рис. 5. Средняя концентрация  $\text{NO}_2$  в кольцах и разница её значений от радиуса кольца по «безветренной» карте TROPOMI для Москвы (а, б) и Омска (в, г). Штриховыми линиями обозначены внешние радиусы колец: меньшего и большего



В качестве центра каждого источника был выбран пиксель с максимальной концентрацией в выделенной области. Подтверждением эффективности описываемого подхода можно, в частности, считать тот факт, что полученные таким образом центры источников (пиксели) совпали с географическими центрами крупных источников загрязнений и фактически не наблюдалось ошибочно идентифицированных кластеров.

Для определения границ КО источника были использованы многолетние безветренные композитные изображения со средней концентрацией  $\text{NO}_2$ . Метод определения границ основан на анализе того, как уровень загрязнения уменьшается по мере удаления от центра источника. Для этого анализировалась средняя концентрация  $\text{NO}_2$  в кольцах разного радиуса относительно центра источника и шириной, соответствующей одному пикселю данных TROPOMI. Таким образом были найдены два кольца: меньшего и большего радиусов. Кольцо, для которого разница средней концентрации в соседних кольцах при увеличении радиуса варьируется в диапазоне от 1 до 2 мкмоль, является кольцом меньшего радиуса и определяет границу КО источника. Кольцо, для которого такая разница варьируется в диапазоне от 0 до 0,5 мкмоль, определяет кольцо большего радиуса. При этом КО источника можно считать круг меньшего радиуса. Кольцо большего радиуса будет использовано нами далее для определения верхней границы фонового значения, чему посвящён следующий раздел настоящей работы. На *рис. 5* (см. с. 159) приведена рассчитанная средняя концентрация в кольцах совместно с разницей значений концентрации в соседних кольцах для двух источников: Москвы и Омска.

### Выделение базового уровня загрязнения при анализе крупных локализованных стационарных источников

Для анализа загрязнений от конкретного исследуемого источника необходимо определить «базовый» (стабильный) уровень загрязнения, формирующийся в КО этого источника. Такой базовый уровень загрязнения формируется как за счёт природного фона, т.е. загрязнения, возникающего без влияния антропогенной деятельности человека, так и за счёт диффузии выбросов других антропогенных источников, расположенных «близко» к анализируемому региону. В работе такой базовый уровень загрязнения обозначается общим термином «фон» для конкретного анализируемого источника. Стоит также отметить, что значение фона может существенно различаться для разных анализируемых источников и определяется для каждого из них независимо. Кроме того, следует учитывать, что уровень фона может несколько меняться во времени. Поэтому при проведении анализа использовалось динамическое значение фона на каждый день для каждого источника загрязнения. В качестве такого значения фона выбирался 10-й процентиль в кольце шириной в один пиксель TROPOMI за границами источника, полученными по технологии, описанной выше. Пример такого кольца представлен на *рис. 6* (см. с. 161).

Таблица 1. Динамический фон для г. Омска, усреднённый для разных диапазонов скорости ветра

| Скорость ветра, м/с | Динамический фон, мкмоль/м <sup>2</sup> |
|---------------------|---|
| 0,7                 | 7,6                                     |
| 1,6                 | 6,7                                     |
| 2,5                 | 6,8                                     |
| 3,5                 | 6,0                                     |
| 4,5                 | 6,4                                     |
| 5,5                 | 5,7                                     |
| 6,4                 | 6,2                                     |
| 7,9                 | 5,4                                     |



При этом чтобы исключить влияние крупных выносов за источник, в качестве верхнего уровня, который не должен превосходить значение фона, использовалась средняя концентрация  $\text{NO}_2$ , полученная по безветренному среднемуголетнему композитному изображению в кольце большого радиуса, установленному по технологии, описанной выше. Предложенный подход позволяет определять достаточно устойчивое значение фона для различных источников в зависимости от разной скорости ветра (см., например, *табл. 1*). Выбранные на основе предлагаемого подхода границы КО для исследованных источников приведены на *рис. 7*.

