Многолетние тренды содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным

А. А. Тронин, С. Г. Крицук, А. В. Киселёв

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

Среди антропогенных загрязнителей атмосферного воздуха большое место занимают оксиды азота (NO_2), роль которых особенно велика в крупных городах и промышленно-транспортных зонах. Области повышенной концентрации этих соединений в атмосферном воздухе распространяются на десятки километров от источников, хотя ветровые шлейфы могут проследиваться в преобладающем направлении ветров на расстоянии до 300–400 км. Современные приборы дистанционного зондирования позволяют отслеживать содержание NO_2 в атмосфере. Основным инструментом для измерения концентрации диоксида азота в столбе атмосферы служат газоанализаторы SCIAMACHY на борту спутника ENVISAT и OMI (AURA). Пространственное разрешение аппаратуры, а также облачность пока не позволяют вести ежедневный мониторинг. Поэтому для анализа содержания NO_2 целесообразно использовать среднемесячные и среднегодовые значения. Анализ полученных данных показывает явную антропогенную приуроченность аномалий диоксида азота. По интенсивности аномалий, их площади можно ранжировать источники газа на городские и промышленные агломерации, районы добычи и переработки углеводородного сырья, в первую очередь угля. Наиболее интенсивные аномалии концентрации газа наблюдаются в Москве, Санкт-Петербурге и Московской области. Кроме распределения диоксида азота по территории России большой интерес представляет изменение концентрации газа во времени. Построены линейные тренды содержания диоксида азота по регионам за период с 2005 по 2017 г. По результатам анализа многолетнего тренда зафиксирована группа регионов в центре Европейской части России, характеризующаяся падением концентрации газа. Наиболее интенсивным падением было в Москве, Санкт-Петербурге и Московской области, т. е. на территориях с самой высокой концентрацией. Отмечается некоторое увеличение концентрации в арктических регионах, но его можно объяснить ошибками восстановления содержания газа в высоких широтах. Отмечен рост концентрации на Северном Кавказе, в Приморском крае и Еврейской АО.

Ключевые слова: диоксид азота, спутник, многолетний тренд

Одобрена к печати: 20.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265

Введение

Среди антропогенных загрязнителей атмосферного воздуха большое место принадлежит оксидам азота, роль которых особенно велика в крупных городах и промышленно-транспортных зонах. Области повышенной концентрации этих соединений в атмосферном воздухе распространяются на десятки километров от источников, хотя ветровые шлейфы могут проследиваться в преобладающем направлении ветров на расстоянии до 300–400 км (Еланский, 2002).

Под общей формулой оксидов азота NO_x обычно рассматривается сумма оксида азота NO и диоксида азота NO_2 . Основным антропогенным источником поступления этих газов в атмосферу является сжигание органического топлива в двигателях внутреннего сгорания автомобилей и на ТЭС. 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_2 по схеме $\text{NO} + \text{O}_3 = \text{NO}_2 + \text{O}_2$. Имеются сведения, что в городских условиях в приземном воздухе между концентрациями оксидов азота NO_x и озона наблюдается значимая обратная корреляция (Белоглазов и др., 2001).

Антропогенные оксиды азота, возникающие в тропосфере, имеют сравнительно малое время жизни и не достигают стратосферы, где сосредоточена основная масса озона (слой на высоте 15–55 км с максимальной концентрацией на уровне 20–25 км), т.е. не несут угрозы для озонового слоя. Опасность для него представляют только оксиды азота, образующиеся непосредственно в стратосфере, а также гемеоксид азота N_2O , возникающий в процессах денитрификации в почве. Соединение N_2O имеет достаточно большое время жизни и может достигать зоны максимальной концентрации озона. В стратосфере N_2O трансформируется в оксид азота и инициирует азотный цикл разрушения озона (Тарасова, Кузнецова, 2007).

В приземном слое атмосферного воздуха равновесие между диоксидом и оксидом азота, в связи с интенсивным поступлением последнего с земной поверхности, отсутствует. По оценке авторов работы (Безуглая, Смирнова, 2008), отношение концентрации диоксида азота NO_2 к суммарной концентрации NO_x (коэффициент трансформации) редко превышает 0,6.

