

УДК 551.510.41; 551.510.534

Сопоставление данных о содержании NO₂ в атмосфере по результатам спутниковых (OMI) и наземных (NDACC) измерений

А.Н. Груздев[✉], А.С. Елохов*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 25.04.2023;
после доработки 16.02.2024;
принята к печати 29.02.2024

Сопоставление данных спутниковых измерений с результатами измерений с помощью других средств — важная и необходимая составляющая валидации спутниковых данных. В настоящей работе сопоставлены результаты спектрометрических измерений содержания NO₂ в атмосфере с помощью спутникового прибора OMI (Ozone Monitoring Instrument) в 2004–2020 гг. с данными наземных сумеречных зенитных измерений на 14 станциях сети по обнаружению изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change — NDACC). Получены широтные распределения содержания NO₂ и характеристик сопоставления: разности содержаний, коэффициентов корреляции и линейной регрессии между спутниковыми и наземными данными. Предложены критерии проверки межгодовых и долговременных изменений содержания NO₂ по данным OMI на основе результатов наземных измерений. Выявлены широтные — полусферные и региональные — особенности соответствия между спутниковыми и наземными данными. Получена существенно новая информация о зависимости характеристик сопоставления от уровня загрязнения нижней тропосферы окислами азота, а также временного масштаба вариаций NO₂: межсезонного, сезонного и межгодового. Результаты будут полезны при анализе изменчивости NO₂ по данным OMI.

Ключевые слова: NO₂, спектрометрические измерения, OMI, NDACC, сопоставление; nitrogen dioxide, spectrometric measurements, OMI, NDACC, comparison.

Введение

Роль окислов азота NO и NO₂ в атмосфере определяется их химической активностью, прежде всего в отношении озона, и тем, что они являются существенным фактором антропогенного загрязнения нижней тропосферы. Наличие хорошо дифференцированных полос поглощения NO₂ в видимой области спектра позволяет проводить дистанционные измерения содержания этой примеси с поверхности Земли и со спутников. Ряд наземных станций, на которых измеряется содержание NO₂, включен в сеть по обнаружению изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change — NDACC).

В 2004 г. начаты измерения содержания NO₂ с помощью прибора OMI (Ozone Monitoring Instrument) с борта спутника EOS-Aura. В первые годы работы прибора была выполнена валидация данных OMI по наземным данным [1–8]. Методика восстановления содержания NO₂ по результатам измерений на приборе OMI совершенствовалась [9].

В [10] выполнено тщательное сопоставление данных OMI с данными станций NDACC за длительный период совместных измерений. Всесторонний анализ показал наличие существенных расхождений между ними.

Цель настоящей работы состоит в продолжении и развитии исследований, представленных в [10]. Использованы результаты измерений на четырех дополнительных станциях NDACC; результаты сопоставления визуализированы в широтном представлении. Они должны помочь определить условия, при которых данные OMI можно использовать для анализа долговременных трендов и межгодовой изменчивости NO₂ в различных регионах.

Данные и методы измерений. Принципы сопоставления данных

Сведения об особенностях, методах и ошибках измерений можно найти в [2, 9, 11] (OMI) и [7, 8, 12, 13] (NDACC). Подробный анализ ошибок выполнен в [10].

Спектрометр OMI измеряет рассеянную атмосферой Земли солнечную радиацию. Горизонтальное разрешение составляет 13 × 24 км² в надире.

* Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru);
Александр Сульманович Елохов (elokhov@mail.ru).

Стандартными продуктами ОМІ являются содержание NO_2 в столбах тропосферы и стратосферы и общее содержание (ОС) NO_2 в атмосфере. Данные ОМІ в окрестностях наземных станций доступны в [14] в виде отдельных файлов. Для сопоставления мы использовали результаты измерений, полученные в радиусе 10 км от станций. Обоснование этого ограничения дано в [10]. Из сопоставления также исключены результаты измерений при значениях доли облаков в поле зрения прибора ОМІ, равных и больших 0,99. Они ухудшают количественные характеристики сопоставления [10].

На рис. 1 показано географическое расположение станций. В дополнение к работе [10] использованы данные еще четырех станций NDACC. Это среднеширотная ст. Иссык-Куль (42,6° с.ш., 77° в.д.; 1650 м.н.у.м., ответственный за измерения — Киргизский национальный университет), арктическая станция Нью-Олесунн (Ny Olesund, 78,92° с.ш., 11,93° з.д.; 15 м.н.у.м., Climate and Environmental Research Institute NILU, Norway) и две антарктические станции: Ноймайер (Neumayer, 70,63° ю.ш., 8,25° з.д.; 42 м.н.у.м., — University of Heidelberg Germany) и Арривал-Хайтс (Arrival Heights, 77,83° ю.ш., 66,67° в.д.; 184 м.н.у.м., National Institute of Water and Atmospheric Research, Lauder, New Zealand). Пять станций (Звенигород, Иссык-Куль, Лаудер, Маккуори, Арривал-Хайтс) оснащены сканирующими монохроматорами, остальные — спектрометрами SAOZ [10].

Наземные измерения выполняются во время утренних и/или вечерних сумерек при восходе и заходе солнца. Из них определяется так называемое наклонное содержание NO_2 , по которому рассчитывается ОС NO_2 в вертикальном столбе атмосферы [15]. На всех станциях, кроме ст. Зве-

нигород, пересчет производится путем деления наклонного содержания на воздушную массу NO_2 , которая зависит от зенитного угла Солнца и формы вертикального профиля NO_2 . Воздушная масса примеси — это отношение интегрального содержания примеси в слое вдоль оптического луча к содержанию примеси в слое вдоль вертикального направления. В англоязычной литературе для нее часто используется термин *enhancement factor*. Как правило, сеанс измерений проводится при зенитных углах Солнца из окрестности 90°. Воздушная масса стратосферного NO_2 при этом угле обычно находится в пределах 17–19 [10]. Она задается априори.

