«Оптика атмосферы и океана», **36**, № 1 (2023)
DOI: 10.15372/АОО20230105

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.41; 551.510.534

Валидация результатов измерений содержания NO_2 в тропосфере и стратосфере с помощью спутникового прибора TROPOMI по наземным измерениям на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

В.С. Ракитин✉, А.Н. Груздев, Н.С. Кириллова, Е.И. Федорова, А.С. Елохов, А.Н. Сафронов*

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

Поступила в редакцию 1.09.2022 г.;
после доработки 4.10.2022 г.;
принята к печати 29.11.2022 г.

Сопоставлены результаты измерения содержания NO_2 в вертикальных столбах тропосферы и стратосферы с помощью прибора TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) с борта спутника Copernicus Sentinel-5P в 2018–2020 гг. и данные наземных измерений в тот же период на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Соответствие между результатами спутниковых и наземных измерений характеризуется величиной разности между ними, коэффициентами линейной корреляции и линейной регрессии. Выявлена зависимость характеристик сопоставления от сезона, облачных условий и высоты пограничного слоя атмосферы.

Ключевые слова: NO_2, спектрометрические измерения, TROPOMI, валидация; NO_2, spectrometric measurements, TROPOMI, validation.

Введение

Окислы азота NO и NO_2 играют важную роль в фотохимическом балансе атмосферного озона [1, 2]. Также они являются значимых фактором антропогенного загрязнения пограничного слоя атмосферы (ПСА) в крупных городах и промышленных районах, оказывая вредное воздействие на здоровье людей [3]. Источником окислов азота в стратосфере служит фотолиз закиси азота N_2O [1, 2], а в нижней тропосфере – выбросы автомобильного транспорта и тепловых станций [4].

Благодаря поглощению солнечного излучения молекулами NO_2 содержание примеси в атмосфере измеряется дистанционно спектрометрическими методами с поверхности земли и со спутников. Ряд наземных станций, выполняющих измерения содержания NO_2, включен в состав Сети обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Среди них – Звенигородская научная станция (ЗНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Используемые на станциях NDACC приборы и методики определения содержания NO_2 прошли поверку в международных сравнениях.

Существенное продвижение в области спутниковых измерений содержания NO_2 в атмосфере связано с прибором OMI (Ozone Monitoring Instrument), работающим на борту спутника EOS-Aura с 2004 г. и поставляющим информацию о глобальном поле NO_2 с высоким горизонтальным разрешением (13×24 км в надире) [5].

В 2018 г. на борту спутника Copernicus Sentinel-5P начал работать новый прибор TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), позволяющий измерять содержание NO_2 с еще более высоким горизонтальным разрешением [6]. Опубликованы первые результаты валидации данных TROPOMI [7–12], в том числе с использованием результатов измерений стратосферного содержания NO_2 на ЗНС [12].

В настоящее время данные TROPOMI по NO_2 широко применяются при решении различных задач, связанных с загрязнением тропосферы окислами

* Вадим Станиславович Ракитин (vadim@ifaran.ru); Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru); Наталья Сергеевна Кириллова (n.kirillova65@gmail.com); Евгения Ивановна Федорова (fedorova@ifaran.ru); Александр Сульманович Елохов (elokhov@ifaran.ru); Александр Николаевич Сафронов (safronov_2003@mail.ru).

© Ракитин В.С., Груздев А.Н., Кириллова Н.С. и др., 2023

азота [13–18], главным образом для оценки и уточнения антропогенных эмиссий [13–17].

В работе [12] выполнено наиболее полное сопоставление результатов измерений содержания NO_2 в столбах тропосферы и стратосферы и общего содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы с результатами наземных измерений с использованием различных типов приборов и методов измерения, применяемых на разных станциях. Во многих случаях получено достаточно хорошее соответствие спутниковых и наземных данных. Однако на ряде станций отмечена слабая корреляция ($R < 0{,}5$) между тропосферным содержанием NO_2 по данным TROPOMI и результатами наземных измерений. В среднем TROPOMI занижает тропосферное содержание NO_2 на 20–50% и более по сравнению с наземными приборами. Средняя разность между спутниковыми и наземными значениями на нескольких станциях составляет 37–74%.

Корреляция между результатами измерений стратосферного содержания NO_2 в целом оказалась существенно выше: $R \sim 0{,}8$–$0{,}98$ на 21 станции из 26 [12]. При этом TROPOMI в среднем несколько занижает стратосферное содержание NO_2 (примерно на 1%) по сравнению с наземными измерениями.

Выполненные ранее [19–21] сопоставления данных измерений содержания NO_2 с помощью прибора OMI с результатами наземных измерений показали, что степень соответствия между ними зависит от сезона, облачности и уровня загрязнения нижней тропосферы окислами азота. Можно предполагать, что подобные факторы могут влиять также и на степень соответствия между результатами наземных измерений и данными TROPOMI.

Цель настоящей работы состоит в валидации измерений содержания NO_2 в стратосфере и тропосфере с помощью прибора TROPOMI по наземным спектрометрическим измерениям на ЗНС, полученным при пролетах спутника над окрестностью станции.

1. Данные и методы измерений

Орбитальный спектрометр TROPOMI запущен в октябре 2017 г. на борту исследовательского спутника Sentinel-5 Precursor (S-5P) Европейского космического агентства. Спутник находится на низкой околоземной орбите, и его миссия состоит в предоставлении информации о качестве воздуха, климате и озоновом слое. TROPOMI измеряет рассеянную атмосферой солнечную радиацию в широком спектральном диапазоне. По результатам измерений восстанавливается атмосферное содержание нескольких газов, включая NO_2, и аэрозоля над большей частью земной поверхности один раз в сутки. Ширина полосы обзора составляет 2600 км, разрешение (и, следовательно, размер «первичного пикселя») варьируется в зависимости от примеси, угла и полосы обзора. Время измерений над каждым пунктом приходится примерно на 13:30 астрономического (солнечного) времени. Стандартными продуктами измерений являются содержание NO_2 в тропосфере, стратосфере и общее содержание в вертикальном столбе атмосферы. Горизонтальное разрешение измерений содержания NO_2 при наблюдении в надир составляет около 7×7 км. В августе 2019 г. оно было повышено до $5{,}5 \times 3{,}5$ км^2 [6].

Для валидации использованы результаты измерений содержания NO_2 по рассеянному из зенита солнечному излучению видимой области спектра на ЗНС (55,7° с.ш., 36,8° в.д.). Станция расположена в лесистой сельской местности Подмосковья на расстоянии около 50 км к западу от центра Москвы и 40 км от Московской кольцевой автодороги. Измерения содержания NO_2 на ЗНС выполняются во время утренних и/или вечерних сумерек при восходе и заходе солнца в диапазоне зенитных углов Солнца 84–96° с помощью автоматизированного сканирующего монохроматора МДР-23 [22].

По измеренным спектрам рассеянной в зените солнечной радиации определяется так называемое наклонное содержание NO_2, по нему восстанавливается вертикальное распределение NO_2 путем решения обратной задачи с привлечением фотохимического моделирования его суточного хода. Значения содержания NO_2 приводятся к моментам времени, соответствующим зенитному углу Солнца 84°.

По вертикальному распределению NO_2 рассчитывается его содержание в столбах тропосферы (0–10 км) и стратосферы (10–50 км) и общее содержание. Разделение тропосферной и стратосферной частей NO_2 особенно важно в условиях антропогенного загрязнения ПСА, которому станция периодически подвергается ввиду близости московского мегаполиса [23]. Весовые функции, характеризующие высотные распределения вкладов содержания NO_2 в стратосфере и ПСА в измеряемое наклонное содержание NO_2 при зенитных сумеречных измерениях (так называемые усредняющие ядра), практически не перекрываются [24]. Поэтому определяемые нами содержания NO_2 в стратосфере и тропосфере можно считать независимыми.

При наземных зенитных сумеречных наблюдениях горизонтальное разрешение тропосферных данных определяется в основном полем зрения прибора. Поскольку основной вклад в тропосферное содержание NO_2 во время эпизодов загрязнения вносит ПСА [23], то горизонтальное разрешение этих данных не хуже нескольких сотен метров, т.е. данные относятся к малой окрестности станции. Горизонтальное разрешение содержания NO_2 в столбе стратосферы составляет около 400 км в направлении азимута восходящего или заходящего солнца [21].