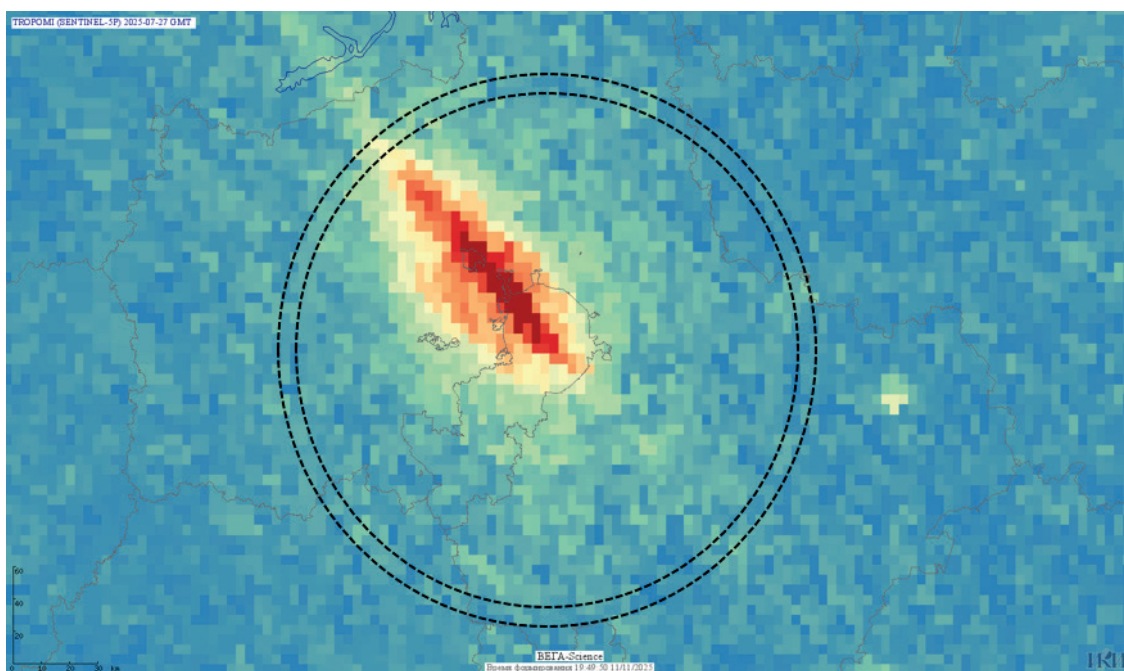


Рис. 6. Шлейф выброса  $\text{NO}_2$  на ежедневных данных TROPOMI, пересекающий кольцо, по которому определяется значение динамического фона. Штриховыми линиями обозначены границы кольца