Воздушная масса нижнетропосферной части NO_2 при зенитных сумеречных измерениях близка к единице. Чувствительность получаемого описанным способом ОС NO_2 к содержанию NO_2 в пограничном слое атмосферы мала; она на порядок меньше, чем чувствительность к стратосферному содержанию NO_2 . Поэтому ОС NO_2 , полученное сумеречным методом в районах с незначительным антропогенным загрязнением, можно считать близким к содержанию NO_2 в столбе стратосферы.

На ст. Звенигород используется свой метод определения содержания NO_2 по наклонному содержанию NO_2 [7, 16]. Путем решения обратной задачи восстанавливается вертикальное распределение NO_2 , а по нему рассчитываются содержания NO_2 в столбах тропосферы и стратосферы и ОС NO_2 . Это позволяет выполнить валидацию стратосферного и тропосферного содержания NO_2 .

Содержание NO_2 значительно изменяется в течение суток. Результаты наземных наблюдений NO_2 интерполировались по времени к моментам, соответствующим наблюдениям со спутника,



Рис. 1. Расположение станций NDACC, где проводятся измерения общего содержания NO_2

с применением фотохимического моделирования суточного хода содержания NO_2 [10].

Результаты и обсуждение

Содержания NO_2 и их разность

В качестве примера на рис. 2, а, б приведено содержание NO_2 в стратосферном столбе (~10–50 км) по данным прибора OMI в окрестностях ст. Соданкюля и От-Прованс и соответствующее им по дате ОС NO_2 по наземным измерениям. Значения стратосферного содержания NO_2 по спутниковым и наземным данным вполне соответствуют друг другу: годовой ход NO_2 примерно одинаков.

На рис. 2, в, г приведено содержание NO_2 в столбах стратосферы и тропосферы по результатам спутниковых и наземных измерений на ст. Звенигород. Соответствие между значениями стратосферного содержания в целом хорошее, но амплитуда годовых колебаний NO_2 по данным OMI несколько меньше, чем по данным ст. Звенигород (рис. 2, в).

Средний уровень тропосферного содержания NO_2 на ст. Звенигород по наземным измерениям

меньше, чем по данным OMI, за счет относительно большого числа дней с невысоким содержанием NO_2 непосредственно на станции по сравнению с содержанием NO_2 в радиусе 10 км от станции (рис. 2, г). Отметим, что разброс тропосферного содержания составляет около четырех порядков величины по наземным измерениям и около двух — по данным OMI.

Анализ широтных распределений характеристик сопоставления начнем с тропосферы, поскольку высокие значения тропосферного содержания NO_2 (сосредоточенного в основном в пограничном слое атмосферы) влияют на соответствие между значениями содержания NO_2 в стратосфере [10]. Сопоставление возможно только для ст. Звенигород. В остальных случаях будем использовать данные OMI.

Штриховые кривые на рис. 3 показывают в широтном представлении постационное распределение содержания NO_2 в столбе тропосферы в радиусе 10 км от станции по данным OMI, осредненное за весь срок совместных измерений. На арктических станциях и большинстве станций южного