Основным антропогенным источником поступления оксидов азота в тропосферу, как уже было сказано, является сжигание органического топлива (автомобили и другие транспортные средства, ТЭС), а также горение биомассы и лесные пожары. К природным источникам относятся микробиологические процессы в почвах, окисление аммиака, молниевые разряды, поступление из океана и образование в стратосфере. Ориентировочные оценки глобальной эмиссии оксидов азота в атмосферу с разделением антропогенных и природных источников приведены в *табл. 1*. Оценки носят экспертный характер и заметно различаются между собой. Тем не менее эти данные однозначно свидетельствуют о существенном преобладании антропогенных источников поступления в атмосферу оксидов азота, на долю которых в среднем приходится 70–80 % общей эмиссии, при этом около половины общей эмиссии связано с процессами сжигания ископаемого органического топлива.

Таблица 1. Оценки глобальной эмиссии NO_x в атмосферу (миллионы тонн азота в год)

Источники эмиссии	Литература			
	(Seinfeld, Pandis, 2006; Vallero, 2014)	(Кондратьев, Донченко, 1999; Кондратьев и др., 1996)		(Мониторинг..., 1987)
		среднее	диапазон	
Антропогенные				
Сжигание ископаемого топлива	33	22,4	15–25	—
Сжигание биомассы	7,1	10,0	2–20	—
Самолётные выбросы	0,7	0,23	0,1–0,7	—
Лесные пожары	—	0,2	0,1–0,8	—
Природные				
Почвенные процессы	5,6	5,0	1–20	5–8
Окисление аммиака				3–5
Молниевые разряды	3,0	10	2–100	6–8
Образование в стратосфере	менее 0,5	1,0	0,5-1,5	0,3–0,5
Поступление из океана	—	—	—	0–0,5
Всего антропогенные	40,8	32,8	17,2–46,5	—
Всего природные	9,1	16	3,5–121,5	14,3–22
Сумма	50	48,8	20,7–168	—

В течение длительного времени спутниковые методы позволяют наблюдать за содержанием диоксида азота в атмосфере (Тронин и др., 2009). Благодаря накопленной информации были сделаны выводы о трендах содержания газа в воздушном бассейне России с 2005 по 2017 г.

Аппаратура и данные

Основными инструментами для измерения концентрации диоксида азота в столбе атмосферы служат газоанализаторы SCIAMACHY и OMI, установленные на борту природоресурсного спутника ENVISAT и спутника AURA соответственно (табл. 2).

Таблица 2. Основные технические характеристики приборов SCIAMACHY и OMI

Прибор/спутник	Спектральный диапазон, нм	Спектральное разрешение, нм	Стабильность спектральных каналов, нм	Разрешение на местности, км	Измеряемые газы
SCIAMACHY/ENVISAT	240–314	0,24	0,003	30×60	O ₃ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NO ₂ , SO ₂ , HCHO, H ₂ O
	309–405	0,26	0,003		
	394–620	0,44	0,004		
	604–805	0,48	0,005		
	785–1050	0,54	0,005		
	1000–1750	1,48	0,015		
	1940–2040	0,22	0,003		
	2265–2380	0,26	0,003		
OMI/AURA	270–314	0,45–1,0	0,002	13×24	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , BrO, HCON OCIO, аэрозоль
	306–380				
	350–500				

Пространственное разрешение аппаратуры, а также облачность пока не позволяют вести ежедневный мониторинг атмосферы. В этой связи для анализа содержания NO₂ целесообразно использовать среднемесячные и среднегодовые значения. К сожалению, в 2012 г. спутник ENVISAT прекратил своё существование, поэтому для дальнейшего анализа данных были использованы среднемесячные значения диоксида азота для прибора OMI с использованием сервиса NEO (<https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/>). Данные имеют пространственное разрешение 3600×1800 пикселей, что соответствует 0,1° на земной поверхности.