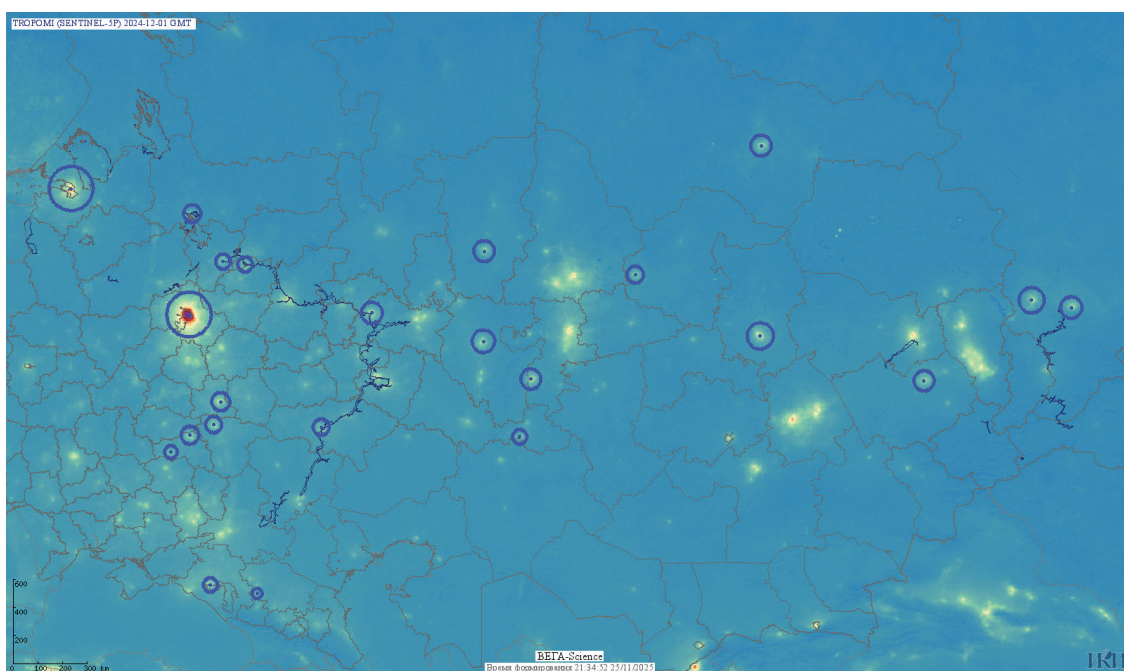


Рис. 7. Исследуемые источники выбросов  $\text{NO}_2$  и границы их КО

## Учёт ветрового выноса диоксида азота из контрольной окрестности источника и оценка интенсивности его выбросов

Под интенсивностью источника в данном контексте и далее будем понимать количественную характеристику содержания  $\text{NO}_2$ , наблюдаемого в КО, которая коррелирует с объёмом выбросов данного источника. Для оценки интенсивности выбросов от изучаемого источника в период наблюдения необходимо иметь информацию о количестве  $\text{NO}_2$ , наблюдаемом в КО, и количестве  $\text{NO}_2$ , которое вышло за неё в результате ветрового выноса. Первая величина может быть просто оценена посредством умножения средней наблюдаемой концентрации  $\text{NO}_2$  в столбе атмосферы над единицей площади на площадь КО (эта величина получается по данным TROPOMI в конкретный момент наблюдения). Вторая величина — на основе анализа падения средней концентрации в КО в зависимости от скорости ветра в момент наблюдения в предположении, что средняя интенсивность выброса из источника является квазипостоянной (в среднем слабо меняющейся на больших временных периодах). То есть фактически для каждого источника необходимо определить зависимость поправочного коэффициента для измеряемой концентрации в КО на ветер  $k(w)$  (где  $w$  — скорость ветра в м/с). Для нахождения такой зависимости для каждого изучаемого источника использовалась среднесуточная (за период с 2018 по 2025 г.) концентрация  $\text{NO}_2$ , наблюдавшаяся в КО источников при различной скорости ветра. При этом при расчёте среднесуточных значений концентрации  $\text{NO}_2$  осуществлялась фильтрация измерений, которые могли быть зашумлены, в том числе из-за высокой облачности. Так, например, в расчёте использовались только те дни, для которых наблюдалось более 50 % значимых пикселей в КО. Фильтрация данных также проводилась отбрасыванием наблюдений, значения концентрации  $\text{NO}_2$  для которых отклонялись более чем на три стандартных отклонения от среднего значения для каждого рассматриваемого интервала скорости ветра.

