

УДК 551.510.413.2, 551.510.412

СОПОСТАВЛЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В СЛОЕ ТРОПОСФЕРЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2023 г. Я. А. Виrolайнен^{a, *}, Г. М. Неробелов^{a, b}, А. В. Поляков^a

^aСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^bСПб ФИЦ РАН — Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,
ул. Корпусная, 18, Санкт-Петербург, 197110 Россия

*e-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

После доработки 20.04.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Мониторингу содержания тропосферного озона в мировой науке в последнее время уделяется значительное внимание, так как озон в тропосфере является одновременно и парниковым, и загрязняющим газом. Также он играет важную роль в различных химических и фотохимических процессах. Для оценки качества и валидации данных спутниковых измерений глобального распределения озона можно использовать различные наземные измерения. Временные ряды содержания озона в слое тропосферы 0–8 км, полученные из данных спектральных измерений спутникового прибора IASI с использованием двух различных алгоритмов (IASI_LATMOS и IASI_LISA), а также из совместных измерений приборами IASI и GOME-2 (IASI-GOME2) были сопоставлены с данными наземных измерений на станции NDACC St. Petersburg, полученными с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR (FTIR) за период 2009–2021 гг. IASI_LISA и IASI-GOME2 в среднем завышают наземные измерения озона в слое 0–8 км на 9.8 и 5.1%, соответственно; между данными IASI_LATMOS и FTIR систематических различий нет. Стандартные отклонения разностей между наземными измерениями и данными IASI_LISA и IASI_LATMOS не превышают 12–13%, для данных IASI-GOME2 они составляют 24.5%. Лучше всего данные наземных и спутниковых измерений согласованы в весенний и летний период. Наземные и спутниковые измерения IASI_LATMOS показывают наличие статистически значимого отрицательного тренда в содержании озона в слое 0–8 км в окрестностях Санкт-Петербурга за период 2012–2021 гг., составляющего $-0.71 \pm 0.35\%$ в год и $-0.60 \pm 0.21\%$, соответственно.

Ключевые слова: тропосферный озон, ИК Фурье-спектроскопия, IASI, Bruker 125HR, валидация спутниковых данных

DOI: 10.31857/S0002351523040144, **EDN:** YQGTXP

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата Земли является одной из важнейших проблем современности. Согласно докладу Всемирной Метеорологической Организации (WMO, 2022), в 2022 году средняя глобальная температура была на 1.15°C выше доиндустриальных значений. Восемь лет с 2015 по 2022 гг. являются самыми теплыми в серии за всю историю наблюдений. Результаты расчетов ряда моделей оценивают величину радиационного воздействия общего содержания озона в тропосфере (далее по тексту — ТО) как $+(0.40 \pm 0.20)$ Вт м⁻² (IPCC, 2013), его вклад в глобальное потепление, по различным оценкам, составляет от нескольких процентов до десятков процентов (Кароль и др., 2012). Большой разброс оценки вклада ТО в радиационное воздействие вызван как неопределенностью в оцен-

ке самих доиндустриальных значений озона, так и недостаточностью знаний о современном состоянии пространственного распределения ТО (Wu et al., 2007).

Локальная информация о ТО может быть получена с помощью озонзондирования. В базе данных WOUDC (<https://woudc.org/home.php>) представлены данные нескольких десятков наземных станций, проводящих эпизодически или периодически запуски озонзондов. На отдельных наземных станциях профили содержания озона в тропосфере периодически или в ходе измерительных кампаний измеряются с помощью лидарного метода (см., например, [Trickl et al., 2020]) и метода обращения Umkehr, использующего спектрофотометры Брюера и Добсона [Gaudel et al., 2018]. Кроме того, ТО в безоблач-

ные дни получают на станциях международной измерительной сети IRWG-NDACC (InfraRed Working Group of Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) (<https://www2.acom.ucar.edu/irwg>), оборудованных Фурье-спектрометрами (ФС) высокого спектрального разрешения – FTIR-измерения (Fourier Transform InfraRed) [Vigouroux et al., 2015]. В этой сети представлена единственная российская станция St. Petersburg, расположенная в кампусе Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) в Петергофе и оснащенная ФС Bruker IFS 125HR. Измерения содержания озона в различных слоях тропосферы проводятся с 2009 года [Виролайнен и др., 2015, 2023].

Глобальное распределение ТО в настоящее время получают с помощью таких спутниковых приборов как IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) [Boynard et al., 2018; Dufour et al., 2012, 2015] и TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) [Hubert et al., 2021]. Кроме того, содержание озона в тропосфере может быть получено с помощью совместных измерений несколькими приборами, например, IASI и GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment) [Cuesta et al., 2013], GOME и OMI (Ozone Monitoring Instrument) [Liu et al., 2005], OMI и MLS (Microwave Limb Sounder) [Ziemke et al., 2006]. Спутниковые измерения требуют регулярной валидации с данными опорных наземных измерений (см., например, [Fioletov et al., 2008; Loew et al., 2017]).

В работе [Dufour et al., 2012] данные измерений ТО IASI, полученные по трем различным алгоритмам, в том числе лабораторий LATMOS (далее – IASI_LATMOS) и LISA (далее – IASI_LISA), были провалидированы за 2008 год по измерениям озонозондов на нескольких десятках станций в средних и низких широтах (всего 390 пар измерений). Отметим, что в зимний период в средних широтах спутниковые измерения менее информативны относительно ТО (0.7 степеней свободы сигнала относительно озона против 1.0 летом). В среднем по всем сопоставлениям в средних широтах (320 дней сопоставлений) спутниковые измерения превышают озонозондовые на 1.6% (0.6 е.Д.) со стандартными отклонениями разностей (COP) 15.3% (5.5 е.Д.) (IASI_LATMOS) и на 2.6% (1.0 е.Д.) с COP в 16% (6.1 е.Д.) (IASI_LISA).

В работе [Boynard et al., 2018] измерения ТО IASI_LATMOS за период 2008–2017 гг. были сопоставлены с данными озонозондирования на 56 станциях и FTIR-измерениями на 6 станциях сети IRWG-NDACC. Средние разности (CP) для станций NDACC-IRWG менялись от –14.3% (–4 е.Д.) до +1.4% (+0.5 е.Д.), COP составили 8.5–13.8% (2.5–3.9 е.Д.). Кроме того, в сопоставлении с FTIR измерениями ТО был обнаружен отрицательный дрейф спутниковых данных, со-

ставивший 4–15% за декаду, в зависимости от станции. Таким образом, для разных локаций оценки согласованности спутниковых и наземных измерений различны. При сопоставлении с озонозондовыми измерениями в Северном полушарии статистически значимый дрейф в –8.61% за декаду был обнаружен за период 2008–2016 гг. За период 2011–2016 гг. отрицательный дрейф уже был статистически незначим, т.е. возможно, что начиная с 2011 г. дрейф в спутниковых данных отсутствует, однако это требует проверки для более длинных рядов данных.

