

Валидация орбитальных наблюдений TROPOMI общего содержания оксида углерода по данным наземных измерений на станциях ИФА РАН в Москве и Звенигороде

В.С. Ракитин[✉], Н.С. Кириллова, Е.И. Федорова, А.Н. Сафронов,
А.В. Казаков, А.В. Джола, Е.И. Гречко*

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

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.;
после доработки 19.12.2022 г.;
принята к печати 16.01.2023 г.

Представлены результаты валидации измерений общего содержания оксида углерода с помощью орбитального спектрометра высокого разрешения TROPOMI по наземным спектроскопическим измерениям в пункте Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (г. Москва) и на Звенигородской научной станции в период с 28.06.2018 г. по 31.12.2021 г. Были определены и проанализированы характеристики соответствия орбитальных данных TROPOMI данным наземных станций. Получены высокие коэффициенты корреляции ($R \sim 0,81\text{--}0,97$) в зависимости от пункта наблюдения, пространственного усреднения и применяемой фильтрации. При разном пространственном усреднении спутниковых данных исследована зависимость параметров корреляции от орбитальных углов, альбедо подстилающей поверхности и высоты пограничного слоя атмосферы. Для обоих пунктов наблюдения установлено отсутствие влияния альбедо на характеристики корреляции орбитальных и наземных измерений. Также не обнаружено значимой зависимости характеристик корреляции от зенитного угла наблюдений. Однако имеет место зависимость коэффициентов корреляции от азимутальных углов и высоты атмосферного пограничного слоя. Отмечено увеличение корреляции при наблюдениях под азимутальными углами менее 40° (до $R \sim 0,97$) и при росте высоты атмосферного пограничного слоя (до $R \sim 0,90$).

Ключевые слова: окись углерода, общее содержание примеси, атмосферная спектроскопия, спутниковое зондирование, TROPOMI; carbon monoxide, total column, atmospheric spectroscopy, remote sensing, TROPOMI.

Введение

Окись, или монооксид (оксид), углерода (CO) является одной из ключевых малых газовых атмосферных примесей. Несмотря на то что собственный парниковый потенциал CO невелик, этот газ играет важную роль в атмосферной фотохимии: способствует удалению гидроксила OH из атмосферы, предотвращая окисление метана, а также участвует в производстве тропосферного озона (O_3) и углекислого газа (CO_2) [1]. В глобальном масштабе содержание CO определяет концентрацию гидроксила (OH) — основного окислителя в атмосферных фотохимических

процессах, уменьшение которой приводит к разрушению в стратосфере важнейшего газа — озона [2–4]. Главные источники CO — процессы горения, т.е. антропогенные эмиссии и выбросы от природных пожаров [1, 2]. Приземные концентрации CO во многом определяют качество воздуха в городах [5]. Эмиссии CO тесно связаны с выбросами других малых атмосферных примесей и аэрозолей [4, 6]. Являясь относительно пассивной в химическом отношении примесью со временем жизни в тропосфере от двух недель до трех месяцев [2, 5], окись углерода способна переноситься на большие расстояния от источника. Так, время от времени повторяющиеся случаи дальнего переноса (в том числе трансокеанского и трансконтинентального) CO и аэрозолей из областей интенсивных природных пожаров способны повлиять на состав атмосферы целых регионов, удаленных от источников эмиссий на многие тысячи километров [7, 8]. С учетом того, что дистанционные наземные и спутниковые методы

* Вадим Станиславович Ракитин (vadim@ifaran.ru); Наталья Сергеевна Кириллова (n.kirillova65@gmail.com); Евгения Ивановна Федорова (fedorova@ifaran.ru); Александр Николаевич Сафронов (safronov_2003@mail.ru); Артем Вячеславович Казаков (artem.kasakov@gmail.com); Анатолий Васильевич Джола (dzhola@yandex.ru); Евгений Иванович Гречко (eigrechko@gmail.com).

измерений содержания окиси углерода давно существуют, отработаны и неоднократно прошли валидацию, СО наряду с аэрозолями можно считать почти идеальным трассером для исследования процессов дальнего атмосферного переноса загрязнений.

Несмотря на сокращающиеся антропогенные эмиссии и в целом отрицательные тренды общего содержания (ОС) СО в Северном полушарии с начала XXI в. [1, 9], примерно после 2008 г. в летние и осенние месяцы спад ОС СО замедлился, а в некоторых регионах Евразии начался его рост [9, 10]. Причины изменения характера трендов СО пока не вполне ясны. Хотя часть исследователей связывает эти изменения с вариациями пожарной активности, есть и другие возможные причины, например изменение соотношения источники/стоки на фоне происходящих климатических изменений и увеличение атмосферной концентрации метана [10], являющегося одним из важнейших природных источников СО [2–4].

Можно констатировать, что интерес к мониторингу атмосферного СО и исследованию его вариативности по-прежнему высок. Активное развитие орбитальных систем мониторинга в два последних десятилетия позволяет исследовать состав атмосферы (включая оценки трендов концентраций и эмиссий разных атмосферных примесей, в том числе СО) на качественно новом уровне.

Высокоточные наземные и спутниковые методы измерений содержания СО в атмосферном столбе разработаны и применяются уже в течение нескольких десятилетий. В частности, спутниковые наблюдения СО проводятся с помощью так называемых «долголетающих» орбитальных комплексов первого и второго поколений (MOPITT, AIRS, IASI) [11–14]. Данные упомянутых спутниковых сенсоров неоднократно прошли валидацию наземными, самолетными и аэрологическими измерениями и широко используются исследователями при анализе пространственно-временных вариаций СО для оценки эмиссий и трендов [15–19]. Однако невысокая чувствительность этих приборов в нижней тропосфере, а также довольно грубое разрешение (порядка десятков километров) накладываю- т существенные ограничения на применение полученных ими данных, особенно в условиях высокого тропосферного загрязнения в урбанизированных районах и при сильных природных пожарах [13, 16, 17, 19].

С целью преодоления недостатков орбитальных измерений недавно был сделан очень важный шаг в развитии космических методов мониторинга состава атмосферы. В октябре 2017 г. на орбиту был выведен гиперспектральный прибор TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), установленный на борту исследовательского спутника Sentinel-5P Европейского космического агентства (ESA). Спектрометр TROPOMI обладает высоким пространственным разрешением (до $7 \times 5,5$ км по СО), а также более высокой, по сравнению с орбитальными приборами предыдущих поколений, чувствительностью

в нижней тропосфере. Новые возможности TROPOMI сразу же привлекли внимание мирового научного сообщества. Сейчас данные, полученные с помощью этого прибора, широко используются для исследования качества воздуха и при оценке эмиссий СО, NO₂, CH₄ и других примесей от природных и антропогенных источников, в том числе относительно небольшой мощности и пространственной протяженности [20–24]. Однако с учетом новизны этого прибора необходимо как дальнейшее совершенствование расчетных алгоритмов, так и серьезные исследования в области валидации и применимости орбитальных данных TROPOMI.

Цель настоящей работы — валидация измерений СО TROPOMI с использованием наземных спектроскопических наблюдений ИФА РАН в пункте «Москва» и на Звенигородской научной станции. Отметим, что эти пункты находятся в районе, подверженном влиянию антропогенных выбросов, в то время как в большинстве валидационных работ используются данные пунктов, расположенных в районах с фоновыми или слабозагрязненными условиями. Кроме того, дополнительный интерес представляет исследование качества орбитальных (TROPOMI) данных по СО, полученных в разных условиях, и характеристик их соответствия наземным измерениям. В частности, в настоящей работе были исследованы зависимость чувствительности спектрометра TROPOMI от углов наблюдения, альбедо поверхности, высоты пограничного слоя атмосферы (ПСА) и пространственного усреднения (разрешения) спутниковых данных.