Данные наблюдений поступали в формате tiff и после фильтрации загружались в ГИС ArcGIS, где и проводился расчёт концентрации. Для всех субъектов Российской Федерации были вычислены среднемесячные значения концентрации NO₂ в столбе атмосферы с октября 2004 г. по декабрь 2017 г. Для сохранения целостности рядов данных и возможности сравнения не были учтены последние изменения в административно-территориальном устройстве, в частности расчёты концентрации газа велись по карте «старой» Москвы. Затем были рассчитаны среднегодовые значения и средние за летний период с мая по август 2005–2017 гг. Значения летнего периода нужны для получения репрезентативных данных для всей территории России, так как определение концентрации диоксида азота основано на измерении поглощения солнечного излучения. Соответственно, корректные измерения содержания газа для всех регионов возможны только в летний период. После получения средних за летний период был рассчитан линейный тренд изменения концентрации диоксида азота за 13 лет.

Результаты

В качестве примера на рис. 1 (см. с. 262) приведены результаты измерений диоксида азота на территории Российской Федерации за июнь 2017 г. На спутниковых данных отчётливо фиксируются крупные аномалии над городскими агломерациями. Так, концентрация газа в июне 2017 г. в Москве составила $261 \cdot 10^{13}$ молекул/см², в Московской области — $171 \cdot 10^{13}$ молекул/см², в Санкт-Петербурге — $210 \cdot 10^{13}$ молекул/см², в Ленинградской области — $45 \cdot 10^{13}$ молекул/см². Практически все крупные города страны отчётливо дешифрируются на спутниковых картах диоксида азота, что связано с наличием большого количества автомобилей, являющихся основным источником этого газа в настоящее время.

Рис. 1. Среднее содержание диоксида азота в столбе атмосферы над Российской Федерацией в июне 2017 г. (10^{13} молекул/см²)

Кроме городов, аномалии диоксида азота отмечены над крупными угольными и нефтегазоносными бассейнами. Так, прослеживаются высокие концентрации NO₂ над Кузнецким, Иркутским и Канско-Ачинским угольными бассейнами в России, Экибастузским — в Казахстане, Донецким — на Украине. Также высокие концентрации обнаружены в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, в широтном Приобье, районах современной добычи углеводородов в полосе Сургут—Нижневартовск. По-видимому, это связано со сжиганием угля и попутного газа на месте добычи сырья.

Отмечены также повышенные концентрации диоксида азота над промышленными агломерациями Челябинска, Екатеринбурга, Самары, Запорожья, Днепропетровска. По размеру и интенсивности эти аномалии превышают аналогичные, создаваемые городскими агломерациями, где доминирующим является вклад автомобилей. В случае промышленных агломераций более существенной становится роль промышленных источников диоксида азота.

Кроме распределения диоксида азота по территории России, большой интерес представляет изменение концентрации газа во времени. На рис. 2 (см. с. 263) и в табл. 3 показаны величины линейных трендов содержания диоксида азота за период с 2005 по 2017 г. Отрицательные тренды, т.е. падение концентрации, показаны на рисунке оттенками зелёного, положительные (рост) — оттенками оранжевого. Отчётливо видна группа регионов в центре Европейской части России, характеризующаяся падением концентрации газа. Наиболее интенсивные падения отмечены в Москве, Санкт-Петербурге и Московской области. Следует сразу заметить, что это регионы с самими высокими концентрациями диоксида азота. Наблюдается некоторое увеличение концентрации в арктических регионах, но его можно объяснить ошибками восстановления содержания газа в высоких широтах. Однако это не объясняет рост концентрации на Северном Кавказе, в Приморском крае и Еврейской АО.

Согласно распределению основных источников диоксида азота на земной поверхности (см. табл. 1), сжигание органического топлива при высокой температуре (более 1000 °C) является главной причиной роста содержания газа в атмосфере. Современные экологические исследования выявили, что основным загрязнителем атмосферы в крупных городах является автотранспорт (Охрана..., 2008). Сравнение данных спутниковых наблюдений за содержанием диоксида азота с количеством зарегистрированных автомобилей в субъектах Российской

Федерации показывает несомненную их взаимосвязь (Тронин и др., 2009). Наибольшее количество автомобилей зарегистрировано в Москве, Московской области и Санкт-Петербурге, там же отмечаются абсолютные максимумы концентрации газа в атмосфере.

