

Содержание диоксида азота в тропосфере Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений. Пространственно-временная изменчивость

Т. В. Русскова, П. Н. Зенкова

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия
E-mails: btv@iao.ru, zpn@iao.ru

Рост промышленного производства в отдельных регионах мира и повсеместное развитие транспортно-логистических систем сопровождаются перманентным загрязнением атмосферы в результате эмиссии различных газовых примесей, в том числе окислов азота. Накопленный к настоящему времени значительный объём спутниковых наблюдений позволяет оценивать долговременные изменения концентрации двуоксида азота (NO_2) в глобальном масштабе, а также идентифицировать географическое расположение её источников. Для оценки пространственно-временной изменчивости содержания NO_2 в статье использованы многолетние данные измерений спектрометра OMI, размещённого на спутнике Aura. Приведён пример среднегодового пространственного распределения NO_2 в тропосфере восточного полушария, демонстрирующий наиболее крупные очаги антропогенного загрязнения. На территории России отмечается наличие протяжённого шлейфа загрязнений, простирающегося от западных границ государства до восточных границ Красноярского края и охватывающего большую часть Западной Сибири. Представлены результаты анализа содержания диоксида азота в тропосфере Западной Сибири с 2005 по 2016 г. Показано, что пространственное распределение концентрации газа в воздушном бассейне региона носит широтный характер с уменьшением значений в юго-восточном и северном направлениях. Наименьшими значениями тропосферного содержания диоксида азота отличаются труднодоступные, а также наименее заселённые и освоенные области региона, такие как Республика Алтай, Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа. Федеральные трассы, крупные города и промышленные центры образуют зоны повышенного загрязнения тропосферы. По многолетним изменениям концентрации NO_2 получены оценки линейных трендов, определены особенности её сезонной изменчивости.

Ключевые слова: диоксид азота, спектрометр OMI, тропосфера, пространственно-временная изменчивость, Западная Сибирь

Одобрена к печати: 29.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-221-235

Введение

На протяжении многих лет одной из центральных проблем физики и химии атмосферы является исследование пространственно-временных изменений газового состава атмосферы Земли и оценка роли антропогенного вклада в наблюдаемые изменения климата. Непрерывные процессы роста промышленного производства, расширения транспортно-логистических систем сопровождаются перманентным загрязнением тропосферы в результате эмиссии различных газовых примесей, в том числе окислов азота (NO_x). В химии атмосферы окислы азота играют важнейшую роль. С одной стороны, они определяют окислительный потенциал атмосферы, влияющий на её способность к самоочищению от ряда загрязнений. С другой стороны, присутствие NO_x является одной из причин образования кислотных дождей и фотохимического смога, представляющих серьёзную экологическую опасность. Диоксид азота (NO_2) является не только радиационно- и химически активным соединением, но и опасным токсином, в высоких концентрациях угрожающим здоровью людей.

Наибольшее количество NO_2 сосредоточено в пограничном слое атмосферы и стратосфере. В фоновых условиях содержание диоксида азота в тропосфере мало, поэтому основным фактором повышенного содержания газа следует считать антропогенный. В отдельные дни с высоким уровнем загрязнения концентрация NO_2 в приземном слое может многократно превышать концентрацию в слое стратосферного максимума, а общее содержание в нижней

тропосфере может превышать общее содержание газа в стратосфере (Елохов, Груздев, 2000). Время жизни NO_2 сравнительно невелико и варьируется в пределах от нескольких часов до одного дня по данным разных литературных источников (Beirle et al., 2003; Liu et al., 2016; Seinfeld, Pandis, 2016 и др.). Границы диапазона его изменения зависят от ряда факторов, в том числе от метеоусловий (скорости ветра, температуры), скорости фотохимических реакций (чем меньше солнечного света, тем сложнее протекают реакции, разрушающие NO_2 , и тем медленнее газ удаляется из атмосферы), концентрации радикалов гидроксила OH и др. Основными антропогенными источниками NO_x являются процессы высокотемпературного сгорания различных видов топлива на тепловых электростанциях, металлургических предприятиях, промышленных установках, в автомобильных и авиационных двигателях. Оксид и диоксид азота являются наиболее часто встречаемыми соединениями. Концентрация NO_3 и некоторых других окислов обычно незначительна (Безуглая, Смирнова, 2008).

В Сибири расположено большое число экологически неблагоприятных городов. Основная причина экологических проблем заключается в том, что с 1950–1960-х гг. в сибирских городах размещались гигантские «грязные» производства (чёрная и цветная металлургия, теплоэнергетика, угольная и целлюлозная промышленность). Особенности климата и географического расположения отдельных областей Западной Сибири, Кемеровской области в частности, способствуют тому, что большая часть промышленных выбросов загрязняющих веществ, в том числе NO_2 , не рассеивается в атмосферном воздухе, а осаждается в горных долинах. В регионе добывается свыше 90 % российского природного газа, в том числе 87 % — в Ямало-Ненецком (ЯНАО) и 4 % — в Ханты-Мансийском (ХМАО) автономных округах. Выбросы источников газодобывающей и газотранспортной систем оказывают существенное техногенное воздействие на состояние атмосферы. При этом окислы азота являются единственным загрязнителем воздушного бассейна при сжигании природного газа (Хван, Хван, 2003). Нефтедобывающая промышленность, также широко развитая в регионе, обуславливает хроническое химическое загрязнение атмосферы в результате сжигания попутного газа в факелах нефтяных месторождений. Суммарный вклад искусственных источников в общий объём выбросов NO_x превалирует над вкладом природных (почвенная эмиссия, бактериальная активность в почве, лесные пожары, грозы, извержения вулканов и др.). Ежегодная эмиссия тропосферного NO_x от сжигания органического топлива (преимущественно электростанциями и автотранспортом), горения биомассы, физико-химических процессов в почве, грозовых разрядов и работы авиадвигателей составила 33,0; 7,1; 5,6; 5,0 и 0,7 Тг/год соответственно, от всех источников — 51,9 Тг/год (Prather et al., 2001).

В России количество наземных пунктов мониторинга NO_2 в атмосферном воздухе невелико. В большинстве из них проводятся измерения приземных концентраций газа, что позволяет оценивать степень загрязнения приземного воздуха лишь в небольшой окрестности поста наблюдения. Функционирующие в настоящее время станции спектральных измерений концентрации газа в вертикальном столбе атмосферы, включающие в себя приборы, которые регистрируют спектры прямого (фурье-интерферометры) и рассеянного (дифференциальная спектроскопия) солнечного излучения, единичны. Среди них — Кисловодская высокогорная научная станция, станция в пригороде Санкт-Петербурга, станции, аккредитованные в качестве дополнительных пунктов сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) (города Звенигород, Салехард, Жиганск). Их количества недостаточно для формирования представления пространственной структуры загрязнения атмосферы в том или ином регионе. Идентифицировать источники крупных эмиссий газов, исследовать экосистемы, подверженные воздействию выбросов загрязняющих веществ антропогенного и природного происхождения, проводить мониторинг окружающей среды с высоким пространственным и временным разрешением в настоящее время позволяют методы дистанционного зондирования Земли. Антропогенный вклад в тропосферное содержание (ТС) NO_2 настолько велик, что позволяет использовать данные спутниковых наблюдений для оценки его концентрации (Richter et al., 2005).

Сравнительно короткое время жизни диоксида азота обуславливает локализованность этого газа в тропосфере и малую вероятность его переноса на большие расстояния. Таким

образом, данные спутниковых измерений служат индикатором расположения источников NO_2 и других химических соединений, а также идентификатором воздушных масс, находившихся под воздействием значительной антропогенной нагрузки. Над территорией с незагрязнённой атмосферой ТС NO_2 будет отличаться низкими значениями и однородным пространственным распределением.