1. Методики измерений и обработки

1.1. Спектроскопические измерения ИФА РАН

В качестве реперных наземных данных об общем содержании СО в атмосфере использовались результаты долговременных спектроскопических измерений в пункте «Москва» (центр города, здание ИФА РАН), а также на ЗНС, находящейся на расстоянии 53 км к западу от мегаполиса. Измерения в обоих пунктах проводились с помощью идентичных спектрометров среднего разрешения ($0,2 \text{ см}^{-1}$) с использованием эффекта поглощения молекулами примеси солнечного излучения в области основной полосы поглощения СО с центром около $4,67 \text{ мкм}$. Все спектры были обработаны с применением единой методики, подробно изложенной в [13, 25–27].

Отношение сигнал/шум в записанных спектрах не хуже 100. Для обработки спектров использовалась стандартная процедура подгонки с помощью нелинейного метода наименьших квадратов, реализованная в MATLAB и учитывающая линии поглощения и вертикальные профили других газов (H₂O, O₃, N₂O, CO₂), а также вертикальные профили температуры и СО [26]. В процессе расчетов программа обработки варьирует вертикальный профиль СО

до максимального совпадения синтетического спектра с записанным экспериментальным спектром. Для расчетов ОС СО в фоновых условиях или в условиях невысоких загрязнений (например, для пункта ЗНС) применялся стандартный вертикальный профиль СО, используемый в расчетах MORITT [11], с приземной концентрацией 120 ppb и убыванием до 80 ppb на уровне тропопаузы.

Общее содержание СО в пункте «Москва» вычислялось с измененным профилем концентрации примеси: приземная концентрация устанавливалась равной 300 ppb, что соответствует усредненной для всей Москвы концентрации за 2018–2020 гг., полученной на основе измерений нескольких десятков автоматических станций сети Мосэкомониторинг [28]. Априорный профиль концентрации СО задавался постоянным до высоты 500 м; далее применялся стандартный профиль из [11]. На предварительном этапе были выполнены расчеты влияния вертикального профиля СО на восстановленное общее содержание примеси. Выяснилось, что изменения концентрации в нижнем слое 500 м на 200 ppb, а также изменения характера (формы) этого профиля до высоты 1000 м практически не отражаются на результатах расчетов ОС СО (в пределах 0,2–1,0%). Погрешность единичного измерения ОС СО оценивается в 5–6% [12, 27].

Измерения проводились в солнечные дни и, как правило, синхронно в обоих пунктах, обычно с 10:00 до 15:00 по московскому времени. Количество измерительных дней в году на обеих станциях, как правило, 70–80; однако в 2020 и 2021 гг. в связи с локдауном во время пандемии COVID-19 количество измерительных дней в пункте ЗНС уменьшилось до 20–25 в год. Для сопоставления с орбитальными измерениями TROPOMI использовались средние дневные величины содержания СО. С учетом времени пролета TROPOMI над Москвой (~ 13:30 MSK) разница во времени между началом и окончанием наземных измерений со временем орбитальных измерений не превышала 1,5 ч. Добавим, что в последние годы наземные измерения как в пригороде на ЗНС, так и в Москве, как правило, характеризовались отсутствием дневного хода [25]. В тех случаях, когда дневной ход фиксировался, отбирались спектры, записанные с 12:30 до 14:30 MSK. Таким образом, в эти дни временная разница между пролетом спутника и наземными измерениями составляла не больше 1 ч. Для валидации был выбран период одновременных орбитальных и наземных измерений с 28.06.2018 г. по 31.12.2021 г.

1.2. Орбитальные наблюдения TROPOMI

Орбитальный спектрометр TROPOMI был запущен в октябре 2017 г. на борту исследовательского спутника Sentinel-5 Precursor (S-5P) Европейского космического агентства. S5-P представляет собой спутниковую систему, выведенную на полярную околоземную орбиту для сбора информации

о качестве воздуха, климате и озоновом слое. TROPOMI измеряет усредненное атмосферное содержание нескольких газов (в том числе СО) и аэрозолей на большей части земного шара один раз в сутки с разрешением 7×7 км ($7 \times 5,5$ км начиная с 6 августа 2019 г.) в надир в случае СО [29]. Ширина полосы обзора составляет 2600 км, область усреднения (размер «первичного пикселя») варьируется в зависимости от примеси, угла и полосы обзора. Время измерений над каждым пунктом соответствует примерно 13:30 астрономического (солнечного) времени.

1.3. Обзор литературных данных валидации TROPOMI

Данные TROPOMI по СО в настоящее время широко используются при решении различных задач, связанных с загрязнением тропосферы в урбанизированных и фоновых районах [20–24, 30, 31], в том числе для оценки или уточнения антропогенных эмиссий [21–23]. В этих же работах данные TROPOMI сопоставляются с наземными спектроскопическими измерениями и отмечается их хорошее соответствие. Так, например, в пригороде Пекина Шангхе коэффициент корреляции $R \sim 0,96$, наклон линии регрессии $K \sim 1,1$ [31], но статистическая обеспеченность этого и других отдельных проведенных сопоставлений невелика (не более полутора лет).

Результаты валидации данных TROPOMI по ХСО (усредненная в атмосферной толще концентрация СО) и ОС СО для большого количества наземных пунктов международных наблюдательных сетей NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) и TCCON (Total Carbon Column Observing Network) опубликованы в [32]. В нашем исследовании использовалась выборка спутниковых пикселей, лежащих в круге радиусом 50 км вокруг наземного пункта, т.е. сопоставление производилось при достаточно грубом разрешении. Так же, как и в [30, 31], в [32] была отмечена высокая корреляция орбитальных и наземных измерений СО. При использовании линейной формы зависимости в большинстве пунктов сопоставления были получены коэффициент корреляции $R \sim 0,9$ и коэффициент наклона линии регрессии $K \sim 0,9$, а систематическое расхождение (невязка) между орбитальными и наземными данными находилось в пределах $9,22 \pm 3,45\%$ (средняя величина невязки при прямом сравнении измерений TROPOMI ХСО с данными 28 пунктов TCCON) и $5,69 \pm 3,07\%$ (средняя величина невязки при прямом сравнении измерений TROPOMI ОС СО в 23 пунктах NDACC). В целом невязка варьировалась от $-6,02 \pm 6,9\%$ (станция TCCON Xianghe) до $20,6 \pm 11,9\%$ (станция NDACC Altzomoni). Применение в [32] сглаживающих и корректирующих алгоритмов привело лишь к незначительному улучшению этого расхождения. Отмечались отсутствие значимой зависимости характеристик корреляции от облачности и слабо выраженная

зависимость от солнечного зенитного угла, относящаяся в основном к измерениям в условиях низкого Солнца, т.е. к высоким широтам.

Однако следует отметить несколько важных, по нашему мнению, моментов. Во-первых, станции TCCON и NDACC расположены, как правило, в фоновых или слабозагрязненных районах (за некоторым исключением, например Xianghe). В случае отсутствия интенсивного дальнего переноса пространственные вариации поля CO относительно невелики и использованное в [32] довольно грубое пространственное усреднение в принципе не должно приводить к значительному искажению результатов сопоставлений в большинстве пунктов. Во-вторых, в ряде задач, например при оценке пространственных неоднородностей полей CO и/или при оценке эмиссий, наибольший интерес представляют спутниковые данные высокого разрешения. В особенности это относится к урбанизированным районам или районам природных пожаров. В этой связи представлялось интересным оценить качество данных TROPOMI по CO именно в высоком пространственном разрешении. В настоящей работе был использован другой (по сравнению с [32]) принцип выборки спутниковых данных и их систематизации по условиям. Кроме исследования зависимости параметров корреляции орбитальных и наземных измерений от масштаба пространственного усреднения спутниковых данных была также изучена зависимость от альбедо, углов наблюдения и высоты ПСА. Кроме этого, период сопоставлений в нашей работе был увеличен по сравнению с [32] на полтора года (см. п. 2.1).