На ЗНС прибор установлен на крыше здания, на высоте около 8 м над поверхностью земли, поэтому измеряемое нами содержание NO_2 в столбе тропосферы не включает содержание NO_2 в этом нижележащем слое.

Сечения поглощения NO_2 в видимой области спектра зависят от температуры. Используемые для валидации данные измерений содержания NO_2 на ЗНС рассчитаны на основе сечений поглощения NO_2 при температуре 220 К [25]. Зимняя (январская) температура в слое максимума стратосферного

содержания NO_2 над ЗНС соответствует этой температуре, но температура нижней тропосферы, а также летняя температура стратосферы отличаются от нее. Из-за пренебрежения температурной зависимостью сечений поглощения NO_2 содержание NO_2 в стратосфере по измерениям на ЗНС в среднем занижено в июле примерно на 4%, а тропосфере — на 11% в январе и 18% в июле [21].

Так как при восстановлении содержания NO_2 по значениям наклонного содержания не учитывается многократное рассеяние [22, 26], то значения содержания NO_2 в нижней тропосфере завышены по сравнению с теми, которые могли бы быть получены при учете многократного рассеяния. Завышение может составлять до 45% в безоблачных условиях, а при облачности и высоком альбедо подстилающей поверхности оно может быть больше.

Случайные ошибки определения содержания NO_2 в стратосферном столбе над ЗНС составляют десятые доли от 10^{15} молек./см^2. Их среднемесячные абсолютные значения находятся в пределах $0{,}1$—$0{,}3 \cdot 10^{15}$ молек./см^2, а среднемесячные относительные ошибки варьируют в зависимости от сезона в пределах 4—12% [21]. Случайные ошибки содержания NO_2 в нижней тропосфере могут составлять в зависимости от условий от 5 до 100%. В частности, относительная ошибка мала в стабильных условиях с высоким содержанием NO_2 и велика при низком содержании NO_2 в приземном слое [10, 11, 21].

2. Подготовка данных для сопоставления

2.1. Первичная подготовка данных TROPOMI

В работе использован продукт Sentinel-5P OFFL NO2 L2 (вид обработки OFFL, т.е. архивные данные, прошедшие первичную фильтрацию) (https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products). Для внешнего пользователя уровень 2 (L2) — это первичный уровень, в данных которого один измерительный день содержит 15 файлов формата NetCdf (по числу орбит спутника за сутки) [6, 12]. Данные уровня 3 (L3) TROPOMI NO_2 OFFL (преобразованные в один суточный файл) в настоящее время отсутствуют, поэтому каждая исследовательская группа готовит данные этого уровня самостоятельно или пользуется данными L2, которые содержат информацию о нескольких переменных, относящихся напрямую к диоксиду азота. Это nitrogendioxide_tropospheric_column — содержание NO_2 в столбе тропосферы (далее — тропосферное содержание, *TrC*), nitrogendioxide_stratospheric_column — содержание NO_2 в столбе стратосферы (*StC*), cloud_fraction_crb (*crb*) — доля облачности, quality assurance value (*qa*) — параметр качества данных. Приводятся и многие другие переменные, геопривязанные и сопутствующие, т.е. не имеющие координатной привязки и связанные с применяемыми расчетными алгоритмами.

Для анализа орбитальных данных (в первую очередь данных TROPOMI) нами было разработано специальное программное обеспечение tropomi_tools, позволяющее осуществлять сбор данных TROPOMI уровня 2 и последующее их преобразование в данные уровня 3 — объединение 15 файлов формата NetCdf в единый суточный файл формата .mat с сохранением любых геопривязанных переменных, исходного разрешения данных и расположения первичных орбитальных пикселей. Кроме этого, на основе данных уровня 3 нескольких орбитальных спектрометров (MODIS/Terra/Aqua, AIRS/Aqua и TROPOMI/Sentinel-5P) программа позволяет рассчитывать и наносить на карту пространственные распределения полей содержания нескольких загрязняющих примесей по произвольно заданной области и с заданным пространственным разрешением. Программа позволяет получать дневные и усредненные распределения по набору произвольно заданных дат (включая среднегодовые распределения), а также для произвольно заданной пространственной области получать любые геопривязанные параметры, содержащиеся в исходных данных, с возможностью фильтрации по выбранным переменным и пороговым значениям. Таким образом были рассчитаны дневные величины тропосферного и стратосферного содержания NO_2 TROPOMI OFFL над ЗНС.

В настоящей работе при валидации данных TROPOMI OFFL по *TrC* и *StC* NO_2 использованы области усреднения $0{,}1° \times 0{,}1°$, $0{,}25° \times 0{,}25°$ и $0{,}5° \times 0{,}5°$ с одновременной фильтрацией информации по облачным характеристикам и *qa*. Характеристики облачности содержатся в переменной *crb*, которая изменяется от 0 (отсутствие облачности) до 1 (максимально возможное заполнение облаками).

Данные TROPOMI, предназначенные для сопоставления с результатами измерений на ЗНС, готовились следующим образом. Содержание NO_2, соответствующее одному дню и попадающее в окрестность ЗНС с границами, определяемыми заданным разрешением, усреднялось. Например, область осреднения $0{,}1° \times 0{,}1°$ представляет собой приблизительно прямоугольную область, в центре которой находится ЗНС. Границы этой области отстоят от ЗНС на 5,5 км к северу и югу и на 3,1 км к западу и востоку, и Москва не попадает в ячейку. В ячейки $0{,}25° \times 0{,}25°$ и $0{,}5° \times 0{,}5°$ Москва также не попадает. Типичное число значений содержания NO_2, по которым выполняется усреднение, составляет 2—3, 5—10 и 12—20, соответственно, для ячеек $0{,}1° \times 0{,}1°$, $0{,}25° \times 0{,}25°$ и $0{,}5° \times 0{,}5°$.

Описанное выше программное обеспечение использовалось в работе [27] при анализе распределений общего содержания CO, полученных на основе измерений на орбитальном спектрометре AIRS, а также в работе [28] при построении усредненных распределений общего содержания CO и тропосферного содержания NO_2 для Московского мегаполиса при выборке по штилевым дням.

Разработчики прибора TROPOMI рекомендуют при анализе данных по тропосферному содержанию NO_2 использовать данные с $qa > 0{,}75$. По их мне-

нию, это позволяет исключить данные, полученные при $crb > 0{,}5$, информацию, полученную над снежной или ледовой поверхностью, и часть ошибочных расчетов [6]. В отношении стратосферного содержания NO_2 рекомендован параметр $qa > 0{,}5$.

На предварительном этапе (этап оценки качества первичных спутниковых данных) нами была исследована вариативность *crb*. Оказалось, что для района ЗНС существует некоторое количество первичных пикселей (около 9% от общего числа с $qa > 0{,}75$) со значениями $crb < 0$ и $crb > 1$. Упомянутые параметры облачности лишены физического смысла и свидетельствуют о недостаточном совершенстве алгоритмов обработки облачных характеристик TROPOMI.

Таким образом, в своем исследовании мы придерживались рекомендованных параметров качества ($qa > 0{,}75$ для тропосферы и $qa > 0{,}5$ для стратосферы), но дополнительно исключали из анализа все первичные пикселем со значениями $crb > 1$ и $crb < 0$.

2.2. Выборки данных TROPOMI в зависимости от облачности и высоты пограничного слоя атмосферы

При подготовке выборок данных TROPOMI, соответствующих заданным условиям облачности, использован параметр *crb*, содержащийся в исходных данных TROPOMI OFFL уровня 2. Как отмечалось ранее, программа tropomi_tools позволяет обрабатывать любую переменную с одновременной фильтрацией сразу по нескольким параметрам, относящимся к любым переменным. В расчетах с разным пространственным разрешением мы использовали $0 \le crb \le crb_{\max}$, где $crb_{\max}$ принимало значения 0,05; 0,1; 0,2 и т.д. до 1,0. При этом всегда налагалось ограничение $qa > 0{,}75$ для тропосферного и $qa > 0{,}5$ для стратосферного содержания NO_2, а также условие $TrC > 10^{10}$ молек./см^2 для исключения спутниковых артефактов (отрицательных значений содержания NO_2 и выбросов, связанных с особенностями или неточностями первичных алгоритмов восстановления орбитальных данных).