Такая аппаратура, как GOME — Global Ozone Monitoring Experiment (1995–2011, спутник ERS-2) (Burrows et al., 1999) и SCIAMACHY — SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartographY (2002–2012, спутник ENVISAT) (Bovensmann et al., 1999), впервые позволила осуществлять практически ежедневное глобальное картирование содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы. Спектрометр OMI — Ozone Monitoring Instrument (спутник AURA) (Levelt et al., 2006), функционирующий с 2004 г., является результатом дальнейшего развития GOME и SCIAMACHY, а также TOMS — Total Ozone Mapping Spectrometer (McPeters et al., 1993), на которых отработана технология измерений с высоким спектральным разрешением. Более высокое горизонтальное и временное разрешение спектрометра OMI (Ионов, Тимофеев, 2009), в отличие от приборов GOME-2, запущенных на спутниках MetOp-A в 2007 г. и MetOp-B в 2012 г., делают его более предпочтительным для проведения исследований. Альтернативный спектрометр TROPOMI (TROPospheric Monitoring Instrument) (Veefkind et al., 2012), размещённый на Sentinel-5P, запуск которого осуществлён в конце 2017 г., позволяет проводить наблюдения с меньшей погрешностью измерений и ещё более высоким пространственным разрешением ($7 \times 3,5$ км в направлении надира), однако использование данных его измерений — вопрос ближайшего будущего.

Вместе с тем значительные трудности в интерпретации спутниковых измерений такого типа до сих пор оставляют вопрос о точности восстанавливаемых данных открытым, особенно в условиях загрязнённой атмосферы (Boersma et al., 2004). Кроме того, определение концентрации NO_2 пока невозможно при наличии снежного покрова и высоких баллах облачности. Тем не менее спутниковые данные позволяют установить основные тенденции изменения содержания газа в тропосфере, а удовлетворительное статистическое соответствие данных измерений приземных концентраций диоксида азота и его тропосферного содержания (см., например, работы (Celarier et al., 2008; Paraschiv et al., 2017)) позволяет использовать спутниковые измерения в настоящем исследовании.

В работе анализируется пространственно-временная изменчивость ТС NO_2 над Западно-Сибирским регионом с использованием базы данных спектрометра OMI за 12-летний (2005–2016) период наблюдений.

Исходные данные

Спектрометр OMI, размещённый на борту научно-исследовательского спутника Aura, запущенного в 2004 г. в рамках программы NASA EOS (Earth Observation System), выполняет измерения отражённого атмосферой и поверхностью Земли солнечного излучения в диапазоне от 270 до 500 нм. Ширина снимаемой полосы поверхности, составляющая порядка 2600 км, и период обращения спутника, равный 98,8 мин, позволяют вести измерения в глобальном масштабе и за сутки охватить практически всю земную поверхность. В режиме работы OMI, предназначенном для съёмки в глобальном масштабе, размер пикселя при съёмке в направлении надира составляет 13×24 км вдоль и поперёк полосы съёмки соответственно (Levelt et al., 2006). Данные измерений спектрометра используются для определения вертикальных профилей озона, концентраций таких атмосферных газов, как NO_2 , SO_2 , HCHO , BrO и OClO , освещённости поверхности, а также ряда характеристик аэрозоля и облаков.

Алгоритм оценки концентрации NO_2 включает в себя несколько этапов (Boersma et al., 2011; Bucsela et al., 2013; Castellanos et al., 2015; Lorente et al., 2017). На первом этапе определяется общее содержание измеряемой газовой составляющей на наклонной трассе с помощью методики дифференциального поглощения DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), состоящей в минимизации различий между наблюдаемыми спектрами и линейной

комбинацией известных спектров молекулярного поглощения (NO_2 , O_3 , H_2O) с учётом эффектов аэрозольного, молекулярного и комбинационного рассеяния, альbedo поверхности, а также эффекта Ринга в спектральном диапазоне 405–465 нм (Voersma et al., 2011). Наклонное содержание NO_2 в тропосфере определяется как разность наклонных концентраций NO_2 во всём столбе атмосферы и стратосфере. Далее на основе решения уравнения переноса солнечного излучения для различных условий измерений вычисляется средний оптический путь луча света в атмосфере, характеризующийся коэффициентом воздушной массы AMF (Air Mass Factor), с последующим выделением тропосферной и стратосферной составляющих. Вертикальное содержание газа вычисляется делением его наклонного содержания на AMF.

Точность определения концентрации диоксида азота зависит от совокупности факторов: погрешностей измерений спектрометра, погрешностей телеметрии, точности используемой модели переноса солнечного излучения, точности исходной спектроскопической и априорной информации, алгоритмических особенностей. Наибольший вклад в суммарную ошибку наблюдений вносят неопределённости вычисления коэффициента AMF: различные способы коррекции отражённой радиации от эффектов аэрозоля и облаков при его моделировании приводят к расхождениям, которые в зависимости от атмосферной ситуации могут достигать 30–40 % (Lorente et al., 2017). Предварительные оценки точности измерений тропосферного содержания NO_2 аппаратурой OMI, полученные в работе (Celarier et al., 2008) для фоновых условий, составляют примерно 15–30 %. По подсчётам (Voersma et al., 2011), погрешность восстановления в загрязнённых условиях составляет 35–60 %. Поскольку наблюдаемые пространственно-временные вариации тропосферного диоксида азота существенно выше, измерения даже с такой относительно невысокой точностью позволяют получить ценную информацию (Ионов, Тимофеев, 2009).

Для анализа пространственно-временной изменчивости TC NO_2 использованы ежедневные данные архива National Aeronautics and Space Administration Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (NASA GES DISC) версии OMNO2d V003 с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ за 2005–2016 гг. При расчёте среднемесячных значений были взяты только те наблюдения при которых балл облачности не превышал 30 % (поле ColumnAmountNO2TropCloudScreened HDF-файла). Для исследования взаимосвязи TC NO_2 с дневной температурой поверхности привлечены данные архива NASA Earth Observations (<https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/>).

При оценке концентрации NO_2 в тропосфере городов, превышающих по площади размеры наземного пикселя, рассматривалась совокупность пикселей, попадающих в заданную область, с соответствующими им значениями TC NO_2 , а в качестве анализируемой величины использовалось их среднее значение. В противном случае анализировалось значение того пикселя, в пределах которого город расположен.

Пространственно-временная изменчивость тропосферного содержания окислов азота

К настоящему времени накоплен значительный объём непрерывных с 1996 г. спутниковых измерений, позволяющих оценивать долговременные изменения TC NO_2 в глобальном масштабе. Так, в работе (Richter et al., 2005) на основе измерений GOME и SCIAMACHY в период с 1996 по 2004 г. выявлено существенное сокращение антропогенных выбросов для промышленных районов Западной Европы и США (10–20 %) и заметный их рост в ряде районов Китая (до 50 %). Эту тенденцию можно объяснить тем, что экономические регионы так называемого «европейского банана» (юго-восток Англии, северо-запад Франции, Бенилюкс, Западная Германия, Северная Италия) — самые развитые и густонаселённые области Западной Европы — в последние десятилетия переживают процесс активной деиндустриализации и перехода к постиндустриальному информационному обществу. Процесс сопровождается практически полным закрытием «грязных» производств сталелитейной и угольной промышленности, развитием возобновляемой энергетики, переводом транспорта на новые

экологические стандарты. Правительства указанных стран формируют экономическую и экологическую политику с учётом своих обязательств по сокращению вредных выбросов в атмосферу в рамках Киотского протокола (1997) (<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf>) и Парижского соглашения по климату (2015) (<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>). Между тем, основные промышленные мощности международных корпораций с 80-х гг. XX века переносятся из Европы, США и Японии в страны Восточной, Юго-Восточной и Южной Азии. В рамках международной специализации за странами Азии закреплена роль основного производителя промышленных товаров в мире в связи с низким уровнем оплаты труда и косвенных расходов (в том числе незначительных по сравнению с западными странами экологических налогов и сборов). Это, в свою очередь, приводит к резкому увеличению промышленных производств и автотранспорта с соответствующим ростом объёмов эмиссии NO_2 .