Пункт «Москва» в большей степени, чем загородная станция ЗНС, подвержен влиянию городских выбросов. Дополнительно следует отметить, что в последние годы (начиная примерно с 2008 г.) в пункте «Москва» наблюдается относительно небольшое превышение дневных значений ОС CO над аналогичными значениями на ЗНС. Среднее превышение составляет 10–15%; случаи с превышением 30–40% в 2018–2021 гг. были единичными. Аналогичная тенденция (быстрое снижение в последние полтора десятилетия) наблюдается и для приземных концентраций оксида углерода, т.е. Москву сейчас нельзя отнести к району с высоким атмосферным загрязнением CO [25, 28].

1.4. Краткое описание орбитальных данных, методов их обработки и фильтрации

В работе использовался продукт TROPOMI OFFL CO L2 (второй уровень L2, или Level 2, вид обработки OFFL, т.е. архивные данные, прошедшие первичную фильтрацию). Для пользователя L2 — это первичный уровень, где один измерительный день содержит 15 файлов формата NetCdf (по числу орбит спутника за сутки) [29, 33]. Используемые данные доступны со второй половины 2018 г. и находятся в открытом доступе на сайте <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products>.

Так как суточные данные уровня 3 (Level 3, или L3) отсутствуют, то каждая исследовательская группа формирует TROPOMI L3 самостоятельно, используя значения предыдущего уровня L2. Для анализа данных TROPOMI нами было разработано специальное программное обеспечение (*tropomi_tools*), позволяющее осуществлять сбор данных TROPOMI L2 с последующим преобразованием их к уровню L3. При этом 15 файлов формата NetCdf преобразуются в единый суточный файл формата MATLAB «.mat» с сохранением метаданных и геопеременных исходного разрешения и расположения первичных орбитальных пикселей (ячеек). Упомянутое программное обеспечение применялось ранее в [25] при анализе распределений общего содержания CO орбитального спектрометра AIRS, а также в [34].

На основе сформированного набора данных уровня L3 программа также позволяет рассчитывать для произвольно заданных координат любые геопривязанные параметры с возможностью автоматической фильтрации по выбранным переменным и пороговым значениям. В настоящей работе были использованы области усреднения спутниковых измерений $0,1^\circ \times 0,1^\circ$; $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Для пунктов «Москва» и ЗНС и этих областей производились расчеты среднесуточного содержания CO с одновременной фильтрацией по одному или нескольким параметрам: зенитному (параметр *viewing_zenith_angle*, далее VZA) и азимутальному (параметр *viewing_azimuth_angle*, VAA) углам наблюдений, параметру качества орбитальных данных (параметр *quality_assurance_value*, далее qa) и альбедо поверхности (параметр *surface_albedo*, далее SA).

Переменная качества орбитальных данных, равная нулю ($qa = 0$), соответствует наихудшему качеству, $qa = 1$ — наилучшему. Разработчиками рекомендуется использовать для продукта TROPOMI OFFL CO орбитальные данные с параметром качества $qa > 0,5$ [29]. Это, по мнению разработчиков, удаляет облачные сцены, часть сцен, покрытых снегом или льдом, а также «проблемные» расчеты и пиксели. Однако по результатам предварительных сопоставлений данных TROPOMI OFFL CO с наземными измерениями выяснилось, что при такой фильтрации ($qa > 0,5$) количество данных (и, следовательно, пар сопоставлений) уменьшается примерно на 8–9%, по сравнению с условием $qa > 0,3$, а корреляция не улучшается. Так, при фильтрациях по параметрам качества $qa > 0,3$ и $qa > 0,5$ коэффициенты корреляции при усреднении по ячейкам $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ были равны $\sim 0,826$ и $0,833$ для пункта «Москва» и $0,862$ и $0,819$ для ЗНС соответственно. В результате для лучшей статистической обеспеченности сопоставлений ОС CO нами было использовано значение $qa > 0,3$.

Кроме того, на предварительном этапе мы исследовали зависимость параметров корреляции от альбедо и не нашли заметных изменений корреляции при разных значениях SA, что согласуется с результатами [32]. Тем не менее для выбранного района сопоставлений было обнаружено некоторое

количество пикселей TROPOMI OFFL CO, в которых $SA < 0$ и $SA > 1$ (~10–12% от общего числа первичных пикселей). Поскольку значения альбеда $SA < 0$ и $SA > 1$ лишены физического смысла, то во всех дальнейших расчетах мы использовали дополнительную фильтрацию по условию $0 \leq SA \leq 1$.

Отметим, что при усреднении по ячейкам наземный измерительный пункт всегда размещался в центре соответствующего прямоугольника. Следовательно, области усреднения для Москвы и ЗНС не перекрывались при любом выбранном разрешении. При упомянутой выше фильтрации по параметрам $qa > 0,3$ и $0 \leq SA \leq 1$ типичное количество первичных пикселей с данными, по которым производится усреднение, было равно 2–3, 8–12 и 20–40 для областей $0,1^\circ \times 0,1^\circ$; $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ соответственно.

1.5. Фильтрация данных по орбитальным углам наблюдения и высоте ПСА

При исследовании зависимости параметров корреляции от зенитных и азимутальных углов наблюдений устанавливались следующие условия: $0 \leq VZA \leq 20; 30; \dots; 90^\circ$ и $|VAA| \leq 20; 30; \dots; 90^\circ$, т.е. углы выбирались с дискретностью 10° . Отметим дополнительно, что порог для азимутальных углов выбирался по модулю, т.е. условие $|VAA| \leq 20^\circ$ означало $-20^\circ \leq VAA \leq 20^\circ$, поскольку значения VAA в данных TROPOMI могут быть как положительными, так и отрицательными (от -90 до $+90^\circ$). При проведении сопоставлений выяснилось, что для пункта ЗНС данные TROPOMI с $|VAA| \leq 40^\circ$ полностью отсутствуют, т.е. орбитальный спектрометр наблюдает окрестности ЗНС только под относительно большими азимутальными углами.

Высота ПСА не содержится в данных TROPOMI OFFL CO. Этот параметр определялся по метеорологическим полям из базы данных Глобальной системы ассимиляции данных (Global Data Assimilation System, GDAS1) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и временным разрешением 3 ч: 00:00, 03:00, 06:00 UTC и т.д. Описание метеорологических полей GDAS можно найти на веб-сайте NOAA ARL; сами данные доступны через FTP-сервер ARL. Для распаковки метеорологических полей и проецирования их на координаты Москвы и ЗНС применялись скрипты GrADS (Grid Analysis and Display System). Исходники программы GrADS доступны на веб-сайте COLA (Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies). В своих сопоставлениях мы использовали высоты ПСА, рассчитанные в срок, ближайший по времени к пролету спутника, т.е. 09:00 UTC/12:00 MSK.

При исследовании зависимости параметров корреляции от высоты ПСА использовались интервалы высот ПСА (H_{ABL}) с шагом 100 м в слое от 0 до 1000 м ($H_{ABL} \geq 0$; $H_{ABL} \geq 100$; $\geq 200 \dots \geq 1000$ м) и далее $H_{ABL} \geq 1200$ и ≥ 1500 м.

2. Результаты и обсуждение

Примеры синхронных пар TROPOMI и наземных (спектрометры ИФА РАН) измерений ОС СО для пунктов «Москва» и ЗНС с 20.06.2018 г. по 31.12.2021 г. при усреднении данных по ячейкам $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ приведены на рис. 1, а и б. На рис. 1, в, г представлены разности (невязки) между данными TROPOMI и наземными измерениями: $\Delta U = U_{stl} - U_{gr}$, где U_{stl} — ОС СО, полученное с помощью TROPOMI, и U_{gr} — ОС СО, измеренные наземными спектрометрами.

И наземные, и орбитальные данные хорошо отображают сезонные вариации ОС СО (минимум в июле — сентябре и максимум в феврале-марте). Разность (невязка) между орбитальными и наземными данными ΔU не зависит от сезона, а ее средняя величина составляет $-2,4 \cdot 10^{16}$ и $2,7 \cdot 10^{16}$ молек./см² (в отн. ед. $-1,1 \pm 7,5$ и $1,3 \pm 5,7\%$) для пунктов «Москва» и ЗНС при области усреднения (разрешения) $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Для разрешения $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) невязка составляет $-1,7 \pm 6,7\%$ ($-1,5 \pm 6,3\%$) для Москвы и $0,64 \pm 5,2\%$ ($0,88 \pm 4,6\%$) для ЗНС. Полученная невязка по абсолютной величине существенно меньше, чем систематическая ошибка, приведенная в [32] при валидации TROPOMI OFFL CO. При прямом сравнении по станциям NDACC и TCCON были получены средние значения невязки $9,22 \pm 3,45\%$ и $5,69 \pm 3,07\%$ соответственно.