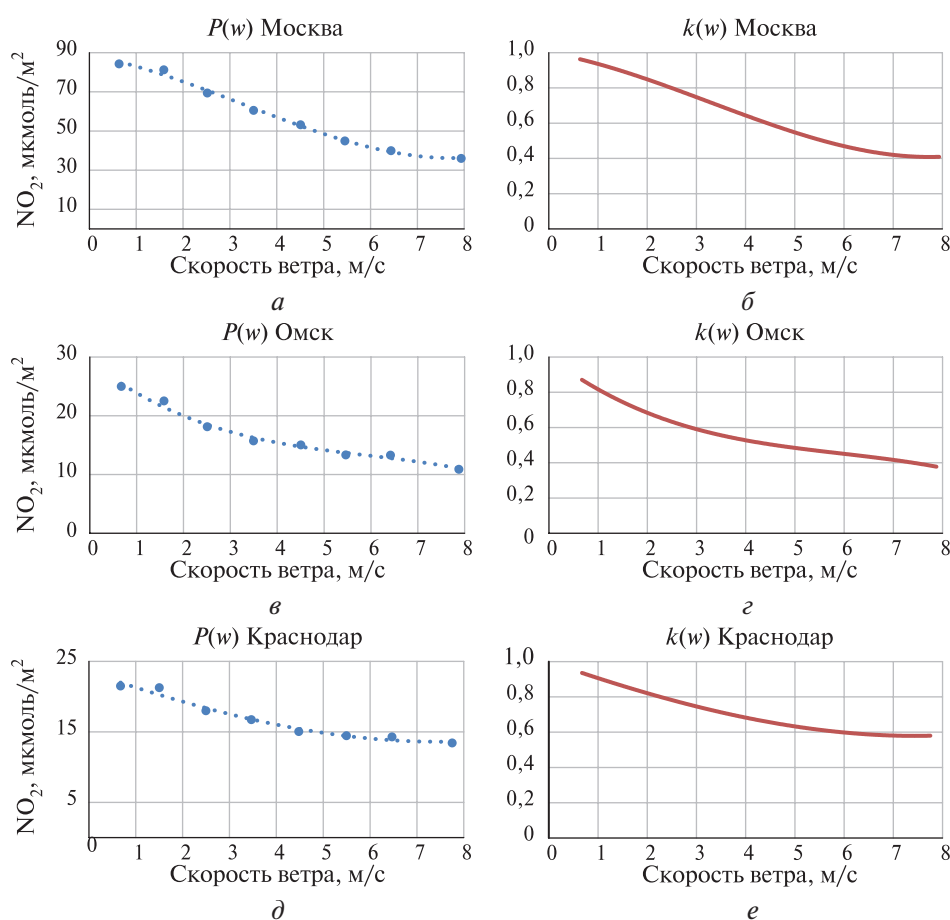


Рис. 8. Зависимости  $P(w)$  и  $k(w)$  для Москвы (а, б), Омска (в, г), Краснодара (д, е)

В результате для каждого анализируемого источника были получены данные для следующих диапазонов скорости ветра с шагом 1 м/с — 0–7 м/с и более 7 м/с. Для полученной таким образом концентрации была построена функция аппроксимации  $P(w)$  с использованием полинома третьей степени. Эта аппроксимирующая функция связывает величину скорости ветра с многолетней средней концентрацией  $\text{NO}_2$  в КО. Применение полиномиальной аппроксимации третьего порядка позволило адекватно описать зависимость средней концентрации  $\text{NO}_2$  от скорости ветра, учитывая нелинейные эффекты. Для установления коэффициента коррекции полученные значения аппроксимирующей функции были нормированы на максимальную концентрацию диоксида азота  $C_{\max}$  (концентрация при нулевом ветре). Таким образом  $k(w) = P(w)/C_{\max}$ . На рис. 8 (см. с. 162) приведены примеры зависимостей среднесуточной концентрации  $\text{NO}_2$   $P(w)$  в КО и построенные на их основе зависимости коэффициентов коррекции от ветра  $k(w)$ .

Следует отметить, что различия полученной зависимости  $k(w)$  связаны как с некоторыми различиями в метеоусловиях, включая структуру преобладающих ветровых потоков в районе анализируемого объекта, так и с особенностями выбора КО, по которой проводится расчёт средней концентрации  $\text{NO}_2$ , включая соотношение площади КО и площади, занимаемой источником.

