

Мониторинг содержания диоксида азота в атмосфере городов Европы и России по спутниковым данным

А. А. Тронин, М. С. Седеева, Г. М. Неробелов, М. П. Васильев

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия

E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

В работе анализируются тенденции изменения среднемесячной концентрации диоксида азота в период с 2005 по 2021 г. в 18 крупных городах в разных географических зонах: в Санкт-Петербурге, Москве, Киеве, Донецке, Хельсинки, Варшаве, Стамбуле, Афинах, Риме, Милане, Барселоне, Мадриде, Париже, Лондоне, Амстердаме, Берлине, Марселе, Стокгольме. Во всех городах концентрация диоксида азота уменьшается со временем, но с разной скоростью. Наивысшая скорость изменения зафиксирована в городах с наибольшими содержаниями газа на момент начального этапа — 2005 г. Выявлена линейная зависимость средней концентрации диоксида азота от численности населения и антропогенных эмиссий по данным базы HTAPv3. Примерно каждый миллион населения крупных городов ответственен за формирование концентрации газа $\sim 200 \cdot 10^{15}$ молекул/см² независимо от географического положения города. Каждые $\sim 10\,000$ т/мес выбросов диоксида азота по базе HTAPv3 генерируют концентрации газа $\sim 500 \cdot 10^{15}$ молекул/см². Используя эти зависимости, можно оценить антропогенные эмиссии источников NO₂ по всей территории страны, опираясь на данные дистанционного зондирования. Результаты исследования также указывают на возможность верификации и коррекции инвентаризационных баз данных эмиссий газа на основе данных спутниковых наблюдений за содержанием диоксида азота в атмосфере.

Ключевые слова: диоксид азота, спутниковое зондирование, OMI, TROPOMI, численность населения, крупные города

Одобрена к печати: 22.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-287-297

Введение

Проблема аэротехногенного загрязнения стоит в Российской Федерации и во всём мире достаточно остро. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) считает, что загрязнение воздуха представляется одной из самых серьёзных экологических угроз для здоровья человека. По данным ВОЗ, в 2019 г. 99 % мирового населения проживало в районах, где уровень загрязнения воздуха превышал значения, установленные в рекомендациях ВОЗ по качеству воздуха ([https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)).

Вариация загрязнителей воздуха меняется от года к году для конкретных стран и городов по-своему. Так, в исследовании (Vohra et al., 2021) показано, что содержание NO₂ (диоксид азота) и PM_{2,5} (мелкодисперсные взвешенные частицы) за 2005–2018 гг. имело тенденцию к уменьшению в Лондоне и Бирмингеме (Англия), но увеличивалось в Дели и Канпуре (Индия). Авторы связывают тенденцию к уменьшению содержания загрязнителей в городах Англии с политикой страны по контролю автомобильных эмиссий. Однако, несмотря на общее уменьшение эмиссий загрязнителей в Англии, всё ещё наблюдаются случаи превышения предельно допустимой среднегодовой концентрации NO₂ и PM_{2,5} в некоторых частях страны. Ситуация с загрязнением воздуха в слое нижней атмосферы промышленных городов Российской Федерации находится на неудовлетворительном уровне, что потребовало принятия специальных мер по борьбе с загрязнением воздуха. В 2018 г. Президент Российской Федерации подписал указ № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», согласно которому до 2024 г. требуется

значительно уменьшить уровень загрязнения воздуха в крупных промышленных городах и обеспечить снижение загрязнения не менее чем на 20 % в наиболее загрязнённых объектах страны. Согласно данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году», количество городов, в которых уровень загрязнения высокий и очень высокий (индекс загрязнения атмосферы ИЗА больше 7), составило 34 (Государственный..., 2021).

Большинство населения Европы и России проживает в городах, и поэтому задача анализа концентраций экотоксикантов в атмосферном воздухе в городских агломерациях представляется весьма актуальной. Диоксид азота выступает важнейшим загрязнителем атмосферного воздуха, так как оказывает токсичное воздействие на организм человека. Основным источником газа — антропогенная деятельность, хотя существуют и природные источники (Seinfeld, Pandis, 2016). Главным антропогенным источником NO_2 на территориях городов становится различный транспорт (в частности, автомобильный). Несмотря на стремление правительств стран к уменьшению выбросов оксидов азота в атмосферу — переход на новый вид топлива, применение катализаторов, внедрение электрического транспорта, подобные действия применяются в разных странах с заметно различающейся скоростью.

По данным отчёта об экологической ситуации в Санкт-Петербурге за 2020 г. (Доклад..., 2021), выбросы оксидов азота от автомобильного транспорта имели тенденцию к увеличению от 2008 к 2018 г. с 35,8 до 39,4 тыс. т/год. Однако в период 2019–2020 гг. эмиссии опустились примерно в два раза — до 16–17 тыс. т/год, что, вероятно, связано с изменением методики расчёта данных эмиссий, как об этом сказано в самом докладе. Отметим, что, судя по всему, эмиссии до 2019 г. не пересчитаны по новой методике, поэтому сложно судить о том, продолжили ли они увеличиваться или действительно уменьшились в период 2019–2020 гг. Такая же картина наблюдается и в Москве: объём выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от автомобильного транспорта с 2018 по 2019 г. уменьшился почти в три раза — с 933,9 тыс. т в 2018 г. до 334,4 в 2019 г. Отметим, что количество единиц транспорта в Санкт-Петербурге неизменно увеличивалось с 2008 по 2020 г. (примерно на 25,4 %), а прирост транспорта в период 2018–2020 гг. составил около 3,2 % (относительно количества транспорта в 2008 г.).