В работе [Cuesta et al., 2013] данные совместных измерений приборов IASI и GOME-2 были проинтерпретированы для получения информации о содержании озона в различных слоях атмосферы, в том числе и в слое тропосферы. Результаты были провалидированы по озонозондовым данным за лето 2009 года на 10 станциях в Европе. CP составили 0.1% (0.01 е.Д.) и COP = 19.2% (4.3 е.Д.) для содержания озона в слое 0–6 км и CP = –1.7% (–0.73 е.Д.) и COP = 14% (6.2 е.Д.) для содержания озона в слое 0–12 км.

В работе [Виролайнен и др., 2015] анализировались ряды измерений озона в слое тропосферы 0–12 км за 2009–2012 гг. Эти ряды были сопоставлены с данными измерений ФС IASI, полученными по алгоритмам лаборатории LISA. За 157 дней наблюдений было показано, что наземные измерения превышают спутниковые на 1.6 е.Д. (3.4%) при COP = 7.8 е.Д. (17%). В летнее полугодие CP возрастали до 4.5 е.Д., а COP уменьшались до 4.2 е.Д., в зимнее полугодие, спутниковые измерения превышали наземные на 6.7 е.Д. при росте величин COP до 9.6 е.Д. В дальнейшем, методика определения профилей озона как по наземным измерениям, так и по спутниковым была модифицирована. Кроме того, в рамках проекта TOAR (<https://igacproject.org/activities/TOAR>), посвященного исследованиям тропосферного озона, а также на сети станций NDACC-IRWG научный интерес сместился в сторону более близких к поверхности слоев, поэтому в настоящей работе мы в качестве ТО рассматриваем содержание озона в слое 0–8 км.

В работе [Виролайнен и др., 2023] были представлены ряды наземных ИК-измерений ТО на станции St. Petersburg (далее – FTIR), полученные по усовершенствованной методике интерпретации спектральных данных для периода 2009–2022 гг., подробно рассмотрена фильтрация данных на основании различных критериев и приведены средние случайные и систематические погрешности единичных измерений ТО. В настоящей работе эти ряды впервые и за длительный период сопоставлены с данными измерений ФС IASI на борту спутника MetOp-A, полученными с помощью трех различных алгоритмов:

IASI_LATMOS, IASI_LISA и данными совместных измерений IASI и прибора GOME-2 (далее — IASI-GOME2), расположенных на спутнике MetOp-B. Данные IASI_LATMOS и IASI-GOME2 находятся в открытом доступе. Ранее доступная спутниковая информация о суммарном содержании озона в слое тропосферы 0–8 км не была проанализирована и провалидирована на территории России.

1. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТРОПОСФЕРНОГО ОЗОНА И МЕТОДИКА ИХ СОПОСТАВЛЕНИЙ

2.1. Наземные FTIR-измерения

Наблюдательная станция NDACC St. Petersburg (59.88° N, 29.82° E, 20 м над уровнем моря) оснащена спектральным комплексом на основе ФС Bruker IFS 125HR, который измеряет прошедшее через атмосферу солнечное излучение в ИК-диапазоне спектра (650–5400 см⁻¹). Из-за климатических и погодных условий (измерения проводятся только в ясные солнечные дни или в больших разрывах облаков) число дней измерений в среднем составляет около 70 в год, большинство из них относится к весенне-летнему периоду. Данный метод измерений ТО позволяет проводить валидацию спутниковых данных, полученных в безоблачных условиях. Детали методики обработки спектральных измерений для получения информации о содержании ТО описаны в работах [Виролайнен и др., 2015, 2023]. В настоящей работе мы использовали данные версии V009 (<https://www-air.larc.nasa.gov/missions/ndacc/data.html#>), подробно описанные в работе [Виролайнен и др., 2023]. Все полученные результаты подвергались предварительному отбору в соответствии со следующими критериями. Из последующего анализа исключались измерения содержания озона, для которых число степеней свободы сигнала относительно содержания озона DOFS не превышало 3.5, что заведомо отсекало те измерения, для которых величина DOFS для озона в слое атмосферы 0–8 км меньше 1. Величина DOFS рассчитывалась как след матрицы усредняющих ядер дистанционного метода [Rodgers, 2000, стр. 37, формула (2.80)]. Кроме того, были также отфильтрованы результаты, для которых величина спектральной невязки (суммарной среднеквадратической разностью между рассчитанными и измеренными спектрами) составила больше 2% от среднего сигнала. Это позволило отсеять измерения с неудовлетворительными результатами решения обратной задачи. Отметим также, что спектры, в которых отношение сигнал / шум составляло меньше 50, не были приняты в расчет изначально.

Вертикальные профили содержания озона в слоях (partial columns) на высотной сетке из

49 уровней (от 0 до 120 км) были получены при интерпретации спектральных измерений с помощью программного кода PROFFIT [Hase et al., 2004], который используется также и на ряде других станций NDACC. Для расчета содержания озона в слое 0–8 км профили содержания озона были просуммированы (13 слоев). Всего за 850 дней измерений в 2009–2022 гг. были получены более 5 тысяч отдельных измерений ТО, которые мы осреднили за первую половину дня (с 9 до 14 часов местного времени), чтобы временное рассогласование с данными спутниковых измерений не превышало 6 часов. В работе [Виролайнен и др., 2015] представлен бюджет теоретических оценок случайных и систематических погрешностей измерения содержания озона в различных слоях атмосферы, которые рассчитываются с помощью матриц ошибок, включенных в программный код PROFFIT. Анализ погрешностей определения содержания озона в слое 0–8 км для версии FTIR-измерений V009 подробно рассмотрен в работе [Виролайнен и др., 2023]. Отметим, что средняя по рассматриваемому ансамблю случайная погрешность отдельного измерения ТО составила $1.9 \pm 0.4\%$, систематическая погрешность — $3.9 \pm 0.7\%$, суммарная погрешность с учетом погрешностей “сглаживания” составляет около 10%. В работе [Garcia et al., 2012] аналогичные FTIR-измерения ТО были сопоставлены с данными озонзондирования. Погрешности измерений, полученные из сопоставлений с озонзондами совпали с теоретическими оценками погрешностей измерений ТО и составили минимально 7% (при применении усредняющих ядер FTIR-метода к профилям озонзондирования).

2.2. Спутниковые измерения IASI

Приборы IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) [Clerbaux et al., 2009], находящиеся на борту полярных спутников серии MetOp (-A, -B, -C), были разработаны для измерения собственного излучения системы Земля-атмосфера в тепловом ИК диапазоне спектра (645–2760 см⁻¹), используя надирную геометрию измерений. Спутник находится на солнечно-синхронной орбите с пересечением экватора на нисходящем полувитке (descending node) в 7:50 (MetOp-A) и в 9:31 (MetOp-B, -C) местного астрономического времени. Для сопоставления с данными наземных измерений использовались только данные измерений при наличии солнечного излучения (как правило, утренние), т.к. их точность несколько выше, поскольку они более чувствительны к изменению озона в нижних слоях атмосферы [Dufour et al., 2015, Wespes et al., 2016]. Измерения при наличии солнечного излучения отбирались исходя из величины зенитного угла Солнца меньшего 90°.

