

УДК 551.510.41

РЕГИОНАЛЬНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ ДВУОКИСИ АЗОТА В ТРОПОСФЕРЕ

© 2009 г. Д. В. Ионов, Ю. М. Тимофеев

Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока
Санкт-Петербургского государственного университета
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1
E-mail: ionov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 27.05.2008 г., после доработки 23.09.2008 г.

Представлено краткое описание действующей спутниковой аппаратуры для оперативного глобального мониторинга содержания NO_2 в атмосфере – ERS-2 GOME, Envisat SCIAMACHY, Aura OMI, MetOp GOME-2. Показано, что точность измерений общего содержания NO_2 , составляющая ~10% для фоновых условий содержания NO_2 в тропосфере, существенно снижается в районах с антропогенным загрязнением. Приведены примеры практического использования данных многолетних спутниковых измерений для регионального мониторинга содержания NO_2 в тропосфере: картирование тропосферного NO_2 на территории Российской Федерации, выделение недельного и годового циклов в вариациях тропосферного NO_2 для городских мегаполисов с оценкой долговременного линейного тренда в 1995–2007 гг. (Санкт-Петербург, Москва и Париж).

1. ВВЕДЕНИЕ

Двуокись азота (NO_2) – одна из ключевых газовых компонент в атмосферной химии. В стратосфере NO_2 участвует в цикле реакций по разрушению атмосферного озона, тогда как в тропосфере фотолиз NO_2 является одним из источников образования O_3 . Важно отметить, что повышенное содержание NO_2 в приземном слое представляет прямую угрозу человеку и окружающей среде, вызывая образование фотохимического смога и кислотных дождей. При этом до 60% выбросов NO_2 в тропосферу обусловлено сжиганием топлива автомобилями и промышленными установками [1]. Антропогенный вклад в содержание NO_2 во всей толще атмосферы настолько велик, что зачастую превышает естественный уровень и становится заметен в данных наблюдений спутниковых систем глобального мониторинга. Это обстоятельство позволяет, в свою очередь, использовать результаты спутниковых измерений содержания NO_2 в качестве индикатора антропогенного загрязнения.

Информация о глобальном распределении NO_2 поступает в настоящее время со спутниковых систем надирных измерений, установленных на околополярных солнечно-синхронных орбитах. В частности, с 1995 года на борту европейского спутника ERS-2 функционирует прибор GOME (Global Ozone Monitoring Experiment [2]), осуществляющий глобальный мониторинг общих содержаний (ОС) озона и NO_2 по измерениям спектров отраженного и рассеянного солнечного излучения в УФ и видимой областях спектра. Позднее, в 2002 г. был запущен

аналогичный по принципу измерений ОС NO_2 аппарат SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorbption spectroMeter for Atmospheric ChartographY) [3], установленный на европейском спутнике ENVISAT. Затем в 2004 г. состоялся запуск американского спутника AURA, на борту которого в числе прочих установлен прибор OMI (Ozone Monitoring Experiment [4]), измеряющий также и ОС NO_2 . Наконец, в октябре 2006 г. состоялся запуск европейского спутника EPS-MetOp, на котором функционирует аналог аппаратуры GOME – GOME-2 [5]. Основные характеристики действующих надирных спутниковых измерительных систем представлены в табл. 1. Следует отметить существенное улучшение пространственного разрешения и периодичности измерений в последовательности вводимых в эксплуатацию спутниковых приборов. В последние десятилетия были проведены также многочисленные спутниковые эксперименты по определению вертикальных профилей содержания NO_2 в стратосфере с помощью затменных методов измерений – аппаратура SAGE-I, -II, -III, POAM-II, -III, HALOE и др. (см., например, [6–8]). Обладая высоким вертикальным пространственным разрешением в стратосфере, эти приборы не могли, тем не менее, обеспечить требуемого горизонтального и временного разрешений.

В настоящее время, основные “очаги” антропогенного загрязнения атмосферы окислами азота сосредоточены, по данным надирных спутниковых наблюдений, в промышленных и густонаселенных районах США, Китая, Западной Европы и Южной Африки. При этом накопленный ряд непрерывных

Таблица 1. Основные характеристики действующей спутниковой аппаратуры, осуществляющей глобальный мониторинг содержания NO₂ в атмосфере

Характеристики	Название аппаратуры			
	GOME	SCIAMACHY	OMI	GOME-2
Носитель	ERS-2	ENVISAT	EOS Aura	MetOp
Агентство	ESA	ESA	NASA	EUMETSAT
Год запуска	1995	2002	2004	2006
Горизонтальное разрешение, км ²	40 × 320	30 × 60	13 × 24	40 × 80
Спектральный диапазон*, нм	425–450	425–450	405–465	425–445
Спектральное разрешение, нм	~0.3	~0.2	~0.5	~0.3
Период глобального картирования, сут	~3	~6	~1	~1.5
Местное время измерений, чч:мм	~10:30	~10:00	~14:00	~9:30

Примечание. * – спектральный диапазон измерений, используемый для определения содержания NO₂.

спутниковых наблюдений за ОС NO₂ (начиная с 1995 г.) позволяет уже оценивать его долговременные изменения. Так, в работе [9] отмечены существенные сокращения антропогенных выбросов NO₂ для промышленных районов Западной Европы и США (10–20%), выявленные на основе данных измерений GOME и SCIAMACHY в период с 1996 по 2004 гг. Эти сокращения могут быть связаны с широким внедрением каталитических преобразователей в двигателях современных автомобилей и повышением качества используемого топлива. Вместе с тем исследования выявили также заметный рост содержания NO₂ в период спутниковых наблюдений – до 50% – в тропосфере промышленных районов Китая, обусловленный стремительным экономическим развитием этого региона (общее число автомобилей в Китае с 1995 по 2002 гг. удвоилось).