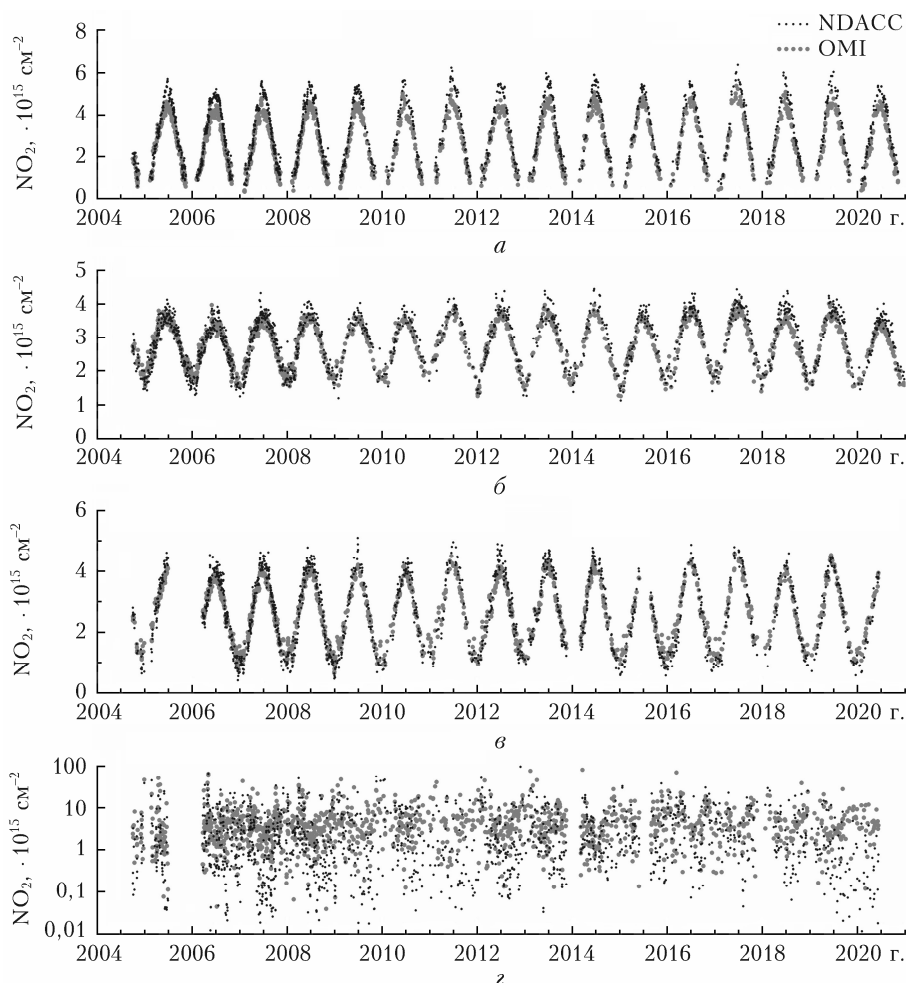


Рис. 2. Содержание NO_2 в столбе стратосферы по данным OMI (серые кружки) и общее содержание NO_2 по данным наземных измерений (черные точки) на ст. Соданкюля (а) и От-Прованс (б); содержание NO_2 в столбе стратосферы (в) и тропосферы (г) на ст. Звенигород

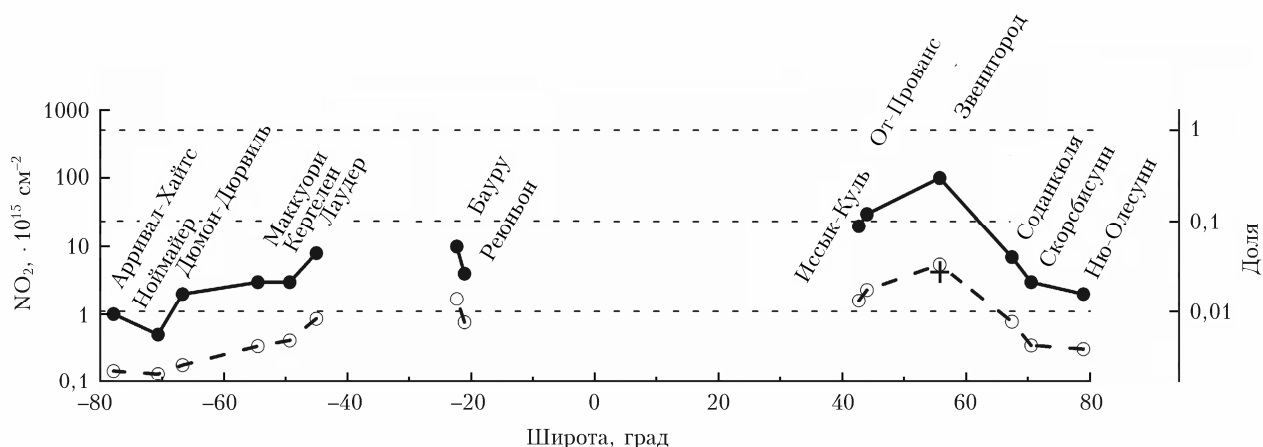


Рис. 3. Среднегодовые (штриховые кривые) и верхние пороговые (сплошные кривые) значения содержания NO_2 в столбе тропосферы над наземными станциями по данным ОМІ и их доля относительно среднеголетнего содержания NO_2 в столбе стратосферы по данным наземных измерений; крестик — среднееголетнее тропосферное содержание NO_2

полушария (ЮП) содержание NO_2 меньше $1 \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 , а на антарктических станциях еще меньше. Такие значения не должны давать существенного вклада в ОС NO_2 , определяемое из наземных наблюдений. Среднееголетнее тропосферное содержание NO_2 во внетропических широтах Северного полушария (СП) существенно выше. Оно особенно велико на ст. Звенигород — около $5 \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 . К нему близко среднее значение тропосферного содержания NO_2 , полученное на этой же станции (крестик на рис. 3).

Среднее значение тропосферного содержания NO_2 не служит достаточным показателем влияния нижнетропосферного загрязнения на сопоставление результатов спутниковых и наземных измерений. В качестве такого показателя определим так называемое верхнее пороговое значение тропосферного содержания NO_2 . Рассмотрим характеристики сопоставления (разности содержаний, коэффициенты корреляции и регрессии) как функции задаваемого верхнего значения содержания NO_2 . Эти характеристики меняются с увеличением содержания NO_2 . Однако после достижения им верхнего порогового значения они остаются постоянными. Верхнее пороговое значение примерно на порядок больше среднего содержания NO_2 (рис. 3).

На правой шкале рис. 3 те же величины представлены в виде их доли относительно среднегодового содержания NO_2 в столбе стратосферы. Они будут в несколько раз больше, если их определять для сезонного (зимнего) минимума NO_2 . Из рис. 3 следует, что влияние тропосферного содержания NO_2 на результаты сопоставления можно исключить лишь на антарктических и арктических станциях.

На рис. 4 стратосферное содержание NO_2 по данным ОМІ сравнивается с общим (для ст. Звенигород — стратосферным) по результатам наземных измерений.

Зимнее содержание NO_2 в обоих полушариях по тем и другим данным уменьшается (штриховые

кривые на рис. 4, а), а летнее (пунктир) в целом увеличивается в направлении от средних к полярным широтам. Летние значения на самых высокоширотных станциях понижены по сравнению со значениями на соседних по широте станциях. Амплитуда годового хода стратосферного содержания NO_2 во внетропических широтах в целом возрастает с широтой. Соответствие зимних значений содержания NO_2 по тем и другим данным лучше, чем летних. Обращает на себя внимание немонокотонность широтного хода NO_2 во внетропических широтах ЮП по данным наземных. Отметим, что в целом наилучшее соответствие между спутниковыми и наземными данными получено для ст. Звенигород.