2.2.1. Спутниковые измерения IASI_LATMOS

Данные измерений IASI_LATMOS основаны на интерпретации измеренных спектров с помощью алгоритма FORLI лаборатории LATMOS [Boynard et al., 2018], принятого в качестве алгоритма оперативной обработки спектральных данных IASI (Daily IASI/Metop-A ULB-LATMOS ozone (O3) L2 product, доступен на сайте <https://iasi.aeris-data.fr/catalog/>). Для анализа доступны результаты измерения профилей содержания озона между различными уровнями давления, соответствующими вертикальной сетке с шагом в ~1 км. Для получения содержания ТО мы брали все профили озона, измеренные в радиусе 200 км от станции St. Petersburg, суммировали их до высоты, соответствующей ~8 км (9 слоев) и затем осредняли за день. Поскольку измерения прибором IASI не зависят от наличия солнечного излучения, всего за 2009–2021 гг. данные по ТО в районе Санкт-Петербурга были получены за 3800 дней, что в несколько раз больше, чем число наземных измерений ТО, получаемых из измерений прямого солнечного излучения. Погрешности единичных измерений ТО с учетом случайной и систематической компонент, а также погрешности сглаживания в слое 0–8 км (поверхность – 300 мбар) для данных IASI оцениваются в ~15% [Boynard et al., 2018].

2.2.2. Спутниковые измерения IASI_LISA

Набор данных по тропосферному озону IASI_LISA предоставлен сотрудниками лаборатории LISA. Методика интерпретации спектральных измерений основана на алгоритме решения обратной задачи KOPRAFIT [Dufour et al., 2012, 2015]. Этот продукт используется для научных целей, поэтому он недоступен публично, данные по ТО, включавшие в себя медианные значения ТО, полученные в радиусе 2 градуса от станции St. Petersburg, были получены непосредственно от разработчиков алгоритма. Отметим, что предоставленные величины ТО были сосчитаны интегрированием профилей отношения смеси на вертикальной сетке с шагом 100 м в слое 0–8 км. За период 2009–2017 гг. таких измерений было около 2200. Погрешность единичных измерений ТО оценивается в ~15% [Dufour et al., 2012].

2.3. Спутниковые измерения IASI-GOME2

Для получения данных IASI-GOME2 разработчиками алгоритма использовались совместные измерения теплового излучения атмосферы и поверхности в ИК-диапазоне (IASI) и солнечного излучения в УФ-диапазоне спектра (GOME-2) (Daily IASI + GOME2/Metop-B LISA ozone (O3) L2 product, доступен на сайте <https://iasi.aeris-data.fr/catalog/>). Спектрометр GOME-2 находится на

спутнике MetOp-B и измеряет отраженное системой атмосфера-поверхность солнечное УФ-излучение в 4 различных каналах области 240–790 нм [Cai et al., 2012]. Подробная схема решения обратной задачи с использованием данных двух приборов описана в работе [Cuesta et al., 2013]. В частности, авторы данных отбирают только те спектральные измерения GOME-2, когда покрытие облаками не превышает 30%. Исходные данные на сайте представлены в виде профилей отношения смеси на сетке высот с шагом в 1 км. Для использования в дальнейшем мы отбирали профили озона, измеренные в радиусе 200 км от станции, интегрировали их методом трапеций по давлению (до высоты 8 км – 9 уровней) и затем осредняли за день. За период 2016–2021 гг. измерения ТО этим методом получены за 1675 дней. Точность определения ТО, полученная на основе сопоставления с данными озонзондирования, составляет 16% при использовании усредняющих ядер спутникового метода для ухудшения вертикального разрешения данных озонзондирования и 20% при непосредственном сопоставлении ТО из спутниковых и озонзондовых данных [Cuesta et al., 2013].

2.4. Методика анализа и сопоставления различных данных измерений

Для анализа информации о ТО из различных источников данных мы использовали как все имеющиеся ряды данных, отобранные в соответствии с критериями, указанными выше (для оценок трендов, сезонной изменчивости), так и согласованные по дням измерения пары: наземные-спутниковые измерения ТО (для валидации спутниковых данных).

Оценка трендов рядов данных ТО выполнялась с использованием алгоритма, описанного в работе [Polyakov et al., 2021]. Этот алгоритм основан на аппроксимации сезонной изменчивости рядом Фурье, что позволяет учитывать пробелы в рядах данных, не вызывая разрывов функции сезонного хода. Оценка ширины доверительных интервалов выполнялась с использованием метода bootstrap resampling, дающим надежные оценки для распределенных не по нормальному закону данных [Gardiner et al., 2008].

Сезонный ход ТО для каждого набора данных был получен путем осреднения всех имеющихся данных за тот или иной месяц. Доверительный интервал (ДИ) с уровнем доверия 95% для среднемесячных значений определялся с использованием t -критерия Стьюдента по формуле (1):

$$\text{ДИ} = \bar{x} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (1)$$

Здесь $\bar{x}$ – среднее значение, σ – стандартное отклонение, N – число реализаций.

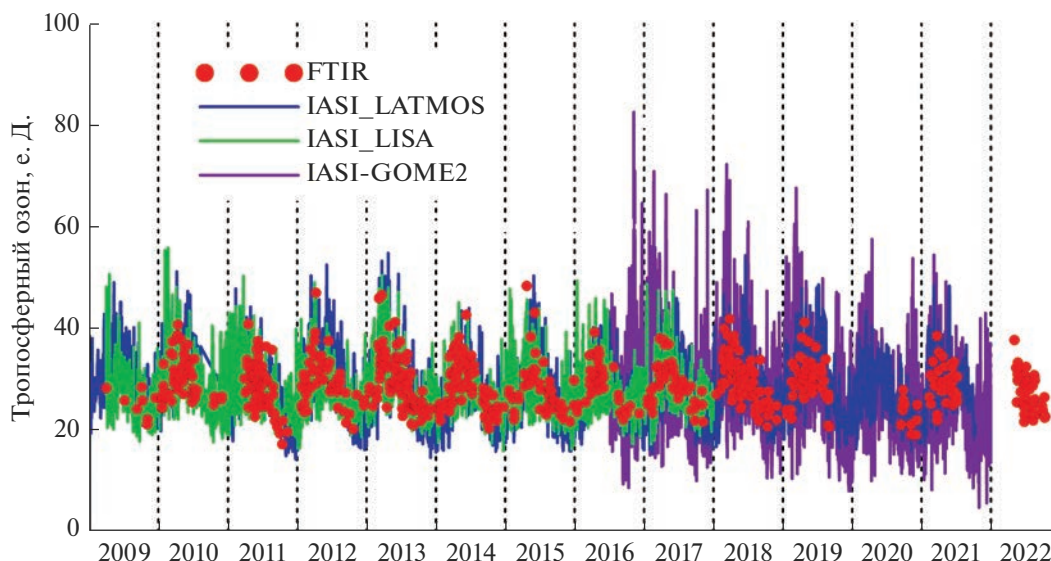


Рис. 1. Временные ряды измерений ТО различными методами на станции St. Petersburg за 2009–2022 гг.

