

Сравнение оценок общего содержания озона в атмосфере по данным высокоэллиптического спутника “Арктика-М” с наземными наблюдениями и независимыми спутниковыми оценками

Ю. М. Тимофеев*, А. В. Поляков*, Л. С. Крамарева**,
В. Д. Блощинский**, Г. М. Неробелов*, П. М. Неробелов*,
А. А. Филей**, Ю. А. Шамилова**, А. В. Бородинская*,
Я. А. Виролайнен*, Ю. И. Бордовская*, Г. В. Кобзарь*

Мониторинг общего содержания озона — одного из важнейших климатически и экологически важных газов — осуществляется с помощью полярных, геостационарных и высокоэллиптических спутников (“Арктика-М”). Проведено сопоставление измерений общего содержания озона радиометром МСУ-ГС на спутниках “Арктика-М” с наземными измерениями Фурье-спектрометром Bruker 125HR и спутниковыми приборами ИКФС-2 и TROPOMI. Показано, что измерения МСУ-ГС на высокоэллиптических спутниках “Арктика-М” позволяют получать с высоким пространственным (4 км) и временным (15 мин) разрешением ценную информацию об общем содержании озона с учетом наблюдающихся вариаций в условиях возникновения озоновых дыр, достигающих 50% и более и приводящих к увеличению опасного ультрафиолетового солнечного излучения.

Ключевые слова: озон, дистанционные спутниковые и наземные измерения, сравнения измерений, Фурье-спектрометр Bruker 125HR, приборы ИКФС-2 и TROPOMI.

DOI: 10.52002/0130-2906-2025-8-43-53

1. Введение

Озон является одной из важнейших газовых составляющих в атмосфере Земли [23]. Он поглощает опасное для человека и всей биосферы ультрафиолетовое (УФ) излучение Солнца, является ключевым компонентом в регулировании климата. Особую роль в интенсификации исследований озона в последние десятилетия сыграло разрушение озонового слоя, вызванное антропогенными факторами, а также понимание важности озона как сложного и уникального атмосферного параметра, влияющего на климат, погоду и экологию.

* Санкт-Петербургский государственный университет; e-mail: y.timofeev@spbu.ru (Тимофеев Юрий Михайлович).

**Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Дальневосточный центр.

Первые признаки аномалий содержания полярного озона появились над Антарктидой к концу 1970-х годов [12, 14] и достигли пика насыщения в конце 1980-х годов [18]. Принятие Монреальского протокола (https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-2-a&chapter=27&clang=_en) и его реализация способствуют восстановлению озонового слоя [26]. Несмотря на тенденции увеличения (восстановления) общего содержания озона (ОСО), в последние десятилетия по-прежнему регулярно появляются его аномалии — озоновые дыры — как в южном, так и в северном полярных регионах. Так, с 1979 г. арктические зимы 1995, 1996, 2000, 2005 и 2011 гг. были очень холодными, с большими потерями озона, достигавшими 25—30%, но все же значительно меньшими, чем потери озона в Антарктике, составляющие 40—55% [18, 19].

Признаки озоновой дыры (значения ОСО менее 220 *е. Д.*) появились над Арктикой в марте и апреле 2020 г. Данная озоновая аномалия наблюдалась впервые за всю историю наблюдений в Арктике и продлилась почти три недели, площадь арктической озоновой дыры составила порядка 0,9 млн км² [13]. Также в декабре 2019 г. и январе 2020 г. в районе Арктики наблюдались озоновые мини-дыры, обусловленные атмосферной динамикой. Серьезная потеря озона в Арктике привела к тому, что около 650 млн человек и обширные экосистемы подверглись вредному для здоровья и состояния воздействию ультрафиолетового излучения. По данным работы [11], озоновая аномалия в Арктике 2020 г. привела к рекордному увеличению УФ-излучения, которое превышало предыдущие показатели более чем на 75% (Канада) в течение нескольких дней. В среднем в арктической области УФ-излучение оказалось на 25% выше нормы. Значительное увеличение УФ-излучения, подобное наблюдаемому в 2020 г., может повториться в течение следующих десятилетий в годы с холодным и устойчивым стратосферным полярным вихрем, пока концентрация озоноразрушающих веществ в атмосфере остается повышенной [25].

Понимание значимости стратосферного озона для человека в последние десятилетия привело к созданию глобальной системы дистанционного мониторинга данного газа в атмосфере. Система основана на применении различных методов и аппаратуры, используемых в наземных, самолетных и спутниковых измерениях в рамках международных и национальных систем наблюдений [15].