Интенсивность выбросов  $V_{\text{ист}}$  конкретного источника рассчитывается по уравнению:

$$V_{\text{ист}} = S_{\text{ист}}^* (C_{\text{ср}} - C_{\text{ф}}),$$

где  $S_{\text{ист}}$  — площадь КО источника, вычисляемая по формуле площади круга  $\pi R^2$ ;  $C_{\text{ср}}$  — средняя концентрация в КО;  $C_{\text{ф}}$  — фоновое значение для конкретного источника. С учётом полученных зависимостей  $k(w)$  восстановлена ежедневная интенсивность выбросов  $V_{\text{восст}}$  от каждого источника по выражению:

$$V_{\text{восст}} = V_{\text{ист}} / k(w).$$

### Примеры оценки выбросов диоксида азота для различных локализованных источников на территории РФ

Для оценки значимости учёта ветровых условий при расчёте интенсивности выбросов от различных источников на основе предложенного подхода был выполнен анализ 25 российских городов, характеризующихся различным размером, объёмом выбросов и расположением в районах с неоднородным рельефом и метеорологическими условиями. Список таких городов приведён в табл. 2. Также в табл. 2 представлена интенсивность выбросов, рассчитанная без и с учётом ветровых условий в момент наблюдения. Города упорядочены по убыванию интенсивности, вычисленной с поправкой на ветер. Из приведённых в табл. 2 данных хорошо видно, что учёт ветровых условий может существенно изменить оценки интенсивности выбросов. В некоторых случаях увеличение оценок интенсивности выбросов может достигать до 50 %. Изменения естественно зависят от конкретных условий в регионе и расположения источников, определяющих условия ветрового переноса в нём. Можно, например, обратить внимание, что для городов Красноярск и Невинномысск, расположенных вблизи горных массивов, уровни коррекции достаточно низкие (13 и 14 % соответственно). Это может, в частности, отражать тот факт, что ветровой вынос от этих источников затруднён и загрязнения остаются в районах источников выбросов. Следует также отметить, что учёт ветровых условий приводит и к изменению расположения различных источников в рейтингах по интенсивности выбросов. Ярким примером является г. Магнитогорск, чей рейтинг повысился с 9-го на 5-е место при учёте влияния ветра. Таким образом, можно констатировать, что при решении задач, связанных со сравнением различных источников  $\text{NO}_2$  и их влияния на окружающую среду, необходимо учитывать ветровые условия в зонах их расположения.

Динамика среднегодовой интенсивности выбросов  $\text{NO}_2$  без и с учётом коррекции на ветер для некоторых из проанализированных городов представлена на рис. 9 (см. с. 164). Из приведённых данных видно, что без поправки на ветер значительный объём эмиссии

остаётся неучтённым. Хотя учёт влияния ветра не привёл к принципиальным изменениям в межгодовой динамике выбросов в районах проанализированных городов, в отдельных случаях после проведения коррекции становятся заметны существенные изменения (см., например, Москву 2024 и 2025 гг. или Омск 2021 и 2022 гг.).