Отметим, что для данных TROPOMI OFFL CO, прошедших только предварительную фильтрацию, с увеличением области усреднения коэффициент наклона K и константа линейной регрессии A практически не изменяются, а коэффициент корреляции R увеличивается на обоих пунктах (рис. 2), хотя это увеличение статистически не значимо (95%-е доверительные интервалы для R пересекаются). Причины роста R полностью не ясны и обсуждаются ниже.

На рис. 3 (цв. вкладка) приведено распределение ОС СО по данным TROPOMI на 19.07.2020 г. для разного пространственного усреднения. Этот день был выбран как наиболее типичный (случай ясной погоды во время пролета спутника), т.е. в районе Москвы облачность была минимальна. Как видно из рис. 3, а, для области усреднения $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ максимальная разность между значениями ОС СО в соседних ячейках достигает $5 \cdot 10^{17} - 7 \cdot 10^{17}$ молек./см², что составляет около 50–60% от измеряемой величины ОС. Отметим также, что на рис. 3, а ячейки с минимальным и максимальным ОС СО далеко не всегда соответствуют фоновым районам или, наоборот, интенсивным антропогенным источникам. Для областей $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (рис. 3, б) и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (рис. 3, в) максимальная разность ОС СО в соседних ячейках существенно ниже и для 19.07.2020 г. составляет около $3 \cdot 10^{17}$ и $2 \cdot 10^{17}$ молек./см² соответственно (~20 и 12% от измеряемой величины).

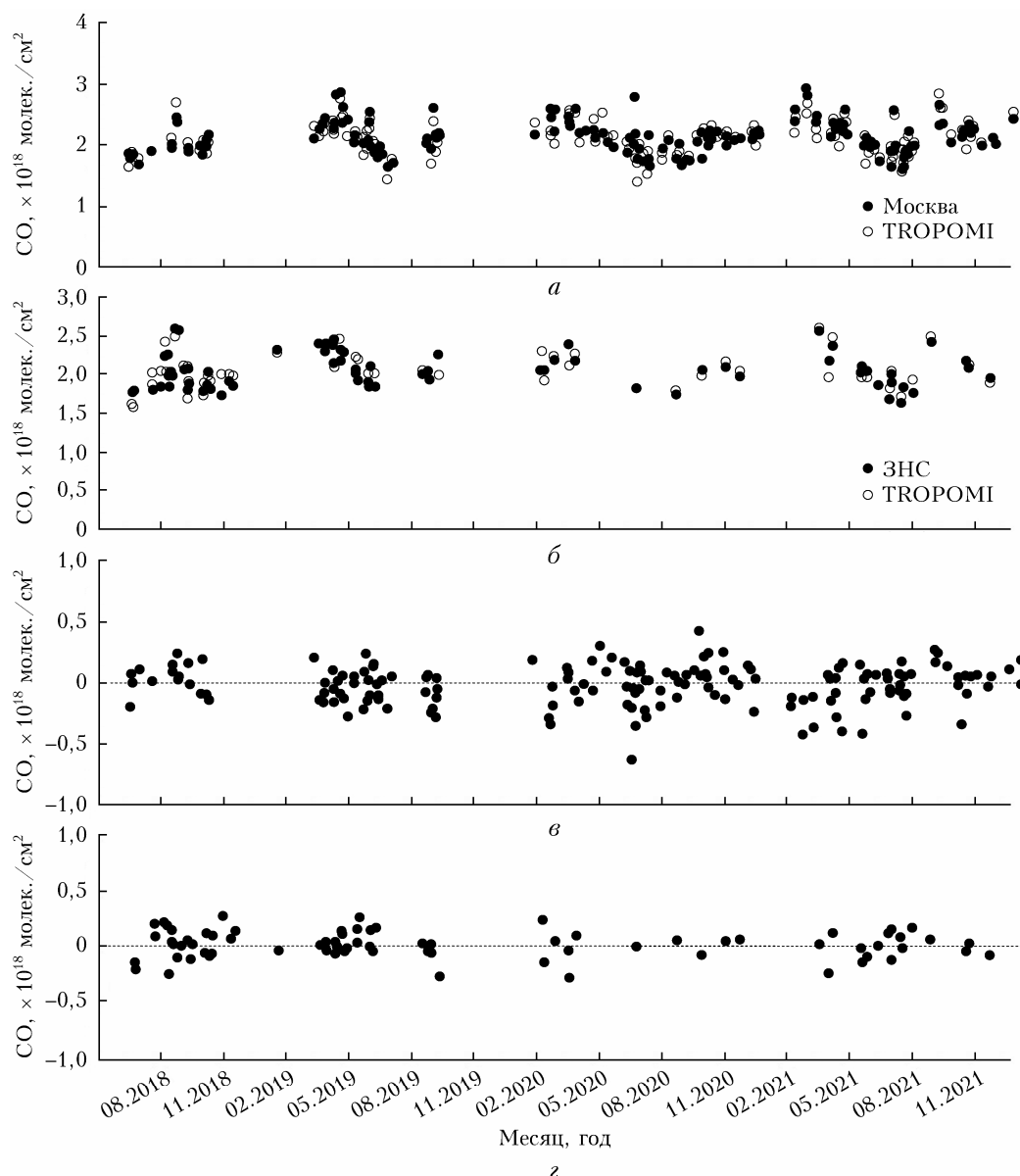


Рис. 1. Временные ряды ОС СО по данным TROPOMI и наземных спектрометров в Москве (а) и на ЗНС (б) и разности между орбитальными и наземными измерениями в Москве (в) и на ЗНС (г); область усреднения $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Наземные ряды были синхронизированы с орбитальными измерениями TROPOMI. К данным TROPOMI применялась фильтрация по условиям $qa > 0,3$ и $0 \leq SA \leq 1$

Таким образом, при использовании области усреднения $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ вес «артефактного» пикселя (или пикселя с «проблемными расчетами», упомянутыми разработчиками в [29]) повышается, в то время как использование больших областей усреднения приводит к сглаживанию границ между ячейками. По нашему мнению, одной из причин отсутствия увеличения корреляции при использовании более высокого пространственного разрешения орбитальных данных TROPOMI ОС СО может являться именно некоторое количество «артефактных» первичных пикселей.

Отметим плавное улучшение корреляции с уменьшением модуля азимутального угла от 90° до 40° для пункта «Москва» (рис. 4, а, цв. вкладка) (R уве-

личивается от 0,83 до 0,91). Наклон линии регрессии K также плавно увеличивается от 0,83 до 1,19. Значение $K \sim 1$ наблюдается при $|VAA| \leq 60^\circ$; с уменьшением модуля VAA уменьшается количество данных TROPOMI и, следовательно, количество пар сопоставления. Константа A также убывает и становится минимальной по модулю при $|VAA| \leq 60^\circ$. В совокупности наилучшие параметры корреляции при достаточно большом количестве данных TROPOMI достигаются при соблюдении условия $|VAA| \leq 50-60^\circ$ (рис. 4, а, б). Это объясняется тем, что при больших азимутальных углах в область усреднения дополнительно попадают данные других орбит, что приводит к рассогласованию наземных и спутниковых измерений во времени (не считая возможных