Невязка на арктических станциях отрицательная (рис. 4, б). Общее (фактически стратосферное) содержание NO_2 по наземным данным систематически превышает стратосферное по данным ОМІ. Максимальная по модулю невязка (летом) приближается к $1 \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 , а это порядок величины сезонного (зимнего) минимума NO_2 (см. рис. 2). Невязка на среднеширотных станциях СП и тропических станциях ЮП находится в пределах $0,5 \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 , а ее среднегодовое значение на ст. Звенигород равно нулю. Зимняя невязка на внетропических станциях ЮП незначительно отличается от нуля, но летняя, отрицательная, невязка на отдельных станциях достигает по модулю $1 \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 . Наилучшее соответствие между спутниковыми и наземными данными в ЮП отмечено на среднеширотных станциях Лаудер и Кергелен.

Крестиком на рис. 4, б обозначена невязка между тропосферными содержаниями NO_2 на ст. Звенигород в среднем за весь срок измерений. Она положительная и составляет чуть более $1 \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 , что, несмотря на высокий уровень загрязнения окрестности станции (см. рис. 3), служит неплохим показателем соответствия средних

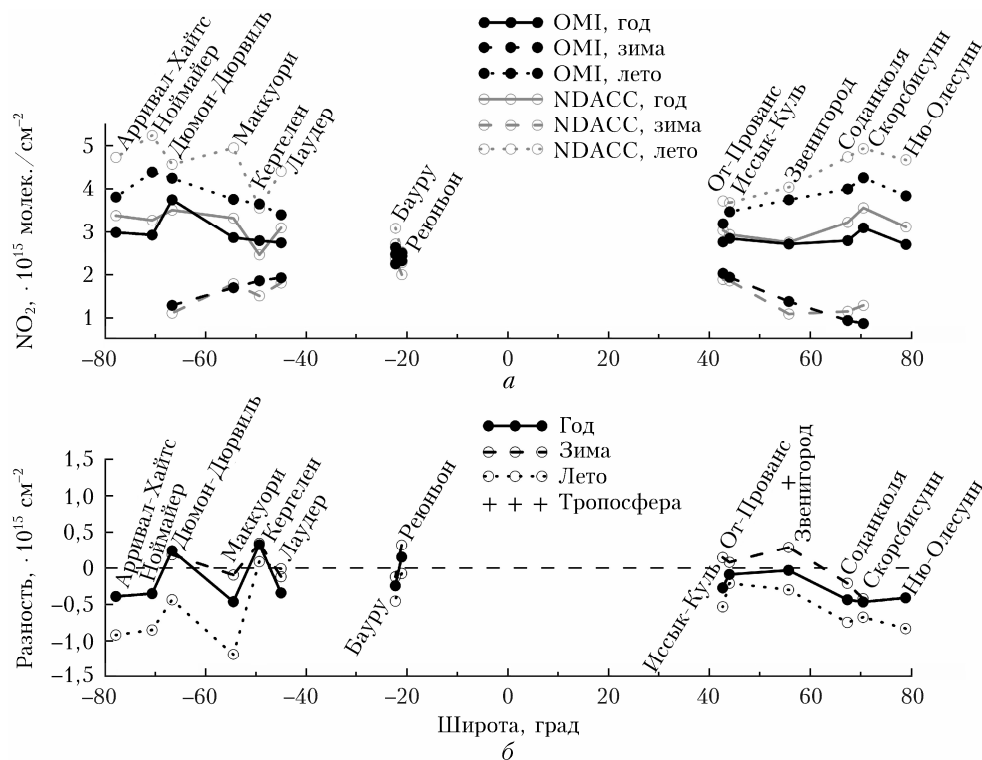


Рис. 4. Среднегодовые (сплошные кривые), среднезимние (штриховые кривые) и среднелетние (пунктир) значения стратосферного содержания NO_2 по спутниковым данным (черные кривые) и общего (для ст. Звенигород – стратосферного) содержания NO_2 по данным наземных измерений (серые кривые) в зависимости от широты (а); средняя разность между содержаниями NO_2 в стратосфере по данным OMI и общего (для ст. Звенигород – стратосферного) содержания NO_2 по наземным данным за весь срок совместных измерений (черные кривые), зимой (штриховые кривые) и летом (пунктир) (б). Крестик – средняя разность между тропосферными содержаниями NO_2 по данным OMI и данным ст. Звенигород

значений тропосферного содержания NO_2 , полученных по спутниковым и наземным измерениям.

Линейная корреляция

Для сопоставления межгодовой изменчивости и долговременных трендов важна согласованность временной эволюции данных на этих временных масштабах. Сезонно зависящая невязка между данными в этой задаче может быть учтена, например, путем включения составляющих годового хода в модель множественной линейной регрессии [17].

Сплошной кривой на рис. 5, а, б показан коэффициент корреляции, полученный по исходным данным без удаления с помощью множественной линейной регрессии годового хода. Регрессионная модель включала константу, три пары синусов и косинусов с периодами год, полгода и треть года и остаточный ряд, который и представляет собой результат удаления из данных годового хода.