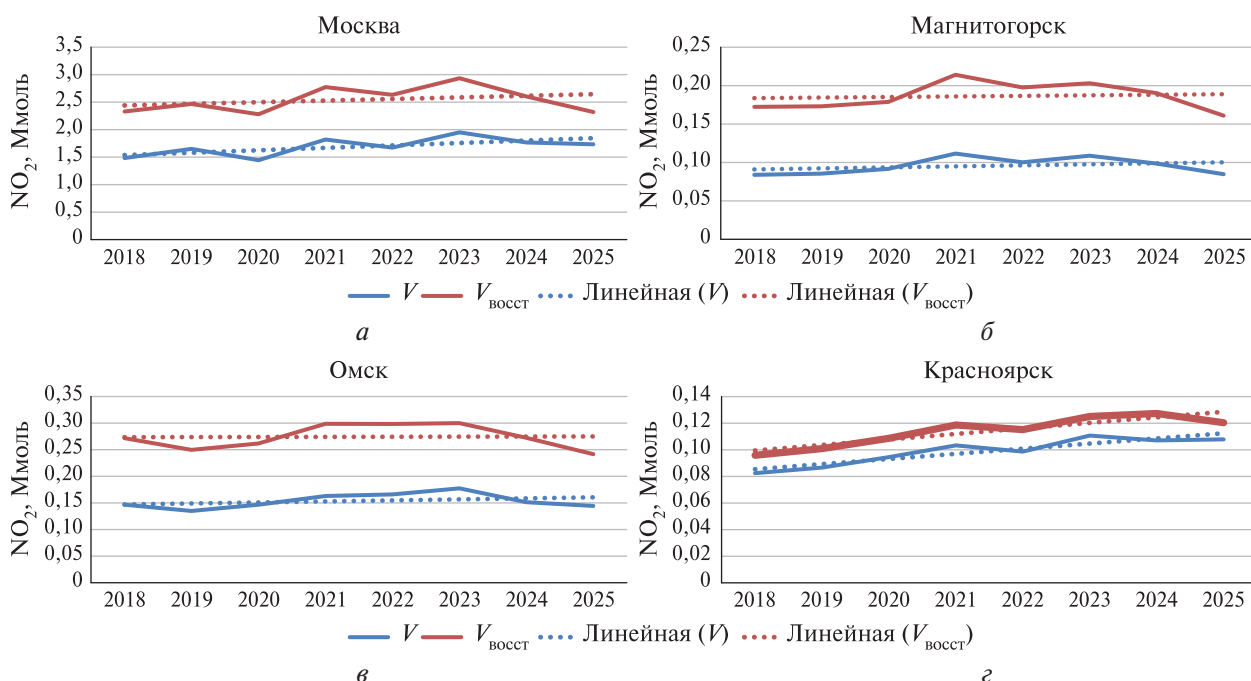


Рис. 9. Среднегодовая интенсивность выбросов  $\text{NO}_2$  по данным TROPOMI с учётом ветра и без него для Москвы (а), Магнитогорска (б), Омска (в) и Красноярска (г)

Таблица 2. Сравнение среднемноголетней интенсивности выбросов  $\text{NO}_2$  от различных городов, оценённой по данным прибора TROPOMI без и с учётом ветровых условий в момент проведения наблюдений

| Город           | Интенсивность выброса, оценённая без учёта ветровых условий $V$ , Ммоль | Интенсивность выброса, оценённая с учётом ветровых условий $V_{\text{восст}}$ , Ммоль | $V/V_{\text{восст}}$ | Номер в рейтинге      |                     |
|-----------------|---|---|----------------------|-----------------------|---------------------|
|                 |   |   |                      | после учёта коррекции | без учёта коррекции |
| Москва          | 1,690   | 2,542   | 0,66                 | 1                     | 1                   |
| Санкт-Петербург | 0,564   | 0,927   | 0,61                 | 2                     | 2                   |
| Омск            | 0,154   | 0,274   | 0,56                 | 3                     | 4                   |
| Ачинск          | 0,157   | 0,221   | 0,71                 | 4                     | 3                   |
| Магнитогорск    | 0,096   | 0,186   | 0,51                 | 5                     | 9                   |
| Уфа             | 0,111   | 0,155   | 0,71                 | 6                     | 5                   |
| Барнаул         | 0,103   | 0,155   | 0,66                 | 7                     | 6                   |
| Казань          | 0,100   | 0,149   | 0,68                 | 8                     | 7                   |
| Пермь           | 0,072   | 0,131   | 0,55                 | 9                     | 13                  |
| Липецк          | 0,088   | 0,126   | 0,69                 | 10                    | 10                  |
| Старый Оскол    | 0,079   | 0,124   | 0,64                 | 11                    | 11                  |
| Красноярск      | 0,099   | 0,114   | 0,87                 | 12                    | 8                   |
| Череповец       | 0,056   | 0,112   | 0,50                 | 13                    | 18                  |
| Сургут          | 0,062   | 0,104   | 0,60                 | 14                    | 15                  |
| Волгореченск    | 0,053   | 0,102   | 0,52                 | 15                    | 19                  |