При подготовке выборок данных TROPOMI, соответствующих заданным условиям высоты ПСА, применялся другой подход, поскольку высота ПСА не содержится в данных TROPOMI. Мы использовали результаты расчетов высоты ПСА по метеорологическим полям из базы данных Глобальной системы ассимиляции данных (Global Data Assimilation System, GDAS). Пространственное разрешение этих данных составляет 1° × 1°, временное разрешение — 3 ч. Описание метеорологических полей можно найти на веб-сайте NOAA ARL; сами данные доступны через сервер ARL FTP (https://www.arl.noaa.gov/). В нашей работе использованы значения высоты ПСА в срок, ближайший ко времени пролета спутника, т.е. 09:00 UTC, что соответствует 12:00 московского времени.

Выборки данных TROPOMI в зависимости от высоты ПСА h формировались по условию $h \ge h_{\min}$, где нижнее пороговое значение $h_{\min}$ варьировалось от 0 до 1000 м с шагом 100 м, а выше 1000 м принимало значения 1200 и 1500 м.

2.3. Подготовка данных наземных измерений

Данные наблюдений, предназначенные для сопоставления, должны по возможности максимально соответствовать друг другу по месту и времени наблюдений. Содержание NO_2 сильно меняется в течении суток, поэтому результаты наземных наблюдений NO_2 интерполировались ко времени наблюдений со спутника. Фотохимически обусловленные изменения содержания NO_2 в дневное время происходят относительно медленно и достаточно просто могут быть учтены с использованием рассчитанного суточного хода NO_2.

Способ приведения наземных данных ко времени измерений со спутника подробно описан в [19, 21]. Если в день спутниковых измерений на ЗНС имелись утренние и вечерние данные, то выполнялась их линейная интерполяция ко времени спутниковых измерений. К интерполированному значению содержания NO_2 в стратосферном столбе добавлялась поправка, рассчитанная с помощью фотохимической модели и обусловленная нелинейностью дневного хода NO_2. Эта поправка мала. Если в день измерений со спутника были данные только утренних или только вечерних измерений, то стратосферное содержание NO_2 по данным ЗНС экстраполировалось ко времени спутниковых измерений с использованием результатов фотохимических расчетов. Тропосферное содержание NO_2 по данным ЗНС приписывалось моменту измерений со спутника неизменным, без учета фотохимических изменений.

3. Результаты и обсуждение

При сопоставлении данных TROPOMI с данными ЗНС мы придерживались методики, примененной в [21] для валидации данных измерений содержания NO_2 в столбах тропосферы и стратосферы спутниковым прибором OMI. Для сопоставления в [21] были использованы данные OMI из окрестности ЗНС радиусом 10 км. В настоящей работе представлены результаты сопоставления данных TROPOMI с данными наземных измерений на ЗНС с середины 2018 г. по середину 2020 г. в зависимости от сезона, облачных условий и высоты ПСА (этой части нет в [21]). Выявленная в [21] из сопоставления данных OMI и ЗНС зависимость характеристик от уровня загрязнения нижней тропосферы окислами азота в настоящей работе не рассматривается ввиду недостаточной статистической обеспеченности условий сильного загрязнения.

3.1. Общие характеристики сопоставления

Содержание NO_2 в столбах тропосферы и стратосферы в окрестности ЗНС по результатам спутниковых измерений с помощью прибора TROPOMI

и результатами наземных измерений на ЗНС приведены на рис. 1, *а*, *б* (цв. вкладка) Здесь данные TROPOMI ограничены областью размером $0{,}1° \times 0{,}1°$ с ЗНС в центре. Для этой области получена лучшая корреляция спутниковых данных с наземными данными по сравнению с более обширными областями.

Годовой ход стратосферного содержания NO_2 характеризуется минимумом в январе ($\sim 1 \cdot 10^{15}$ молек./см^2) и максимумом в июле (около $4 \cdot 10^{15}$ молек./см^2) и воспроизводится и наземными, и спутниковыми измерениями (рис. 1, *б*). Значения тропосферного содержания NO_2 по данным обоих приборов рассеяны в широких пределах от нуля до величин, на порядок превосходящих стратосферное содержание NO_2, и соответствие между ними гораздо хуже, чем в случае стратосферы (рис. 1, *а*). Причинами этого могут быть пространственная (горизонтальная) неоднородность поля NO_2 и большая временная изменчивость полей NO_2 в подверженном антропогенному загрязнению слое атмосферы.

Разность между содержаниями NO_2, измеренными со спутника и с поверхности земли, приведена на рис. 1, *в*, *г* для тропосферы и стратосферы соответственно. Согласно рис. 1, *в*, содержание NO_2 в тропосферном столбе по данным TROPOMI в целом больше на величину порядка 10^{15} молек./см^2 (что составляет около 36% от данных TROPOMI), чем по данным наземных измерений на ЗНС; при этом разность не имеет выраженного сезонного хода.

Разность стратосферных содержаний варьирует вокруг нуля с амплитудой около $0{,}3 \cdot 10^{15}$ молек./см^2. Средняя за период сопоставления разность составляет $-0{,}2 \cdot 10^{15}$ молек./см^2 при усреднении по области $0{,}1° \times 0{,}1°$. Содержание NO_2 в стратосферном столбе по данным TROPOMI зимой в целом несколько выше, а летом — ниже, чем показывают данные измерений на ЗНС. Это расхождение не может быть следствием того, что в наземных данных не учтена температурная зависимость сечений поглощения NO_2. Ее учет привел бы к увеличению летнего содержания NO_2, полученного из наземных измерений, в среднем примерно на 4% ($\sim 0{,}15 \cdot 10^{15}$ молек./см^2 в июле) [21] и, следовательно, к увеличению абсолютного значения разности.

Содержание NO_2 в тропосферном столбе по данным ЗНС может быть в среднем занижено из-за температурной зависимости сечения поглощения. Занижение содержания NO_2 в приземном слое атмосферы может быть в среднем ~ 10% в январе и ~ 20% в июле [21].

Оценим связь между данными TROPOMI и ЗНС с помощью линейной регрессии. На рис. 2 приведены корреляционные диаграммы тропосферного и стратосферного содержаний NO_2 в окрестности ЗНС по результатам наземных и спутниковых измерений. На графиках также приведены уравнения регрессий, описывающие зависимость содержания NO_2 по данным TROPOMI от содержания NO_2 по данным наземных измерений, R и число пар сопоставлений (N). Диаграммы для тропосферного содержания NO_2 на рис. 2, *а*—*в* приведены для трех выборок данных TROPOMI из окрестности ЗНС размерами $0{,}1° \times 0{,}1°$; $0{,}25° \times 0{,}25°$ и $0{,}5° \times 0{,}5°$, а диаграмма для стратосферного содержания NO_2 — для выборки из области $0{,}1° \times 0{,}1°$.

Угловой коэффициент регрессии (коэффициент наклона K) тропосферного содержания NO_2 примерно вдвое меньше единицы (что соответствует результатам [12]), а свободный член примерно вдвое превышает среднюю за весь период сопоставления разность между тропосферным содержанием NO_2 по данным TROPOMI и ЗНС (рис. 2, *а*—*в*). Отметим, что похожие соотношения были получены при сопоставлении данных многолетних измерений содержания NO_2, полученных с помощью прибора OMI, с данными ЗНС [21].

Корреляционная связь между тропосферными данными TROPOMI и ЗНС ухудшается с увеличением области выборки данных TROPOMI (рис. 2, *а*—*в*). Вклад дисперсии тропосферного содержания NO_2 по данным TROPOMI, обусловленной их линейной связью с результатами наземных измерений (коэффициент детерминации R^2), в полную дисперсию уменьшается от 0,46 для области $0{,}1° \times 0{,}1°$ до 0,26 для $0{,}5° \times 0{,}5°$. Соответствующий коэффициент корреляции R уменьшается от 0,68 до 0,51. Отметим, что первое из значений заметно выше, чем коэффициент корреляции между результатами наземных измерений на ЗНС и данными OMI в 10-километровой окрестности ЗНС, полученными в [21].