Относительно высокая корреляция в этом случае в значительной степени обусловлена большой амплитудой годового хода стратосферного содержания NO_2 (см. рис. 2). Количество значений в массивах сопоставляемых данных составляет, как правило, не менее тысячи при использовании суточных данных и не менее сотни при использовании среднемесячных данных. Соответствующие им значения коэффициентов корреляции, статистиче-

ски значимые на уровне 0,05 и менее, равны ~0,2 и более и 0,06 и более соответственно. На рис. 5, а приведены также коэффициенты корреляции по сезонам. Зимние и летние коэффициенты (черные штриховые и пунктирные кривые соответственно), отвечающие годовым экстремумам стратосферного NO_2 , заметно меньше годовых, особенно в средних широтах. Минимальные значения коэффициентов корреляции опускаются до 0,6. Весенние и осенние коэффициенты (серые штриховые и пунктирные кривые соответственно) в СП близки к годовым, отражая тот факт, что главные изменения стратосферного содержания NO_2 в эти сезоны обусловлены сезонным ходом NO_2 . Подобное справедливо и для осенних коэффициентов корреляции в ЮП. Однако весенние коэффициенты на антарктической ст. Дюмон-Дюрвиль и среднеширотных станциях ЮП невелики (серая штриховая кривая). Это указывает на рассогласованность изменений содержания NO_2 в этот сезон в данной области ЮП по результатам наземных и спутниковых измерений.

Штриховые и пунктирные кривые на рис. 5, б получены после исключения из данных годового хода. Штриховые кривые получены на основе суточных данных (как и сплошные кривые), а пунктирные – среднемесячных. Исключение годового хода выполнено с помощью множественной линейной регрессии [10].

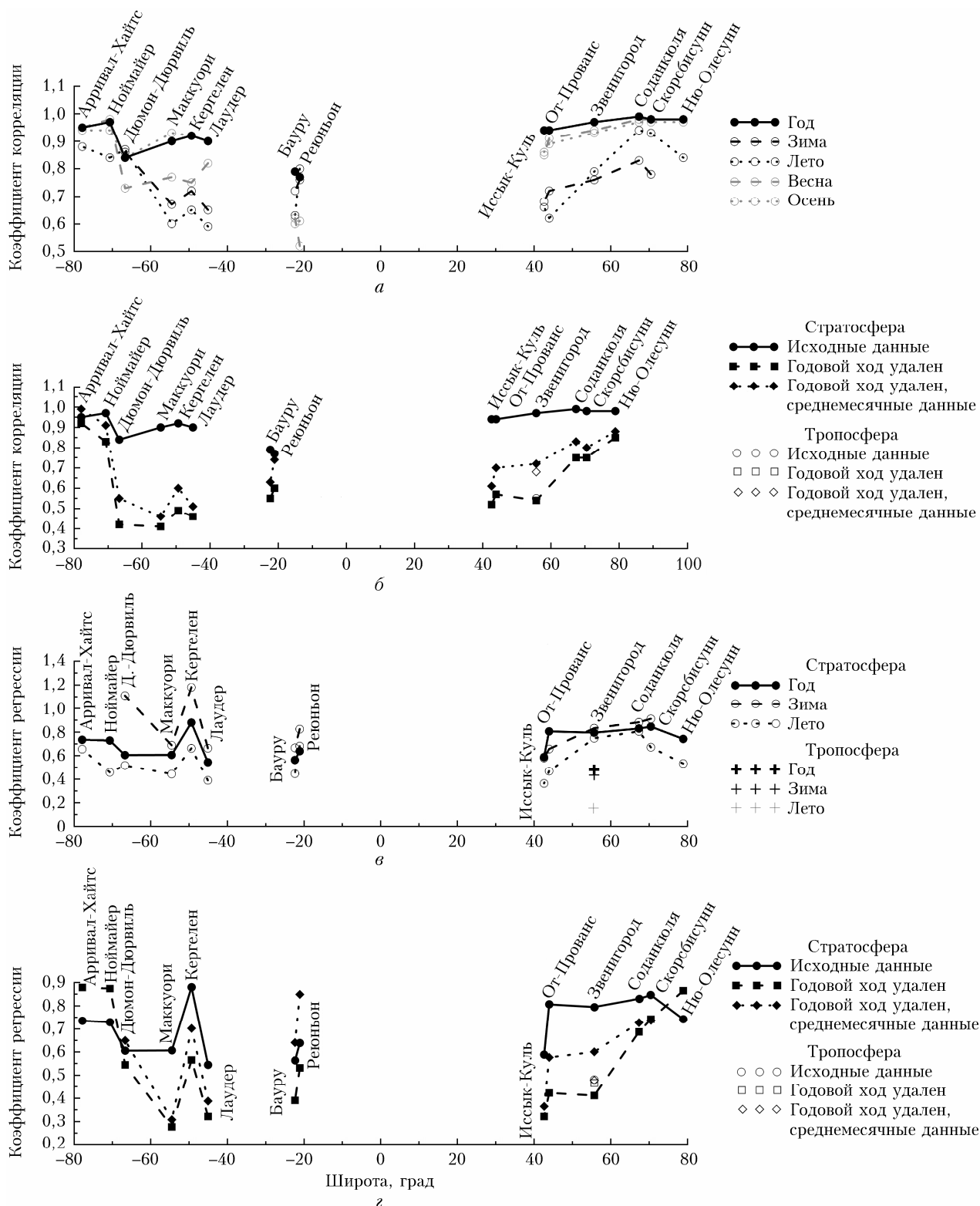


Рис. 5. Коэффициенты корреляции между общим (для ст. Звенигород – стратосферным) содержанием NO_2 по данным наземных измерений и стратосферным содержанием по данным ОМІ: а – за весь период совместных измерений и сезоны; б – за весь период совместных измерений без удаления годового хода (сплошные кривые, идентичны сплошным кривым на графике (а) и после удаления годового хода из данных, полученные на основе исходных (штриховые кривые) и среднемесячных (пунктир) данных, пустые символы – коэффициенты корреляции между тропосферным содержанием NO_2 по данным ОМІ и по данным ст. Звенигород); в – коэффициенты регрессии стратосферного содержания NO_2 по данным ОМІ на общее (для ст. Звенигород – стратосферное) содержание NO_2 по наземным данным и тропосферного содержания NO_2 по данным ОМІ на тропосферное содержание NO_2 по данным ст. Звенигород за весь период и отдельные сезоны; г – аналогично б, но для коэффициента регрессии