В аналогичном исследовании (Van der A et al., 2008), охватывающем 11-летний период (1996–2006), отмечен статистически значимый положительный тренд тропосферного содержания NO_2 не только в Восточном Китае (в частности, в Шанхае — до 29 % в год, Пекине — до 11 % в год), Южной Корее (Сеуле — до 1,3 % в год), Индии (Дели — до 7,4 % в год, Калькутте — до 2,2 % в год), но и в промышленно развитых районах России (Новосибирске — до 11 % в год, Омске — до 9 % в год). Согласно результатам анализа, представленным в докладе (Ежегодник..., 2017), в городах азиатской части РФ (Урал, Сибирь и Дальний Восток) средние концентрации взвешенных веществ, диоксида серы, оксида углерода и оксида азота были выше, чем в её европейской части на 26–33 %.

На *рис. 1* представлено среднегодовое распределение содержания NO_2 в тропосфере восточного полушария, построенное на основе данных ОМІ за 12-летний период (2005–2016). Очевидно, что основные «очаги» антропогенного загрязнения атмосферы диоксидом азота по-прежнему сосредоточены в промышленных и густонаселённых районах Восточной Азии (Китай, Япония, Южная Корея), Западной Европы (страны Бенилюкса, Западная Германия, Северная Италия), Южной Африки, а также России (Москва). Однако, как показывают результаты анализа данных ОМІ, в некоторых мегаполисах Восточного Китая после 2005 г. наблюдается устойчивый отрицательный тренд по выбросам NO_2 (в частности, в Пекине — до –1,6 % в год, Шанхае — до –1,8 % в год), что может свидетельствовать о технологическом перевооружении китайских производств и повороте политики государства в сторону проблем экологии.

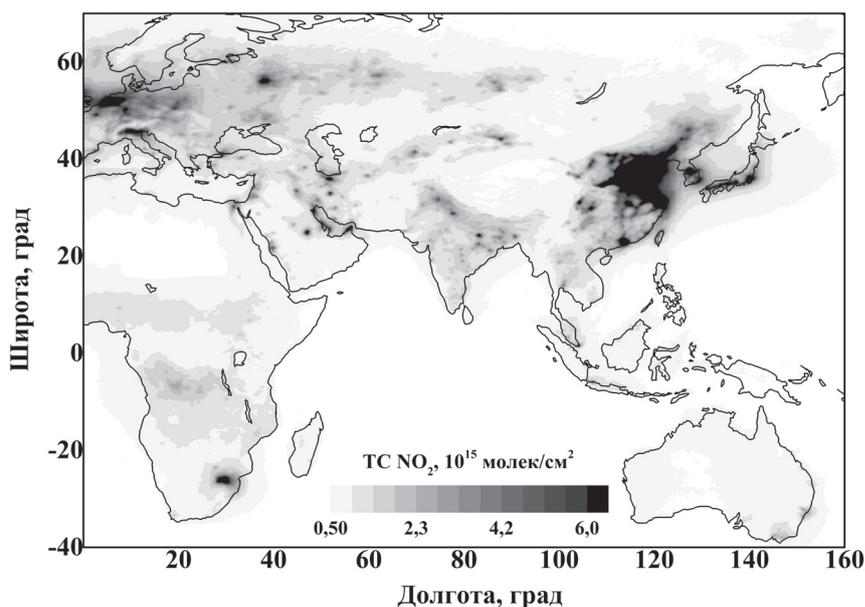


Рис. 1. Среднегодовое распределение содержания NO_2 , 10^{15} молек/см², в тропосфере Восточного полушария, построенное на основе интерпретации данных ОМІ за 2005–2016 гг.

И хотя на фоне Восточного Китая уровень загрязнения диоксидом азота тропосферы России, и Сибири в частности, выглядит не столь драматично, с учётом плотности населения, масштабов промышленного производства, географических, топографических и климатических особенностей, обширных, ещё не тронутых человеческой деятельностью территорий и других факторов он всё же является сравнительно высоким: выраженный шлейф загрязнения, визуально сопоставимого по величине с загрязнением, например, густонаселённой Индии, сплошной полосой тянется от западных границ российского государства до восточных границ Красноярского края, охватывая большую часть территории Западной Сибири.

Рассмотрим более подробно особенности пространственно-временной изменчивости NO_2 в воздушном бассейне Западной Сибири.

Основными антропогенными источниками газа в пределах данного региона являются процессы высокотемпературного сгорания различных видов топлива на тепловых электростанциях, промышленных установках, в автомобильных двигателях, суммарный вклад в общий объём выбросов которых превалирует над вкладом естественных источников, о чём свидетельствует повышенное содержание диоксида азота вблизи большинства промышленных центров и крупных городов.

Согласно данным (Государственный доклад..., 2017), наиболее высокие показатели по объёмам эмиссии оксидов азота от стационарных источников за период с 2012 по 2016 г. принадлежат Новосибирской (машиностроительная отрасль, цветная металлургия, химическая промышленность), Кемеровской (угольная, металлургическая, машиностроительная и химическая промышленность), Омской (машиностроительная и нефтехимическая отрасли) областям, ХМАО и ЯНАО (нефтегазодобыча, теплоэнергетика, машиностроительная отрасль) (табл. 1).

Таблица 1. Объём эмиссии NO_x (тыс. т) от стационарных источников и вклад (% в скобках) автомобильного транспорта в общий объём выбросов загрязняющих веществ в тропосферу Западной Сибири; по данным (Государственный доклад..., 2017)

Субъект Федерации	Численность населения, тыс. чел.	2012	2013	2014	2015	2016
Новосибирская область	2779,5	44,7 (56,0)	37,8 (61,3)	40,7 (57,1)	39,0 (59,8)	41,2 (58,0)
Кемеровская область	2708,8	69,5 (13,1)	55,65 (13,9)	63,05 (12,8)	68,55 (14,3)	74,75 (14,4)
Алтайский край	2365,7	25,95 (49,8)	24,25 (52,9)	26,45 (53,5)	27,45 (53,3)	27,95 (52,1)
Омская область	1972,7	31,95 (42,0)	29,25 (43,2)	31,35 (48,5)	32,35 (49,0)	31,85 (48,1)
ХМАО	1646,1	135,35 (8,2)	129,15 (10,6)	113,75 (13,2)	116,45 (13,7)	123,95 (13,5)
Тюменская область	1477,9	19,75 (57,9)	23,15 (55,3)	23,65 (56,5)	24,75 (56,8)	23,55 (61,1)
Томская область	1078,9	23,35 (19,9)	20,65 (24,0)	20,85 (25,8)	18,55 (26,2)	20,45 (25,6)
ЯНАО	536,0	81,55 (7,1)	85,25 (9,3)	73,95 (11,7)	74,25 (11,3)	81,15 (9,7)
Республика Алтай	217,0	0,45 (69,5)	0,55 (74,9)	0,65 (75,4)	0,55 (75,6)	0,5 (78,7)

Исходя из данных, представленных в таблице, сложно установить наличие устойчивой тенденции роста или снижения объёма выбросов в обозначенный период. При этом практически во всех областях наблюдается стабильный рост вклада автомобильного транспорта в общую эмиссию вредных примесей в атмосферу. Этот вклад наиболее высок в Новосибирской, Омской, Тюменской областях, Алтайском крае и Республике Алтай.