Корреляционная связь между содержанием NO_2 по спутниковым и наземным измерениями в столбе стратосферы практически не зависит от величины области выборки данных TROPOMI в окрестности ЗНС. Доля дисперсии стратосферного содержания NO_2 по данным TROPOMI, обусловленная их линейной связью с результатами наземных измерений, составляет 0,93 от полной дисперсии, а $R = 0{,}96$ (рис. 2, *г*). Коэффициент наклона регрессии $K < 1$ ($K = 0{,}82$), что связано, в частности, с различием амплитуд годового хода стратосферной NO_2 по данным TROPOMI и наземным измерениям (см. рис. 1, *б*). Свободный член регрессии на рис. 2, *г* положительный, он противоположен по знаку средней разности (см. рис. 1, *г*) и в полтора раза больше ее по абсолютной величине. Приведенные статистические характеристики линейной связи между значениями стратосферного содержания NO_2 близки к тем, что получены при сопоставлении данных OMI с данными ЗНС [21], а также к результатам сопоставления стратосферных измерений TROPOMI и станций NDACC [12].

3.2. Сезонная зависимость характеристик сопоставления

Сезонная зависимость характеристик сопоставления данных TROPOMI с результатами наземных измерений на ЗНС представлена на рис. 3 (цв. вкладка) кривыми, а символами в правых частях графиков показаны средние значения тех же характеристик по всему периоду измерений. Здесь и далее

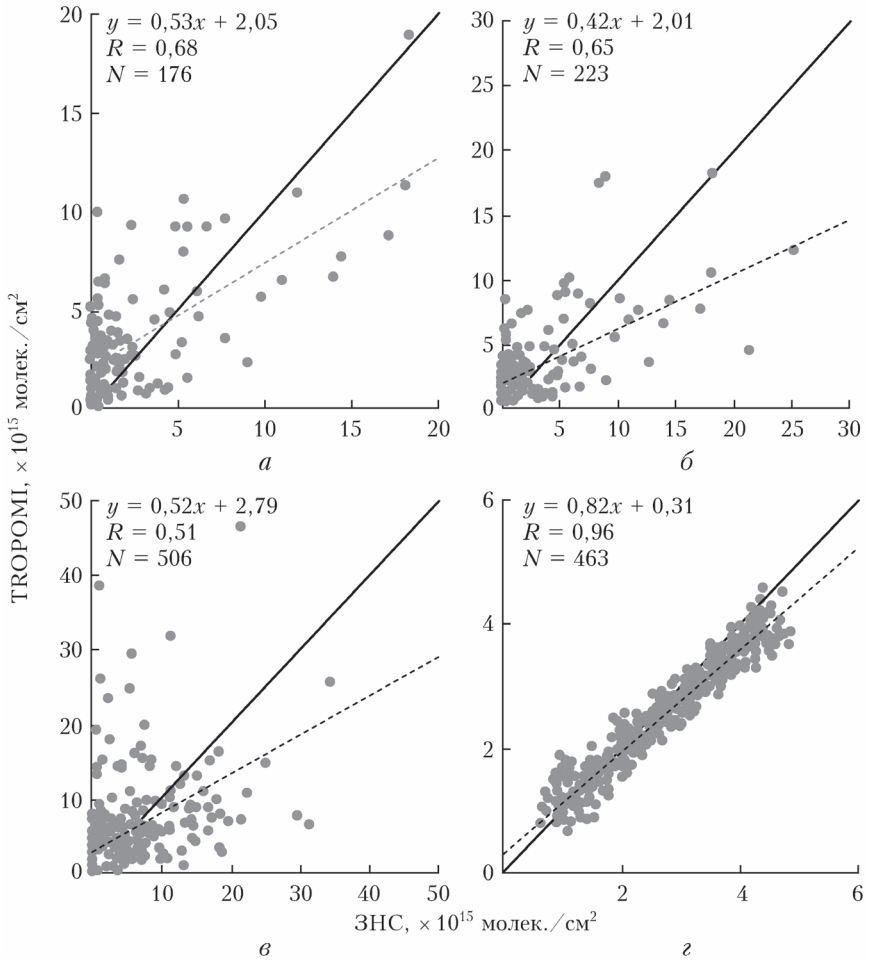

Рис. 2. Корреляционные диаграммы тропосферного (*а*–*в*) и стратосферного (*г*) содержания NO_2 в окрестности ЗНС по результатам наземных и спутниковых измерений; пунктирные прямые – линейные регрессии данных TROPOMI на данные наземных измерений. Уравнения регрессии, коэффициенты корреляции и число точек N на диаграммах приведены на графиках. Тропосферные данные TROPOMI с $qa > 0{,}75$ соответствуют областям $0{,}1° \times 0{,}1°$ (*а*), $0{,}25° \times 0{,}25°$ (*б*) и $0{,}5° \times 0{,}5°$ (*в*), а стратосферные данные с $qa > 0{,}5$ (*г*) – области $0{,}1° \times 0{,}1°$. Из анализа исключены данные, полученные при $crb < 0$ и $crb > 1$

(рис. 3–5, цв. вкладка) спутниковые данные соответствуют области $0{,}1° \times 0{,}1°$ с центром на ЗНС с $qa > 0{,}75$ для тропосферы и $qa > 0{,}5$ для стратосферы. Из анализа исключены данные, полученные при $crb < 0$ и $crb > 1$.

Среднесезонные разности тропосферных содержаний NO_2 в течение большей части года положительные и имеют максимальные значения весной и осенью (рис. 3, *а*). Для зимы разность близка к нулю (с учетом доверительного интервала). Характер сезонной зависимости разности на рис. 3, *а* качественно тот же, что получен в [21] для OMI, а средняя за весь период сопоставления разность (годовое значение в правой части рисунка, равное $1{,}05 \cdot 10^{15}$ молек./см^2) близка к среднегодовой в случае с OMI.

Учет температурной зависимости сечений поглощения NO_2, вероятно, привел бы к увеличению содержания NO_2 в тропосферном столбе по данным ЗНС (см. раздел 3.1). Это усилило бы малую отрицательную невязку зимой и привело к уменьшению положительной невязки в другие сезоны. Можно было бы ожидать увеличения среднегодового тропосферного содержания NO_2 по данным ЗНС на величину до 15% и, как результат, уменьшения среднегодовой положительной невязки между тропосферными данными TROPOMI и ЗНС.

Другая причина того, что тропосферное содержание NO_2 по данным TROPOMI в целом больше, чем по данным измерений на ЗНС, кроется в существенном различии пространственного разрешения тех и других данных при горизонтальной неоднородности поля NO_2 в ПСА в окрестности ЗНС. Согласно [21] окрестность ЗНС сильнее загрязнена окислами азота, чем территория ЗНС, поэтому поле зрения орбитального прибора включает участки в среднем более загрязненные, чем ЗНС.

Максимальный коэффициент корреляции $R = 0{,}77$ между тропосферными содержаниями NO_2 по данным TROPOMI и ЗНС получен для весны, как и в случае с OMI [21], но превышает R для OMI по величине. Минимальное значение $R = 0{,}55$ отмечено зимой и близко к полученному в случае с OMI для зимы в [21]. Сезонные и годовые значения R на рис. 3, *а* заметно выше, чем в [21]. Наиболее важное отличие состоит в том, что для

TROPOMI получена высокая корреляция ($R > 0{,}7$) с данными наземных измерений летом, тогда как корреляция тропосферных данных OMI с данными ЗНС летом слабая ($R \sim 0{,}2$). Причинами лучшей корреляции измерений TROPOMI могут быть лучшее горизонтальное разрешение спутниковых данных и меньший размер области их локализации в окрестности ЗНС. Эти факторы существенны летом, когда атмосферный перенос ослаблен и горизонтальный масштаб неоднородностей поля NO_2 в ПСА уменьшается.

Угловой коэффициент регрессии K тропосферного содержания NO_2 сильно варьирует от сезона к сезону: от 0,2 летом до 0,8 весной (рис. 3, *б*). Соответствие по этому показателю между данными TROPOMI и ЗНС весной и осенью лучше, чем зимой и летом; A имеет примерно одинаковое значение во все сезоны, но при этом характеризуется большой неопределенностью, особенно зимой.