Для валидации спутниковых измерений для каждого из наборов спутниковых данных составлялся набор пар: спутниковый ТО и наземный ТО, синхронизированные по одному и тому же дню измерений. Поскольку длительность различных спутниковых измерений ТО разная, то число сопоставляемых пар для каждого из наборов спутниковых данных различается. Для оценки спутниковых измерений ТО использовались средние разности (СР) и стандартные отклонения разностей (COP), полученные по формулам (2):

$$\begin{aligned} \text{СР} &= 100\% \frac{x_{\text{FTIR}} - x_{\text{IASI}}}{x_{\text{FTIR}}}, \\ \text{COP} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (100\%(x_{\text{FTIR}} - x_{\text{IASI}})/x_{\text{FTIR}} - \text{СР})^2}{N}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Кроме того, для оценки связей между сериями наземных и спутниковых измерений ТО использовался коэффициент корреляции (КК). ДИ с уровнем доверия 95% для КК рассчитывался с использованием t -критерия Стьюдента в соответствии с формулой (3):

$$\text{ДИ}_{\text{КК}} = \text{КК} \pm t \sqrt{\frac{1 - \text{КК}^2}{N - 2}}. \quad (3)$$

Для оценки статистической значимости средних разностей также использовался ДИ в соответствии с формулой (1), только в качестве стандартного отклонения использовались величины COP.

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 представлены временные ряды ТО по данным из всех рассматриваемых источников. Данные FTIR доступны за период 2009–2022 гг., данные IASI_LATMOS доступны для периода: январь 2009–июль 2021 гг., данные IASI_LISA доступны для периода: 2009–2017 гг., данные IASI-GOME2 – для периода: июль 2016–декабрь 2021 гг. В среднем все данные демонстрируют примерно одинаковый сезонный ход с максимумом в весенне-летний период и минимумом в осенне-зимний период и схожие значения средних величин содержания ТО. Данные IASI-GOME2 отличаются наибольшей изменчивостью, при этом изменчивость уменьшается со временем, что может косвенно свидетельствовать об улучшении согласованности в работе двух приборов, чьи данные используются для получения величин ТО. В целом, все спутниковые измерения дают большие величины изменчивости ТО, чем наземные.

На рис. 2 представлена изменчивость сезонного хода ТО в виде среднемесячных величин для каждого набора данных. Для каждого значения среднемесячной величины ТО также на рисунке приведены величины ДИ с уровнем доверия 95% — см. формула (1)). Все среднемесячные значения ТО совпадают друг с другом в границах доверительного интервала только в марте и октябре.

Наилучшее согласие сезонного хода наблюдается между измерениями FTIR и IASI_LISA, за исключением мая, ноября и зимних месяцев. Зимой среднемесячные величины IASI_LISA выше, чем наземные. Это может быть связано с меньшей информативностью и большими погрешностями спутниковых измерений при наличии снежного по-

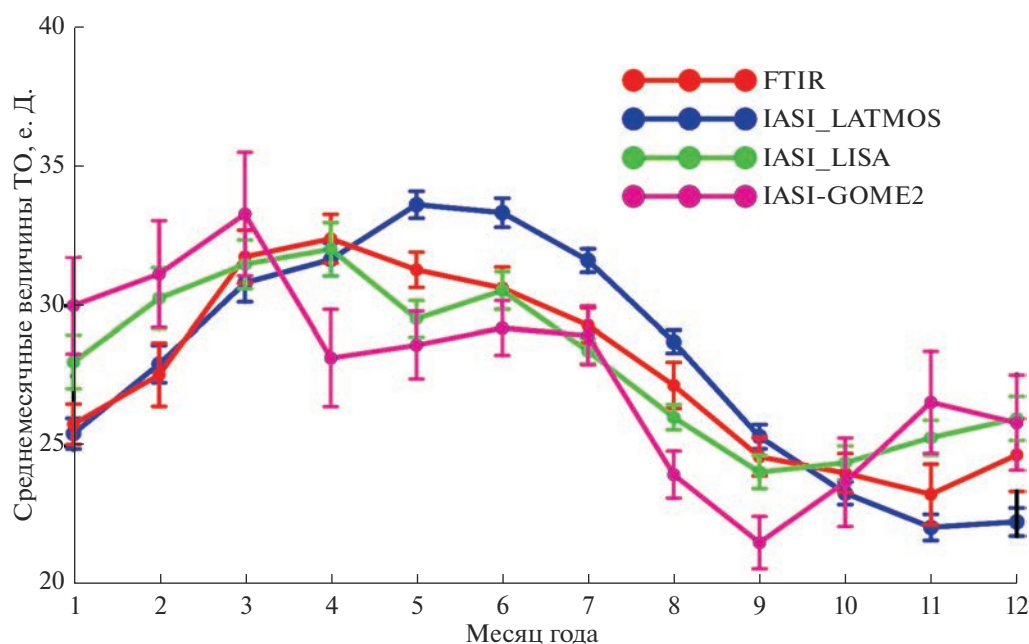


Рис. 2. Сезонный ход TO (среднемесячные значения и их погрешности) на станции St. Petersburg, полученный по различным данным.

крова [Dufour et al., 2012; Boynard et al., 2018]. Максимум сезонного хода в обоих случаях приходится на март-апрель, что связано с сезонным ходом общего содержания озона в Санкт-Петербурге [Виролайнен и др., 2023]. Кроме того, для обоих методов наблюдается наличие вторичного максимума в июне, связанного с возможной генерацией озона в нижних слоях атмосферы при высоких температурах и наличии достаточного количества солнечного излучения. В работе [Vigouroux et al., 2015] рассмотрен сезонный ход TO на некоторых других станциях IRWG-NDACC, для всех рассмотренных станций максимум TO также приходится на весенние месяцы.

Максимум сезонного хода по данным IASI_LATMOS смещен относительно двух предыдущих ансамблей на конец мая — начало июня, при этом в первые 4 месяца года и в осенние месяцы среднемесячные величины IASI_LATMOS совпадают в пределах доверительного интервала с данными наземных измерений. В конце весны и летом спутниковые TO превышают наземные, что может быть связано с меньшей информативностью алгоритма, используемого для обработки спутниковых измерений, относительно нижних слоев атмосферы. Поскольку при интерпретации спектральных измерений на получаемые величины TO влияет как априорная информация, так и информация о тропосферном озоне, содержащаяся в измеренных спектрах, то при недостаточности последней, априорная информация о TO может преобладать. Отметим, что в работе [Wespes et al., 2016] представлены графики сезонного хода TO

по данным IASI_LATMOS в различных широтных интервалах. Для области широт 50–70 градусов Северного полушария максимум сезонного хода также приходится на май и июнь. Можем предположить, что задаваемая при решении обратной задачи априорная информация для различных сезонов, в частности, летом связанная с генерацией озона, может не соответствовать условиям фоновой станции St. Petersburg с учетом локальных погодных условий.