В последние десятилетия развивающиеся методы спутникового зондирования используются в том числе для измерения содержания NO_2 как во всём атмосферном столбе, так и в выделенных слоях (например, в тропосфере). Из известных приборов, позволяющих получить информацию о содержании NO_2 в атмосфере, можно выделить спектрометр OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument), спутник Aura; GOME (*англ.* Global Ozone Monitoring Experiment), ERS-2 (*англ.* European Remote-Sensing Satellite); GOME-2, MetOp-A и MetOp-B (*англ.* Meteorological Operational satellite programme); SCIAMACHY (*англ.* SCanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography), Envisat (*англ.* Environmental Satellite) и, наконец, TROPOMI (*англ.* TROPOspheric Monitoring Instrument), Sentinel-5P. Последний прибор отличается от прочих высоким пространственным разрешением (примерно до $3,5 \times 7$ км). В исследовании (Тронин и др., 2019) показано, что общее содержание NO_2 по данным измерений OMI за период 2005–2017 гг. имеет выраженную тенденцию к уменьшению в крупных городах России — Москве и Санкт-Петербурге. В более раннем исследовании (Ialongo et al., 2014), используя данные о тропосферном NO_2 по измерениям прибором OMI, авторы показали, что среднее содержание газа за период с 2005 по 2011 г. примерно в два раза больше в Санкт-Петербурге, чем в Хельсинки (Финляндия) и Стокгольме (Швеция). В работах (Тронин и др., 2021; Fioletov et al., 2022) данные спутниковых измерений NO_2 сенсором TROPOMI использовались, чтобы продемонстрировать уменьшение содержания газа в городах разных стран, связанное с ограничительными мерами в период коронавирусной инфекции (COVID-19). В исследовании (Sedeeva et al., 2021) сопоставление тропосферного NO_2 по данным спутниковых измерительных систем (GOME, GOME-2, SCIAMACHY, OMI) за период 2005–2017 гг. показало заметные различия между содержанием NO_2 в Санкт-Петербурге и Ленинградской обл. по данным отличающихся друг от друга измерительных систем.

Цель настоящей работы заключается в анализе распределения диоксида азота в атмосфере городов Европы и России за последние 17 лет и его связи с численностью населения и источниками газа на земной поверхности.

Данные и методы

Для анализа концентрации диоксида азота над городами Европы были использованы среднемесячные значения концентрации тропосферного диоксида азота, измеряемые прибором OMI на борту спутника Aura, с использованием сервиса NEO (*англ.* NASA Earth Observations; NASA — National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) (<https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>). Среднемесячные данные с октября 2004 г. по декабрь 2021 г. имеют пространственное разрешение 3600×1800 пикселей, что примерно соответствует $0,1^\circ$ на земной поверхности, и единицы измерения $\times 10^{15}$ молекул/см². Данные наблюдений были получены в формате GeoTIFF, после фильтрации загружались в ГИС (геоинформационная система) ArcGIS, где и проводился расчёт концентрации. На *рис. 1* приведена карта Европы с результатами спутниковых наблюдений за концентрациями диоксида азота.