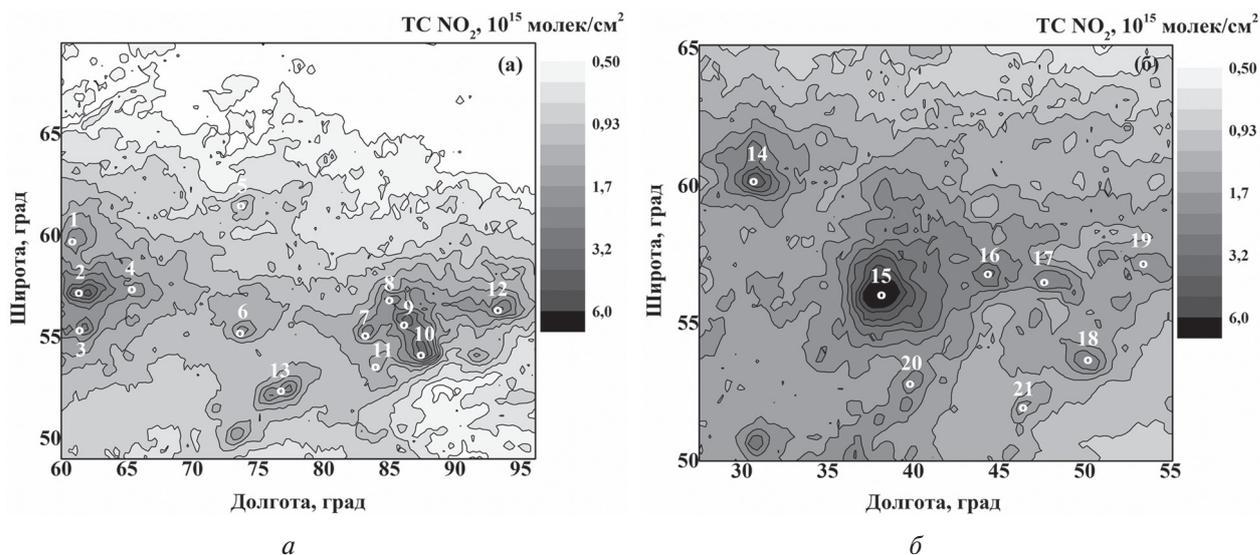


Рис. 2. Среднегодовое распределение логарифма содержания NO_2 , 10^{15} молек/см², в тропосфере Западной Сибири (а) и европейской части России (б), построенное на основе интерпретации данных ОМІ за 2005–2016 гг.; цифрами обозначены города: 1 — Серов, 2 — Екатеринбург, 3 — Челябинск, 4 — Тюмень, 5 — Сургут, 6 — Омск, 7 — Новосибирск, 8 — Томск, 9 — Кемерово, 10 — Новокузнецк, 11 — Барнаул, 12 — Красноярск, 13 — Павлодар, 14 — Санкт-Петербург, 15 — Москва, 16 — Нижний Новгород, 17 — Чебоксары, 18 — Самара, 19 — Ижевск, 20 — Липецк, 21 — Саратов

Высокий уровень автомобилизации наряду с неблагоприятными метеорологическими условиями для рассеивания выхлопных газов вызывает хроническое загрязнение тропосферы. Накопление этих продуктов в условиях температурной инверсии, высокой влажности воздуха и безветрия приводит к фотохимическому смогу и соответствующим последствиям. Переход от бензиновых автомобилей к дизельным в рамках реакции Европейского Союза на Киотский протокол 1997 г. по сокращению выбросов парниковых газов, диоксида углерода (CO_2) в частности, ухудшает ситуацию, поскольку повышает токсичность выбросов NO_x : некоторыми специалистами высказывается мнение, что внедряемая в последнее десятилетие технология регуляции содержания CO_2 и углеводов в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания приводит, в свою очередь, к выбрасыванию ещё большего объёма NO_2 (Kiesewetter et al., 2013; Schmidt, 2016), оказывающего — в отличие от парниковых газов — немедленный токсический эффект.

Среднегодовое распределение концентрации NO_2 в тропосфере Западной Сибири по данным ОМІ представлено на рис. 2а (логарифмический масштаб). Для сравнения на рис. 2б приведено пространственное распределение диоксида азота в тропосфере европейской части России.

Очевидно, что существенная неоднородность в распределении газа над поверхностью вызвана антропогенным фактором, поскольку основная часть районов с повышенным TC NO_2 сосредоточена вблизи крупных городов, а также вдоль путей транспортного сообщения. Более густая транспортная сеть, высокая плотность населения и промышленных предприятий в европейской части России способствуют более однородному распределению газа в тропосфере и более высоким значениям его концентрации. При этом наблюдается спад загрязнения воздушного бассейна диоксидом азота при удалении от его источников в юго-восточном и северном направлениях.

Среднегодовое распределение концентрации NO_2 в тропосфере Западной Сибири носит широтный характер с уменьшением значений также в юго-восточном и северном направлениях. Наименьшими значениями отличаются труднодоступные, а также наименее заселённые и освоенные области региона, такие как ЯНАО, ХМАО и Республика Алтай.

Предполагая некоторое фоновое значение TC NO_2 , можно приближённо рассчитать степень превышения естественной концентрации диоксида азота L , обусловленную преимущественно антропогенным загрязнением воздуха и позволяющую градуировать участки земной

поверхности по уровню ТС NO_2 относительно фонового состояния атмосферы. В качестве фонового значения использована средняя величина ($0,5 \cdot 10^{15}$ молек/см²), рассчитанная на основе многолетних данных ОМІ по концентрации NO_2 , имеющей однородное пространственное распределение и наблюдаемой в тропосфере, не подверженной либо слабо подверженной антропогенному воздействию.

На рис. 3 представлено пространственное распределение величины L . Как видно из рисунка, основные очаги NO_2 расположены над урбанизированной территорией. Связки близлежащих населённых пунктов и промышленных центров образуют целые агломерации, характеризующиеся повышенным загрязнением воздуха. На территории рассматриваемого региона к такой агломерации относятся города Новосибирск, Томск, Кемерово, Новокузнецк. Это зона так называемого высокого потенциала загрязнения атмосферы. Облако загрязнения, продуцируемого этой группой городов, отчётливо выделяется и на глобальной карте распределения NO_2 (см. рис. 1). Другими примерами зон с повышенным содержанием диоксида азота являются Омск, Барнаул, Сургут. Тюмень находится в зоне влияния агломерации, формируемой вокруг Екатеринбурга и Челябинска.

Шлейфы загрязнения вдоль основных автомобильных трасс и путей сообщения железнодорожного транспорта служат иллюстрацией влияния транспорта на уровень концентрации NO_2 , поскольку территории, соединяющие областные центры, как правило, не являются плотно заселёнными и на них не расположены крупные промышленные производства. Например, вдоль федеральной трассы Р-254 «Иртыш» наблюдается превышение фоновых значений ТС NO_2 в среднем в 2–3 раза. Очевидно также, что радиус действия такого источника достаточно широк и может достигать порядка 200 км.