Рис. 2. Многолетний тренд изменения содержания диоксида азота в столбе атмосферы над Российской Федерацией с 2005 по 2017 г. (10^{13} молекул/см² в год). Зелёные области показывают падение концентрации, оранжевые — рост

Таблица 3. Среднее содержание диоксида азота на период с мая по август по некоторым субъектам Российской Федерации, $n \cdot 10^{13}$ молекул/см²

Регион	Год													
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Тренд
Москва	2560	3708	2111	2491	1845	2036	2050	1973	2203	1674	1438	1663	1266	–123
Санкт-Петербург	1064	1259	1251	1293	1069	932	941	927	977	860	714	720	650	–48
Московская область	1021	1282	996	984	836	892	712	890	851	787	621	672	669	–40
Алтайский край	171	182	181	185	179	172	175	162	206	191	162	186	175	0
Северная Осетия	242	240	271	232	245	277	290	354	257	321	298	345	322	8

Заключение

Современные приборы дистанционного зондирования позволяют осуществлять как глобальный, так и региональный долговременный мониторинг содержания NO₂ в атмосфере. Распределение диоксида азота в атмосферном воздухе по латерали весьма неравномерно. Контрастность аномалий достигает двух порядков. Анализ полученных данных показывает явную антропогенную приуроченность аномалий диоксида азота. По интенсивности аномалий, их площади можно ранжировать источники газа на городские и промышленные агломерации, районы добычи и переработки углеводородного сырья, в первую очередь угля. В городских агломерациях выявлена зависимость содержания диоксида азота от числа автомобилей. Анализ распределения газа в пространстве показывает значительный его перенос,

что открывает новые возможности для моделирования трансграничных переносов. Кроме распределения диоксида азота по территории России, большой интерес представляет изменение его концентрации во времени. Построены линейные тренды содержания диоксида азота по регионам России за период с 2005 по 2017 г. По результатам анализа многолетнего тренда зафиксирована группа регионов в центре Европейской части России, характеризующаяся падением концентрации газа. Наиболее интенсивные падения отмечены в Москве, Санкт-Петербурге и Московской области, т.е. в регионах с самими высокими концентрациями NO_2 . Отмечается некоторое увеличение концентрации в арктических регионах, но его можно объяснить ошибками восстановления содержания газа в высоких широтах. Отмечен рост концентраций на Северном Кавказе, в Приморском крае и Еврейской АО.

Литература

1. Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008. 254 с.
2. Белоглазов М. И., Карпечко А. Ю., Никулин Г. Н., Румянцев С. А. Антропогенное воздействие окислов азота на озон в атмосфере заполярного города при разной освещенности // Метеорология и гидрология. 2001. № 3. С. 57–63.
3. Еланский Н. Ф. Примеси в атмосфере континентальной России // Природа. 2002. № 2. С. 32–43.
4. Кондратьев К. Я., Донченко В. К. Экодинамика и геополитика. Т. 1. СПб.: НИЦЭБ РАН, 1999. 1032 с.
5. Кондратьев К. Я., Донченко В. К., Лосев К. С., Фролов А. К. Экология, экономика, политика. СПб.: НИЦЭБ РАН, 1996. 827 с.
6. Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ / ред. Ю.А. Израэль. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 302 с.
7. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2004 году / ред. Д.А. Голубев, Н.Д. Сорокин. СПб.: ООО «Сезам-Принт», 2008. 472 с.
8. Тарасова Н. П., Кузнецова В. А. Химия окружающей среды. Атмосфера. М.: Академкнига, 2007. 228 с.
9. 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. 2. № 6. С. 217–223.
10. Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric chemistry and physics. New Jersey: Wiley, 2006. 1203 p.
11. Vallero D. A. Fundamentals of Air Pollution. Academic Press, 2014. 996 p.