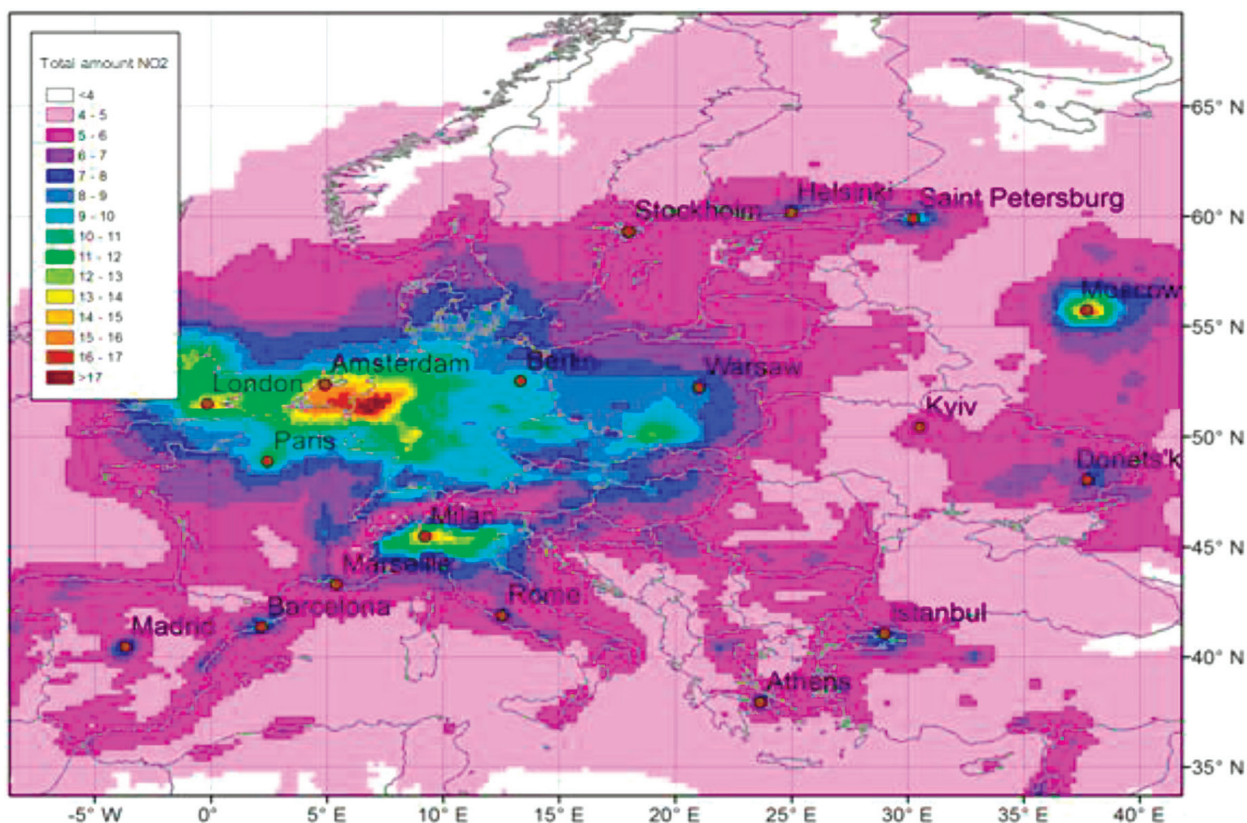


Рис. 1. Средняя концентрация диоксида азота в период с 2004 по 2014 г., $\times 10^{17}$ молекул/см²

Вычисление концентрации газа в столбе атмосферы над городом требует знания площади города. Определение этого параметра оказалось нетривиальной задачей. Опыт предыдущих исследований (Тронин и др., 2009) и анализ границ муниципальных образований показали, что, во-первых, границы городов изменяются и самый яркий пример тому — Москва; во-вторых, часто границы городов не отражают истинного размера агломерации.

Для настоящего исследования был выбран следующий метод расчёта. Из базы данных WCD (*англ.* World Cities Database) (<https://simplemaps.com/data/world-cities>) были выбраны

18 крупных европейских и российских городов из разных географических зон: Санкт-Петербург, Москва, Киев, Донецк, Хельсинки, Варшава, Стамбул, Афины, Рим, Милан, Барселона, Мадрид, Париж, Лондон, Амстердам, Берлин, Марсель, Стокгольм.

Из базы WCD были получены географические координаты центров городов. Для всех городов были рассчитаны среднемесячные значения концентрации NO_2 в столбе атмосферы с октября 2004 г. по декабрь 2021 г. в радиусе 25 км от центра города. Численность населения городов также извлекалась из базы WCD и рассчитывалась с использованием сервиса NEO в радиусе 25 км от центра города. База данных WCD содержит информацию о численности населения в пределах административных границ городов. NEO предоставляет такие данные в виде географически привязанного изображения, где каждому пикселю размером 2,5 угл.мин соответствует некоторое количество людей, проживающих в пределах этого участка. С использованием данных о границах городов вычислялась численность населения по базе NEO.

Данные об эмиссиях NO_2 от различных антропогенных источников для исследуемых городов были извлечены из инвентаризационной базы данных HTAPv3 (*англ.* Emissions Database for Global Atmospheric Research) (https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_htap_v3). База HTAPv3 представляет собой данные об антропогенных эмиссиях различных газовых и аэрозольных загрязнителей с пространственно-временным распределением на глобальном масштабе. Она сформирована при помощи информации об антропогенной активности, которая в той или иной степени детальности распространяется правительствами стран. База может использоваться для моделирования процессов переноса газов, в том числе и диоксида азота. Пространственное разрешение данных составляет $0,1^\circ$, они покрывают период с 2000 по 2018 г. с временным разрешением в один месяц. Источники разделены на 15 категорий, среди которых представлены различные виды транспорта, население, промышленность и сельское хозяйство. Данные с источниками эмиссий представлены в формате NetCDF. Эти данные также были пересчитаны в эмиссии NO_2 в радиусе 25 км от центра города.

Результаты

В результате анализа спутниковых данных были получены среднемесячные значения концентрации диоксида азота для 18 городов. В качестве примера в *табл. 1* представлены результаты для Москвы. Пустые поля в таблице означают отсутствие данных.

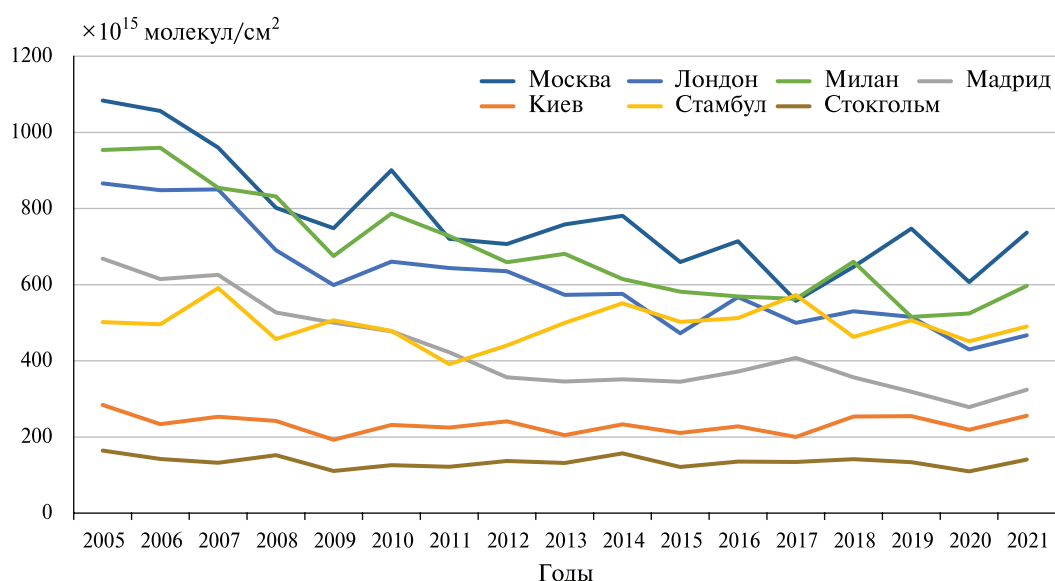


Рис. 2. Средние значения концентрации диоксида азота с апреля по ноябрь в период 2005–2021 гг. в радиусе 25 км от центров городов