Корреляция, представленная штриховыми кривыми, обусловлена межсуточными и межгодовыми вариациями NO_2 . Она понизилась до 0,75–0,85 на трех арктических станциях и до 0,8–0,9 на двух антарктических. В средних широтах СП и в ЮП, включая антарктическую ст. Дюмон-Дюрвиль, отмечено резкое ослабление корреляции, вплоть до 0,4–0,5 в ЮП.

Для анализа межгодовых вариаций наиболее важны изменения с временными масштабами более года. Пунктирные кривые на рис. 5, б соответствуют этому случаю. Подавление межсуточных вариаций за счет месячного осреднения приводит к повышению корреляции до 0,15 в средних широтах СП и в меньшей степени в ЮП. Коэффициент корреляции, обусловленный межгодовой изменчивостью стратосферного содержания NO_2 , составляет ~ 0,7.

Белыми символами на рис. 5, б показаны коэффициенты корреляции между спутниковыми и наземными данными тропосферного содержания NO_2 на ст. Звенигород. Коэффициенты корреляции, рассчитанные по суточным данным без исключения (круг) и с исключением годового хода (белый квадрат; он не виден из-за наложения на черный квадрат), почти совпадают между собой и с коэффициентом корреляции между стратосферными содержаниями NO_2 с исключенным годовым ходом. Таким образом, годовой ход NO_2 практически не влияет на корреляцию между тропосферными данными для ст. Звенигород. Белый ромб на рис. 5, б — это коэффициент корреляции, обусловленный межгодовой изменчивостью тропосферного содержания NO_2 . Он близок к соответствующему коэффициенту корреляции между стратосферными содержаниями NO_2 .

Возникает вопрос: можно ли ожидать соответствия межгодовых вариаций NO_2 по данным спутниковых и наземных измерений. Примем коэффициент корреляции ~ 0,7 (обеспечивает половину взаимно обусловленной дисперсии) и более в качестве предварительного критерия соответствия. Этому критерию удовлетворяют все станции СП (для ст. Звенигород — и по стратосферному, и по тропосферному содержанию NO_2), кроме ст. Иссык-Куль, а в ЮП — лишь две антарктические станции и островная ст. Реюньон (пунктирные кривые с черными ромбами и белый ромб на рис. 5, б).

Коэффициенты линейной регрессии

Соответствие дисперсий и амплитуд вариаций двух рядов можно характеризовать угловым коэффициентом регрессии. На рис. 5, в представлены широтные распределения коэффициента регрессии стратосферного содержания NO_2 по данным ОМІ на общее (для ст. Звенигород — стратосферное) содержание NO_2 по данным наземных измерений в целом за год (сплошные кривые), зимой и летом (штриховые и пунктирные кривые соответственно). Годовые значения заметно меньше единицы и обычно находятся в пределах 0,6–0,8, при этом на

большинстве станций СП (кроме Иссык-Куля) они близки к 0,8. Низкие значения коэффициента обусловлены в определенной мере меньшей амплитудой годового хода NO_2 по данным ОМІ по сравнению с наземными данными (см. рис. 2, а–в и 4, а).

Еще меньшие значения коэффициента регрессии, опускающиеся на отдельных станциях до 0,4, получены для летних сезонов (пунктирные кривые на рис. 5, в). Изменчивость стратосферного содержания NO_2 , следующая из спутниковых измерений и обусловленная в основном межсуточными вариациями, летом существенно меньше, чем изменчивость из результатов наземных данных. Зимние коэффициенты регрессии (штриховые кривые) практически везде больше годовых. На ст. Дюмон-Дюрвиль и Кергелен, которые оснащены однотипными наземными приборами SAOZ, они превышают единицу, приближаясь к 1,2. Отметим близость годовых и сезонных коэффициентов регрессии на ст. Звенигород и на гораздо менее загрязненной ст. Соданкюля.

Годовой и зимний коэффициенты регрессии для тропосферного содержания NO_2 на ст. Звенигород (полужирный крестик и крестик средней толщины на рис. 5, в соответственно) невелики: чуть более 0,4, а летний коэффициент составляет лишь 0,2 (тонкий крестик). Причина в том, что доля дней с низким уровнем загрязнения непосредственно на станции (т.е. по результатам наземных измерений) больше, особенно летом, по сравнению с аналогичной долей, полученной по спутниковым данным (рис. 2, г; см. также [10]).

На рис. 5, г в обозначениях, аналогичных обозначениям на рис. 5, б, приведены коэффициенты регрессии, рассчитанные по суточным данным без удаления годового хода (сплошные кривые), суточным данным (штриховые кривые) и среднемесячным данным с исключенными годовыми вариациями (пунктирные кривые).