В табл. 2 представлены среднегодовые (K_y , 10^{15} молек/см²) и среднелетние (K_s , 10^{15} молек/см²) значения содержания NO_2 в тропосфере наиболее крупных городов Западно-Сибирского региона. Для демонстрации тенденций в долговременном изменении ТС NO_2 приведены характеристики его линейных трендов, вычисленные за весь 12-летний период (T_{12} , %/год). Для летнего сезона рассчитаны также тренды за 5-летний период (с 2012 по 2016 г. включительно) (T_5 , %/год). Следует отметить, что временной интервал, доступный для обработки спутниковых данных, тем уже, чем выше географическая широта анализируемой точки. Исходные данные с января по февраль полностью отсутствовали в общем массиве (главным образом из-за наличия снежного покрова в этот период) и, соответственно, не были использованы в исследовании.

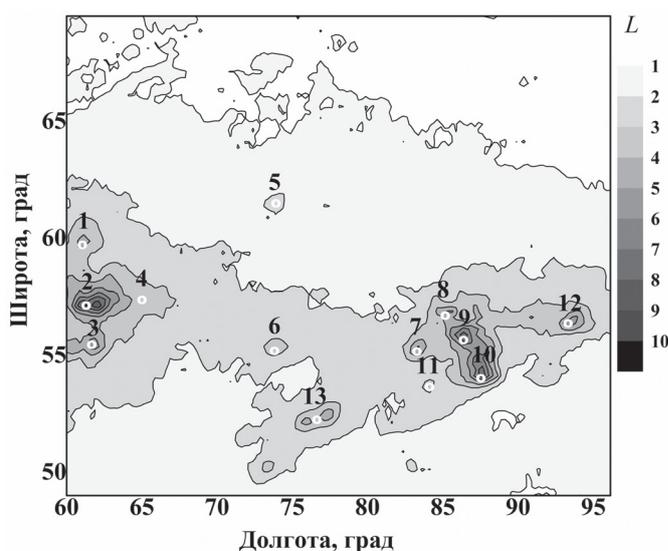


Рис. 3. Среднегодовое распределение величины L в тропосфере Западной Сибири, построенное на основе интерпретации данных ОМІ за 2005–2016 гг.; цифрами обозначены города: 1 — Серов, 2 — Екатеринбург, 3 — Челябинск, 4 — Тюмень, 5 — Сургут, 6 — Омск, 7 — Новосибирск, 8 — Томск, 9 — Кемерово, 10 — Новокузнецк, 11 — Барнаул, 12 — Красноярск, 13 — Павлодар

Для ряда городов из анализа исключены также данные за ноябрь, декабрь и март по причине малого количества наблюдений в эти месяцы. Ввиду этого полученные и представленные в табл. 2 средние значения K_y не являются предельными.

Таблица 2. Средние значения и характеристики линейного тренда содержания NO_2 в тропосфере ряда городов Западной Сибири

Субъекты Федерации	Город	K_y , 10^{15} молек/см ²	$T_{12}(K_y)$, %/год	K_s , 10^{15} молек/см ²	$T_{12}(K_s)$, %/год	$T_5(K_s)$, %/год
ХМАО	Нижневартовск	0,86±0,13	-1,19	0,65±0,07	+0,40	+2,55
	Сургут	1,23±0,20	+0,34	0,99±0,15	-2,06	+1,83
	Нефтеюганск	0,84±0,19	+0,95	0,65±0,09	-0,73	-1,25
	Ханты-Мансийск	0,78±0,19	-2,69	0,52±0,06	-0,99	+1,38
	Мегион	0,86±0,12	+0,05	0,63±0,07	+0,97	+3,05
ЯНАО	Ноябрьск	0,69±0,08	+0,54	0,67±0,14	+3,00	+9,88
	Салехард	0,54±0,08	+2,78	0,51±0,08	+3,34	+3,40
	Новый Уренгой	0,56±0,09	-0,26	0,53±0,07	+0,04	+4,78
Омская область	Омск	1,79±0,24	-1,24	1,52±0,13	-0,14	-2,10
	Тара	1,21±0,34	-0,17	0,73±0,11	-1,32	+2,88
	Калачинск	1,40±0,22	-1,49	1,05±0,21	-0,89	+3,63
Тюменская область	Тюмень	1,93±0,39	-3,56	0,99±0,10	-0,56	+6,15
	Тобольск	1,33±0,23	+0,03	0,73±0,12	+1,71	+14,7
	Ялуторовск	1,44±0,30	-2,87	0,82±0,04	-0,26	-1,43
Новосибирская область	Новосибирск	2,34±0,36	-2,42	1,71±0,23	-1,65	-4,48
	Бердск	1,71±0,13	-0,41	1,33±0,22	-2,77	-8,05
	Искитим	1,67±0,22	+0,97	1,26±0,19	-2,46	-5,58
	Татарск	1,16±0,17	+0,30	0,93±0,09	+1,14	5,65
Томская область	Томск	2,10±0,46	+0,40	1,25±0,15	-1,95	-6,55
	Северск	2,44±0,53	+0,27	1,20±0,14	-0,62	-3,55
	Асино	1,64±0,27	-0,76	1,03±0,13	-0,01	-3,70
	Колпашево	0,78±0,07	-0,81	0,64±0,09	-3,03	-0,80
	Стрежевой	0,74±0,10	-1,19	0,58±0,08	-0,78	+4,40
Кемеровская область	Кемерово	3,72±0,61	+0,49	1,67±0,30	-3,26	+0,73
	Новокузнецк	3,47±0,63	-1,10	2,18±0,31	-2,77	-1,30
	Прокопьевск	3,12±0,40	-0,27	1,87±0,19	-1,85	-1,58
	Анжеро-Судженск	2,11±0,58	+4,17	1,02±0,14	-1,05	+1,43
	Белово	2,51±0,30	+2,12	1,51±0,13	-1,43	-2,95
	Березовский	3,73±0,56	-0,22	1,44±0,21	-2,54	+4,40
	Киселевск	2,62±0,55	+3,45	1,66±0,20	+0,11	+1,23
	Ленинск-Кузнецкий	2,33±0,41	+1,99	1,26±0,16	-1,95	-5,70
Мариинск	1,72±0,38	-1,43	1,04±0,12	-1,08	-7,73	
Алтайский край	Барнаул	1,62±0,12	+0,02	1,24±0,13	-1,38	-0,78
	Бийск	1,26±0,14	+1,35	1,11±0,12	-0,74	-1,65
	Заринск	1,37±0,21	+1,74	1,07±0,11	-0,84	-3,45
	Алейск	1,15±0,14	+0,94	1,06±0,12	-0,83	-0,85
	Камень-на-Оби	1,13±0,11	+1,49	0,99±0,09	+0,47	+3,38
	Рубцовск	1,04±0,11	+0,75	1,02±0,13	-1,35	-6,45
Республика Алтай	Горно-Алтайск	0,81±0,09	+1,60	0,75±0,08	-0,04	-0,98
	Майма	0,84±0,12	+1,45	0,79±0,08	-1,13	-3,63
	Онгудай	0,66±0,08	+1,09	0,70±0,07	+1,65	+3,98