Сезонный ход TO по данным IASI-GOME2 несколько отличается от сезонного хода по другим данным. Ярко-выраженный максимум приходится на март, однако в апреле, в отличие от других данных, среднемесячная величина TO уменьшается с 33 е.Д. до 28 е.Д., далее оставаясь практически неизменной до июля, после чего резко падает до 22 е.Д. в сентябре и снова начинает рост. Такие результаты могут быть связаны как с небольшой длиной выборки (4.5 года), взятой для осреднения, так и в большей степени с большой погрешностью получаемых величин TO в первые годы измерений. Значения TO по измерениям IASI-GOME2 для станции St. Petersburg в соседние дни первых нескольких лет измерений могут различаться в 2–3 раза, что не соответствует естественной изменчивости содержания озона в слое 0–8 км. Анализ сезонного хода TO по данным IASI-GOME2 для отдельных лет с 2016 по 2021 гг. показывает, что к 2021 году он становится похожим на средний сезонный ход по данным наземных измерений FTIR, демонстрируя характерный максимум весной-летом и минимум осенью.

Таблица 1. Оценки трендов содержания ТО в районе Санкт-Петербурга и границы доверительного интервала этих оценок за период 2012–2021 гг.

Метод	Оценка тренда, % в год
FTIR	-0.71 ± 0.35
IASI_LATMOS	-0.60 ± 0.21

Причины такого изменения неясны, в данных не содержится информации о смене методики или алгоритмов расчета ТО.

Для расчетов оценок трендов мы выбрали период 2012–2021 гг., т.к., во-первых, по данным работы [Boynard et al., 2018] в измерениях IASI_LATMOS при сравнении с данными озонзондирования после 2011 г. уже не наблюдается статистически значимого отрицательного дрейфа, а, во-вторых, в первые годы FTIR-измерений прибор еще настраивался, и много измерений за 2009–2011 гг. не прошли предварительного отбора после фильтрации (см. подраздел 2.1). Таким образом, в табл. 1 представлены полученные оценки трендов ТО за 2012–2021 гг. для наземных FTIR-измерений и спутниковых измерений IASI_LATMOS. Оценки трендов приведены вместе с границами ДИ на уровне значимости 95%. Оба метода демонстрируют наличие статистически значимого (с достоверностью 95%) примерно одинакового (с учетом границ ДИ: от -0.36 до -1.06% в год по наземным измерениям и от -0.39 до -0.81% в год по спутниковым данным) отрицательного тренда в величинах суммарного содержания озона в слое 0–8 км в районе Санкт-Петербурга.

Отрицательный тренд ТО также отмечается в последнем докладе IPCC в районах высоких широт [Szora et al., 2021; Vigoroux et al., 2015] за период с 1995 (99) до 2012 гг. также обнаружили статистически значимый отрицательный тренд для станций NDACC средних и высоких широт Северного полушария. Отметим также, что оценка тренда, приведенная в работе [Виролайнен и др., 2023] для периода 2009–2022 гг. составила $-0.34 \pm 0.22\%$ в год. С учетом границ ДИ для обеих оценок различие между этими оценками не является статистически значимым, таким образом, можно заклю-

чить, что и для всего периода измерений (2009–2022 гг.) и для части этого периода (2012–2021 гг.) сохраняется наличие статистически значимого отрицательного тренда в величинах содержания озона в слое тропосферы 0–8 км по данным наземных FTIR-измерений.

На рис. 3 приведены диаграммы рассеяния между наземными и спутниковыми данными по ТО. За исключением отдельных дней измерений, наиболее плотно вдоль прямой лежат данные FTIR и IASI_LISA. Данные FTIR и IASI_LATMOS также представлены компактно, ближе к единичной прямой, хотя для спутниковых данных характерны более высокие значения ТО в ряде случаев. Данные FTIR и IASI-GOME2 сильнее всего рассеяны друг относительно друга, одним и тем же величинам ТО из наземных измерений соответствуют совершенно разные величины ТО из спутниковых измерений.

В табл. 2 собраны статистические характеристики согласования наземных и спутниковых данных: СР с границами доверительных интервалов (формула 1), СОР (формулы 2) и КК с границами доверительных интервалов (формула (3)). Также в таблице приведены средние по сопоставляемым ансамблям величины ТО, границы их доверительного интервала, а также их естественная изменчивость. Отметим, что наибольшая изменчивость в получаемых величинах ТО (30%) наблюдается для данных IASI-GOME2 (см. рис. 1), для данных, полученных по другим алгоритмам, изменчивость ТО не превышает 20%. Изменчивость же наземных измерений ТО составляет 15%.

Больше всего дней сопоставления имеется для пар данных FTIR-IASI_LATMOS, для них же получен и наибольший коэффициент корреляции КК (0.75). Корреляции наземных измерений с данными IASI_LISA также высоки (КК = 0.73), но между ансамблями наблюдается статистически значимое систематическое различие – спутниковые данные занижают наземные примерно на 10%, что может быть вызвано, в том числе, и различными методами расчета ТО (данные IASI_LATMOS и FTIR представлены в виде профилей содержания озона в слоях, данные IASI-GOME-2 в виде профилей отношения смеси,

Таблица 2. Статистические характеристики согласованности наземных и спутниковых данных измерений тропосферного озона: N – число пар, $\bar{x}$ – средние, σ – изменчивость, СР – средняя разность, СОР – стандартное отклонение разностей, КК – коэффициент корреляции. Границы ДИ приведены для 96% уровня значимости

Данные	N	$\bar{x}$, е.Д.	σ , е.Д.	СР, %	СОР, %	КК
IASI_LATMOS	664	29.3 ± 0.4	5.7	-0.2 ± 1.0	12.9	0.75 ± 0.05
FTIR		29.2 ± 0.4	4.6			
IASI_LISA	424	26.8 ± 0.5	5.0	$+9.8 \pm 1.1$	11.8	0.73 ± 0.07
FTIR		29.7 ± 0.4	4.5			
IASI-GOME2	235	27.6 ± 1.1	8.5	$+5.1 \pm 3.1$	24.5	0.55 ± 0.08
FTIR		29.1 ± 0.6	4.3			