Estimation of multiyear changes in nitrogen oxide concentrations over Russia from satellite measurements

A. A. Tronin, S. G. Kritsuk, A. V. Kiselev

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

Nitrogen dioxide is one of the main anthropogenic air pollutants especially in megalopolises and industrial zones. High concentrations gas anomalies spread on tens kilometers, sometimes on 300–400 km depending on prevailing wind direction. Current remote sensing systems allow to control nitrogen dioxide in atmosphere. Main device for gas measurements from satellite are SCIAMACHY and OMI hyperspectrometers. Daily Earth monitoring of nitrogen dioxide is impossible now due to low spatial resolution and clouds. Monthly and yearly mean values are reasonable for analysis. Data analysis indicate clear conjunction of gas anomalies with anthropogenic sources. Nitrogen dioxide anomalies sources are divided in urban and industrial, areas of oil and gas explorations, coal mining. The most intensive anomalies are observed over Moscow, St. Petersburg and Moscow region. Time-series analysis is the point of interest in addition to gas concentration distribution. Linear trends of

nitrogen dioxide concentrations over Russian regions were compiled for the 2005–2017 time period. The group of regions in the center of European Russia with negative trend was detected. The most intensive concentrations drop in time was recorded over Moscow, Saint Petersburg and Moscow region, areas with highest gas concentrations. Slight nitrogen dioxide concentrations growth was revealed in Arctic regions, it may be related with gas concentrations retrieving errors in high latitudes. Another group of regions in the North Caucasus and the Russian Far East also demonstrate gas concentration growth.

Keywords: nitrogen dioxide, satellite, multi-year trend

Accepted: 20.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265

References

1. Bezuglaya E. Yu., Smirnova I. V., *Vozdukh gorodov i ego izmeneniya* (City's air and its change), Saint Petersburg: Asterion, 2008, 254 p.
2. Beloglazov M. I., Karpechko A. Yu., Nikulin G. N., Rumyantsev S. A., *Antropogennoe vozdeistvie okislov azota na ozon v atmosfere zapolyarnogo goroda pri raznoi osveshchennosti* (Anthropogenic impact of nitrogen dioxide on ozone in the air of polar city in dependence of light intensity), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2001, No. 3, pp. 57–63.
3. Elanskii N. F., *Primesi v atmosfere kontinental'noi Rossii* (Atmospheric trace gases in continental Russia), *Priroda*, 2002, No. 2, pp. 32–43.
4. Kondratyev K. Ya., Donchenko V. K., *Ekodinamika i geopolitika* (Ecodynamics and geopolitics), Vol. 1, Saint Petersburg: SRCES RAN, 1999, 1032 p.
5. Kondratyev K. Ya., Donchenko V. K., Losev K. S., Frolov A. K., *Ekologiya, ekonomika, politika* (Ecology, economy, policy), Saint Petersburg: SRCES RAN, 1996, 827 p.
6. *Monitoring transgranichnogo perenosa zagryaznyayushchikh vozdukh veshchestv* (Monitoring of transboundary air pollution transport), Izrael Yu. A. (ed.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 302 p.
7. *Okhrana okruzhayushchei sredy, prirodoopol'zovanie i obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti v Sankt-Peterburge v 2004 godu* (Environmental protection, environmental management and ecological safety in St. Petersburg in 2004), Golubev D. A., Sorokin N. D. (eds.), Saint Petersburg: Sezam-Print, 2008, 472 p.
8. Tarasova N. P., Kuznetsova V. A., *Khimiya okruzhayushchei sredy. Atmosfera* (Chemistry of environment. Atmosphere), Moscow: Akademkniga, 2007, 228 p.
9. Tronin A. A., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., *Dioksid azota v vozdushnom basseine Rossii po sputnikovym dannym* (Satellite observation of nitrogen dioxide in Russia air basin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 2, No. 6, pp. 217–223.
10. Seinfeld J. H., Pandis S. N., *Atmospheric chemistry and physics*, New Jersey: Wiley, 2006, 1203 p.
11. Vallero D. A., *Fundamentals of Air Pollution*, Academic Press, 2014, 996 p.