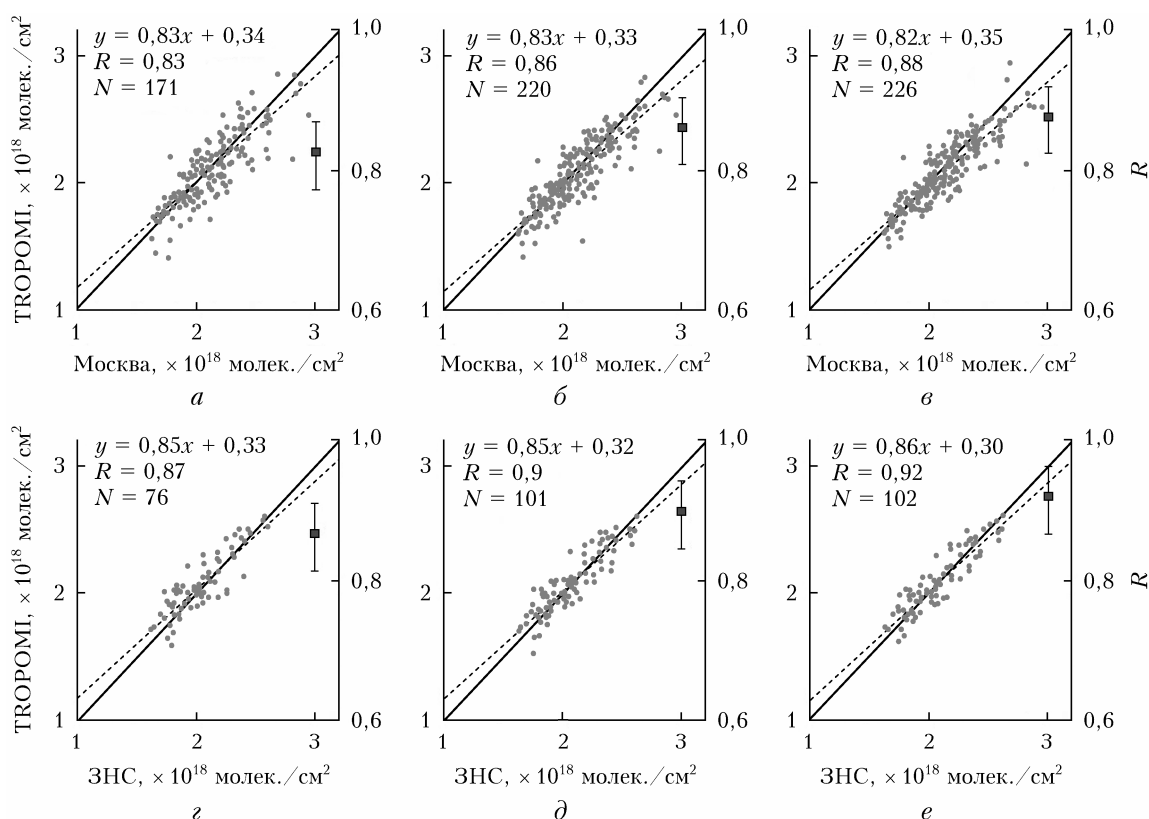


Рис. 2. Параметры сопоставления измерений TROPOMI и наземных данных ОС СО для областей усреднения: $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (а, г), $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (б, д) и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (в, е) по условиям $0 \leq SA \leq 1$, $qa > 0,3$: а–в – пункт «Москва», г–е – пункт ЗНС. Точечные прямые – линейные регрессии; квадраты с вертикальными отрезками – R с доверительным интервалом 95%

ошибок расчетных алгоритмов при увеличении углов наблюдения). При $|VAA| \leq 60^\circ$ данные соседних орбит практически исключаются из сопоставления.

С уменьшением VZA происходят плавное увеличение K и уменьшение A при незначительных вариациях R . Для пункта «Москва» K варьирует от 0,83 ($VZA \leq 90^\circ$) до 0,90 ($VZA \leq 20^\circ$) при одновременном уменьшении числа пар сопоставлений от 171 до 64. Константа A для этих же величин VZA в пункте «Москва» плавно убывает от $0,336 \cdot 10^{18}$ до $0,199 \cdot 10^{18}$ molec./cm².

Для пункта ЗНС характер зависимости параметров корреляции от величины наблюдаемых углов примерно такой же, как и для Москвы, за исключением того, что данные TROPOMI OFFL CO L2 при $|VAA| \leq 40^\circ$ практически отсутствуют (см. рис. 4, в, г). Плавный характер зависимости R от VZA для ЗНС нарушается (рис. 5, в, г, цв. вкладка) вследствие меньшего, по сравнению с Москвой, количества пар сопоставлений.

Следует отметить, что для больших областей усреднения ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$) характер анализируемых зависимостей параметров корреляции от спутниковых углов практически идентичен представленному на рис. 4 и 5, за исключением того, что значения R для этих усреднений несколько выше, чем для $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Так, для пункта «Моск-

ва» R достигает максимума $\sim 0,96/0,97$ для областей $0,25^\circ \times 0,25^\circ/0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и $|VAA| \leq 40^\circ$.

На рис. 6 (цв. вкладка) представлена зависимость параметров линейной регрессии от высоты ПСА. Было установлено, что в Москве (рис. 5, а) R практически не меняется с ростом высоты ПСА в диапазоне 0–400 м ($R \sim 0,82$). Начиная с 600 м ($R \sim 0,83$) происходит рост корреляции вплоть до 1000 м ($R \sim 0,86$). Коэффициент регрессии имеет слабовыраженный рост лишь на высотах от 400–600 м и достигает значений порядка $K \sim 0,85$. На рис. 6, б видна зависимость количества используемых данных (N) от высоты ПСА, при этом чем выше ПСА, тем меньше количество данных. Константа A практически неизменна и имеет незначительные локальные максимумы на 300 и 900 м. В Звенигороде (рис. 6, в) коэффициент корреляции меняется скачкообразно, что, по нашему мнению, связано с относительно невысокой статистической обеспеченностью сопоставлений. Первый максимум R соответствует высоте ПСА 300–400 м ($R \sim 0,87$), второе увеличение (с $R \sim 0,87$ до $\sim 0,90$) происходит примерно на высоте ПСА 600–1000 м, после чего замечен спад до $R \sim 0,84$. Незначительный рост проявляет также и коэффициент наклона ($K \sim 0,85$ на 0 м и $K \sim 0,90$ на 1500 м). Вариации A в пункте ЗНС незначительны во всем диапазоне

высоты ПСА: от $0,243 \cdot 10^{18}$ (ПСА ≥ 1500 м) до $0,368 \cdot 10^{18}$ молек./см² (ПСА ≥ 600 м). Наличие локальных экстремумов A на рис. 6, z следует также отнести на счет относительно невысокой статистической обеспеченности сопоставлений в пункте ЗНС.

Заключение

Выполнено сопоставление результатов измерений содержания оксида углерода орбитальным спектрометром высокого разрешения TROPOMI (продукт OFFL CO L2) с наземными спектроскопическими данными спектрометров ИФА им. А.М. Обухова РАН, расположенных в Москве и Московской обл., за 2018–2021 гг. Исследованы зависимости параметров корреляции орбитальных и наземных данных от наблюдаемых углов, альbedo подстилающей поверхности и высоты пограничного слоя атмосферы при разном пространственном усреднении данных TROPOMI по ячейкам размерами $0,1^\circ \times 0,1^\circ$; $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Установлена высокая корреляция орбитальных данных TROPOMI по CO с наземными измерениями (до $R = 0,81–0,97$) в зависимости от пункта наблюдения, разрешения и применяемой фильтрации орбитальных данных. Отмечено относительно невысокое систематическое расхождение (невязка) орбитальных и наземных данных ($-1,1 \pm 7,5\%$; $-1,7 \pm 6,7\%$; $-1,5 \pm 6,3\%$ для пункта «Москва» и $1,3 \pm 5,7\%$; $0,64 \pm 5,2\%$; $0,88 \pm 4,6\%$ для ЗНС при областях усреднения $0,1^\circ \times 0,1^\circ$; $0,25^\circ \times 0,25^\circ$; $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ соответственно). Не обнаружено увеличение корреляции данных TROPOMI по CO для области усреднения $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ по сравнению с более грубым пространственным разрешением. Более того, в обоих пунктах отмечен некоторый статистически незначимый рост ($\sim 6\%$) коэффициента корреляции при увеличении области усреднения спутниковых данных до $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Так, для пункта «Москва» для нефильтрованных данных и пространственных разрешений $0,1^\circ \times 0,1^\circ$; $0,25^\circ \times 0,25^\circ$; $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ коэффициенты корреляции были равны $R = 0,83$; $0,86$; $0,88$; наклоны линий регрессии $K = 0,832$; $0,833$; $0,822$. Установлено увеличение корреляции при уменьшении модуля азимутального угла наблюдений от 90 до 40° (вплоть до $R = 0,97$ для области усреднения $0,5^\circ \times 0,5^\circ$). Также обращает на себя внимание увеличение коэффициента корреляции с ростом высоты атмосферного пограничного слоя. Отмечено отсутствие значимой зависимости параметров корреляции от зенитного угла наблюдений и альbedo подстилающей поверхности.