Сегодня данные спутникового мониторинга NO₂ широко применяются для решения различных научных и прикладных задач в Западной Европе, США, Японии и, прежде всего, – в задаче регионального мониторинга качества приземного воздуха. Цель настоящей работы – охарактеризовать точность современных спутниковых данных об ОС NO₂ и апробировать использование результатов спутниковых измерений для исследования региональных пространственно-временных вариаций содержания двуокси азота в тропосфере на территории Российской Федерации.

2. ТОЧНОСТЬ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ NO₂

Как всякие дистанционные измерения, определение газового состава атмосферы по данным радиационных наблюдений из космоса представляет собой сложную обратную задачу. Точность ее решения и соответственно точность определения

содержания искомым газовых компонент обусловлена совокупностью разнообразных факторов: погрешностями измерений регистрирующего прибора, его абсолютной и спектральной калибровками, погрешностями телеметрии, адекватностью используемой модели переноса солнечного излучения, особенностями алгоритма интерпретации, точностью исходной спектроскопической и априорной информации. Практическое применение данных спутниковых измерений требует тщательного анализа их соответствия предъявляемым требованиям точности, пространственного и временного разрешения на основе интенсивных согласованных исследований по валидации спутниковых данных.

Валидация спутниковых данных об ОС NO₂ сопряжена с рядом трудностей. Во-первых, количество станций наземных измерений ОС NO₂ сравнительно невелико. Существующая наземная сеть измерений включает в себя приборы, регистрирующие спектры прямого (Фурье-интерферометры) и рассеянного (дифференциальная спектроскопия) солнечного излучения в ИК и видимой областях спектра [10, 11]. Во-вторых, большинство этих измерений осуществляется сумеречным методом и, следовательно, при сопоставлении их со спутниковыми данными приходится сталкиваться со значительным пространственно-временным рассогласованием спутниковых и наземных измерений. Кроме того, содержание NO₂ в атмосфере испытывает значительные вариации в течение суток, обусловленные изменением освещенности при переходе от дня к ночи (с различными фотохимическими процессами), особенно при восходе и заходе Солнца. Наконец, еще одним важным фактором, затрудняющим сопоставление данных спутниковых и наземных измерений ОС NO₂, являются часто наблюдаемые антропогенные загрязнения, приводящие к повышенному содержанию NO₂ в тропосфере. Нередко обычно незначительное тропосфер-

Таблица 2. Оценки расхождений между данными спутниковых и наземных измерений ОС NO₂, полученные по результатам сопоставлений на станциях Иссик-Куль, ОНР (Observatoire de Haute-Provence, Франция) и Санкт-Петербург

Станция	Спутниковая аппаратура			
	GOME GDP4	SCIAMACHY IUPBV2.1	OMI OMNO2	GOME-2 IUPBV2.1
Иссик-Куль	+0.44 ± 0.49 +14 ± 15% 0.86	+0.20 ± 0.32 +7 ± 12% 0.84	-0.08 ± 0.39 -3 ± 14% 0.82	-0.11 ± 0.37 -3 ± 11% 0.71
ОНР	+0.49 ± 0.82 +7 ± 27% 0.45	+0.42 ± 0.61 +15 ± 22% 0.65	-0.33 ± 0.62 -11 ± 17% 0.62	+0.26 ± 0.53 +8 ± 15% 0.62
Санкт-Петербург	+0.17 ± 0.93 +14 ± 46% 0.68	+0.08 ± 0.73 +7 ± 36% 0.80	-0.29 ± 0.85 -10 ± 34% 0.76	-0.16 ± 0.64 -2 ± 37% 0.83

Примечание. Приведены значения среднего (± стандартное отклонение) для разницы “спутник – наземный прибор” в абсолютных (10^{15} мол/см²) и относительных единицах (%), а также коэффициент корреляции, для данных спутниковой аппаратуры GOME (1995–2007 гг.), SCIAMACHY (2002–2007 гг.), OMI (2004–2007 гг.) и GOME-2 (2007 г.).

ное содержание NO₂ превышает в таких ситуациях ОС во всем столбе вышележащей атмосферы. Поскольку сумеречные наземные и дневные спутниковые измерения имеют разную чувствительность к содержанию NO₂ в тропосфере и разное пространственное разрешение (а пространственно-временные вариации тропосферного NO₂ значительно выше, чем в стратосфере), подобные загрязнения могут вносить дополнительное рассогласование в результаты сравнений.

Для учета указанных особенностей сопоставлений используются различные методики коррекции временных вариаций NO₂, выбор условий и станций подспутниковых измерений. В частности, в работах, посвященных валидации данных спутниковых измерений ОС NO₂ на основе сравнений с результатами наземных сумеречных измерений на станции Иссик-Куль (Киргизия) [12, 13], для приведения к единому времени сопоставлений использовался рассчитанный с помощью фотохимической модели [14] суточный ход ОС NO₂. Аналогичный подход был реализован в дальнейшем и для валидации спутниковых данных об ОС NO₂ на основе сопоставлений с результатами измерений глобальной наземной сети спектрометров SAOZ [15], а также с данными наземных сумеречных измерений в районе Санкт-Петербурга (Петродворец, ~30 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга) [16]. Результаты последних оценок расхождений между данными спутниковых и наземных измерений ОС NO₂, полученных на основе единой методики сопоставлений на станциях Иссик-Куль, ОНР (Observatoire de Haute-Provence, Франция) и Санкт-Петербург, представлены в табл. 2. В данном сопоставлении были использованы данные измерений спутниковых приборов GOME в 1995–2007 гг., SCIAMACHY в 2002–2007 гг., OMI в 2004–2007 гг., а также данные нового прибора GOME-2 в 2007 г. (результаты измерений GOME и OMI представлены оперативными ал-