Характер изменений среднесезонной разности стратосферных содержаний NO_2 на рис. 3, *в* наглядным образом подтверждает отмеченные выше особенности поведения разности на рис. 1, *г*. Коэффициент корреляции между значениями стратосферного содержания NO_2 имеет примерно одинаковые весенний и осенний максимумы с $R > 0{,}9$. Это частично обусловлено значительным годовым ходом стратосферного содержания NO_2 с наибольшей скоростью сезонных изменений весной и осенью (см. рис. 1, *б*). Минимальное значение $R \sim 0{,}5$ получено зимой, и оно заметно меньше, чем коэффициент корреляции между зимними стратосферными данными OMI и ЗНС в [21] ($R = 0{,}76$). Причина этого расхождения не вполне ясна, поскольку статистическая обеспеченность зимнего значения R в случае с TROPOMI невелика ввиду малого числа пар данных для сопоставления в этот сезон (см. рис. 1, *в*).

Характер сезонной зависимости K стратосферного содержания NO_2 на рис. 3, *г* в целом следует форме сезонной зависимости R на рис. 3, *в*. Летом и осенью он несколько больше соответствующего коэффициента в случае с OMI, но зимнее значение K на рис. 3, *г* значительно меньше, чем в случае с OMI. Свободный член регрессии A меньше, чем в случае с OMI, при этом осеннее значение A близко к нулю.

Таким образом, исходя из разности коэффициентов корреляции и регрессии, для данных TROPOMI по содержанию NO_2 в тропосферном столбе получена более тесная, чем для данных OMI, связь с данными наземных измерений на ЗНС. Однако на основе имеющегося для сопоставления объема данных измерений мы не можем сделать подобный вывод в отношении результатов сопоставления стратосферных содержаний NO_2.

3.3. Зависимость результатов сопоставления от облачности

Зависимость результатов сопоставления от облачности будем определять с использованием параметра *crb*. При этом необходимо иметь в виду, что степень покрытия неба облаками (cloud cover) над наземной станцией и в области наблюдений со спутника может отличаться как по причине разности времени спутниковых и наземных измерений, так и из-за неоднородности поля облачности. В связи с этим отметим, что наземные зенитные сумеречные измерения малочувствительны к облачности, если облачные условия в поле зрения смотрящего в зенит прибора были стационарны в течение сеанса измерений. Дополнительным фактором, ослабляющим влияние облачности на наземные измерения на ЗНС, служит и то, что используемый в них узкий спектральный диапазон позволяет линеаризовать и исключить спектральную зависимость поглощения и рассеяния аэрозолем и облаками.

На рис. 4 приведены коэффициенты корреляции и регрессии и средние разности между данными TROPOMI и ЗНС, рассчитанные по всему периоду сопоставления, в зависимости от задаваемого верхнего порогового значения *crb*. Согласно рис. 4, *а*, *в* корреляция между тропосферными содержаниями NO_2 по данным TROPOMI и ЗНС в малооблачных условиях лучше, а корреляция между стратосферными содержаниями несколько слабее, чем в облачных условиях. Это соответствует аналогичным зависимостям, полученным в [21] при сопоставлении данных OMI и ЗНС. Средняя разность (невязка) между тропосферным содержанием NO_2 по спутниковым и наземным измерениям увеличивается в малооблачных условиях (рис. 4, *а*).

Таким образом, отсутствие облачности, с одной стороны, способствует усилению согласованности (корреляции) между спутниковыми и наземными данными, с другой — невязка между ними в этих условиях возрастает.

Изменения K для тропосферного содержания NO_2 в зависимости от *crb* на рис. 4, *б* следуют изменениям R на рис. 4, *а*, а коэффициент A сохраняет примерно постоянное значение. Коэффициент K на рис. 4, *г* для стратосферного содержания NO_2 не меняется, а коэффициент A незначительно варьируется в зависимости от порогового значения *crb*.

3.4. Зависимость результатов сопоставления от высоты ПСА

Толщина ПСА влияет на вертикальное распределение NO_2 в нижней тропосфере. При прочих равных условиях при наличии приземных источников NO_2 (антропогенных или природных) малая высота ПСА способствует концентрации окислов азота в приземном слое атмосферы, а большая высота — их переносу в более высокие слои. Перераспределение NO_2 внутри ПСА при изменении высоты последнего не отражается на результатах наземных сумеречных зенитных наблюдений на ЗНС, однако может влиять на данные со спутника. Содержание NO_2 в ПСА по измерениям на ЗНС — одно из значений вертикального профиля NO_2, определяемого путем решения обратной задачи. При восстановлении содержаний

NO_2 в тропосферном и стратосферном столбах по спутниковым данным используется априорная информация о профиле NO_2, форма которого в нижней тропосфере в условиях загрязнения может значительно варьировать в зависимости от высоты ПСА.

Результаты сопоставления данных TROPOMI с данными измерений на ЗНС в зависимости от нижнего порогового значения высоты ПСА h_{min} приведены на рис. 5. Показано, что корреляция между тропосферными значениями NO_2 относительно невелика (~ 0,65) при h_{min} = 200 м и возрастает с увеличением h_{min} до ~ 0,85 при сужении диапазона высот ПСА до h_{min} = 1,2 км. При дальнейшем увеличении h_{min} корреляция резко падает. Характерных изменений разности между тропосферным содержанием NO_2 не выявлено (рис. 5, *а*). Угловой коэффициент регрессии K на рис. 5, *б* постепенно растет, а коэффициент A уменьшается с увеличением h_{min}. Из рис. 5, *а*, *б* в целом следует, что наилучшее по совокупности рассмотренных характеристик соответствие между данными TROPOMI и ЗНС наблюдается при умеренных величинах h_{min} в пределах 500–1200 м.

Коэффициент корреляции между стратосферным содержанием NO_2 по данным TROPOMI и ЗНС на рис. 5, *в* слабо зависит от малых и умеренных значений h_{min} и падает при h_{min} > 1 км. Параллельно с R изменяется и K (рис. 5, *г*). Разность между стратосферными содержаниями NO_2 слабо изменяется, а коэффициент регрессии возрастает с увеличением h_{min}. Таким образом, наилучшее соответствие между стратосферным содержанием NO_2 по данным TROPOMI и ЗНС достигается при не слишком большом значении h_{min}. Оптимальный диапазон h_{min}, в котором отмечено наилучшее соответствие тропосферных и стратосферных значений содержания NO_2 заключен в пределах от 0,5 до 1 км.

Немонотонность зависимостей R от нижнего порогового значения высоты ПСА на рис. 5 не есть следствие сезонного хода высоты ПСА, которая возрастает от зимы к лету. Согласно рис. 3, *а*, *в* R с весны по осень изменяется незначительно, его резкое уменьшение отмечено зимой. Ввиду сезонного хода высоты ПСА количество сопоставляемых данных по NO_2 зимой при больших значениях h_{min} уменьшается, что не должно приводить к резкому падению R на графиках 5, *а*, *в*.

Причины выявленного ухудшения корреляции при больших высотах ПСА могут быть разными. Прежде всего, отметим, что сужение диапазона высот ПСА уменьшает статистическую обеспеченность результатов сопоставления, порождая большую неопределенность, и полученные оценки R при больших значениях h_{min} находятся на пределе статистической значимости с уровнем 0,05. Если же отмеченное уменьшение корреляции неслучайно, то его причиной может быть ухудшение соответствия рассчитанной высоты ПСА тем условиям, которые использовались разработчиками для задания априорного профиля NO_2 [6] в ПСА при расчетах измерений TROPOMI.

Заключение

Сопоставление результатов измерений содержания NO_2 в атмосфере с помощью спутникового прибора TROPOMI в 2018–2020 гг. с результатами наземных зенитных сумеречных измерений на Звенигородской научной станции показало, что степень соответствия данных зависит от сезона, облачных условий и высоты ПСА. Сопоставление выполнено по двум продуктам спутниковых измерений: содержанию NO_2 в столбе тропосферы и стратосферы. В качестве количественных характеристик соответствия между данными спутниковых и наземных измерений рассмотрены разность между значениями, коэффициент линейной корреляции и коэффициенты линейной регрессии.

Содержание NO_2 в столбе стратосферы по данным TROPOMI в целом за весь период сопоставления несколько меньше, чем по результатам измерений на ЗНС, а средняя разность между данными на порядок величины меньше среднего значения содержания NO_2 в стратосфере. Содержание NO_2 в тропосферном столбе в окрестности ЗНС по данным TROPOMI превышает тропосферное содержание, полученное в наземных измерениях на ЗНС. Средняя разность составляет около $1 \cdot 10^{15}$ молек./см^2.