Благодарности. Данные TROPOMI по CO предоставлены Европейским космическим агентством (European Space Agency). Расчеты высоты ПСА выполнены на основе метеополей Глобальной системы ассимиляции данных (Global Data Assimilation System). Авторы благодарны анонимному рецензенту за полезные замечания.

Финансирование. Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-776).

Список литературы

1. IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf.
2. Novelli P.C., Masarie K.A., Lang P.M. Distributions and recent changes in carbon monoxide in the lower troposphere // J. Geophys. Res.: Atmos. 1998. V. 103, N 19. P. 015–033.
3. Jacob D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1999. 267 p. DOI: 10.1515/9781400841547.
4. The Future of Atmospheric Chemistry Research: Remembering Yesterday, Understanding Today, Anticipating Tomorrow. Washington, DC: The National Academies Press, 2016. 226 p. DOI: 10.17226/23573.
5. Gurjar B.R., Butler T.M., Lawrence M.G., Lelieveld J. Evaluation of emissions and air quality in megacities // Atmos. Environ. 2008. V. 42. P. 1593–1606. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007009697>.
6. Wunch D., Wennberg P.O., Toon G.C., Keppel-Aleks G., Yavin Y.G. Emissions of greenhouse gases from a North American megacity // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. DOI: 10.1029/2009GL039825.
7. Johnson M.S., Strawbridge K., Knowland K.E., Keller Ch., Travis M. Long-range transport of Siberian biomass burning emissions to North America during FIREX-AQ // Atmos. Environ. 2021. V. 252, N 118241. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118241.
8. Hu Q., Goloub Ph., Veselovskii I., Bravo-Aranda J.-A., Popovici I.E., Podvin Th., Haefelin M., Lopatin A., Dubovik O., Pietras Ch., Huang X., Torres B., Chen Ch. Long-range-transported Canadian smoke plumes in the lower stratosphere over Northern France // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 1173–1193. DOI: 10.5194/acp-19-1173-2019.
9. Jiang Z., Worden J.R., Worden H., Deeter M.A., Jones D.B., Arellano A.F., Henze D.K. A fifteen year record of CO emissions constrained by MOPITT CO observations // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 4565–4583. DOI: 10.5194/acp-17-4565-2017.
10. Rakitin V.S., Elansky N.F., Wang P., Wang G., Pankratova N.V., Shtabkin Y.A., Skorokhod A.I., Safronov A.N., Makarova M.V., Grechko E.I. Changes in trends of atmospheric composition over urban and background regions of Eurasia: Estimates based on spectroscopic observations // Geography. Environ. Sustain. 2018. V. 11. P. 84–96. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-2-84-96.
11. Deeter M.N., Emmons L.K., Franci G., Edwards D.-P., Gille J.-C., Warner J., Khattatov B., Zinskin D.-C., Lamarque J.-F., Ho S.-P., Yundin V., Attie Jean-Luc, Packman D., Chen Jie, Mao D.-D., Drummond J. Operational carbon monoxide retrieval algorithm and selected results for the MOPITT instrument // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. N D14. DOI: 10.1029/2002JD003186.
12. Yurganov L.N., McMillan W.W., Dzhola A.V., Grechko E.I., Jones N.B., van der Werf G.R. Global AIRS

- and MOPITT CO measurements: Validation, comparison, and links to biomass burning variations and carbon cycle // *J. Geophys. Res.*: Atmos. 2008. V. 113, N 90. P. D09301. DOI: 10.1029/2007JD009229.
13. Yurganov L.N., Rakitin V., Dzhola A., August T., Fokeeva E., George M., Gorchakov G., Grechko E., Hannon S., Karpov A., Ott L., Semutnikova E., Shumsky R., Strow L. Satellite – and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: Accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 7925–7942.
 14. Pommier M., Mc Linden C.A., Deeter M. Relative changes in CO emissions over megacities based on observations from space // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 1–6. DOI: 10.1002/grl.50704.
 15. Ситнов С.А., Мохов И.И., Джола А.В. Общее содержание оксида углерода в атмосфере над российскими регионами по спутниковым данным // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2017. V. 53. P. 38–55. DOI: 10.7868/S0002351517010126.
 16. Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Гречко Е.И., Сафронов А.Н. Результаты сопоставления спутниковых измерений общего содержания CO, CH₄ и CO₂ с наземными спектроскопическими данными // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 9. С. 816–824; Rakitin V.S., Shtabkin Yu.A., Elansky N.F., Pankratova N.V., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Safronov A.N. Comparison results of satellite and ground-based spectroscopic measurements of CO, CH₄, and CO₂ total contents // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 533–542.
 17. Wang P., Elansky N.F., Timofeev Y.M., Wang G., Golitsyn G.S., Makarova M.V., Rakitin V.S., Shtabkin Y., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Fokeeva E.V., Safronov A.N., Liang R., Ting W. Long-term trends of carbon monoxide total columnar amount in urban areas and background regions: Ground- and satellite-based spectroscopic measurements // *Adv. Atmos. Sci.* 2018. V. 35. P. 785–795. DOI: 10.1007/s00376-017-6327-8.
 18. Krol M., Peters W., Hooghiemstra P., George M., Clerbaux C., Hurtmans D., McInerney D., Sedano F., Bergamaschi P., El Hajj M., Kaiser W., Fisher D., Yershov V., Muller J.-P. How much CO was emitted by the 2010 fires around Moscow? // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 4737–4747.
 19. Yurganov L., Rakitin V. Two decades of satellite observations of carbon monoxide confirm the increase in Northern hemispheric wildfires // *Atmosphere.* 2022. V. 13. P. 1479. DOI: 10.3390/atmos13091479.
 20. Li F., Zhang X., Kondragunta S., Lu X. An evaluation of advanced baseline imager fire radiative power based wildfire emissions using carbon monoxide observed by the Tropospheric Monitoring Instrument across the conterminous United States // *Environ. Res. Lett.* 2020. V. 15. P. 094049. DOI: 10.1088/1748-9326/ab9d3a.
 21. 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. P. 20033. DOI: 10.1038/s41598-019-56428-5.
 22. 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.
 23. Ialongo I., Stepanova N., Hakkarainen J., Virta H., Gritsenko D. Satellite-based estimates of nitrogen oxide and methane emissions from gas flaring and oil production activities in Sakha Republic, Russia // *Atmos. Environ.* X. 2021. V. 11. P. 100114. DOI: 10.1016/j.aeoaa.2021.100114.
 24. Crosman E. Meteorological drivers of permian basin methane anomalies derived from TROPOMI // *Remote Sens.* 2021. V. 13. 22 p. DOI: 10.3390/rs13050896.
 25. 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. атмосфер. и океана.* 2021. Т. 57, № 1. С. 126–136. DOI: 10.31857/S0002351521010107.
 26. McKernan E., Yurganov L.N., Tolton B.T., Drummond R. MOPITT validation using ground-based IR spectroscopy // *Proc. SPIE.* 1999. N 3756. P. 486–491.
 27. Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V. Long-term measurements of carbon monoxide over Russia using a spectrometer of medium resolution // *Recent Res. Devel. Geophys.* 2002. N 4. P. 249–265.
 28. Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2022. Т. 58, № 1. С. 92–108. DOI: 10.31857/S0002351522010023.
 29. Landgraf J., Borsdorff T., Langerock B., Keppens A. MPC Product Readme Carbon Monoxide V. 01.04.00, N 1.5, Document No. S5P-MPC-SRON-PRF-CO. URL: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Carbon-Monoxide-Level-2-Product-Readme-File> (last access: 02.12.2022).
 30. Knapp M., Kleinschek R., Hase F., Agustí-Panareda A., Inness A., Barré J., Landgraf J., Borsdorff T., Kinne S., Butz A. Shipborne measurements of XCO₂, XCH₄, and XCO above the Pacific Ocean and comparison to CAMS atmospheric analyses and S5P/TROPOMI // *Earth Syst. Sci. Data.* 2021. V. 13. P. 199–211. DOI: 10.5194/essd-13-199-2021.
 31. Yang Y., Zhou M., Langerock B., Sha M.K., Hermans C., Wang T., Ji D., Vigouroux C., Kumps N., Wang G., De Maziure M., Wang P. New ground-based Fourier-transform near-infrared solar absorption measurements of XCO₂, XCH₄, and XCO at Xianghe, China // *Earth System Sci. Data.* 2020. V. 12, N 3. P. 1679–1696. DOI: 10.5194/essd-12-1679-2020.
 32. Sha M.K., Langerock B.L., Blavier J.-F., Blumenstock T., Borsdorff T., Buschmann M., Dehn A., De Maziure M., Deutscher N.M., Feist D.G., Garcia O.E., Griffith D.W.T., Grutter M., Hannigan J.W., Hase F., Heikkinen P., Hermans C., Iraci L.T., Jeseck P., Jones N., Kivi R., Kumps N., Landgraf J., Lorente A., Mahieu E., Makarova M.V., Mellqvist J., Metzger J.-M., Morino I., Nagahama T., Notholt J., Ohyama H., Ortega I., Palm M., Petri C., Pollard D.F., Rettinger M., Robinson J., Roche S., Roehl C.M., Röhling A.N., Roussogenous C., Schneider M., Shiomu K., Smale D., Stremme W., Strong K., Sussmann R., Tü Y., Uchino O., Velasco V.A., Vigouroux C., Vrekoussis M., Wang P., Warneke T., Wizenberg T., Wunch D., Yamanouchi S., Yang Y., Zhou M. Validation of methane and carbon monoxide from Sentinel-5 Precursor using TCCON and NDACC-IRWG stations // *Atmos. Meas. Tech.* V. 14. P. 6249–6304. DOI: 10.5194/amt-14-6249-2021, 2021.
 33. Apituley A., Pedernana M., Sneep M., Veefkind J.P., Loyola D., Landgraf J., Borsdorff T. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual

Carbon Monoxide – S5P L2 PUM Carbon Monoxide. N 1.0.0. URL: http://www.tropomi.eu/sites/default/files/files/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Carbon-Monoxide_v1.0002_20180613.pdf (last access: 13.06.2018).

34. Скорыход 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, N.S. Kirillova, E.I. Fedorova, A.N. Safronov, A.V. Kazakov, A.V. Dzhola, E.I. Grechko.
Validation of TROPOMI orbital observations of the CO total column by ground-based measurements at the OIAP stations in Moscow and Zvenigorod.

Carbon monoxide (CO) total column (TC) measurements of the TROPOMI high-resolution orbital spectrometer have been validated by ground-based spectroscopic measurements at sites of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, in Moscow and Zvenigorod for the period from June 28, 2018, to December 31, 2021. Correlation coefficients (R) between TROPOMI orbital data and ground-based stationary data are determined and analyzed. The high values of the correlation coefficient are obtained ($R \sim 0.81\text{--}0.97$) depending on the observation point, spatial averaging, and filtration applied. For different averaging of satellite data, the dependences of correlation parameters on the orbital angles, underlying surface albedo, and the height of atmospheric boundary layer are investigated. No influence of albedo on the correlation parameters of orbital and ground-based measurements is found for both observation sites. No significant dependence of correlation parameters on the viewing zenith angle is detected either. However, the correlation coefficients depend on the viewing azimuthal angles and the height of the atmospheric boundary layer. An increase in the correlation is obtained during observations at viewing azimuthal angles of less than 40° (up to $R \sim 0.97$), as well as under an increase in the height of the atmospheric boundary layer (up to $R \sim 0.90$).

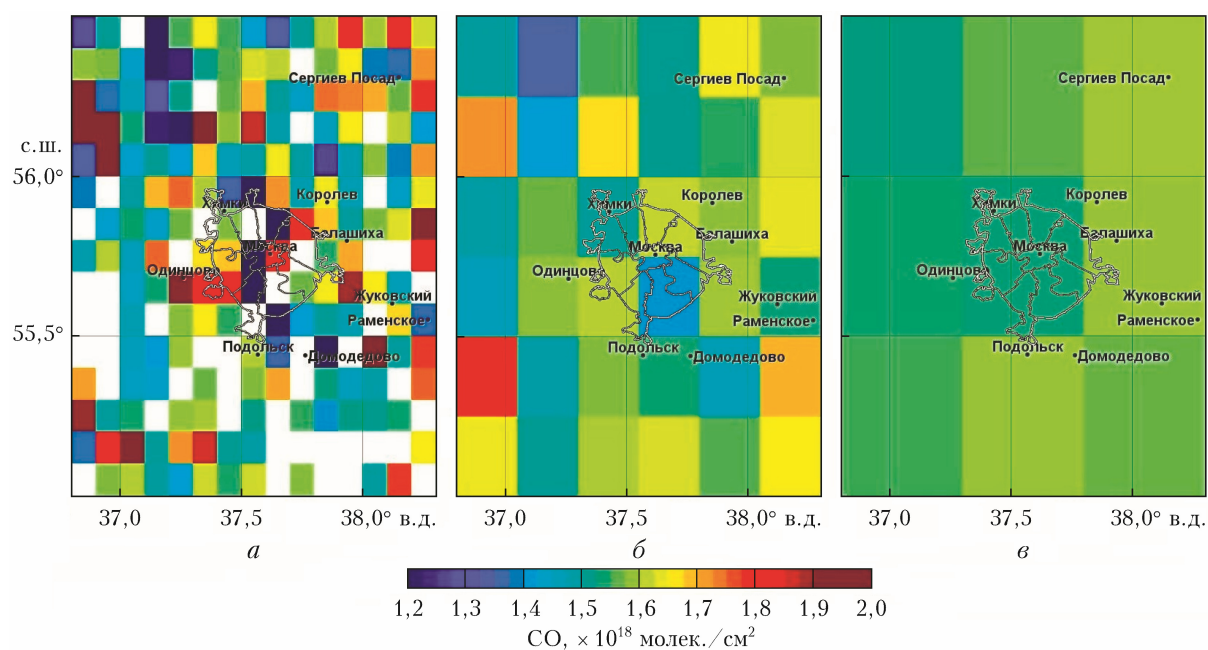


Рис. 3. Пример распределения ОС CO по данным TROPOMI, $0 \leq SA \leq 1$, $qa > 0,3$, на 19.07.2020 г. для разного пространственного усреднения: $a - 0,1^\circ \times 0,1^\circ$; $b - 0,25^\circ \times 0,25^\circ$; $v - 0,5^\circ \times 0,5^\circ$