горитмами – версии GDP4 и V3, соответственно; измерения SCIAMACHY и GOME-2 – алгоритмом университета Бремена, версия V2.1). Как видно из табл. 2, средние расхождения для рассмотренных станций и спутниковой аппаратуры составляют от -0.3 до +0.5 × 10¹⁵ мол/см² (от -11 до +15%). При этом стандартные отклонения этих оценок, являющиеся мерой взаимной погрешности сравниваемых между собой результатов измерений, достаточно высоки и существенно зависят от станции сопоставлений. Так, даже для наиболее совершенной из действующей сейчас спутниковой аппаратуры – OMI, абсолютные стандартные отклонения средних расхождений составляют от 0.39 × 10¹⁵ мол/см² (14%, Иссик-Куль), до 0.62 × 10¹⁵ мол/см² (17%, ОНР) и 0.86 × 10¹⁵ мол/см² (34%, Санкт-Петербург). Такая разница обусловлена существенно большим антропогенным вкладом в тропосферное содержание NO₂ вблизи Санкт-Петербурга, по сравнению со станцией ОНР (французские Альпы, центральная Европа) и тем более – с высокогорной станцией Иссик-Куль в центральной Азии. Результат сопоставления данных наземных сумеречных наблюдений ОС NO₂ в Санкт-Петербурге с данными согласованных спутниковых измерений SCIAMACHY 2004–2007 гг. представлен на рис. 1 (данные спутниковых и наземных измерений приведены ко времени местного полудня). На фоне плавного сезонного хода выделяются аномально высокие значения ОС NO₂ – преимущественно в зимнее время, обусловленные антропогенным загрязнением тропосферы.

В целом, результаты многочисленных исследований по валидации данных измерений ОС NO₂ спутниковой аппаратурой GOME и SCIAMACHY демонстрируют точность не хуже 0.3 × 10¹⁵ мол/см² (~10%), для фоновых условий содержания NO₂ в тропосфере [17, 18]. Аналогичные оценки получе-

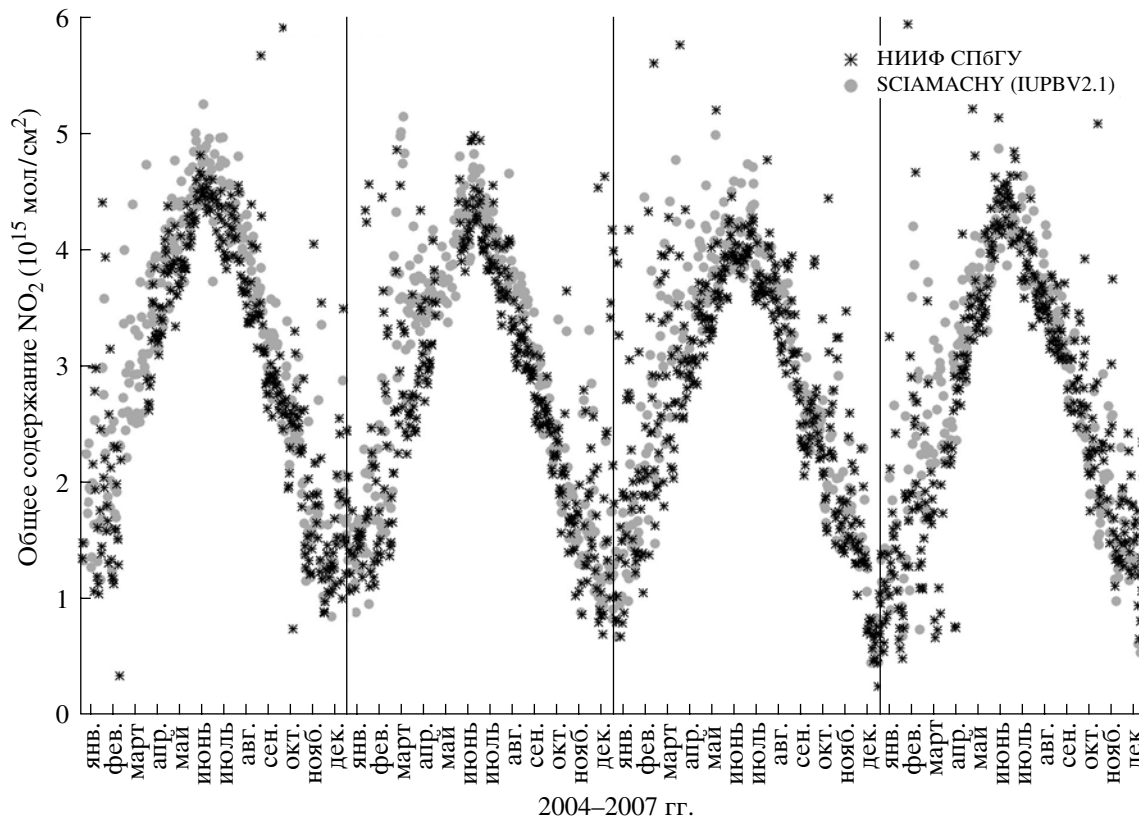


Рис. 1. Результаты сумеречных наземных измерений ОС NO_2 НИИФ СПбГУ, а также данные спутниковых измерений в районе Санкт-Петербурга (SCIAMACHY) в 2004–2007 гг. (данные спутниковых и наземных измерений приведены ко времени местного полдня).

ны недавно и для измерений ОС NO_2 спутниковой аппаратурой OMI [19].

3. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В отличие от ОС NO_2 , достоверно оценить точность спутниковых измерений содержания NO_2 отдельно в тропосфере оказывается существенно сложнее в силу больших пространственно-временных вариаций поля NO_2 вблизи источников загрязнений, различий в пространственном разрешении сравниваемых между собой систем наблюдений, а также недостаточно изученной точности самих наземных измерений. Предварительные оценки точности измерений тропосферного содержания аппаратурой OMI, полученные в работе [19], составляют ~15–30%. Поскольку наблюдаемые пространственно-временные вариации тропосферного NO_2 существенно выше, даже измерения такой относительно невысокой точности позволяют получить новую ценную информацию. Ниже приведены примеры использования данных подобных спутниковых измерений для регионального мониторинга содержания NO_2 в тропосфере.