Характеристики соответствия между данными TROPOMI и ЗНС в большей или меньшей степени зависят от сезона. Корреляция между спутниковыми и наземными данными с весны по осень лучше, чем зимой. При этом корреляция между орбитальными и наземными изменениями содержания NO_2 в тропосфере во все сезоны (кроме зимы) и в целом за год выше, чем корреляция между тропосферными данными OMI и ЗНС в [21].

Выявлена зависимость результатов сопоставления от облачности. В малооблачных условиях отмечается более слабая корреляция между спутниковыми и наземными значениями стратосферного содержания NO_2 и более сильная – между значениями тропосферного содержания NO_2, чем в условиях облачности.

Обнаружена зависимость результатов сопоставления от высоты ПСА. Коэффициент корреляции между тропосферным содержанием NO_2 по данным TROPOMI и ЗНС оказался чувствительным к ней. Значение R возрастает с увеличением нижнего порогового значения высоты ПСА в пределах от 0 до 1200 м. Коэффициенты корреляции между значениями стратосферного содержания NO_2 имеют относительно более высокие значения при нижних пороговых значениях высоты ПСА от 0 до 1 км. В диапазоне высот ПСА более 0,5–1 км отмечено наилучшее соответствие одновременно тропосферных и стратосферных содержаний NO_2 TROPOMI данным ЗНС.

Благодарности. Результаты измерений содержания NO_2 с помощью прибора TROPOMI предоставлены Европейским космическим агентством (European Space Agency). Расчеты высоты ПСА выполнены на основе метеополей Глобальной системы ассимиляции данных (Global Data Assimilation System).

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-17-00200 (обработка и подготовка спутниковых данных), № 21-17-00210 (анализ результатов сопоставления)) и РФФИ (проект № 20-05-00274 (измерения на ЗНС и подготовка наземных данных к сопоставлению)).

Список литературы

1. *Brasseur G.P., Solomon S.* Aeronomy of the middle atmosphere. Dordrecht: Springer, 2005. 644 p.
2. *Atmospheric* chemistry and global change / G.P. Brasseur, J.J. Orlando, G.S. Tyndall (eds.). Oxford: Oxford University Press, 1999. 654 p.
3. *Hu Y., Liu C., Chen R., Kan H., Zhou M., Zhao B.* Associations between total mortality and personal exposure to outdoor-originated NO_2 in 271 Chinese cities // Atmos. Environ. 2021. V. 246. 118170.
4. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 1225 p.
5. *Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Stein Zweer D.C., Duncan B.N., Streets D.G., Eskes H., Van Der A.R., 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 I., Kleipool Q., Krotkov N., Li C., Lamsal L., Newman P., Nowlan C., Suleiman R., Tilstra L.G., 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.
6. *Eskes H., van Geffen J., Boersma F., Eichmann K.-U., Apituley A., Pedergnana M., Sneep M., Veefkind J.P., Loyola D.* Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogendioxide – S5P L2 PUM Nitrogen dioxide issue 4.0.0, 2020-12-01 – released. URL: https://sentinel.esa.int/docments/247904/2474726/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Nitrogen-Dioxide (last access: 1.08.2022).
7. *Zhao X., Griffin D., Fioletov V., McLinden C., Cede A., Tiefengraber M., Müller M., Bognar K., Strong K., Boersma F., Eskes H., Davies J., Ogyu A., Lee S.C.* Assessment of the quality of TROPOMI high-spatial-resolution NO_2 data products in the Greater Toronto Area // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 2131–2159. DOI: 10.5194/amt-13-2131-2020.
8. *Dimitropoulou E., Hendrick F., Pinardi G., Friedrich M.M., Merlaud A., Tack F., De Longueville H., Fayt C., Hermans C., Laffineur Q., Fierens F., Van Roozendael M.* Validation of TROPOMI tropospheric NO_2 columns using dual-scan multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) measurements in Uccle, Brussels // Atmos. Meas. Techn. 2020. V. 13. P. 5165–5191. DOI: 10.5194/amt-13-5165-2020.
9. *Judd L.M., Al-Saadi J.A., Szykman J.J., Valin L.C., Janz S.J., Kowalewski M.G., Eskes H.J., Veefkind J.P., Cede A., Mueller M., Gebetsberger M., Swap R., Pierce R.B., Nowlan C.R., Abad G.G., Nehrir A., Williams D.* Evaluating Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO_2 column densities with airborne and Pandora spectrometers near New York City and Long Island Sound // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 6113–6140. DOI: 10.5194/amt-13-6113-2020.
10. *Wang C., Wang T., Wang P., Rakitin V.* Comparison and validation of TROPOMI and OMI NO_2 observations over China // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 636. DOI: 10.3390/atmos11060636.
11. *Tack F., Merlaud A., Iordache M.-D., Pinardi G., Dinitropoulou E., Eskes H., Bomans B., Veefkind P., Van Roozendael M.* Assessment of the TROPOMI tropospheric NO_2 product based on airborne APEX observations // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 615–646. DOI: 10.5194/amt-14-615-2021.
12. *Verhoelst T., Compernolle S., Pinardi G., Lambert J.-C., Eskes H.J., Eichmann K.-U., Fjæraa A.M., Granville J., Niemeijer S., Cede A., Tiefengraber M., Hendrick F., Pazmico A., Bais A., Bazureau A., Boersma K.F., Bognar K., Dehn A., Donner S., Elokhov A., Gebetsberger M., Goutail F., de la Mora M.G., Gruzdev A., Gratsea M., Hansen G.H., Irie H., Jepsen N., Kanaya Y., Karagkiozidis D., Kivi R., Kreher K., Levelt P.F., Liu C., Müller M., Comas M.N., Piters A.J.M., Pommereau J.-P., Portafaix T., Puentedura O., Querel R., Remmers J., Richter A., Rimmer J., Cárdenas C.R., de Miguel L.S., Sinyakov V.P., Strong K., Van Roozendael M., Veefkind .P., Wagner T., Wittrock F., González M.Y., Zehner C.* Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO_2 measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 481–510. DOI: 10.5194/amt-14-481-2021.
13. *Lorente A., Boersma K.F., Eskes H.J., Veefkind J.P., van Geffen J.H.G.M., de Zeeuw M.B., Denier van der Gon H.A.C., Beirle S., Krol M.C.* Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI // Sci. Rep. 2019. V. 9. 20033. DOI: 10.1038/s41598-019-56428-5.
14. *Huber D.E., Steiner A.L., Kort E.A.* Daily cropland soil NO_x emissions identified by TROPOMI and SMAP // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. DOI: 10.1029/2020GL089949.
15. *Griffin D., McLinden C.A., Dammers E., Adams C., Stockwell C.E., Warneke C., Bourgeois I., Peischl J., Ryerson T.B., Zarzana K.J., Rowe J.P., Volkamer R., Knote C., Kille N., Koenig T.K., Lee C.F., Rollins D., Rickly P.S., Chen J., Fehr L., Bourassa A., Degenstein D., Hayden K., Mihele C., Wren S.N., Liggio J., Akingunola A., Maka P.* Biomass burning nitrogen dioxide emissions derived from space with TROPOMI: Methodology and validation // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 7929–7957. DOI: 10.5194/amt-14-7929-2021.
16. *Jin X., Zhu Q., Cohen R.C.* Direct estimates of biomass burning NO_x emissions and lifetimes using daily observations from TROPOMI // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. 15569–15587. DOI: 10.5194/acp-21-15569-2021.
17. *Saw D.K., Dey S., Kaushal H., Lal K.* Tracking NO_2 emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data // Atmos. Environ. 2021. V. 259. 118514. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118514.
18. *Marais E.A., Roberts J.F., Ryan R.G., Eskes H., Boersma K.F., Choi S., Joiner J., Abuhassan N., Redondas A., Grutter M., Cede A., Gomez L., Navarro-Comas M.* New observations of NO_2 in the upper troposphere from TROPOMI // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 2389–2408. DOI: 10.5194/amt-14-2389-2021.
19. *Gruzdev A.N., Elokhov A.S.* Validation of Ozone Monitoring Instrument NO_2 measurements using ground based NO_2 measurements at Zvenigorod, Russia // Int. J. Remote Sens. 2010. V. 31, N 2. P. 497–511. DOI: 10.1080/01431160902893527.