Таблица 1. Среднемесячные значения концентрации диоксида азота в радиусе 25 км от центра Москвы ($\times 10^{15}$ молекул/см²)

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2004	—	—	—	—	—	—	—	—	—	961	618	1500
2005	736	—	—	1426	998	678	923	758	1262	1440	1185	1066
2006	1500	—	—	1400	1136	987	924	1179	822	1078	926	861
2007	1179	1500	1327	998	795	549	658	877	1263	1334	1211	1500
2008	1448		1352	1353	1054	603	609	656	766	735	639	1298
2009	1283			1056	522	315	656	623	1243	802	772	901
2010	—	856	1359	1229	600	321	687	1047	917	1202	1204	1378
2011	—	—	—	1102	604	442	557	718	533	749	1059	686
2012	—	—	—	1076	565	510	510	783	666	824	720	
2013	—	—	—	958	589	503	619	821	1376	573	628	1422
2014	1500	1484	711	1090	519	506	424	573	890	877	1368	723
2015		1500	1207	726	516	364	187	444	1001	734	1304	657
2016	1331	1256	1489	998	514	503	450	436	586	727	1500	1500
2017	1500	—	880	605	423	301	406	444	728	687	866	
2018	518	695	—	722	509	402	426	639	866	690	919	732
2019	—	—	1462	1194	708	563	523	494	770	816	912	670
2020	590	885	1230	531	378	625	451	645	607	844	777	734
2021	769	554	449	743	592	788	654	1091	415	1204	408	637

Анализ полученных значений показал, что для 7 городов из 18 существуют пробелы данных, когда невозможно определить среднемесячную концентрацию газа. На примере Москвы видно, что это главным образом зимние месяцы. Для построения непрерывного временного ряда многолетних данных были отобраны данные измерений за апрель – ноябрь каждого года. В этот период нет пробелов данных ни для одного из городов, поэтому были рассчитаны средние значения концентрации с апреля по ноябрь для каждого города за 17 лет. Результаты для некоторых городов приведены на *рис. 2* (см. с. 290).

Анализ полученных данных показывает общий тренд на сокращение концентрации диоксида азота во всех проанализированных городах (*табл. 2*). Наивысший градиент зафиксирован в Лондоне, Мадриде, Милане и Москве — городах с изначально высокой концентрацией газа. Наименьший градиент отмечен в Киеве, Стамбуле и Стокгольме. Здесь ситуация несколько иная: в Киеве и Стокгольме изначально были невысокие значения концентрации, а в Стамбуле они находились на высоком уровне. Таким образом, можно констатировать, что концентрация диоксида азота падает во всех выбранных городах, но с разной скоростью.

Анализ концентрации в радиусе 25 км от центров городов естественным образом показал различие значений концентрации, обусловленное разным количеством источников диоксида азота на поверхности земли. Логично предположить, что чем крупнее город, тем больше там находится источников и тем выше концентрация газа в атмосфере. Так ли это? Проверим эту гипотезу двумя методами: сравним концентрацию газа с численностью населения и источниками газа из базы НТАРv3. Для начала сравним численность населения городов из базы WCD и концентрацию газа в 2021 г. Диаграмма показана на *рис. 3* (см. с. 292).

На диаграмме видно, что прослеживается некоторая зависимость между численностью населения и концентрацией газа, и можно предположить линейный характер этой зависимости. При этом два города — Амстердам и Милан — «выпадают» из этой зависимости: они имеют высокую концентрацию газа и относительно малую численность населения в базе WCD.

Таблица 2. Градиенты концентрации диоксида азота с апреля по ноябрь 2005–2021 гг. в радиусе 25 км от центров городов, концентрация диоксида азота в 2005 г., численность населения городов в 2021 г.

Город	Градиент, $\times 10^{15}$ молекул/см ² в год	Концентрация NO ₂ в 2005 г., $\times 10^{15}$ молекул/см ²	Численность населения, чел.
Стамбул	–0,5	502	15 154 000
Киев	–0,7	284	2 963 199
Стокгольм	–0,8	165	972 647
Хельсинки	–2,3	184	642 045
Варшава	–3,4	326	1 790 658
Донецк	–4,7	322	929 063
Санкт-Петербург	–5,7	362	5 351 935
Марсель	–6,1	286	870 018
Берлин	–6,6	444	3 644 826
Рим	–7,4	278	2 872 800
Афины	–7,6	354	664 046
Амстердам	–13,3	769	862 965
Барселона	–14,8	515	4 588 000
Париж	–19,5	740	11 020 000
Мадрид	–21,2	669	6 026 000
Москва	–22,9	1084	17 125 000
Лондон	–24,5	866	10 979 000
Милан	–25,1	954	13 66 180