3.1. Пространственные распределения источников NO_2 в тропосфере

Выделение тропосферной составляющей из результатов спутниковых измерений ОС NO_2 основано на известных особенностях пространственного распределения стратосферной и тропосферной компонент ОС NO_2 в вертикальном столбе. В отличие от тропосферного NO_2 , его содержание в стратосфере характеризуется значительно большим масштабом пространственных вариаций (размер неоднородностей), а географическое распределение имеет преимущественно зональный характер, возмущенный крупномасштабными планетарными волнами. Эти обстоятельства позволяют использовать средства пространственного анализа результатов спутниковых измерений для разделения тропосферного и стратосферного вкладов – сравнивая, например, измерения в интересующей области с данными недавних измерений, выполненными над удаленными районами мирового океана, вне антропогенного загрязнения. В спутниковом эксперименте OMI этот подход был существенно развит и впервые реализован в оперативном режиме. Действующая система интерпретации измерений OMI включает в себя предварительное выделение райо-

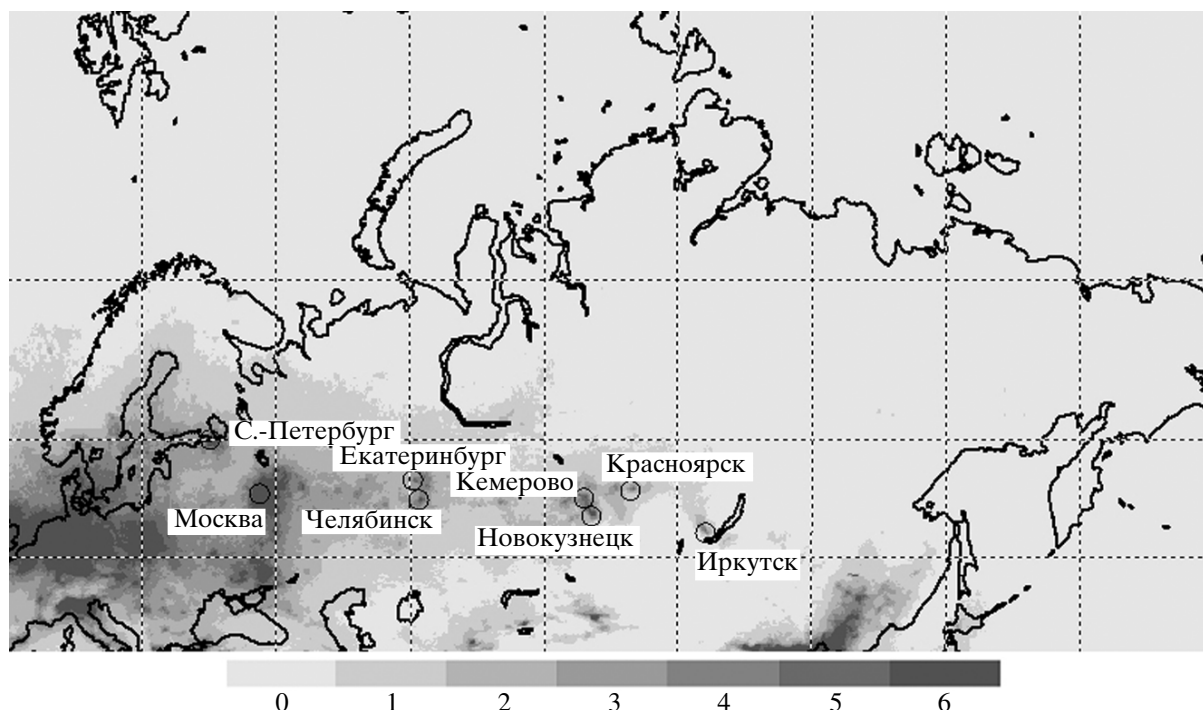


Рис. 2. Среднегодовое распределение содержания тропосферного NO_2 (10^{15} мол/см²) в северной части Евразии, построенное на основе интерпретации данных спутниковых измерений ОМІ в 2006–2007 гг. (<http://www.temis.nl/>).

нов с высоким содержанием NO_2 в тропосфере (на основе известного глобального распределения основных источников) и оценку поля стратосферного содержания (на основе пространственного сглаживания с использованием планетарной волны для описания зональной изменчивости) с последующим уточнением содержания NO_2 в загрязненных районах с учетом результатов трехмерного моделирования тропосферы [20].

К настоящему времени накоплен уже значительный объем спутниковых измерений, необходимый для подробного картирования распределения содержания NO_2 в тропосфере. Это и данные многолетних измерений аппаратурой GOME, и более поздние измерения аналогичной аппаратурой SCIAMACHY, обладающей более высоким, по сравнению с GOME, пространственным разрешением. Наконец, еще большей подробностью и периодичностью измерений характеризуются данные ОМІ (см. табл. 1). Карта среднегодового распределения тропосферного NO_2 над северной частью Евразии, построенная по данным среднемесячного картирования в период с июля 2006 по июль 2007 гг., представлена на рис. 2 (данные получены по результатам интерпретации измерений ОМІ в Королевском национальном институте Нидерландов, www.temis.nl). Как видно из рисунка, основной особенностью поля тропосферного NO_2 на представленной территории является повышенное содержание в западной Европе (Бельгия, Голландия, Германия – до 1.7×10^{16} мол/см²) и

на дальнем Востоке (Китай – до 1.4×10^{16} мол/см²), а также локальные максимумы в районе городских мегаполисов и промышленных центров России – города Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Челябинск, Кемерово, Новокузнецк, Красноярск, Томск. Максимальные значения среднегодовых содержаний тропосферного NO_2 для указанных пунктов представлены в табл. 3. Для сравнения здесь же приведены аналогичные оценки, полученные по результатам картирования данных спутниковой аппаратуры SCIAMACHY в 2003–2006 гг., а также численность населения этих городов. Для большинства пунктов данные ОМІ и SCIAMACHY дают близкие оценки. Характерно, что величина тропосферного содержания NO_2 не всегда однозначно связана с численностью населения. Так, хотя численность населения Новокузнецка почти вдвое меньше населения Красноярска, содержание NO_2 в Новокузнецке существенно выше (см. табл. 3). Кроме того, отдельные города демонстрируют значительно более высокие значения содержания тропосферного NO_2 в 2006–2007 гг., по сравнению с 2003–2006 гг. – Челябинск, Новокузнецк, Кемерово. Все это может указывать на преобладание в этих пунктах промышленных выбросов над транспортными, причем первые, по-видимому, испытывают в последние годы значительный рост.