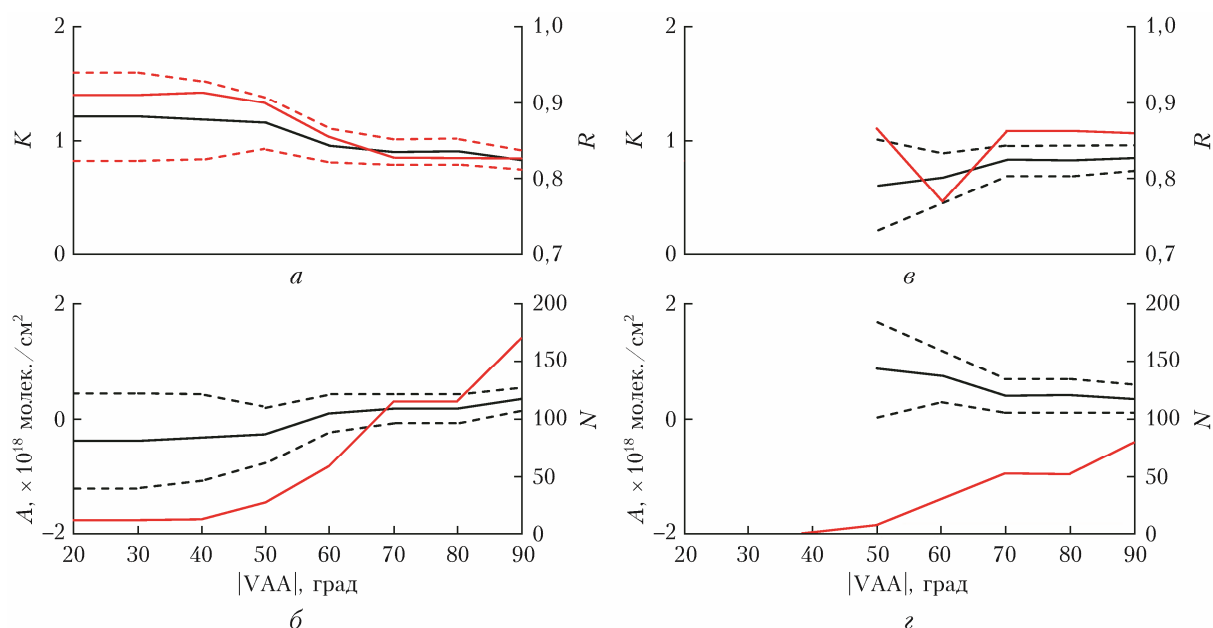


Рис. 4. Зависимость параметров корреляции измерений TROPOMI с наземными данными от азимутального угла наблюдения TROPOMI: коэффициент наклона линейной регрессии (синяя сплошная кривая) и коэффициент корреляции (красная сплошная линия) (a, v), свободный член линейной регрессии (синяя сплошная линия) и количество пар сопоставления (красная сплошная линия) (b, z) для пунктов «Москва» (a, b) и ЗНС (v, z); область усреднения $0,1^\circ \times 0,1^\circ$; пунктирные линии — соответствующие 95%-е доверительные интервалы

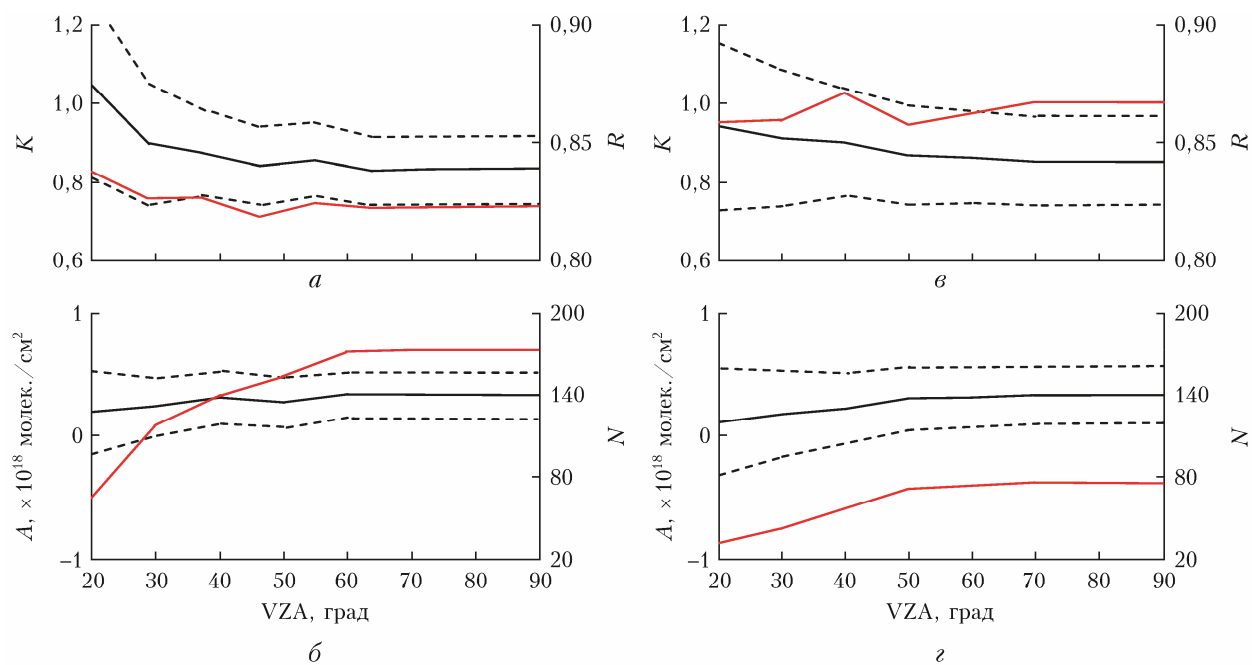


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для зенитных углов наблюдений

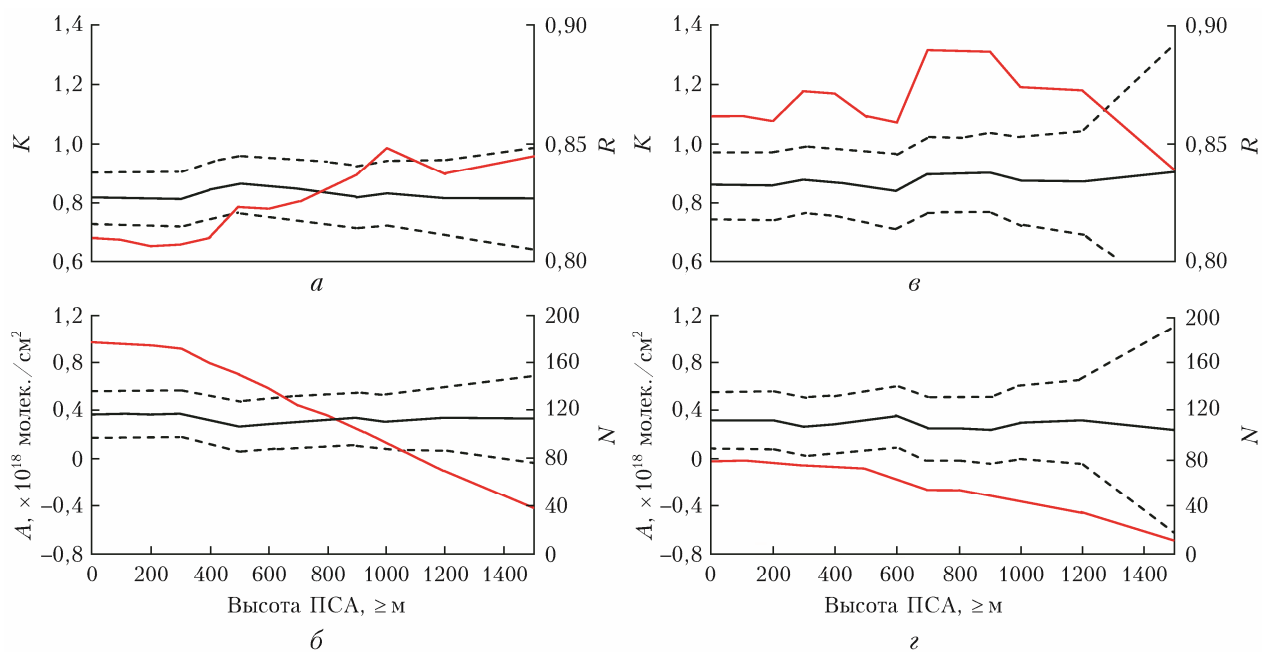


Рис. 6. То же, что на рис. 4 и 5, но для нижнего порогового значения высоты ПСА