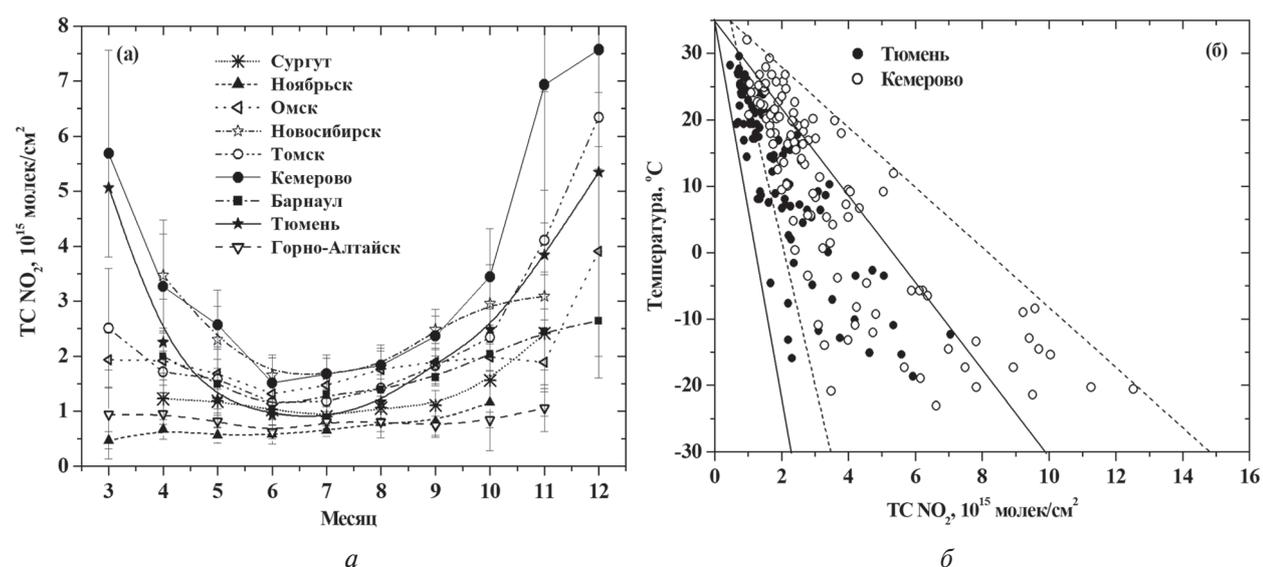


Рис. 4. Годовой ход $TC\ NO_2$ для ряда городов Западной Сибири в 2005–2016 гг. (а).
Связь температуры поверхности и концентрации NO_2 в тропосфере Кемерово и Тюмени (б)

Анализируя данные таблицы в отношении ряда городов, можно говорить об устойчивой тенденции снижения содержания газа в их тропосфере. Среди рассмотренных к таким городам относятся Омск, Ялуторовск, Новосибирск, Бердск, Асино, Колпашево, Новокузнецк, Прокопьевск и Мариинск. Стабильный же положительный тренд характерен для городов Мегион, Ноябрьск, Салехард, Тобольск, Татарск, Киселевск, Камень-на-Оби и Онгудай.

За 5-летний период в некоторых городах отмечается существенная скорость роста $TC\ NO_2$ в летний сезон. Происходит это в городах Ноябрьск, Новый Уренгой, Тюмень, Тобольск, Татарск, Стрежевой, Березовский и Онгудай. Значительный спад антропогенного загрязнения воздушного бассейна наблюдается в Бердске, Искитиме, Томске, Ленинск-Кузнецке, Мариинске, Рубцовске. Опираясь на статистику среднегодовых значений и тренды, построенные за 12-летний период, можно говорить о росте концентраций диоксида азота в некоторых городах ЯНАО, Кемеровской области, Алтайского края и Республики Алтай. На остальной территории Западной Сибири наблюдается преимущественно её снижение.

Значения концентрации диоксида азота и их вариации в некоторой степени обусловлены не только антропогенным фактором, но и метеорологическими, топографическими и другими особенностями, присущими той или иной местности. Омская область, например, расположена на обширной низменности с преимущественно лесостепными массивами, а значит, на хорошо проветриваемой территории, способствующей сравнительно быстрому рассеиванию вредных примесей в атмосфере. Центральная часть Кемеровской области находится в Кузнецкой котловине, с трёх сторон охваченной горами, вследствие чего обмен воздухом с соседними районами ослаблен, а высокая повторяемость приземных инверсий способствует накоплению окислов азота, имеющих тенденцию к естественному скоплению в углублениях.

Метеоусловия также оказывают значительное влияние на загрязнение воздушного бассейна. Условия для накопления вредных примесей в атмосфере чаще всего создаются в те периоды, когда устанавливается антициклон. Уровень загрязнения окислами азота зависит также от высоты слоя перемешивания, скорости и направления ветра. Например, юго-западная роза ветров городов, расположенных севернее Кемеровской области, способствует переносу загрязнённых воздушных масс, усугубляющих экологическое состояние воздушного бассейна.

Из табл. 2 также видно, что среднегодовые значения $TC\ NO_2$ выше среднелетних примерно в 1,5 раза. При этом тренды этих величин могут быть разного знака, что говорит о повышенных значениях концентрации NO_2 в холодный период года. На рис. 4а проиллюстрирована временная изменчивость среднемесячных значений $TC\ NO_2$, показывающая, что

концентрация диоксида азота в тропосфере большинства городов Западной Сибири имеет выраженный сезонный ход с максимальными и минимальными значениями в зимний и летний периоды соответственно. В таких случаях имеет место обратная связь ТС NO_2 с температурой поверхности, эмпирически подтверждаемая *рис. 4б* на примерах городов Кемерово и Тюмень. Коэффициент корреляции в обоих случаях равен $R = -0,83$. Высокая концентрация NO_2 в воздухе в холодное время года может быть вызвана более активным использованием автотранспорта и теплоэнергетических установок, увеличением продолжительности антициклонального режима погоды и, как следствие, ростом повторяемости температурной инверсии, благоприятной для накопления примесей в нижнем слое атмосферы. Кроме того, низкая температура воздуха увеличивает время жизни NO_x в атмосфере (Ионов, Тимофеев, 2009).

Как видно на *рис. 4*, слабая сезонная изменчивость характерна для крайних северных (например, Ноябрьск) и южных (например, Горно-Алтайск) городов Западной Сибири.

Заключение

Результаты непрерывных спутниковых измерений ТС NO_2 дают представление о характерных особенностях его пространственного и временного распределения. Содержание NO_2 в тропосфере крайне неравномерно: максимумы его концентраций приходятся на области, охватывающие крупные города, промышленные центры и пути транспортного сообщения. Неблагоприятную экологическую обстановку усугубляют климатические (засухи, низкие температуры), метеорологические (приземные инверсии, штиль), топографические (котловины, низменности) условия, а также географическое расположение источников.

Оценка состояния воздушного бассейна в различных частях Западно-Сибирского региона на основе спутниковых данных ОМІ по диоксиду азота за 2005–2016 гг. показала, что пространственное распределение концентрации NO_2 в тропосфере носит широтный характер с уменьшением значений в юго-восточном и северном направлениях. Наименьшими значениями отличаются труднодоступные, а также наименее заселённые и освоенные области региона, такие как ЯНАО, ХМАО и Республика Алтай. Близко расположенные города и промышленные центры образуют зоны повышенного загрязнения атмосферы (Новосибирск — Томск — Кемерово — Новокузнецк). Шлейфы загрязнённого воздуха фиксируются также вдоль основных автомобильных трасс и путей сообщения железнодорожного транспорта.

Анализ среднегодовых значений и трендов, построенных за 12-летний период, позволил выявить рост выбросов диоксида азота в некоторых городах ЯНАО, Кемеровской области, Алтайского края и Республики Алтай. Резкое увеличение среднелетних значений ТС NO_2 в течение 5 лет наблюдается в Ноябрьске, Новом Уренгое, Тюмени, Тобольске, Татарске, Стрежевом, Березовском и Онгуде. При этом обнаружен значительный спад антропогенного загрязнения воздушного бассейна городов Бердск, Искитим, Томск, Ленинск-Кузнецкий, Мариинск, Рубцовск.