Таблица 3. Среднегодовые содержания NO_2 в тропосфере крупных городов и промышленных центров России (10^{15} мол/см²), полученные по данным спутниковых измерений аппаратуры SCIAMACHY (2003–2006 гг.) и OMI (2006–2007 гг.)

Города	Население [млн. чел.]	SCIAMACHY 2003–2006 гг. [10^{15} мол/см ²]	OMI 2006–2007 гг. [10^{15} мол/см ²]
Москва	10.10	21.75	20.00
Санкт-Петербург	4.67	9.85	9.13
Екатеринбург	1.29	4.87	4.84
Челябинск	1.08	4.13	5.69
Красноярск	0.91	5.16	4.66
Иркутск	0.59	4.51	4.49
Новокузнецк	0.55	5.42	6.24
Кемерово	0.49	3.87	5.65

Примечание. Города приведены в порядке убывания численности населения (по данным Госкомстата РФ от 2002 г.).

3.2. Недельный цикл вариаций тропосферного NO_2 в мегаполисах

Существуют исследования, посвященные оценкам недельного цикла тропосферного содержания NO_2 вблизи крупных мировых мегаполисов, использующие данные многолетних наземных и спутниковых измерений. Подобный анализ был проведен, в частности, в работе [21], где использовалась информация о тропосферном содержании NO_2 , извлеченная из данных GOME. Недельный цикл тропосферного NO_2 был выявлен также по результатам спектрометрических измерений в санаторной зоне западного Подмосковья [22]. Поскольку основная часть антропогенных выбросов NO_2 связана со сжиганием топлива в двигателях транспорта и энергетических установках, наблюдаемый цикл характе-

ризуется минимумом содержания NO_2 в выходные дни. Результаты расчета недельного цикла тропосферного NO_2 , полученные по данным ежедневных спутниковых измерений прибором OMI в районе Санкт-Петербурга в 2004–2007 гг., представлены на рис. 3. Видно, что минимальное содержание NO_2 наблюдается в воскресенье (3.97×10^{15} мол/см²) – на 21% ниже, чем в пятницу (5.01×10^{15} мол/см²). Этот минимум хорошо согласуется с результатами аналогичных исследований для крупных мегаполисов западной Европы [21], выявляя наличие недельного цикла содержания NO_2 в тропосфере Санкт-Петербурга, обусловленного интенсивностью работы промышленности и транспорта. Анализ данных наземных спектроскопических измерений вблизи Санкт-Петербурга [16] в 2004–2007 гг. также де-

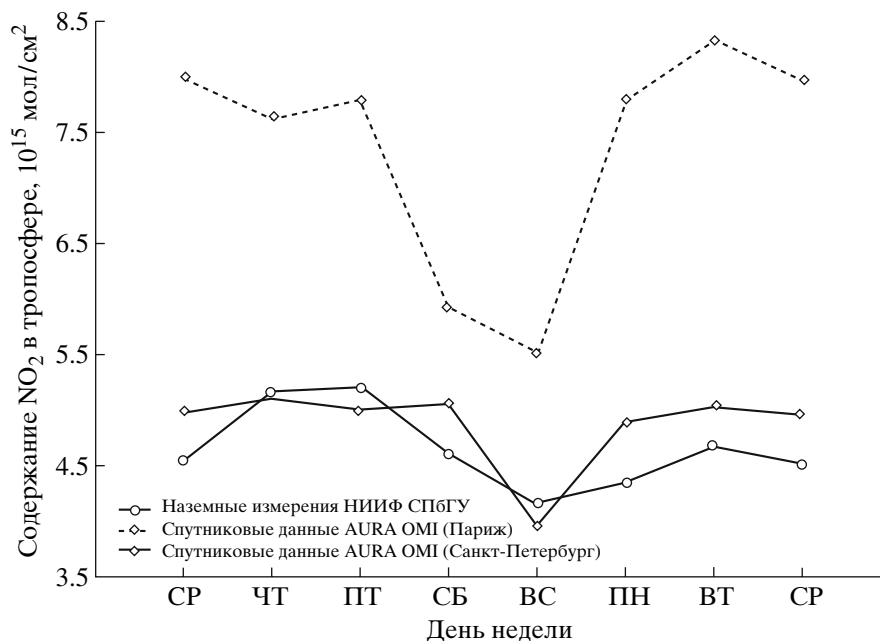


Рис. 3. Недельный цикл содержания тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга и Парижа по данным спутниковых измерений OMI в 2004–2007 гг., а также данным наземных дневных измерений НИИФ СПбГУ.