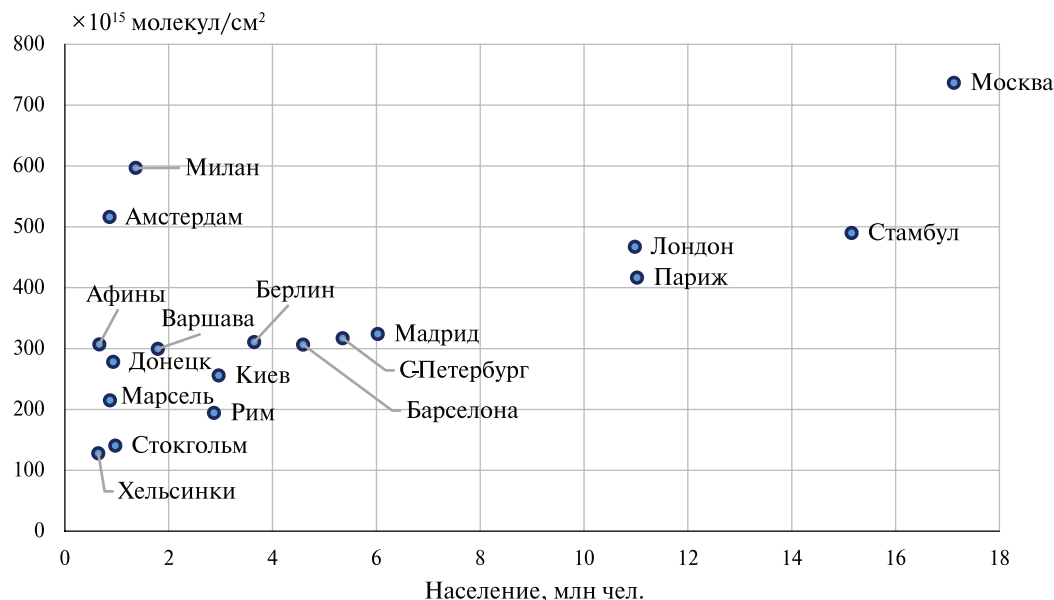


Рис. 3. Численность населения городов из базы WCD и концентрация NO₂ в апреле – ноябре 2021 г.

Сразу отметим, что на рис. 3 представлены измерения концентрации газа в радиусе 25 км от центров городов, а численность населения получена по базе WCD, которая формируется из административного деления территории. Были также выполнены расчёты численности населения в радиусе 25 км от центров городов по данным NASA с использованием сервиса NEO. Результаты сравнения численности населения по данным NASA и концентрациям газа представлены на рис. 4.

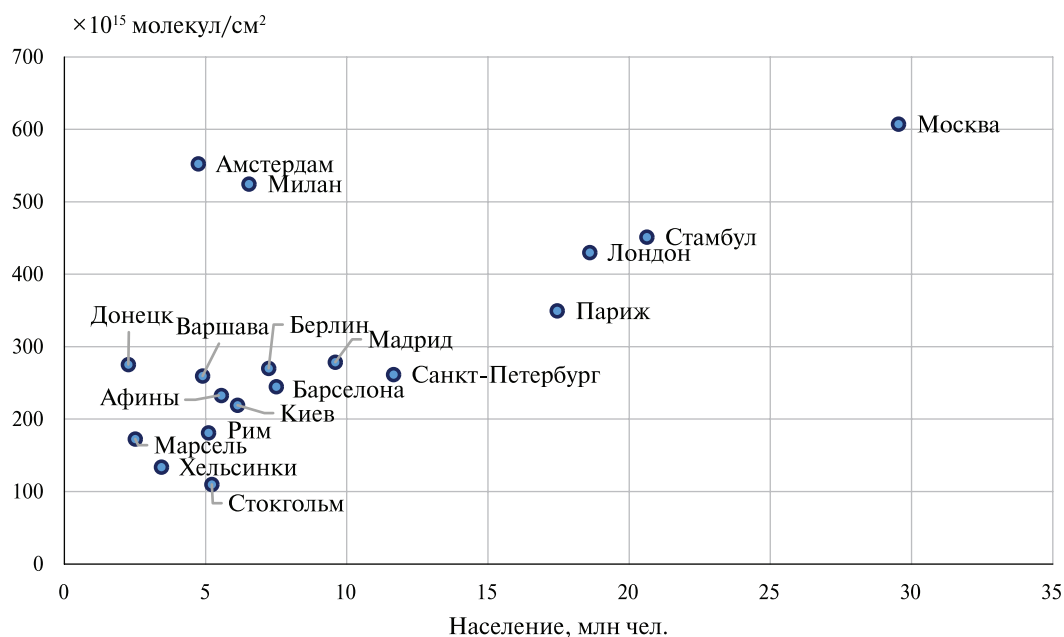


Рис. 4. Численность населения в радиусе 25 км от центров городов по данным NASA и концентрации NO₂ в апреле – ноябре 2020 г.

Сравнивая рис. 3 и 4, отмечаем очевидное сходство зависимостей. Таким образом, можно утверждать, что корректно сравнивать концентрацию газа и численность населения. Отметим, что численность населения по данным NASA явно завышена. Так, по этим данным, в радиусе 25 км от центра Санкт-Петербурга проживало в 2020 г. более 11 млн человек, что значительно превышает численность населения Санкт-Петербурга и Ленинградской обл. вместе взятых. Оценки численности населения по базе данных WCD представляются более реалистичными.