Важным современным дополнением к системе наблюдения ОСО является создание высокоэллиптической системы метеорологических спутников, в частности для мониторинга озоносферы, с высоким пространственным и временным разрешением в полярных районах [1]. В данной статье проанализировано сопоставление измерений ОСО аппаратурой МСУ-ГС спутника “Арктика-М” с наземными измерениями известного качества — Фурье-спектрометром Bruker 125HR высокого спектрального разрешения в районе Петергофа (Санкт-Петербург), а также с измерениями с помощью приборов ИКФС-2 с борта спутника “Метеор-М” № 2 и TROPOMI с борта спутника “Sentinel-5P” за период 2021—2023 гг.

2. Данные и методы

2.1. Наземные измерения ОСО

Наземные измерения ОСО с помощью Фурье-спектрометра Bruker 125HR в Петергофе (СПбГУ) проводятся с 2009 г. В последней версии интерпретации измерений прямого солнечного излучения высокого спектрального разрешения используются [4]:

- программное обеспечение PROFFIT96 для интерпретации спектров солнечного излучения;
- измерения спектров в четырех микроокнах полосы поглощения озона (991,25—993,8, 1001,47—1003,04, 1005—1006,9, 1007,348—1009 см^{-1});
- регуляризация Тихонова — Филиппса;
- фиксированные среднедневные профили CO_2 и H_2O , предварительно определенные из тех же спектров.

Использованная в работе версия интерпретации проходила валидацию с помощью эталонных измерений с помощью спектрометра Добсона и характеризуется систематической погрешностью 1,7% и среднеквадратическим отклонением 2,3%.

2.2. Измерения на спутнике “Арктика-М”

Измерения ОСО на спутнике “Арктика-М” осуществляются с помощью радиометра МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения), ранее использовавшегося на российских геостационарных спутниках. Прибор МСУ-ГС позволяет измерять уходящее излучение всей поверхности Земли в видимом (три канала с пространственным разрешением 1 км) и инфракрасном (семь каналов с разрешением 4 км) диапазонах электромагнитного спектра. Три ИК-канала прибора (8,2—9,2, 9,2—10,2 и 10,2—11,2 мкм) вблизи полосы поглощения озона ~9,6 мкм несут основную информацию об изменении содержания озона в атмосфере Земли.

Бортовая калибровка регистрируемых сигналов в каналах обеспечивается референтными источниками (лампы, имитаторы абсолютно черного тела). Периодичность съемки составляет 15—30 мин, что особенно важно для изучения пространственно-временных изменений общего содержания озона в полярных регионах разного временного масштаба и определения дневных, месячных, сезонных, годовых и долговременных трендов ОСО. Измеряемые в “озоновом” канале значения радиационной температуры чувствительны к вариациям концентрации озона, вертикального распределения температуры воздуха, а также температуры и излучательной способности поверхности и облаков, поэтому для получения достоверных оценок ОСО по спутниковым измерениям требуется привлечение дополнительных данных о параметрах атмосферы, которые были получены из модели GFS NCEP.

Отметим, что разработке методики мониторинга ОСО высокого пространственного и временного разрешения и ее реализации на геостационарных спутниках посвящен ряд работ [5, 7, 8]. В этих работах приведены оценки погрешностей определения ОСО с помощью геостационарных

спутниковых измерений приборами SEVIRI и МСУ-ГС. Они показали, что погрешности определения ОСО зависят от многих факторов — состояния облачности, типа поверхности, самого содержания озона, используемого метода (тепловое излучение или отраженного и рассеянного солнечного излучения), характеристик используемого прибора, объема и качества используемой дополнительной информации и т. д. Значения этих погрешностей были оценены в диапазоне от 5 до 10% и более. Отметим также, что Фурье-спектроскопические ИК-измерения высокого спектрального разрешения и точности (приборы AIRS, TES, ИКФС-2, IASI, CrIS и т. д.), позволяющие определять ОСО в среднем с погрешностями 3%, в полярных регионах имеют заметно большие погрешности — 6—8% [6].

Прибор МСУ-ГС, установленный на космическом аппарате “Арктика-М” № 1, обеспечивает возможность получения спутниковых данных, покрывающих полярные территории с пространственным разрешением 4 км, в инфракрасном диапазоне каждые 15 мин в пределах рабочего участка орбиты. Длительность рабочего участка составляет примерно 6 ч, по истечении которых “Арктика-М” № 1 прекращает съемку. Далее, после 6-часового перерыва, начинается новый рабочий участок.