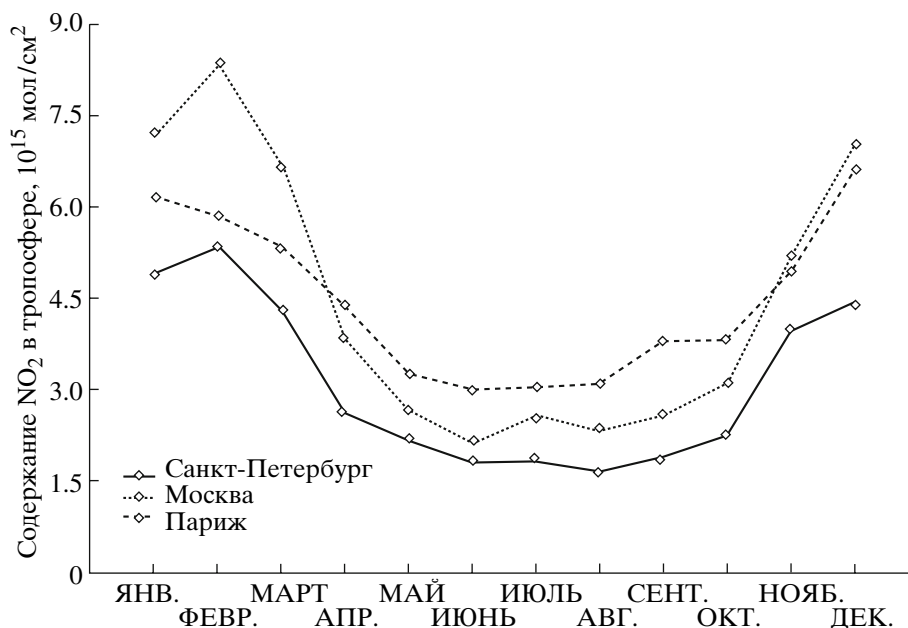


Рис. 4. Годовой ход содержания тропосферного NO₂ в районе городов Санкт-Петербурга, Москвы и Парижа по данным многолетних спутниковых измерений GOME в 1995–2007 гг.

монстрирует выявленную недельную цикличность (см. рис. 3). При этом в качестве оценки тропосферного вклада в измеряемое ОС NO₂ использовались результаты среднедневных измерений в период с 10:00 до 14:00 местного времени (за вычетом средней стратосферной компоненты, полученной из данных многолетних сумеречных измерений и скорректированной ко времени дневных измерений с учетом ее суточного хода). Как и в результатах анализа спутниковых данных, минимальное значение содержания NO₂ измеренное наземным методом, отмечается в воскресенье (4.16×10^{15} мол/см²), на 20% меньше максимального значения в будние дни (пятница, 5.21×10^{15} мол/см²). Для сравнения на том же рисунке приведена оценка недельного цикла для мегаполиса города Париж (Франция), выполненная на основе спутниковых измерений OMI. В целом, по сравнению с Санкт-Петербургом, тропосферное содержание NO₂ в районе Парижа на 50% выше (население 11.6 млн. чел.). При этом воскресный минимум составляет 34% от максимального значения в будние дни.

3.3. Сезонный ход вариаций содержания NO₂ в тропосфере

Данные многолетних спутниковых измерений позволяют также выявить сезонный ход в вариациях тропосферного содержания NO₂ в районах интенсивного антропогенного загрязнения. Очевидно, что в зимнее время выброс оксидов азота в атмосферу может существенно увеличиваться при интенсивном сжигании топлива в энергетических

установках систем отопления. Кроме того, низкие температуры воздуха увеличивают время жизни NO_x в атмосфере и в сочетании с более вероятными для этого времени года стабильными погодными условиями (температурные инверсии в приземном слое) способствуют накоплению загрязняющих веществ. На рис. 4 представлен сезонный ход тропосферного содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга, построенный на основе соответствующих среднемесячных значений, рассчитанных за весь период измерений GOME в 1995–2007 гг. Оценка содержания NO₂ в тропосфере получена по упрощенной методике – для исключения стратосферного вклада использовалось минимальное для каждой широты среднемесячное значение ОС. Для сравнения на том же рисунке представлены результаты аналогичных расчетов для регионов Москвы и Парижа (Франция). Можно отметить относительно высокие содержания тропосферного NO₂ для всех трех мегаполисов в зимнее время. Самые низкие среднемесячные содержания наблюдаются в Санкт-Петербурге. Содержания NO₂ в районе российской и французской столиц находятся примерно на одном уровне в течение большей части года, за исключением конца зимы и начала весны, когда московские значения существенно превышают парижские, достигая максимума в феврале.

3.4. Многолетний тренд содержания тропосферного NO₂

Как уже было отмечено выше, данные многолетнего спутникового мониторинга атмосферного

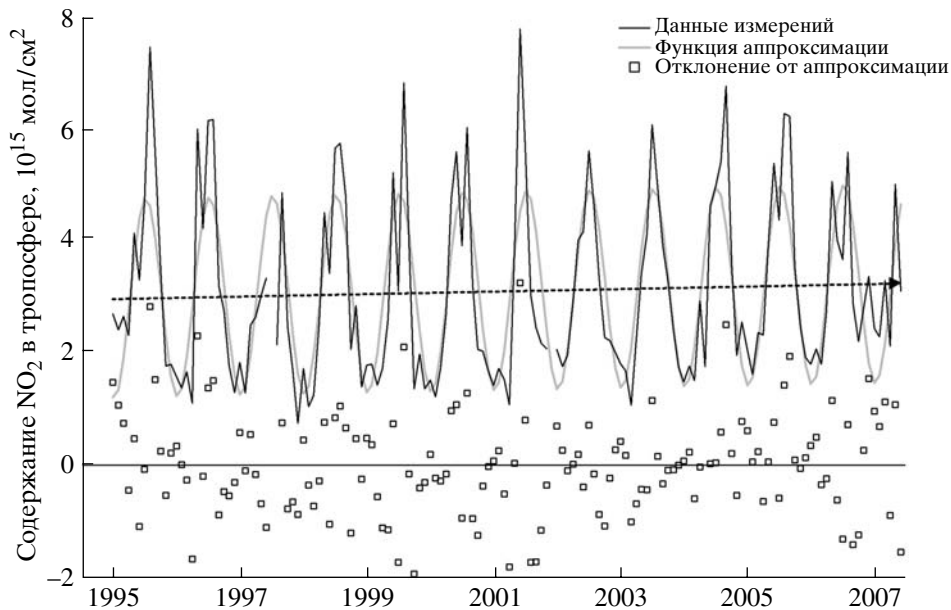


Рис. 5. Среднемесячные значения тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений GOME в 1995–2007 гг. Прямая пунктирная линия – линейная компонента аппроксимирующей функции (тренд); прямоугольными символами показаны отклонения (остаток ряда)

NO_2 активно используются для выявления тренда его тропосферного содержания в районах интенсивной антропогенной эмиссии оксидов азота. Так, в работе [23] получены статистически значимые оценки линейного тренда тропосферного NO_2 над индустриальной частью восточного Китая, достигающего в отдельных районах 20% в год (Шанхай). Другое аналогичное исследование выявило, наряду с Китаем, значительный рост содержания NO_2 в тропосфере других регионов с быстро развивающейся экономикой – Индия, Иран, Россия [24]. В настоящей работе представлена приближенная оценка линейного тренда тропосферного NO_2 , полученная на основе интерпретации данных измерений спутниковой аппаратуры GOME в 1995–2007 гг. по упрощенной методике, описанной в [16].