Концентрация диоксида азота в тропосфере большинства городов Западной Сибири имеет выраженный сезонный ход с максимальными значениями в зимний период и минимальными — в летний. Слабая сезонная изменчивость тропосферного содержания NO_2 характерна для крайних северных и южных городов региона.

Некоторые результаты статистического анализа спутниковых данных (оценка пространственной автокорреляции, выявление кластеров городов, а также оценка взаимосвязи ТС NO_2 , выступающего в качестве индикатора загрязнения воздушной среды, и уровня заболеваемости населения региона онкопатологиями, болезнями верхних дыхательных путей и других органов) будут представлены в следующей части исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант Президента РФ № МК-5381.2016.5) и РФФИ (проект № 16-31-60057 мол_а_дк).

Литература

1. Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008. 253 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году» М.: Минприроды России; НИИ-Природа. 2017. 760 с.
3. Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2016 г.». СПб., 2017. 228 с.
4. Елохов А. С., Груздев А. Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
5. Ионов Д. В., Тимофеев Ю. М. Региональный космический мониторинг содержания двуоксида азота в тропосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 467–476.
6. Хван Т. А., Хван П. А. Безопасность жизнедеятельности. Ростов: Феникс, 2003. 416 с.
7. Beirle S., Platt U., Wenig M., Wagner T. Weekly Cycle of NO₂ by GOME Measurements: A Signature of Anthropogenic Sources // Atmospheric Chemistry and Physics. 2003. V. 3. No. 6. P. 2225–2232.
8. Boersma K. F., Eskes H. J., Brinksma E. J. Error analysis for tropospheric NO₂ retrievals from space // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. No. D04311.
9. Boersma K. F., Eskes H. J., Dirksen R. J., Van der A R. J., Veefkind J. P., Stammes P., Veefkind J. P., Sneep M., Claas J., Leitao J., Richter A., Zhou Y., Brunner D. An improved tropospheric NO₂ column retrieval algorithm for the ozone monitoring instrument // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. V. 4. No. 9. P. 1905–1928.
10. Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M., Frerick J., Noël S., Rozanov V. V., Chance K. V., Goede A. P. H. SCIAMACHY: Mission Objectives and Measurement Modes // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56. No. 2. P. 127–150.
11. Bucsela E. J., Krotkov N. A., Celarier E. A., Lamsal L. N., Swartz W. H., Bhartia P. K., Boersma K. F., Veefkind J. P., Gleason J. F., Pickering K. E. A new stratospheric and tropospheric NO₂ retrieval algorithm for nadir-viewing satellite instruments: applications to OMI // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. V. 6. No. 10. P. 2607–2626.
12. Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M., Rozanov V. V., Ladstätter-Weissenmayer A., Richter A., DeBeek R., Hoogen R., Bramstedt K., Eichmann K.-U., Eisinger M. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56. No. 2. P. 151–175.
13. Castellanos P., Boersma K. F., Torres O., de Haan J. F. OMI tropospheric NO₂ air mass factors over South America: effects of biomass burning aerosols // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. No. 9. P. 3831–3849.
14. Celarier E. A., Brinksma E. J., Gleason J. F., Veefkind J. P., Cede A., Herman J. R., Ionov D., Goutail F., Pommereau J.-P., Lambert J.-C., van Roozendaal M., Pinardi G., Wittrock F., Schönhardt A., Richter A., Ibrahim O. W., Wagner T., Bojkov B., Mount G., Spinei E., Chen C. M., Pongetti T. J., Sander S. P., Bucsela E. J., Wenig M. O., Swart D. P. J., Volten H., Kroon M., Levelt P. F. Validation of Ozone Monitoring Instrument Nitrogen Dioxide Columns // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. No. D15S08.
15. Kiesewetter G., Borken-Kleefeld J., Schöpp W., Heyes C., Bertok I., Thunis P., Bessagnet B., Terrenoire E., Amann M. Modelling Compliance with NO₂ and PM₁₀ Air Quality Limit Values in the GAINS Model // TSAP Report. 2013. 76 p.
16. Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R., Malkki A., Visser H., de Vries J., Stammes P., Lundell J., Saari H. The Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 5. P. 1093–1101.
17. Liu F., Beirle S., Zhang Q., Dörner S., He K., Wagner T. NO_x lifetimes and emissions of cities and power plants in polluted background estimated by satellite observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. No. 8. P. 5283–5298.
18. Lorente A., Boersma K. F., Yu H., Dörner S., Hilboll A., Richter A., Liu M., Lamsal L. N., Barkley M., De Smedt I., Van Roozendaal M., Wang Y., Wagner T., Beirle S., Lin J.-T., Krotkov N., Stammes P., Wang P., Henk J., Eskes H. J., Krol M. Structural uncertainty in air mass factor calculation for NO₂ and HCHO satellite retrievals // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. V. 10. No. 3. P. 759–782.
19. McPeters R. D., Krueger A. J., Bhartia P. K., Herman J. R., Oaks A., Ahmad Z., Cebula R. P., Schlesinger B. M., Swissler T., Taylor S. L., Torres O., Wellemeyer C. G. Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. Technical Report. 1993. URL: <http://cedadocs.ceda.ac.uk/1099/> (April 10, 2018).

20. *Paraschiv S., Constantin D. E., Paraschiv S. L., Voiculescu M.* OMI and Ground-Based In-Situ Tropospheric Nitrogen Dioxide Observations over Several Important European Cities during 2005–2014 // *Intern. J. Environmental Research and Public Health*. 2017. V. 14. No. 11. P. E1415.
21. *Prather M., Ehhalt D., Dentener F., Derwent R., Grubler A.* Atmospheric chemistry and greenhouse gases // *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Third Assessment Report. Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2001. Ch. 4. P. 239–289.
22. *Richter A., Burrows J. P., Nüss H., Granier C., Niemeier U.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space // *Nature*. 2005. V. 437. No. 7055. P. 129–132.
23. *Schmidt C. W.* Beyond a One-Time Scandal: Europe's Ongoing Diesel Pollution Problem // *Environmental Health Perspectives*. 2016. V. 124. No. 1. P. A19–A22.
24. *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to climate Change*. N. Y.: Wiley, 2016. 1152 p.
25. *Van der A R. J., Eskes H., Boersma K. F., van Noije T. P. C., Van Roozendaal M., De Smedt I., Peters D. H. M. U., Meijer E. W.* Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. No. D04302.
26. *Veefkind J. P., Aben I., McMullan K., Förster H., De Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H. J., De Haan J. F., Kleipool Q., Van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P. F.* TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 120. P. 70–83.

Nitrogen dioxide content in the troposphere of Western Siberia according to satellite observations. Spatio-temporal variability

T. V. Russkova, P. N. Zenkova

*V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia
E-mails: btv@iao.ru, zpn@iao.ru*

The growth of industrial production in some regions of the world and the widespread extension of transport and logistics systems are accompanied by permanent pollution of the atmosphere as a result of the emission of various gas impurities, including nitrogen oxides. The considerable volume of satellite observations accumulated to date allows us to estimate the long-term changes in the concentration of nitrogen dioxide on a global scale, as well as to identify the geographical location of its sources. To estimate the spatial and temporal variability of the NO₂ content, long-term measurement data from an OMI spectrometer located on the Aura satellite is used. An example of the average annual distribution of NO₂ in the troposphere of the eastern hemisphere, demonstrating the largest zones of anthropogenic pollution, is given. On the territory of Russia, there is a lengthy plume of pollution that extends from the western borders of the country to the eastern borders of Krasnoyarsk Krai covering most of Western Siberia. The results of the analysis of the nitrogen dioxide content in the troposphere of Western Siberia from 2005 to 2016 are presented. It is shown that the spatial distribution of gas concentration in the air basin of the region is of latitudinal nature with a decrease in values in the south-east and north directions. The lowest NO₂ content is in hard-to-reach, as well as in the least populated and developed areas of the region such as Yamalo-Nenets and Khanty-Mansiysk Autonomous Districts and Altai Republic. Federal highways, large cities and industrial centers form zones of increased air pollution. While using long-term changes of nitrogen dioxide concentration, the estimates of its linear trends are obtained and the features of its seasonal variability are determined.