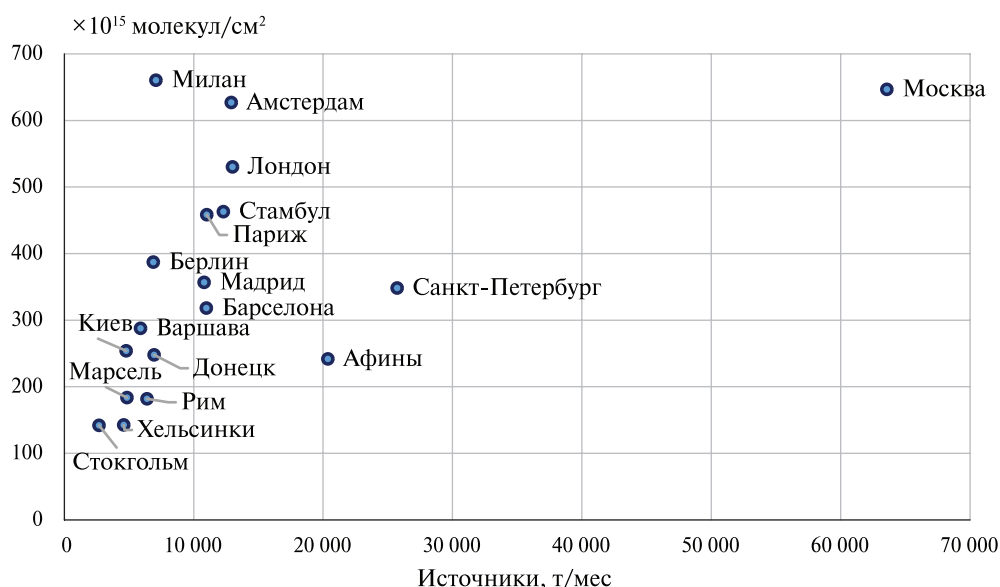


Рис. 5. Антропогенные эмиссии NO₂ по данным HTAPv3 и концентрация газа по данным ОМІ за апрель – ноябрь 2018 г. в радиусе 25 км от центров исследуемых городов

Анализ зависимости концентрации газа от численности населения проанализированных городов показал её линейный характер, за исключением Амстердама и Милана. В чём может

крыться причина высокой концентрации газа в этих городах? Проанализируем данные об антропогенных эмиссиях диоксида азота с территорий исследуемых городов по базе данных HTAPv3 и концентрации газа в атмосфере на основе спутниковых измерений OMI. На *рис. 5* (см. с. 293) показана зависимость концентрации газов от всех доступных антропогенных источников в 2018 г. — самом актуальном году базы данных HTAPv3 на текущий момент.

Анализ *рис. 5* показал явное несоответствие эмиссий NO_2 от антропогенных источников и концентрации газа для отдельных городов. Так, Москва, Амстердам и Милан имеют приблизительно одинаковые величины концентрации газа, но антропогенные эмиссии в Москве превосходят мощности источников в Милане и Амстердаме на порядок. Детальный анализ эмиссий диоксида азота в Москве по базе данных HTAPv3 показал, что доля источников энергетической отрасли составляет 75 %, тогда как в Лондоне — 6 %, Париже — 9 %, Стамбуле — 3 %. Такая ситуация явно не соответствует действительности, так как во всех мегаполисах основным источником диоксида азота является автомобильный транспорт (Государственный..., 2021).

Обсуждение результатов

Средняя концентрация диоксида азота снижается во всех 18 проанализированных городах. На наш взгляд, причина этого кроется в изменении транспортной ситуации в городах, а именно во внедрении экологических стандартов системы Евро, а также переходе от угольной генерации электроэнергии на газовую и возобновляемые источники энергии. Косвенно это подтверждается заметным снижением антропогенных эмиссий диоксида азота от наземного транспорта в базе данных HTAPv3 с 2000 по 2018 г. Аналогичные результаты были получены нами и при анализе трендов содержания диоксида азота в атмосфере субъектов Российской Федерации: в большинстве регионов наблюдается снижение концентрации, а рост концентрации отмечен на Северном Кавказе, в Приморском крае и Еврейской автономной области (Тронин и др., 2019).

Спутниковый мониторинг при помощи прибора OMI за концентрацией диоксида азота в атмосфере крупных городов выявил закономерную зависимость этого показателя от численности населения и транспорта. В некотором смысле транспорт также зависит от численности населения. Таким образом, можно говорить о ключевой зависимости концентрации газа от численности населения. Милан и Амстердам не подчиняются общей тенденции — имеют высокую концентрацию газа и малую численность населения, а также «маломощные» источники. Почему? На наш взгляд, имеет место значительный перенос диоксида азота из соседних областей. Амстердам находится в центре крупной аномалии газа, сформированной в густонаселённой и индустриальной области Западной Европы, охватывающей Бельгию, юг Голландии и запад Германии. Милан также находится в густонаселённой и индустриальной долине р. По на севере Италии. В отличие от Амстердама, находящегося на равнине, Милан находится в долине, закрытой с трёх сторон Альпами и Апенниннами, что, возможно, сдерживает атмосферный перенос и приводит к накоплению загрязнителей.