В отличие от работы [16], где анализировались среднегодовые содержания NO_2 в тропосфере в 1997–2006 гг., в данном исследовании рассматривались среднемесячные значения в период с июля 1995 по декабрь 2007 гг. (т.е. за 12.5 лет). Кроме того, для получения более сглаженных оценок в качестве критерия пространственного выделения величины содержания из данных картирования использовалось более низкое пространственное разрешение, $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ (по сравнению с $0.7^\circ \times 0.7^\circ$, использовавшемся в [16]). Методика определения тренда была модифицирована в соответствии с исследованием [23], посвященным анализу тренда тропосферного содержания NO_2 на территории Китая. Для аппроксимации временного ряда среднемесячных значений использовалась модельная функция, состоя-

щая из линейного тренда и компоненты сезонной изменчивости:

$$Y_t = A + \frac{B}{12} X_t + C \sin(DX_t + E) + N_t, \quad (1)$$

где Y_t – значение содержания NO_2 для месяца t , X_t – порядковый номер месяца с января 1995 г., N_t – остаток ряда (отклонение от аппроксимации), A – начальное значение ряда, B – годовой тренд, а коэффициенты C , D и E – амплитуда, частота и фазовый сдвиг компоненты сезонного хода. Погрешность определения годового тренда, в соответствии с [24], определяется по формуле:

$$\sigma_B \approx \left[\frac{\sigma_N}{n^{3/2}} \sqrt{\frac{1+\phi}{1-\phi}} \right], \quad (2)$$

где n – длина ряда в годах, σ_N – вариация остатка ряда N_t , а ϕ – автокорреляция N_t , рассчитанная для модели стационарного процесса:

$$N_t = \phi N_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где ε_t – белый шум остатка ряда N_t . По результатам анализа N_t – значение автокорреляции ϕ было принято равным 0.1.

Пример временного ряда спутниковых измерений GOME в районе Санкт-Петербурга, с аппроксимирующей его функцией и компонентой линейного тренда, представлен на рис. 5. Оценка величины тренда ($B \pm \sigma_B$) в пересчете на средний рост за 10 лет составила $(+7 \pm 8)\%$. Аналогичная оценка для района города Москвы составила $(+4 \pm 8)\%$. Эти оценки значительно ниже полученных ранее в работе [16],

что, по-видимому, связано с использованием более длинного ряда спутниковых измерений и существенным усовершенствованием методики выделения тренда. Следует также отметить, что согласно общепринятому критерию, величина тренда считается статистически значимой при выполнении условия $|B/\sigma_B| > 2$ (см., например, [24]). Полученные здесь оценки не удовлетворяют этому условию, однако указывают на тенденцию в долгосрочном изменении содержания тропосферного NO_2 . Для сравнения, аналогичным образом был проанализирован ряд измерений GOME в районе города Парижа. Оценка линейного тренда составила при этом $(-8 \pm 9)\%$. Этот тренд также не может считаться статистически значимым, хотя его отрицательная величина согласуется с результатами многих работ, указывающих на сокращение выбросов NO_x в западной Европе (см., например, [9, 24]).

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представлено краткое описание действующей спутниковой аппаратуры по оперативному глобальному мониторингу содержания NO_2 в атмосфере – ERS-2 GOME, Envisat SCIAMACHY, Aura OMI, MetOp GOME-2. Даны оценки точности спутниковых измерений общего содержания NO_2 , составляющие ~10% для фоновых условий содержания NO_2 в тропосфере, и ~15% при сопоставлениях с данными наземных измерений в районах с антропогенным загрязнением.

Приведены примеры практического использования данных многолетних спутниковых измерений для регионального мониторинга содержания NO_2 в тропосфере, со следующими основными результатами.

– Карта среднегодового распределения тропосферного NO_2 , построенная по данным среднемесячного картирования результатов измерений спутниковой аппаратуры OMI, демонстрирующая основные источники антропогенных загрязнений на территории Российской Федерации.

– Недельный цикл тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга, характеризующийся минимальным содержанием в воскресенье (~20% от максимального значения тропосферного NO_2 в пятницу). Аналогичная особенность выявлена и при анализе данных дневных наземных спектроскопических измерений [16], что указывает на исключительно антропогенное происхождение наблюдаемых вариаций.

– Сезонный ход тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга, характеризующийся максимальным содержанием в зимний период, обусловленным сезонностью антропогенных выбросов NO_x , а также метеорологическими условиями, способствующими накоплению загрязнений в приземном слое атмосферы.

– Анализ многолетнего ряда спутниковых измерений тропосферного NO_2 в районе Санкт-Петербурга (1995–2007 гг.), выявивший положительный линейный рост $(+7 \pm 8)\%$ за 10 лет (не являющийся, однако, статистически значимым).

Результаты анализа долговременного тренда тропосферного NO_2 могут быть уточнены с использованием более полного ряда спутниковых данных, включающего в себя, помимо данных GOME, результаты измерений аппаратурой SCIAMACHY (начиная с 2002 г.). Следует в дальнейшем обратить внимание на возможный резкий рост промышленных выбросов NO_x в западной Сибири, где по результатам некоторых исследований уже выявлен статистически значимый положительный тренд тропосферного NO_2 – до 10% в год [24].