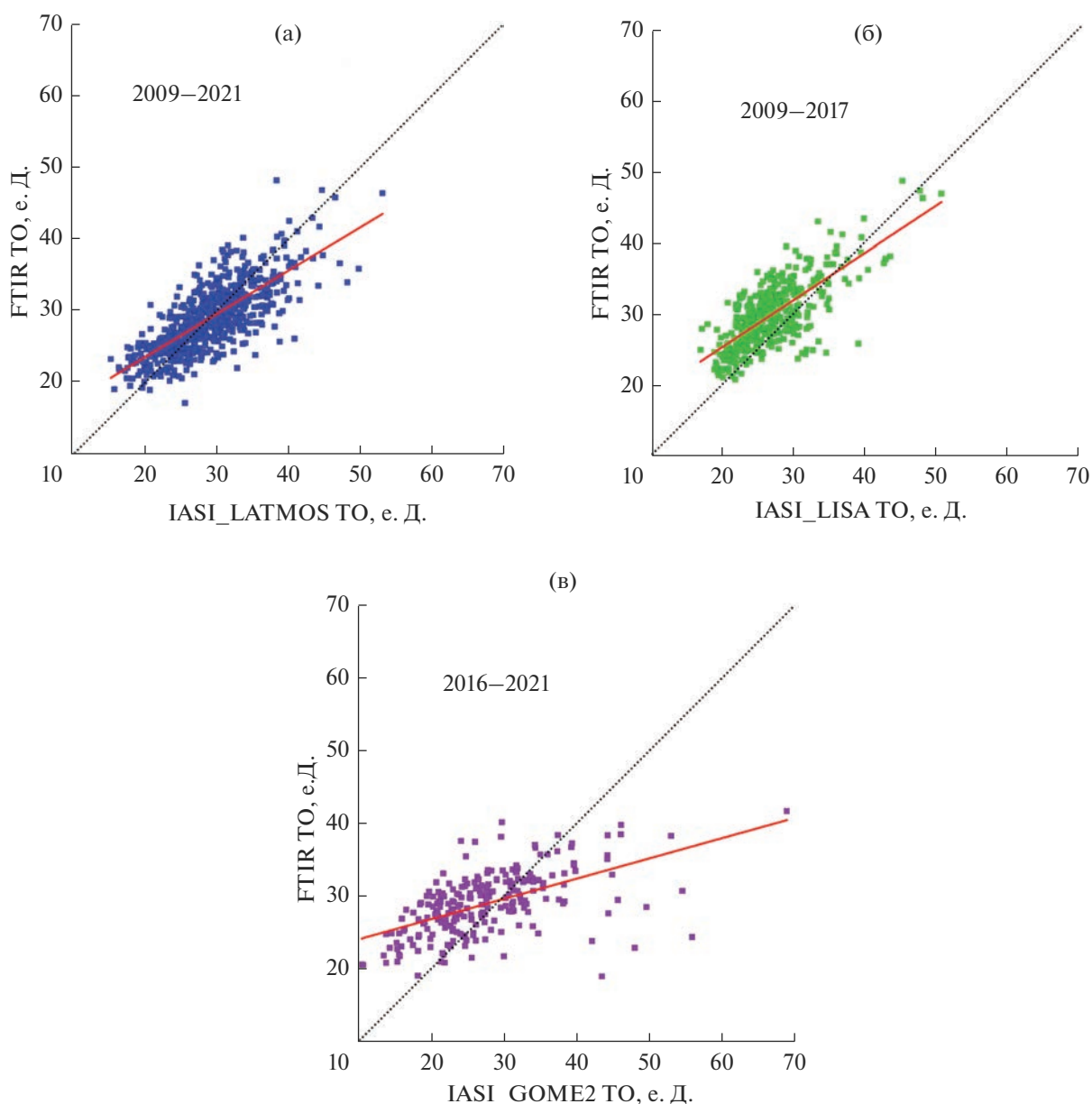


Рис. 3. Диаграмма рассеяния для величин ТО, измеренных наземным методом и спутниковыми: (а) – IASI_LATMOS, (б) – IASI_LISA, (в) – IASI-GOME2.

данные IASI – в виде готовых величин ТО), а также различиями в вертикальном разрешении методов и границами слоев, по которым происходит интегрирование (суммирование) профилей. Величина COP для пар FTIR-IASI_LATMOS и FTIR-IASI_LISA не превышает погрешностей измерения ТО дистанционными методами, что говорит о том, что ряды данных хорошо согласованы между собой. Величина COP для пар FTIR-IASI-GOME2 больше суммарных погрешностей измерений ТО отдельными методами. Таким образом, мы можем заключить, что данные IASI-GOME2 плохо согласованы с данными наземных измерений.

Анализ согласованности данных спутниковых и наземных измерений для разных сезонов (см. табл. 3) показал существенную зависимость согласованности измерений от времени года. В табл. 3 приведены данные аналогичные данным табл. 2, но с разделением по сезонам и только для наборов пар ТО: FTIR-IASI_LATMOS и FTIR-IASI_LISA. Лучшее согласие спутниковых ТО с данными наземных измерений наблюдается весной и летом. В эти же сезоны имеется больше всего пар измерений, поскольку солнечная погода, необходимая для FTIR-измерений, наблюдается преимущественно весной и летом. Осенью и зимой число пар относительно мало, так что досто-

Таблица 3. То же, что и в табл. 2, но для различных сезонов

Сезон	Данные	N	$\bar{x}$, е.Д.	σ , е.Д.	СР, %	COP, %	КК
Весна	IASI_LATMOS	275	31.6 ± 0.6	5.4	$+0.7 \pm 1.5$	12.6	0.67 ± 0.09
	FTIR		31.8 ± 0.5	4.1			
	IASI_LISA	177	28.4 ± 0.8	5.7	$+12.1 \pm 1.7$	11.6	0.75 ± 0.12
	FTIR		32.4 ± 0.6	4.1			
Лето	IASI_LATMOS	200	30.4 ± 0.6	4.1	-2.9 ± 1.4	10.3	0.69 ± 0.10
	FTIR		29.6 ± 0.5	3.6			
	IASI_LISA	139	27.2 ± 0.6	3.4	$+9.0 \pm 1.4$	8.4	0.75 ± 0.11
	FTIR		29.9 ± 0.6	3.7			
Осень	IASI_LATMOS	101	22.9 ± 0.7	3.5	$+4.8 \pm 2.7$	13.5	0.44 ± 0.18
	FTIR		24.1 ± 0.5	2.5			
	IASI_LISA	60	21.9 ± 0.5	2.1	$+10.5 \pm 2.3$	8.9	0.45 ± 0.23
	FTIR		24.4 ± 0.5	2.0			
Зима	IASI_LATMOS	88	27.0 ± 1.2	5.6	-2.3 ± 3.7	17.3	0.59 ± 0.17
	FTIR		26.4 ± 0.7	3.3			
	IASI_LISA	48	26.1 ± 1.4	4.7	$+0.9 \pm 5.2$	17.8	0.24 ± 0.29
	FTIR		26.3 ± 0.6	2.0			

верность статистических оценок согласованности наземных и спутниковых измерений ТО невелика. Тем не менее, в зимнее время наблюдается удовлетворительное согласие между парами: FTIR-IASI_LATMOS. Весной и зимой нет статистически значимой систематической разницы в этих парах измерений, в то же время летом данные IASI_LATMOS превышают наземные измерения ТО на 3%.