Изучение источников диоксида азота по базе данных HTAPv3 выявило странные данные об эмиссиях NO_2 от источников, связанных с энергетикой, в Москве и Санкт-Петербурге (*рис. 6*, см. с. 295). Так, из данных базы следует, что выбросы диоксида азота от стационарных источников в Москве (в радиусе 25 км от центра) в 2018 г. составили около 800 тыс. т, тогда как по данным Минприроды (Государственный..., 2021) они составили 32 тыс. т в Москве и 38 тыс. т в Московской обл. Анализ влияния московских теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) на состояние атмосферы города, выполненный Институтом космических исследований РАН (база данных «Ранжировка ТЭЦ Москвы по опасности, создаваемой для районов города», <http://www.iki.rssi.ru/ehips/Moscow/MoscowStep1.htm>), показал, что суммарный выброс диоксида азота всех ТЭЦ Москвы за 1999 г. составил 72 тыс. т. В Санкт-Петербурге эмиссии NO_2 от стационарных источников в 2018 г. составили около 26 тыс. т по данным (Доклад..., 2021), тогда как по данным HTAPv3 — 237 тыс. т. При анализе распределения ис-

точников на поверхности было выяснено, что оно представлено точечными источниками большой мощности. По-видимому, авторы базы данных пытались привязать их к тепловым электростанциям. Очевидно, что данные НТАРv3 имеют существенное завышение эмиссий NO_2 от энергетической отрасли, которые не связаны с реальной ситуацией в 2018 г. и требуют коррекции. В ином случае моделирование переноса диоксида азота и компонент, зависящих от содержания этого газа, например озона, с использованием базы данных НТАРv3 с высоким пространственным разрешением становится некорректным.

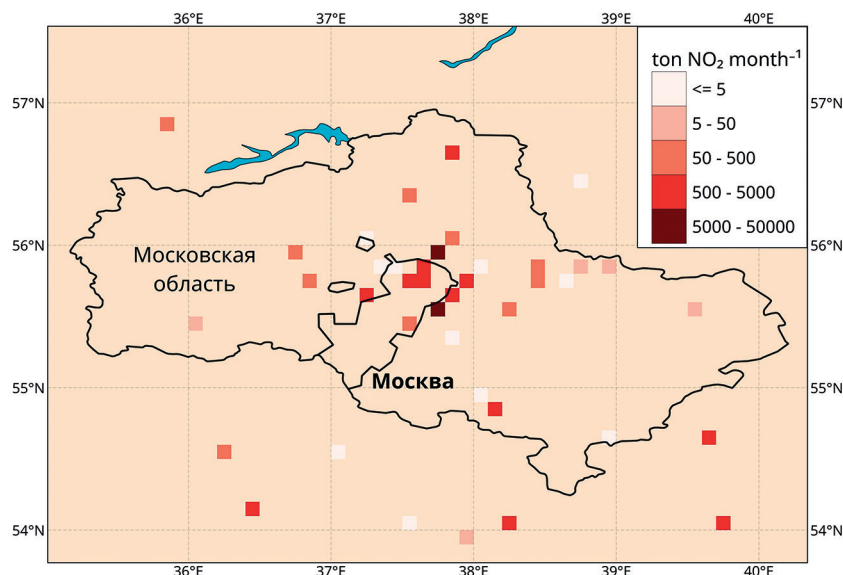


Рис. 6. Источники диоксида азота в Москве и Московской обл., связанные с энергетикой, по базе данных НТАРv3 на 2018 г.

Выводы

Было показано, что среднемесячная концентрация диоксида азота (с апреля по ноябрь) уменьшается во всех 18 городах на интервале с 2005 по 2021 г., но с разной скоростью. Наивысшая скорость изменения концентрации газа зафиксирована в городах с наибольшим содержанием газа на момент начального этапа — 2005 г. Была выявлена линейная зависимость средней концентрации диоксида азота от численности населения и антропогенных эмиссий по данным НТАРv3. Примерно каждый миллион населения крупных городов Европы и России ответствен за формирование концентрации газа $\sim 200 \cdot 10^{15}$ молекул/см², и эта величина не зависит от географического положения города. Каждые $\sim 10\,000$ т/мес выбросов диоксида азота по базе НТАРv3 генерируют концентрации газа $\sim 500 \cdot 10^{15}$ молекул/см². Однако надо отметить, что эти выводы справедливы для крупных городов и промышленных территорий с населением более 1 млн человек.

Используя эти приблизительные значения, можно оценить антропогенные эмиссии источников NO_2 по всей территории страны, опираясь на данные дистанционного зондирования, а не на модельные расчёты. Кроме того, исследование указывает на возможность верификации и коррекции инвентаризационных баз данных эмиссий газа, основываясь также на данных спутниковых наблюдений за содержанием диоксида азота в атмосфере.