Исключение годового хода из суточных данных сильно понижает коэффициенты регрессии для стратосферной NO_2 на неполярных станциях вплоть до 0,3–0,4 (сравни штриховые и сплошные кривые на рис. 5, г). Подавление межсуточных вариаций путем месячного осреднения ведет к заметному увеличению коэффициентов регрессии на среднеширотных европейских ст. Звенигород и От-Прованс и тропических станциях ЮП, но слабо отражается на коэффициентах регрессии для других станций ЮП (пунктирные кривые).

Коэффициенты регрессии для значений тропосферного содержания NO_2 на ст. Звенигород во всех трех случаях практически совпадают и близки к 0,5 (незачерненные символы на рис. 5, г). Это означает, что отношение амплитуд вариаций этих значений по спутниковым и наземным данным примерно одинаково для всех временных масштабов тропосферного содержания NO_2 .

Как в случае с корреляцией, выберем числовой критерий, который можно использовать в качестве показателя более-менее приемлемого соответствия

между амплитудами межгодовых вариаций NO₂ по данным спутниковых и наземных измерений. Принимая в качестве критерия коэффициент регрессии ~ 0,5 и более, видим, что ему удовлетворяют данные спутниковых и наземных наблюдений на европейских станциях (причем на ст. Звенигород и по стратосферному, и по тропосферному содержанию NO₂), а в ЮП — на ст. Дюмон-Дюрвиль и островных ст. Кергелен и Реюньон.

Заключение

Соответствие между результатами измерений содержания NO₂ с помощью спутникового прибора ОМІ и результатами наземных измерений на станциях сети NDACC зависит от широты и места измерений, сезона, загрязненности нижней тропосферы окислами азота, метода восстановления содержания NO₂ в вертикальном атмосферном столбе по результатам наземных измерений наклонного содержания NO₂.

Результаты настоящей работы и статьи [10] получены на гораздо более обширном материале, чем результаты валидации в более ранние периоды работы прибора ОМІ. Характеристики сопоставления данных (разности, коэффициенты корреляции между данными спутниковых и наземных измерений), включающих годовые колебания NO₂, в прежних и наших новых публикациях, вполне соответствуют друг другу. Наряду с этим в новых работах получены новые результаты о зависимости характеристик сопоставления от временного масштаба вариаций NO₂: межсуточного, сезонного, межгодового, и от уровня загрязнения нижней тропосферы окислами азота. Выявлены широтные — полушарные и региональные — особенности соответствия между спутниковыми и наземными данными. Выбраны значения коэффициентов корреляции и линейной регрессии, при которых можно ожидать определенного соответствия между изменениями содержания NO₂ по результатам спутниковых и наземных измерений на временных масштабах более года в целях изучения на основе спутниковых данных межгодовой и долговременной изменчивости NO₂. Данные наземных и спутниковых измерений над станциями, расположенными в Северном полушарии, кроме ст. Иссык-Куль, могут быть кандидатами для подобной валидационной задачи.

По совокупности количественных критериев (разность, корреляция и коэффициент линейной регрессии) наилучшее соответствие между результатами анализа спутниковых и наземных данных получено для ст. Звенигород. Причина состоит, по-видимому, в разделении стратосферной и тропосферной частей слоя NO₂ в наземных измерениях на Звенигородской станции. Наряду с этим наилучшее согласие с данными ОМІ необязательно свидетельствует об исключительной точности результатов наземных измерений на ст. Звенигород, так как любые спутниковые данные обладают собственными погрешностями, в том числе и систематическими [10].

Благодарности. Результаты измерений содержания NO₂ с помощью прибора ОМІ в окрестности наземных станций подготовлены Центром валидации данных «Аура» (Aura Validation Data Center) Годдардского центра космических полетов НАСА (NASA Goddard Space Flight Center). Используемые в работе результаты наземных измерений общего содержания NO₂ находятся в свободном доступе в базе данных NDACC (NDACC Data Host Facility). Авторы благодарны всем, кто обеспечивал проведение наземных измерений, обработку и подготовку данных: В.П. Синякову, М.Д. Орозалиеву (Киргизский национальный университет), A. Pazmino, F. Goutail, J.-P. Pommereau, C. David, J. Jumelet (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observation Spatiales, France; Institut Pierre-Simon Laplace, France), R. Querel, P. Johnston (National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand), N. Jepsen (Danish Meteorological Institute), R. Kivi (Finnish Meteorological Institute), T. Portafaix (Université de la Réunion), G. Held (Universidade Estadual Paulista, Brazil), M. Tully (Bureau of Meteorology Australia), G. Hansen (Norwegian Institute for Air Research, Norway), U. Friess (Institute of Environmental Physics, University of Heidelberg, Germany).

Авторы благодарны анонимным рецензентам и научному редактору за полезные замечания.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-17-00200).

Список литературы

1. Boersma K.F., Jakob D.J., Eskes H.J., Pinder R.W., Wang J., van der A R.J. Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric NO₂ columns: Observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, N D16S26. DOI: 10.1029/2007JD008816.
2. 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 Roozendael M., Pinardi G., Wittrock F., Schonhardt 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. Geophys. Res. 2008. V. 113, N D15S15. DOI: 10.1029/2007JD008908.
3. Ionov D.V., Timofeyev Y.M., Sinyakov V.P., Semenov V.K., Goutail F., Pommereau J.-P., Bucsela E.J., Celarier E.A., Kroon M. Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO₂ vertical column data in the mid-latitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France) // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, N D15S08. DOI: 10.1029/2007JD008659.
4. Irie H., Kanaya Y., Akimoto H., Tanimoto H., Wang Z., Gleason J.F., Bucsela E.J. Validation of OMI tropospheric NO₂ column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006: Mount Tai Experiment 2006 // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 6577–6586.
5. Kramer L.J., Leigh R.J., Remedios J.J., Monks P.S. Comparison of OMI and ground-based in situ and