Судя по величине COP для различных сезонов лучше всего согласованы между собой пары FTIR-IASI_LISA летом ($COP = 8.4\%$). Хотя наблюдается систематическое занижение данных наземных измерений в данных IASI_LISA, они хорошо описывают изменчивость ТО в летний период. Зимой же пары FTIR-IASI_LISA можно считать полностью несогласованными.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

За период с апреля 2009 по октябрь 2022 г. с помощью измерений ФС Bruker IFS 125HR в течение 850 солнечных дней на станции NDACC St. Petersburg были получены данные о содержании озона в слое 0–8 км.

Наземные измерения содержания ТО (FTIR) были сопоставлены с данными спутниковых измерений приборами IASI и GOME-2, работающими на спутниках серии MetOp. Спутниковые данные были получены по трем методикам: IASI_LATMOS (2009–2021), IASI_LISA (2009–2017) (только данные прибора IASI) и IASI-GOME-2 (2016–2021) (с использованием данных двух приборов).

Сопоставление пар данных показало, что данные IASI_LISA и IASI-GOME2 в среднем превышают наземные измерения ТО на 9.8 и 5.1%, соот-

ветственно, между данными IASI_LATMOS и FTIR систематических отличий нет. Стандартные отклонения разностей между наземными ТО и данными IASI_LISA и IASI_LATMOS не превышают 12–13% и находятся в пределах суммарных погрешностей измерений ТО разными методами, что говорит о том, что данные наземных и спутниковых измерений хорошо согласованы между собой. Стандартные отклонения разностей при сопоставлении наземных измерений с данными IASI-GOME2 составляют 24.5%, что превышает оценки погрешности отдельных измерений ТО, таким образом, в целом данные IASI-GOME2 плохо согласованы с данными наземных FTIR-измерений.

Данные наземных FTIR-измерений и спутниковых измерений IASI_LATMOS показывают наличие статистически значимого отрицательного тренда в содержании озона в слое тропосферы 0–8 км в окрестностях Санкт-Петербурга. За период 2012–2022 гг. оценка тренда составила $-0.71 \pm 0.35\%$ в год по данным наземных измерений и $-0.60 \pm 0.21\%$ в год по данным спутниковых наблюдений. Эти оценки соответствуют независимым исследованиям для станций средних и высоких широт Северного полушария.

Весной и летом, в период наблюдения повышенных относительно среднегодовых величин ТО, наилучшее согласие с наземными данными с точки зрения описания изменчивости ТО в районе Санкт-Петербурга наблюдается для алгоритма IASI_LISA.

Данные оперативной обработки IASI_LATMOS в среднем (за исключением описания сезонного хода с максимумом в мае-июне в отличие от максимума наземных ТО в марте-апреле) хорошо согласуются с наземными измерениями в Петерго-

фе ($KK = 0.75$) и могут быть использованы как для анализа климатологических средних, так и для исследования краткосрочных вариаций содержания TO .

Измерения TO , полученные из данных двух приборов IASI и GOME2 для окрестностей Санкт-Петербурга продемонстрировали сильную изменчивость, различную в разные года, и расхождение с наземными измерениями TO , превышающее суммарные погрешности отдельных методов, что не позволяет рекомендовать эти данные для анализа пространственно-временной изменчивости TO , по крайней мере, в средних широтах и фоновых условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наземные спектроскопические измерения были выполнены на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ “Геомодель”. Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда № 23-27-00166, <https://rscf.ru/project/23-27-00166/>. Авторы благодарят AERIS за обеспечение доступа к данным IASI; ULB-ATMOS и LISA за разработку методик измерения озона; Eumetsat/AC SAF за создание готового продукта и сотрудников LISA за предоставление в 2018 г. данных по тропосферному озону. Данные измерений IASI-LATMOS и IASI-GOME-2 доступны на сайте <https://iasi.aeris-data.fr/catalog/>, данные FTIR-измерений — на сайте <https://www-air.larc.nasa.gov/missions/ndacc/data.html>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Еременко М., Дюфор Г. Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектроскопии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 191–200.
- Виролайнен Я.А., Ионов Д.В., Поляков А.В. Анализ результатов многолетних измерений содержания озона в тропосфере на станции СПбГУ в Петергофе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 3. С. 336–345.
- Boynard A., Hurtmans D., Garane K., Goutai F., Hadji-Lazaro J., Koukoulis M.E., Wespes C., Vigouroux C., Keppens A., Pommerehne J.-P., Pazmino A., Balis D., Loyola D., Valks P., Sussmann R., Smale D., Coheur P.-F., Clerbaux C. Validation of the IASI FORLI/EUMETSAT ozone products using satellite (GOME-2), ground-based (Brewer–Dobson, SAOZ, FTIR) and ozonesonde measurements // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11. № 9. P. 5125–5152.
- Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C., Coheur P.-F. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atmos. Chem. Phys. 2009. № 9. P. 6041–6054.
- Cuesta J., Eremenko M., Liu X., Dufour G., Cai Z., Höpfner M., von Clarmann T., Sellitto P., Foret G., Gaubert B., Beekmann M., Orphal J., Chance K., Spurr R., Flaud J.-M. Satellite observation of lowermost tropospheric ozone by multispectral synergism of IASI thermal infrared and GOME-2 ultraviolet measurements over Europe // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. № 19. P. 9675–9693.
- Dufour G., Eremenko M., Griesfeller A., Barret B., Le-Flochmoën E., Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., Coheur P.-F., Hurtmans D. Validation of three different scientific ozone products retrieved from IASI spectra using ozonesondes // Atmos. Mes. Tech. 2012. V. 5. № 3. P. 611–630.
- Dufour G., Eremenko M., Cuesta J., Doche C., Foret G., Beekmann M., Cheiney A., Wang Y., Cai Z., Liu Y., Takigawa M., Kanaya Y., Flaud J.-M. Springtime daily variations in lower-tropospheric ozone over east Asia: the role of cyclonic activity and pollution as observed from space with IASI // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. № 18. P. 10839–10856.
- Fioletov V.E., Labow G., Evans R., Hare E.W., Köhler U., McElroy C.T., Miyagawa K., Redondas A., Savvastouk V., Shalamyansky A.M., Staehelin J., Vanicek K., Weber M. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data // J. Geoph. Res. 2008. V. 113. D14313.
- García O.E., Schneider M., Redondas A., González Y., Hase F., Blumenstock T., Sepúlveda E. Investigating the long-term evolution of subtropical ozone profiles applying ground-based FTIR spectrometry // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. № 11. P. 2917–2931.
- Gardiner T., Forbes A., de Mazière M., Vigouroux C., Mahieu E., Demoulin P., Velasco V., Notholt J., Blumenstock T., Hase F., Kramer I., Sussmann R., Stremme W., Mellqvist J., Strandberg A., Ellingsen K., Gauss M. Trend analysis of greenhouse gases over Europe measured by a network of ground-based remote FTIR instruments // Atmos. Chem. Phys. V. 8. № 22. P. 6719–6727.
- Gaudel A., Cooper O.R., Ancellet G., Barret B., Boynard A., Burrows J.P., Clerbaux C., Coheur P.-F., Cuesta J., Cuevas E., Doniki S., Dufour G., Ebojite F., Foret G., Garcia O., Granados-Muñoz M.J., Hannigan J.W., Hase F., Hassler B., Huang G., Hurtmans D., Jaffé D., Jones N., Kalabokas P., Kerridge B., Kulawik S., Latter B., Leblanc T., Le Flochmoën E., Lin J., Liu J., Liu X., Mahieu E., McClure-Begley A., Neu J.L., Osman M., Palm M., Petetin H., Petropavlovskikh I., Querel R., Rappoe N., Rozanov A., Schultz M.G., Schwab J., Siddans R., Smale D., Steinbacher M., Tanimoto H., Tarasick D.W., Thouret V., Thompson A.M., Trickl T., Weatherhead E., Wespes C., Worden H.M., Vigouroux C., Xu X., Zeng G., Ziemke J. Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and global atmospheric chemistry model evaluation // Elementa: Science of the Anthropocene. 2018. V. 39. № 6.
- Hase H., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hoepfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 2004. V. 87. № 1. P. 25–52.
- Hubert D., Heue K.-P., Lambert J.-C., Verhoelst T., Allaart M., Compennolle S., Cullis P.D., Dehn A., Félix C., Johnson B.J., Keppens A., Kollonige D.E., Lerot C., Loyola D., Maata M., Mitro S., Mohamad M., Piders A., Romahn F., Selkirk H.B., da Silva F.R., Stauffer R.M.,