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИИФ СПбГУ А.В. Поборовскому и С.И. Осипову за организацию наземных спектроскопических измерений в Санкт-Петербурге, а также Ф. Гутай (F. Goutail, Service d'Aeronomie, Франция) и В.П. Сиянкову (Киргизский национальный университет, Киргизия) – за предоставление данных наземных измерений на станциях ОНР (Observatoire de Haute-Provence) и Иссык-Куль соответственно. Данные измерений GOME предоставлены Европейским космическим агентством (ESA). Данные измерений OMI предоставлены Aura Validation Data Center (AVDC), NASA Goddard Space Flight Center. Данные измерений SCIAMACHY и GOME-2 (содержание NO_2 в стратосфере) предоставил А. Рихтер (A. Richter, Университет Бремена, Германия). Данные SCIAMACHY и OMI о пространственном распределении содержания NO_2 в тропосфере получены с интернет-сайта Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI, <http://www.temis.nl>).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Минобрнауки РФ (РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836) и РФФИ (06-05-64909).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ehhalt D., Prather M., Dentener F., et al. Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases // Climate Change 2001: the Scientific Basis. Contribution to the 3rd Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881 p.
2. Burrows J.P. et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. № 2. P.151–175.
3. Bovensmann H. et al. SCIAMACHY – Mission objectives and measurement modes // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56 № 2. P.127–150.
4. Levelt P.F., Hilsenrath E., Leppelmeier G.W. et al. Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. on Geosc. And Remote Sensing. 2006. V. 44. № 5. IGRSD2. P. 1199–1208.
5. Munro R., Eisinger M., Anderson C. et al. GOME-2 on Metop: from in-orbit verification to routine operations // 2006 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Helsinki, Finland, 12–16 June, 2006.

6. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.
7. Polyakov A.V., Timofeyev Y.M., Ionov D.V. et al. Retrieval of ozone and nitrogen dioxide concentrations from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III (SAGE III) measurements using a new algorithm // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № D6. D06303.
8. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В. и др. Новая интерпретация измерений прозрачности спутниковым спектрометром SAGE III // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 410–422.
9. Richter A., Burrows J.P., Hendrik N. et al. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space // Nature. 2005. V. 437 (7055). P. 129–132.
10. Hoffman D.J. et al. Intercomparison of UV/visible spectrometers for measurements of stratospheric NO₂ for the Network for the Detection of Stratospheric Changes // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. № D8. P. 16765–16791.
11. Елохов А.С., Груздев А.Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
12. Ionov D.V., Sinyakov V.P., Semenov V.K. Validation of GOME (ERS-2) NO₂ vertical column data with ground-based measurements at Issyk-Kul (Kyrgyzstan) // Adv. Space Res. 2006. V. 37. № 12. P. 2254–2260.
13. Ionov D.V., Timofeyev Y.M., Sinyakov V.P. et al. Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO₂ vertical column data in the midlatitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France) // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D15S08, doi: 10.1029/2007JD008659.
14. Chipperfield M.P. Multiannual simulations with a three-dimensional chemical transport model // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № 2. D1. P. 1781–1805.
15. Ionov D., Timofeyev Y., Goutail F. et al. Delta-validation of ENVISAT SCIAMACHY total ozone and NO₂ with the data of ground-based UV-VIS measurements (M-124 and SAOZ) // Proc. of 3rd Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of Envisat (ACVE-3), ESRIN, Italy, 4–7 December 2006, ESA SP-642, 2006.
16. Поберовский А.В., Шашкин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М. Вариации содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга по наземным и спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 547–556.
17. Lambert J.-C., Balis D.S. Delta validation report for ERS-2 GOME Data Processor upgrade to version 4.0 // ERSE-CLVL-EOPG-TN-04-0001. ESA. 2004. 82 p.
18. Piders A.J.K., Bramstedt K., Lambert J.-C. et al. Overview of SCIAMACHY validation: 2002–2004 // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. № 1. P. 127–148.
19. Celarier E.A. et al. Validation of Ozone Monitoring Instrument Nitrogen Dioxide Columns // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D15S08, doi: 10.1029/2007JD008908.
20. Bucseka E., Celarier E., Wenig M. et al. Algorithm for NO₂ vertical column retrieval from the Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing, 2006. V. 44. № 5. IGRSD2, P. 1245–1258.
21. Beirle S., Platt U., Wenig M. et al. Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. № 6. P. 2225–2232.
22. Груздев А.Н., Елохов А.С. Спектрометрические измерения NO₂ в приземном слое у Звенигорода, Россия // Proc. of XX Quadrennial Ozone Symposium, 1–8 June 2004, Kos: Greece, IOC/IAMAS. 2004. P. 965–966.
23. Van der A. R.J., Peters D.H.M.U., Eskes H. et al. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D12317, doi: 10.1029/2005JD006594.
24. Van der A. R.J., Eskes H., Boersma K.F. et al. Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D04302, doi: 10.1029/2007JD009021.
25. Weatherhead E.C. et al. Factors affecting the detection of trends: statistical considerations and applications to environmental data // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № D14. P. 17149–17161.

Regional Space Monitoring of Nitrogen Dioxide in the Troposphere

D. V. Ionov and Yu. M. Timofeev

Fock Institute of Physics, St. Petersburg University, Ul'yanovskaya ul. 1, Petrodvorets, 198504 Russia

e-mail: ionov@troll.phys.spbu.ru

Received May 27, 2008; in final form, September 23, 2008

Abstract—Satellite instruments for the routine global monitoring of NO₂ in the atmosphere—the Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) on the ERS-2 satellite, the Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY) on the ENVISAT satellite, the Ozone Monitoring Instrument (OMI) on the AURA satellite, and the GOME-2 on the MetOp satellite—are briefly described. It is shown that the error of measuring the NO₂ total column amount (~10% for the background conditions in the troposphere) substantially increases in regions subject to anthropogenic pollution. Examples of practically using multiyear satellite measurements for the regional monitoring of NO₂ in the troposphere are presented, including mapping the tropospheric NO₂ in Russia, identifying the weekly and annual cycles in tropospheric NO₂ variations for megalopolises (St. Petersburg, Moscow, Paris), and estimating the long-term linear trend in 1995–2007.