20. *Gruzdev A.N., Elokhov A.S.* Comparison of the results of ground-based and satellite (OMI) measurements of the NO_2 contents in the stratosphere and troposphere over Zvenigorod: Sensitivity to cloud cover and tropospheric pollution // Proc. SPIE. 2021. V. 11916. DOI: 10.1117/12.2601814.
21. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Сопоставление результатов многолетних измерений содержания NO_2 в стратосфере и тропосфере с помощью спутникового прибора OMI с результатами наземных измерений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2023. Т. 59. Принято к печати.
22. *Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO_2 на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2000. Т. 36, № 6. С. 831–846.
23. *Gruzdev A.N., Elokhov A.S.* Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // Int. J. Remote Sens. 2011. V. 32, N 11. P. 3115–3127. DOI: 10.1080/01431161.2010.541524.
24. *Hendrick F., Barret B., Van Roozendael M., Boesch H., Butz A., De Maziure M., Goutail F., Hermans C., Lambert J.-C., Pfeilsticker K., Pommereau J.-P.* Retrieval of nitrogen dioxide stratospheric profiles from ground-based zenith-sky UV-visible observations: Validation of the technique through correlative comparisons // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4, N 8. P. 2091–2106.
25. *Vandaele A.C., Hermans C., Simon P.C., Carleer M., Colin R., Fally S., Mérienne M.F., Jenouvrier A., Coquart B.* Measurements of the NO_2 absorption cross section from 42.000 cm^{-1} to 10000 cm^{-1} (238–1000 nm) at 220 and 294 K // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1998. V. 59, N 3–5. P. 171–184.
26. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Валидация результатов измерений содержания NO_2 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.
27. *Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джола А.В., Ракитина А.В., Шилкин А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В.* Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 1. С. 126–136.
28. *Скороход А.И., Ракитин В.С., Кириллова Н.С.* Влияние мер по сдерживанию пандемии COVID-19 и метеорологических условий на состав атмосферного воздуха в Москве в 2020 г. // Метеорол. и гидрол. 2022. № 3. С. 36–46.

V.S. Rakitin, A.N. Gruzdev, N.S. Kirillova, E.I. Fedorova, A.S. Elokhov, A.N. Safronov. **Validation of results of measurements of the NO_2 contents in the troposphere and stratosphere with the TROPOMI satellite instrument on the basis of ground-based measurements at the Zvenigorod scientific station of A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences.**

Results of measurements of the NO_2 contents in the vertical columns of the troposphere and stratosphere with the TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) aboard the Copernicus Sentinel-5P satellite in 2018–2020 are compared with the results of ground-based measurements at the Zvenigorod Scientific Station (ZSS) of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. The comparison of the satellite data with the ZSS data is carried out for the two products of satellite measurements: the NO_2 contents in the tropospheric and stratospheric columns. The correspondence between the results of satellite and ground-based measurements is characterized by the difference between them, linear correlation coefficients, and regression coefficients. The dependences of the comparison characteristics on the season, cloud conditions, and the height of the atmospheric boundary layer are revealed.

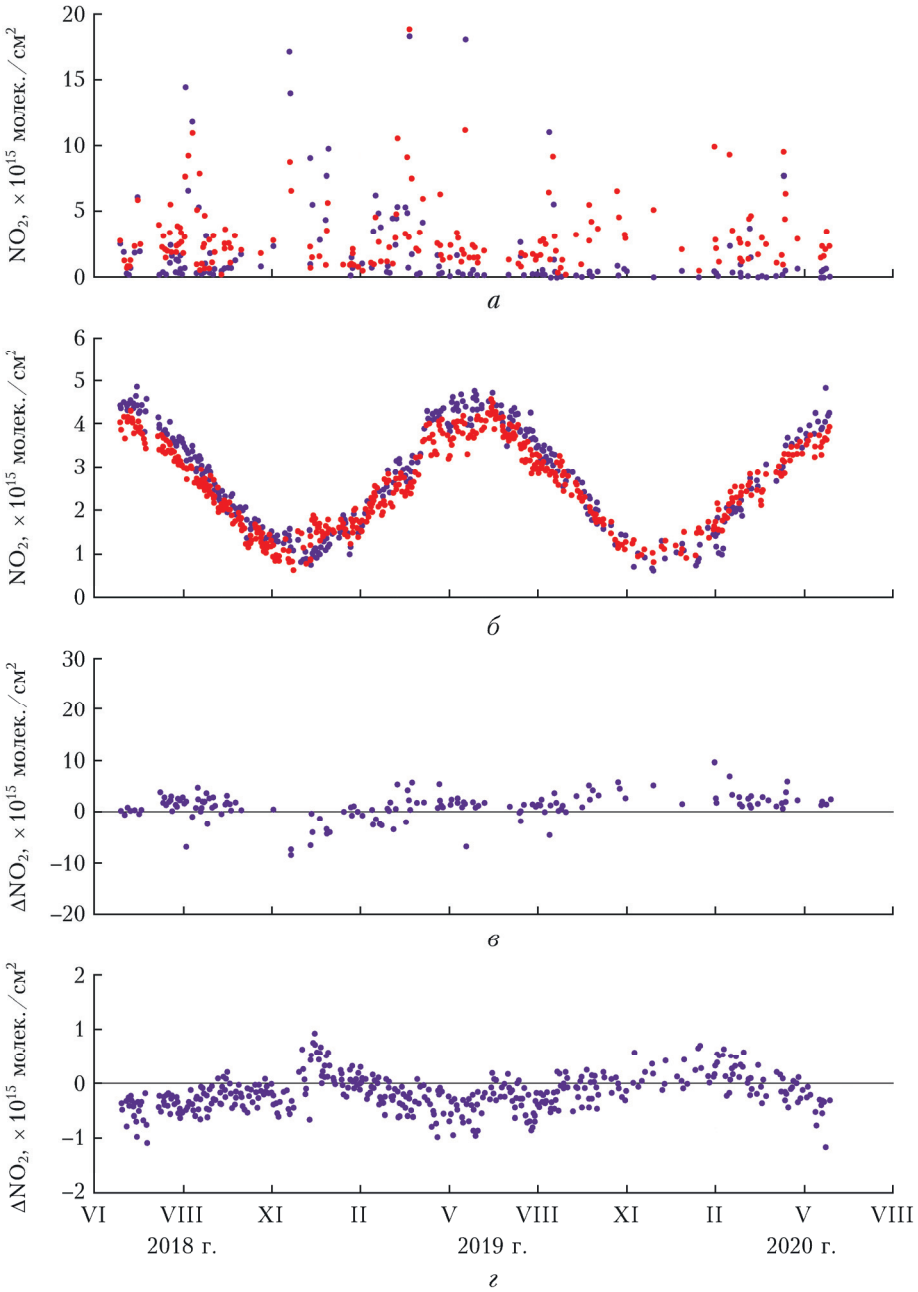

Рис. 1. Содержание NO_2 в столбе тропосферы (*а*) и стратосферы (*б*) в окрестности ЗНС по результатам измерений со спутника с помощью прибора TROPOMI (красные точки) и по данным наземных измерений (синие точки), а также разность между содержаниями NO_2, измеренными со спутника и на ЗНС, в столбе тропосферы (*в*) и стратосферы (*г*). Спутниковые данные соответствуют области $0{,}1° \times 0{,}1°$ и получены с $qa > 0{,}75$ для тропосферы и $qa > 0{,}5$ для стратосферы. Из анализа исключены данные, полученные при $crb < 0$ и $crb > 1$