- Thompson A.M., Veeffkind J.P., Vömel H., Witte J.C., Zehner C. TROPOMI tropospheric ozone column data: geophysical assessment and comparison to ozone-sondes, GOME-2B and OMI // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. № 12. P. 7405–7433.
- IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. NY (USA): Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013. 1535 p.
- Liu X, Chance K, Sioris C.E., Spurr R.J.D., Kurosu T.P., Martin R.V., Newchurch M.J. Ozone profile and tropospheric ozone retrievals from the Global Ozone Monitoring Experiment: Algorithm description and validation // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № D20. P. D006240.
- Loew A., Bell W., Brocca L., Bulgin C.E., Burdanowitz J., Calbet X., Donner R.V., Ghent D., Gruber A., Kaminski T., Kinzel J., Klepp C., Lambert J.-C., Schaepman-Strub G., Schröder M., Verhoelst T. Validation practices for satellite-based Earth observation data across communities // *Rev. Geophys.* 2017. V. 55. P. 779–817.
- Polyakov A., Poberovsky A., Makarova M., Virolainen Y., Timofeyev Y., Nikulina A. Measurements of CFC-11, CFC-12, and HCFC-22 total columns in the atmosphere at the St. Petersburg site in 2009–2019 // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. № 8. P. 5349–5368.
- Rodgers C.D. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. Singapore: World Scientific Publishing, 2000. 243 p.
- Stopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W.D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., Zanis P. Short-Lived Climate Forcers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2021. P. 817–922.
- Trickl T., Giehl H., Neidl F., Perfahl M., Vogelmann H. Three decades of tropospheric ozone lidar development at Garmisch-Partenkirchen, Germany // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. № 11. P. 6357–6390.
- Vigouroux C., Blumenstock T., Coffey M., Errera Q., García O., Jones N.B., Hannigan J.W., Hase F., Liley B., Mahieu E., Mellqvist J., Notholt J., Palm M., Persson G., Schneider M., Servais C., Smale D., Thölix L., De Mazière M.: Trends of ozone total columns and vertical distribution from FTIR observations at eight NDACC stations around the globe // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. № 6. P. 2915–2933.
- Wespes C., Hurtmans D., Emmons L.K., Safieddine S., Clerbaux C., Edwards D.P., Coheur P.-F. Ozone variability in the troposphere and the stratosphere from the first 6 years of IASI observations (2008–2013) // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. № 9. P. 5721–5743.
- World Meteorological Organization (WMO). WMO Provisional State of the Global Climate 2022. WMO: 2022 https://library.wmo.int/doc_num.php?ex-plnum_id=11359. 26 p.
- Wu S., Mickley L.J., Jacob D.J., Logan J.A., Yantosca R.M., Rind D. Why are there large differences between models in global budgets of tropospheric ozone? // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № D05 P. 302.
- Ziemke J.R., Chandra S., Duncan B.N., Froidevaux L., Bhartia P.K., Levelt P.F., Waters J.W. Tropospheric ozone determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D19. P. 303.

Comparison of Satellite and Ground-Based Measurements of Tropospheric Ozone Columns in the Vicinity of St. Petersburg

Ya. A. Virolainen^{1, *}, G. M. Nerobelov^{1, 2}, and A. V. Polyakov¹

¹St. Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034 Russia

²St. Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences—Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, 18 Korpusnaya str., St. Petersburg, 197110 Russia

*e-mail: yana.virolainen@spbu.ru

The monitoring of tropospheric ozone in world science has recently received considerable attention since ozone in the troposphere is both a greenhouse and a pollutant gas. It also plays an important role in various chemical and photochemical processes. Ground-based measurements can be used to assess the quality and to validate satellite measurements of the global ozone distribution. The time series of ozone tropospheric columns in the 0–8 km layer derived from spectral measurements of the IASI satellite instrument using two different algorithms (IASI_LATMOS and IASI_LISA), as well as from joint measurements by the IASI and GOME-2 instruments (IASI-GOME2) were compared to ground-based measurements using the Bruker IFS 125HR Fourier spectrometer at the NDACC St. Petersburg site for 2009–2021. IASI_LISA and IASI-GOME2 on average overestimate ground-based ozone measurements by 9.8 and 5.1%, respectively, while there is no bias between the IASI_LATMOS and FTIR data. The standard deviations of the differences between ground measurements and the IASI_LISA and IASI_LATMOS data do not exceed 12–13%; for the IASI-GOME2 data they are 24.5%. Ground-based and satellite measurements agree better in spring and summer. Ground-based and IASI_LATMOS demonstrate a statistically significant negative trend in the ozone columns in the 0–8 km layer in the vicinity of St. Petersburg for the period 2012–2021, amounting to $-0.71 \pm 0.35\%$ per year and $-0.60 \pm 0.21\%$ per year, respectively.

Keywords: tropospheric ozone, FTIR-spectroscopy, IASI, Bruker 125HR, validation of satellite data