- MAX-DOAS measurements of tropospheric nitrogen dioxide in an urban area // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D16S39. DOI: 10.1029/2007JD009168.
6. *Wenig M.O., Cede A.M., Bucela E.J., Celarier E.A., Boersma K.F., Veeffkind J.P., Brinksma E.J., Gleason J.F., Herman J.R.* Validation of OMI tropospheric NO₂ column densities using direct-Sun mode Brewer measurements at NASA Goddard Space Flight Center // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N D16S45. DOI: 10.1029/2007JD008988.
 7. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Валидация результатов измерений содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора OMI с борта спутника EOS-Aura по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2009. Т. 45, № 4. С. 477–488.
 8. *Gruzdev A.N., Elokhev A.S.* Validation of Ozone Monitoring Instrument NO₂ measurements using ground based NO₂ measurements at Zvenigorod, Russia // *Int. J. Remote Sens.* 2010. V. 31, N 2. P. 497–511. DOI: 10.1080/01431160902893527.
 9. *Bucela E.J., Krotkov N.A., Celarier E.A., Lamsal L.N., Swartz W.H., Bhartia P.K., Boersma F., Veeffkind J.P., Gleason J.F., Pickering K.E.* A new stratospheric and tropospheric NO₂ retrieval algorithm for nadir-viewing satellite instruments: Applications to OMI // *J. Meas. Technol.* 2013. V. 6. P. 2607–2626.
 10. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Сопоставление результатов многолетних измерений содержания NO₂ в стратосфере и тропосфере с помощью спутникового прибора OMI с результатами наземных измерений // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2023. Т. 59, № 1. С. 88–111. DOI: 10.31857/S0002351523010054; *Gruzdev A.N., Elokhev A.S.* Comparison of data of OMI long-term measurements of NO₂ contents in the stratosphere and troposphere with the results of ground-based measurements // *Izvestiya, Atmos. Oceanic Phys.* 2023. V. 59, N 1. P. 78–99. DOI: 10.1134/S000143382301005X.
 11. *Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J., Veeffkind J.P., Bhartia P.K., Zwers D.C.S., Duncan B.N., Streets D.G., Eskes H., Van Der R.A., McLinden C., Fioletov V., Carn S., de Laat J., DeLand M., Marchenko S., McPeters R., Ziemke J., Fu D., Liu X., Pickering K., Apituley A., Abad G.G., Arola A., Boersma F., Miller C.C., Chance K., de Graaf M., Hakkarainen J., Hassinen S., Ialongo J., Kleipool Q., Krotkov N., Li C., Lamsal L., Newman P., Nowlan C., Suleiman R., Tilstra L.J., Torres O., Wang H., Wargan K.* The Ozone Monitoring Instrument: Overview of 14 years in space // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 5600–5745. DOI: 10.5194/acp-18-5699-2018.
 12. *Johnston P.V., McKenzie R.L.* NO₂ observations at 45° S during the decreasing phase of solar cycle 21, from 1980 to 1987 // *J. Geophys. Res.* V. 94. N D3. P. 3473–3486.
 13. *Vaughan G., Quinn P.T., Green A.C., Bean J., Roscoe H.K., van Roozendaal M., Goutail F.* SAOZ measurements of NO₂ at Aberystwyth // *J. Environ. Monit.* 2006. V. 8. P. 353–361. DOI: 10.1039/b511482a.
 14. *Aura OMI Version 3 Level 2 Overpass Data.* URL: <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMNO2/> (дата обращения: 22.01.2023).
 15. *NDACC.* URL: <https://ndacc.larc.nasa.gov/instruments/uv-visible-spectrometer> (дата обращения: 22.01.2023).
 16. *Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2000. Т. 36, № 6. С. 831–846.
 17. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Изменения общего содержания и вертикального распределения NO₂ по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2021. Т. 57, № 1. С. 99–112. DOI: 10.31857/S0002351521010089; *Gruzdev A.N., Elokhev A.S.* Changes in the column content and vertical distribution of NO₂ according to the results of 30-year measurements at the Zvenigorod Scientific Station of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2021. V. 57, N 1. P. 91–103.

A.N. Gruzdev, A.S. Elokhev. Comparison of atmospheric nitrogen dioxide content data derived from satellite (OMI) and ground-based (NDACC) measurements.

Comparison of results of satellite measurements by results of independent measurements is an essential and necessary component of validation of satellite data, justifying their use for scientific and practical tasks. The work compares the results of spectrometric measurements of the NO₂ content in the atmosphere by the Ozone Monitoring Instrument (OMI) in 2004–2020 with the results of ground-based twilight zenith measurements at 14 stations of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC). Latitudinal distributions of quantitative characteristics of the comparison have been obtained, including the NO₂ contents, their differences, and correlation and linear regression coefficients between the satellite and ground-based data. Criteria for validation of interannual and long-term changes in NO₂ derived from the OMI data with the help of ground-based measurements are proposed. The latitudinal – hemispheric and regional – features of the correspondence between the satellite and ground-based data have been revealed. Significantly new results have been obtained on the dependence of the comparison characteristics on the level of pollution of the lower troposphere with nitrogen oxides and on the time scale of NO₂ variations: day-to-day, seasonal, and interannual. The results will be useful in analysis of NO₂ variability based on OMI data. The continuation of this work may be a comparison of the results of the analysis of interannual variations and long-term NO₂ trends obtained on the basis of the OMI and ground-based measurement data.