Keywords: nitrogen dioxide, OMI spectrometer, troposphere, spatio-temporal variability, Western Siberia

Accepted: 29.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-221-235

References

1. Bezuglaya E. Yu., Smirnova I. V., *Vozdukh gorodov i ego izmeneniya* (The air of cities and its changes), Saint Petersburg: Asterion, 2008, 253 p.
2. *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2016 godu"* (State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2016"), Moscow: Minprirody Rossii; NIA-Priroda, 2017. 760 p.
3. *Ezhegodnik "Sostoyanie zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2016 g."* (Yearbook "The state of atmospheric pollution in cities in Russia for 2016"), Saint Petersburg, 2017, 228 p.
4. Elovkhov A. S., Gruzdev A. N., Izmereniya obshchego sodержaniya i vertikal'nogo raspredeleniya NO₂ na Zvenigorodskoi nauchnoi stantsii (The measurements of NO₂ total content and vertical distribution at Zvenigorod scientific station), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2000, Vol. 36, No. 6, pp. 831–846.
5. Ionov D. V., Timofeev Yu. M., Regional'nyi kosmicheskii monitoring sodержaniya dvoukisi azota v troposfere (Regional space monitoring of nitrogen dioxide content in the troposphere), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 45, No. 4, pp. 467–476.
6. Khvan T. A., Khvan P. A., *Bezopasnost' zhiznedeysel'nosti* (Life safety), Rostov: Feniks, 2003, 416 p.
7. Beirle S., Platt U., Wenig M., Wagner T., Weekly Cycle of NO₂ by GOME Measurements: A Signature of Anthropogenic Sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, Vol. 3, No. 6, pp. 2225–2232.
8. Boersma K. F., Eskes H. J., Brinksma E. J., Error analysis for tropospheric NO₂ retrievals from space, *J. Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, No. D04311.
9. Boersma K. F., Eskes H. J., Dirksen R. J., Van der A R. J., Veefkind J. P., Stammes P., Veefkind J. P., Sneep M., Claas J., Leitao J., Richter A., Zhou Y., Brunner D., An improved tropospheric NO₂ column retrieval algorithm for the ozone monitoring instrument, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, Vol. 4, No. 9, pp. 1905–1928.
10. Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M., Frerick J., Noël S., Rozanov V. V., Chance K. V., Goede A. P. H., SCIAMACHY: Mission Objectives and Measurement Modes, *J. Atmospheric Sciences*, 1999, Vol. 56, No. 2, pp. 127–150.
11. Bucsela E. J., Krotkov N. A., Celarier E. A., Lamsal L. N., Swartz W. H., Bhartia P. K., Boersma K. F., Veefkind J. P., Gleason J. F., Pickering K. E., A new stratospheric and tropospheric NO₂ retrieval algorithm for nadir-viewing satellite instruments: applications to OMI, *Atmospheric Measurement Technique*, 2013, Vol. 6, No. 10, pp. 2607–2626.
12. Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M., Rozanov V. V., Ladstätter-Weißmayer A., Richter A., DeBeek R., Hoogen R., Bramstedt K., Eichmann K.-U., Eisinger M., The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results, *J. Atmospheric Sciences*, 1999, Vol. 56, No. 2, pp. 151–175.
13. Castellanos P., Boersma K. F., Torres O., de Haan J. F., OMI tropospheric NO₂ air mass factors over South America: effects of biomass burning aerosols, *Atmospheric Measurement Technique*, 2015, Vol. 8, No. 9, pp. 3831–3849.
14. Celarier E. A., Brinksma E. J., Gleason J. F., Veefkind J. P., Cede A., Herman J. R., Ionov D., Goutail F., Pommereau J.-P., Lambert J.-C., van Roozendaal M., Pinardi G., Wittrock F., Schönhardt A., Richter A., Ibrahim O. W., Wagner T., Bojkov B., Mount G., Spinei E., Chen C. M., Pongetti T. J., Sander S. P., Bucsela E. J., Wenig M. O., Swart D. P. J., Volten H., Kroon M., Levelt P. F., Validation of Ozone Monitoring Instrument Nitrogen Dioxide Columns, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, No. D15S08.
15. Kieseewetter G., Borken-Kleefeld J., Schöpp W., Heyes C., Bertok I., Thunis P., Bessagnet B., Terrenoire E., Amann M., Modelling Compliance with NO₂ and PM₁₀ Air Quality Limit Values in the GAINS Model, *TSAP Report*, 2013, 76 p.
16. Levelt P. F., van den Oord G. H. J., Dobber M. R., Malkki A., Visser H., de Vries J., Stammes P., Lundell J., Saari H., The Ozone Monitoring Instrument, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, No. 5, pp. 1093–1101.
17. Liu F., Beirle S., Zhang Q., Dörner S., He K., Wagner T., NO_x lifetimes and emissions of cities and power plants in polluted background estimated by satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, Vol. 16, No. 8, pp. 5283–5298.
18. Lorente A., Boersma K. F., Yu H., Dörner S., Hilboll A., Richter A., Liu M., Lamsal L. N., Barkley M., De Smedt I., Van Roozendaal M., Wang Y., Wagner T., Beirle S., Lin J.-T., Krotkov N., Stammes P., Wang P., Henk J., Eskes H. J., Krol M., Structural uncertainty in air mass factor calculation for NO₂ and HCHO satellite retrievals, *Atmospheric Measurement Technique*, 2017, Vol. 10, No. 3, pp. 759–782.

19. McPeters R. D., Krueger A. J., Bhartia P. K., Herman J. R., Oaks A., Ahmad Z., Cebula R. P., Schlemmer B. M., Swissler T., Taylor S. L., Torres O., Wellemeyer C. G., *Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*, Technical Report, 1993, available at: <http://cedadocs.ceda.ac.uk/1099/> (April 10, 2018).
20. Paraschiv S., Constantin D. E., Paraschiv S. L., Voiculescu M., OMI and Ground-Based In-Situ Tropospheric Nitrogen Dioxide Observations over Several Important European Cities during 2005–2014, *Intern. J. Environmental Research and Public Health*, 2017, Vol. 14, No. 11, p. E1415.
21. Prather M., Ehhalt D., Dentener F., Derwent R., Grubler A., Atmospheric chemistry and greenhouse gases, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Third Assessment Report. Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2001, Ch. 4, pp. 239–289.
22. Richter A., Burrows J. P., Nüss H., Granier C., Niemeier U., Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 2005, Vol. 437, No. 7055, pp. 129–132.
23. Schmidt C. W., Beyond a One-Time Scandal: Europe's Ongoing Diesel Pollution Problem, *Environmental Health Perspectives*, 2016, Vol. 124, No. 1, pp. A19–A22.
24. Seinfeld J. H., Pandis S. N., *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to climate Change*, New York: Wiley, 2016, 1152 p.
25. Van der A R. J., Eskes H., Boersma K. F., van Noije T. P. C., Van Roozendael M., De Smedt I., Peters D. H. M. U., Meijer E. W., Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, No. D04302.
26. Veefkind J. P., Aben I., McMullan K., Förster H., De Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H. J., De Haan J. F., Kleipool Q., Van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P. F., TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 120, pp. 70–83.