| Город        | Интенсивность выброса, оценённая без учёта ветровых условий $V$ , Ммоль | Интенсивность выброса, оценённая с учётом ветровых условий $V_{\text{восст}}$ , Ммоль | $V/V_{\text{восст}}$ | Номер в рейтинге      |                     |
|--------------|---|---|----------------------|-----------------------|---------------------|
|              |   |   |                      | после учёта коррекции | без учёта коррекции |
| Тюмень       | 0,050   | 0,101   | 0,49                 | 16                    | 21                  |
| Краснодар    | 0,074   | 0,100   | 0,74                 | 17                    | 12                  |
| Воронеж      | 0,065   | 0,087   | 0,75                 | 18                    | 14                  |
| Саратов      | 0,060   | 0,081   | 0,74                 | 19                    | 16                  |
| Норильск     | 0,060   | 0,077   | 0,78                 | 20                    | 17                  |
| Орск         | 0,041   | 0,072   | 0,57                 | 21                    | 22                  |
| Белгород     | 0,038   | 0,071   | 0,53                 | 22                    | 23                  |
| Ярославль    | 0,050   | 0,071   | 0,70                 | 23                    | 20                  |
| Чита         | 0,022   | 0,030   | 0,72                 | 24                    | 25                  |
| Невинномысск | 0,026   | 0,030   | 0,86                 | 25                    | 24                  |
| Итого        | 3,970   | 6,145   | 0,65                 |                       |                     |

### Заключение

Таким образом, в работе показано, что для анализа выбросов  $\text{NO}_2$  от различных локализованных источников необходимо учитывать метеорологические условия в районах их КО, в первую очередь температуру и скорость ветра. В частности, показано, что отсутствие учёта ветровых выносов может приводить к значительному занижению оценок интенсивности выбросов от источников (до 50 %). Также показано, что игнорирование метеоусловий при таких оценках ограничивает возможность их корректного использования для формирования объективных рейтингов наблюдаемых источников по уровню загрязнения.

В работе предложена технология мониторинга источников загрязнения на основе ежедневных данных TROPOMI, обеспечивающая получение сопоставимой информации для различных источников за счёт коррекции данных с учётом ветровых условий в каждый момент получения измерения. Показано, что для корректного сравнения необходимо дополнительно учитывать температурные условия, ограничивая анализ периодами с устойчивой положительной температурой. В работе также представлен метод выделения крупных стационарных источников  $\text{NO}_2$ , мониторинг которых реализуется с помощью предложенной технологии. Таким образом, разработанные подходы могут служить основой для постоянного объективного спутникового мониторинга крупных локализованных источников загрязнения атмосферы.

Перспективными направлениями развития предложенных технологий могут в первую очередь быть развитие методов коррекции оценок с учётом температурного фона в моменты проведения наблюдений, а также разработка методов проведения анализа не локализованных (близко расположенных к другим) источников.

Работа выполнена с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» Минобрнауки (госрегистрация № 122042500031-8), и при поддержке темы «Эмиссия» (госрегистрация № 125111112878-8).

### Литература

1. Артемов В. М., Николаев Н. А., Фридман Ш. Д. Дистанционный мониторинг загрязнения атмосферы и выбросов на урбанизированных территориях // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 130–144.