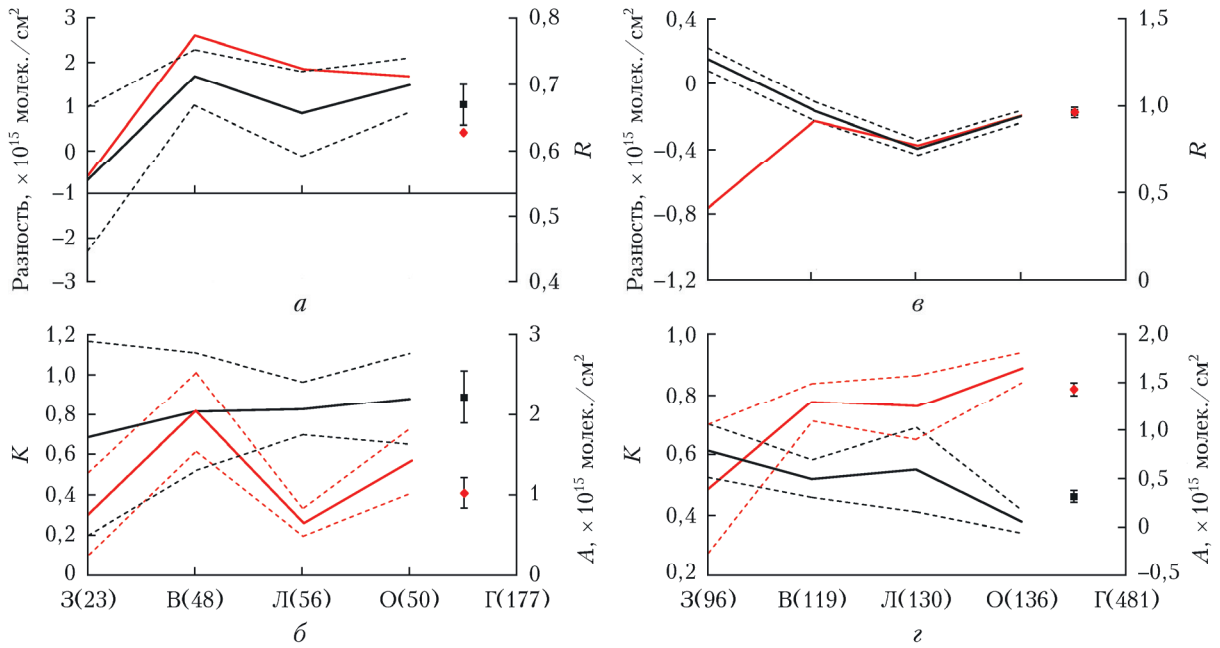

Рис. 3. Сезонные (З — зима, В — весна, Л — лето, О — осень) и годовые (Г) значения характеристик сопоставления данных TROPOMI с результатами наземных измерений на ЗНС: *а* — *R* (сплошная красная кривая и ромб) и разность (сплошная черная кривая и квадрат) между спутниковыми и наземными значениями тропосферного содержания NO_2; *б* — *K* (сплошная красная кривая и ромб) и свободный член *A* (сплошная черная кривая и квадрат) линейной регрессии тропосферных данных TROPOMI на наземные данные; *в*, *г* — аналогично *а*, *б*, но для стратосферного содержания NO_2. На осях абсцисс для каждого сезона в скобках указано количество сопоставлений. Штриховые кривые — 95% доверительные границы, вертикальные отрезки — 95% доверительные интервалы

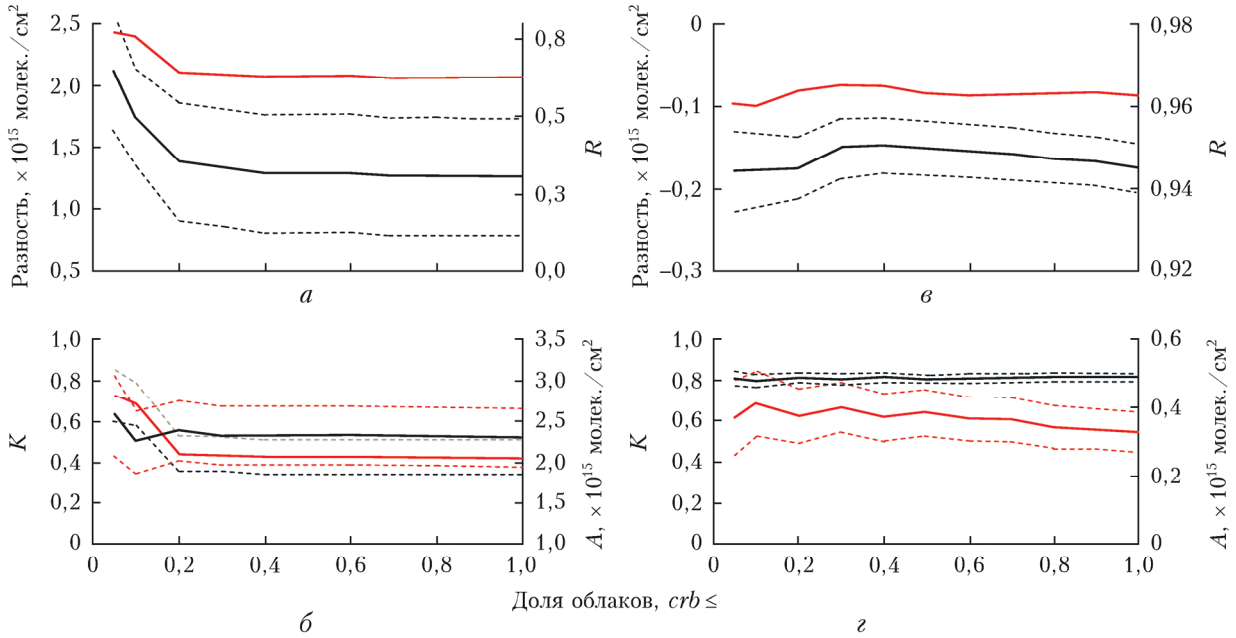

Рис. 4. Характеристики сопоставления данных TROPOMI с данными наземных измерений на ЗНС в зависимости от верхнего порогового значения *crb*: *а* — *R* (сплошная красная кривая) и разность (сплошная черная кривая) между спутниковыми и наземными значениями тропосферного содержания NO_2; *б* — *K* (сплошная красная кривая) и *A* (сплошная черная кривая) линейной регрессии тропосферных данных TROPOMI на наземные данные; *в*–*г* — аналогично *а*–*б*, но для стратосферного содержания NO_2. Штриховые кривые — 95% доверительные границы

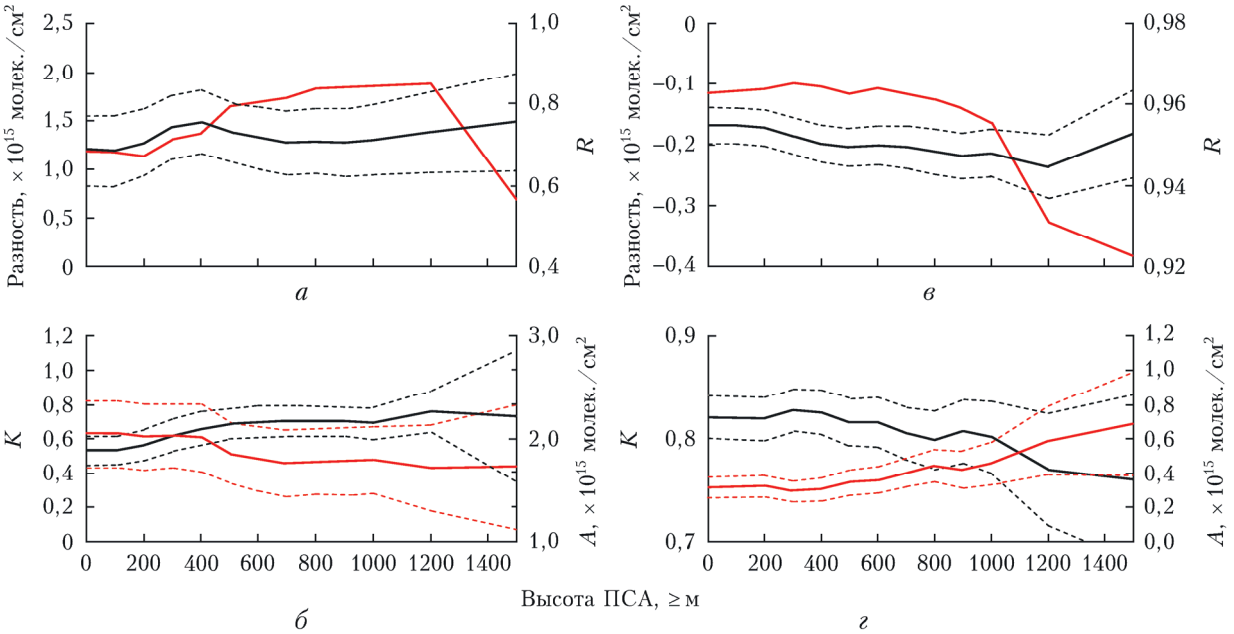

Рис. 5. Аналогично рис. 4, но в зависимости от нижнего порогового значения высоты ПСА