Снимки предоставлены группой наблюдения Земли НАСА на основе данных, полученных Локом Ламсалом (англ. Lok Lamsal) из Центра космических полётов имени Годдарда (Goddard Space Flight Center) НАСА и научной группой ОМІ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FFZF-2022-0011 «Научные основы оценки

здоровья экосистем Северо-Запада России и предупреждения угроз экологической безопасности». Номер темы в ЕГИСУ НИОКТР (РОСРИД): 122041100085-8.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. 864 с.
2. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2020 году / под ред. Беляева Д. С., Серебрицкого И. А. Ижевск: ООО «ПРИНТ», 2021. 253 с.
3. Тронин А. А., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Диоксид азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 217–223.
4. Тронин А. А., Крицук С. Г., Киселёв 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.
5. Тронин А. А., Киселёв А. В., Васильев М. П., Седеева М. С., Неробелов Г. М. Мониторинг содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным в условиях пандемии COVID-19 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 309–313. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-309-313.
6. Fioletov V., McLinden C. A., Griffin D., Krotkov N., Liu F., Eskes H. Quantifying urban, industrial, and background changes in NO₂ during the COVID-19 lockdown period based on TROPOMI satellite observations // Atmospheric Chemistry Physics. 2022. V. 22. P. 4201–4236. <https://doi.org/10.5194/acp-22-4201-2022>.
7. Ialongo I., Hakkarainen J., Hyttinen N., Jalkanen J.-P., Johansson L., Boersma K. F., Krotkov N., Tamminen J. Characterization of OMI tropospheric NO₂ over the Baltic Sea region // Atmospheric Chemistry Physics. 2014. V. 14. P. 7795–7805. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7795-2014>.
8. Sedeeva M., Tronin A., Nerobelov G., Panidi E. Variation of Tropospheric NO₂ on the Territories of Saint Petersburg and Leningrad Region According to Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. P. 669–679. <https://doi.org/10.1134/S0001433821200032>.
9. Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2nd ed. 2016. 1152 p.
10. Vohra K., Marais E. A., Suckra S., Kramer L., Bloss W. J., Sahu R., Gaur A., Tripathi S. N., Van Damme M., Clarisse L., Coheur P.-F. Long-term trends in air quality in major cities in the UK and India: a view from space // Atmospheric Chemistry Physics. 2021. V. 21. P. 6275–6296. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6275-2021>.

Monitoring of nitrogen dioxide content in the atmosphere of cities in Europe and Russia using satellite data

A. A. Tronin, M. S. Sedeeva, G. M. Nerobelov, M. P. Vasiliev

*Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru*

The paper analyzes the trends in the average monthly concentrations of nitrogen dioxide in the period from 2005 to 2021 in 18 large cities in different geographical areas: Saint Petersburg, Moscow, Kyiv, Donetsk, Helsinki, Warsaw, Istanbul, Athens, Rome, Milan, Barcelona, Madrid, Paris, London, and Amsterdam. It was found that in all cities the concentration of this gas decreases, but at different rates. The highest rate of change was recorded in cities with the highest gas content at the time of the initial stage — 2005. A linear dependence of the average nitrogen dioxide concentration on the population and anthropogenic emissions was revealed according to HTAPv3 data. Approximately every million of the population of large cities is responsible for the formation of a gas concentration of $\sim 200 \times 10^{15}$ molecules/cm², regardless of the geographical location of the city. Every $\sim 10,000$ tons/month of nitrogen dioxide emissions based on HTAPv3 generate gas concentrations of $\sim 500 \cdot 10^{15}$ molecules/cm². Using

these dependencies, it is possible to estimate anthropogenic emissions of NO₂ sources throughout the country, based on remote sensing data. The results of the study also indicate the possibility of verifying and correcting inventory databases of gas emissions based on satellite observations of the nitrogen dioxide content in the atmosphere.

Keywords: nitrogen dioxide, satellite sensing, OMI, TROPOMI, population, large cities

Accepted: 22.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-287-297

References

1. *State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020"*, Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2021, 864 p. (in Russian).
2. *Report on the environmental situation in Saint Petersburg in 2020*, D.S. Belyaeva, I.A. Serebriy (eds.), Izhevsk: Open Office Org. "PRINT", 2021, 253 p. (in Russian).
3. Tronin A. A., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Nitrogen dioxide in the air basin of Russia according to satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 217–223 (in Russian).
4. Tronin A. A., Kritsuk S. G., Kiselov A. V., Long-term trends in the content of nitrogen dioxide in the air basin of Russia according to satellite data. *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.
5. Tronin A. A., Kiselov A. V., Vasilev M. P., Sedeyeva M. S., Nerobelov G. M., Monitoring of nitrogen dioxide content in the Russian air basin using satellite data during the COVID-19 pandemic, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 309–313 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-309-313.
6. Fioletov V., McLinden C. A., Griffin D., Krotkov N., Liu F., Eskes H., Quantifying urban, industrial, and background changes in NO₂ during the COVID-19 lockdown period based on TROPOMI satellite observations, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2022, Vol. 22, pp. 4201–4236, <https://doi.org/10.5194/acp-22-4201-2022>.
7. Ialongo I., Hakkarainen J., Hyttinen N., Jalkanen J.-P., Johansson L., Boersma K. F., Krotkov N., Tamminen J., Characterization of OMI tropospheric NO₂ over the Baltic Sea region, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2014, Vol. 14, pp. 7795–7805, <https://doi.org/10.5194/acp-14-7795-2014>.
8. Sedeeva M., Tronin A., Nerobelov G., Panidi E., Variation of Tropospheric NO₂ on the Territories of Saint Petersburg and Leningrad Region According to Remote Sensing Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, pp. 669–679, <https://doi.org/10.1134/S0001433821200032>.
9. Seinfeld J. H., Pandis S. N., *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd ed., 2016, 1152 p.
10. Vohra K., Marais E. A., Suckra S., Kramer L., Bloss W. J., Sahu R., Gaur A., Tripathi S. N., Van Damme M., Clarisse L., Coheur P.-F., Long-term trends in air quality in major cities in the UK and India: a view from space, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2021, Vol. 21, pp. 6275–6296, <https://doi.org/10.5194/acp-21-6275-2021>.