2. Асфандиярова Л. Р., Панченко А. А., Юнусова Г. В. и др. Экологический анализ содержания загрязняющих веществ в воздушном бассейне промышленного города (на примере оксидов азота в г. Стерлитамак республики Башкортостан) // Вестн. Тюменского гос. ун-та. 2013. № 12. С. 182–188.
3. Бриль А. А., Константинова А. М., Луян 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.
4. Бриль А. А., Луян Е. А., Константинова А. М. и др. Новые информационные продукты о распределении диоксида азота с учётом ветровых условий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 301–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-301-307.
5. Гусев А. П., Флерко Т. Г. Дистанционный индикатор риска загрязнений атмосферы (TROPOMI air quality index) при мониторинге трансграничных воздействий // Учёные записки Крымского федер. ун-та имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2025. Т. 11 (77). № 2. С. 120–129.
6. Константинова А. М., Бриль А. А., Луян Е. А. и др. Возможности использования технологии объектного мониторинга для анализа концентраций диоксида азота в атмосфере крупных источников загрязнений // Вычисл. технологии. 2024. Т. 29. № 3. С. 92–102. DOI: 10.25743/ICT.2024.29.3.008.
7. Луян 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.
8. 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.
9. 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.
10. Huang S., Li H., Wang M. et al. Long-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: A systematic review and meta-analysis // Science of the Total Environment. 2021. V. 776. Article 145968. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145968.
11. 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. 5. P. 2745–2762. DOI: 10.5194/acp-22-2745-2022.
12. Seinfeld J. H. Urban air pollution: State of the Science // Science. 1989. V. 243. Iss. 4892. P. 745–752. DOI: 10.1126/science.243.4892.745.

## Estimates of nitrogen dioxide emissions based on TROPOMI data considering meteorological conditions

A. M. Konstantinova, A. A. Bril, E. A. Loupian

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

The study focuses on objectively monitoring nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) emissions from significant pollution sources throughout Russia, utilizing satellite observations from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) aboard the Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P). Special attention is given to accounting for meteorological conditions, particularly wind and temperature, which significantly affect the accuracy of emission intensity estimates. It is shown that ignoring wind-driven transport can lead to underestimating emissions by up to 50 % and can distort comparative analyses of pollution sources. A data correction technique considering meteorological factors is proposed, enabling comparable information on various pollution sources. The method for identifying large stationary NO<sub>2</sub> sources for satellite observation is also described. The developed approaches can form the basis for continuous objective satellite monitoring of large localized atmospheric pollution sources. Results of applying the discussed technology to analyze several Russian cities are presented. Various NO<sub>2</sub> observation products used and created in this work are developed by the IKI-Monitoring Collective Use Center (<http://ckp.geosmis.ru/>) based on TROPOMI data.

**Keywords:** nitrogen dioxide, atmospheric pollution, TROPOMI, minor gas components, satellite monitoring

Accepted: 06.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-153-167

## References

1. Artemov V. M., Nikolaev N. A., Fridman Sh. D., Remote monitoring of atmospheric pollution and emissions in urbanized areas, *Optika atmosfery i okeana*, 1993, V. 6, No. 2, pp. 130–144 (in Russian).
2. Asfandiyarova L. R., Panchenko A. A., Yunusova G. V. et al., Ecological analysis of pollutant content in the air basin of an industrial city (using nitrogen oxides in Sterlitamak, Republic of Bashkortostan as an example), *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, No. 12, pp. 182–188 (in Russian).
3. 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, V. 20, No. 5, pp. 85–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
4. Bril A. A., Loupian E. A., Konstantinova A. M. et al., New data products on nitrogen dioxide distribution with consideration of wind conditions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 301–307 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-301-307.
5. Gusev A. P., Flerko T. G., Remote indicator of atmospheric pollution risk (TROPOMI air quality index) in monitoring transboundary impacts, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2025, V. 11 (77), No. 2, pp. 120–129 (in Russian).
6. 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, *Computational Technologies*, 2024, V. 29, No. 3, pp. 92–102 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2024.29.3.008.
7. 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.
8. 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.
9. 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, pp. 1737–1739, DOI: 10.1126/science.1207824.
10. Huang S., Li H., Wang M. et al., Long-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: A systematic review and meta-analysis, *Science of the Total Environment*, 2021, V. 776, Article 145968, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145968.
11. 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. 5, pp. 2745–2762, DOI: 10.5194/acp-22-2745-2022.
12. Seinfeld J. H., Urban air pollution: State of the Science, *Science*, 1989, V. 243, Iss. 4892, pp. 745–752, DOI: 10.1126/science.243.4892.745.