Методика интерпретации измерений ОСО с помощью МСУ-ГС основывается на применении полносвязной искусственной нейронной сети, которая в качестве входных данных использует значения яркостной температуры, регистрируемой в инфракрасных каналах прибора МСУ-ГС, данные о параметрах атмосферы из численной модели прогноза GFS NCEP с разрешением 0,25° и информацию о зенитном угле Солнца. Данный подход ранее был применен для прибора МСУ-ГС, установленного на космическом аппарате “Электро-Л” № 3 [2]. В работе [2] подробно описана методика интерпретации спутниковых измерений радиометра МСУ-ГС, а также представлены результаты валидации по данным наземных озонметрических станций. На основе сопоставлений с данными из архивов AERONET и WOUDC было получено, что представленный метод позволяет определять ОСО со среднеквадратической ошибкой 18,5 е. Д. по отношению к AERONET и 19,2 е. Д. по отношению к WOUDC.

Для работы нейронной сети используются данные каналов МСУ-ГС № 7, 8 и 9 (8,7, 9,7 и 10,8 мкм), а в качестве параметров атмосферы выступают профиль температуры (от 1000 до 1 гПа) и приземное давление. Разработанная искусственная нейронная сеть решает регрессионную задачу вычисления значений ОСО, а ее архитектура построена по типу многослойных перцептронов и имеет три скрытых слоя.

Обучение нейронной сети выполнялось с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, в качестве функции потерь использовалось среднеквадратическое отклонение, а в качестве алгоритма оптимизации был выбран алгоритм Adam. Эталонной информацией для обучения служили результаты измерения ОСО с помощью прибора OMPS (космические аппараты “Suomi NPP” и “NOAA-20”). Случайные погрешности измерения яркостной температуры в указанных ранее каналах МСУ-ГС составляют ~0,15 К (https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/msu_gs_a).

Первым этапом анализа спутниковых измерений для получения ОСО являлся отбор безоблачных ситуаций.

2.3. ИКФС-2

Российский ИК-Фурье-спектрометр на полярном спутнике “Метеор-М” измерял ОСО в течение 2015—2022 гг. на основе интерпретации измерений уходящего ИК-теплого излучения высокого спектрального разрешения [20, 24].

Сравнение данных измерений ОСО, полученных с помощью прибора ИКФС-2, с независимыми наземными и спутниковыми данными показало, что средние различия между данными ИКФС-2 и независимыми измерениями составляют до 2% (ИКФС-2 обычно недооценивает значения ОСО). Среднеквадратические отклонения различий (SDD) варьируются от 2 до 4%. В то же время сравнение результатов ИКФС-2 с независимыми данными демонстрирует увеличение расхождений в высоких широтах. В весенне-зимний период SDD достигает 8% в Южном и 6% в Северном полушарии.

2.4. TROPOMI

Спектрометр TROPOMI измеряет уходящее отраженное и рассеянное солнечное излучение в диапазоне длин волн 270—2385 нм с разрешением 0,2—0,5 нм. Поле зрения в надире дает наземные пиксели площадью 7,5–3,5 км² с 6 августа 2019 г. Большая ширина полосы сканирования (2600 км) в поперечном направлении обеспечивает почти ежедневное глобальное покрытие освещенной Солнцем атмосферы. Спутниковые измерения ОСО прибором TROPOMI постоянно валидируются и находятся в хорошем согласии с наземными измерениями международных сетей наблюдений GAW и NDACC, приборов Brewer и Dobson, сети наблюдений Pandora и т. д., а также с данными спутниковых измерений “MetOp-B” GOME-2, “Aura” OMI и “Suomi-NPP” OMPS-nadir. Среднее смещение по всем сетям составляет около 0,5—1,3%, а неопределенность, обусловленная случайными ошибками, меньше $\pm 2,5\%$ [22]. Сравнение измерений ОСО спектрометром TROPOMI со спутниковыми данными GOME-2B и GOME-2C, OMI, OMPS показывает согласие в пределах 1—2% на всех широтах, кроме самых высоких, где получение данных наиболее затруднено из-за больших солнечных зенитных углов и больших градиентов альбедо поверхности.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Сравнение данных наземных и спутниковых (МСУ-ГС) измерений ОСО

На рис. 1 представлены временные ряды среднесуточных значений ОСО по данным наземных и спутниковых измерений (пространственное усреднение 10 км), а также разности между измерениями за 2021—2023 гг. Вертикальные прямые на рисунке изображают переход на следующий год. В отдельные дни спутниковые измерения согласуются с наземными с разностью менее 2—10 е. Д. Однако в некоторые дни разности в несколько раз превышают 10 е. Д., а максимальные по модулю равны 71,8 е. Д. и наблюдались в 2023 г.

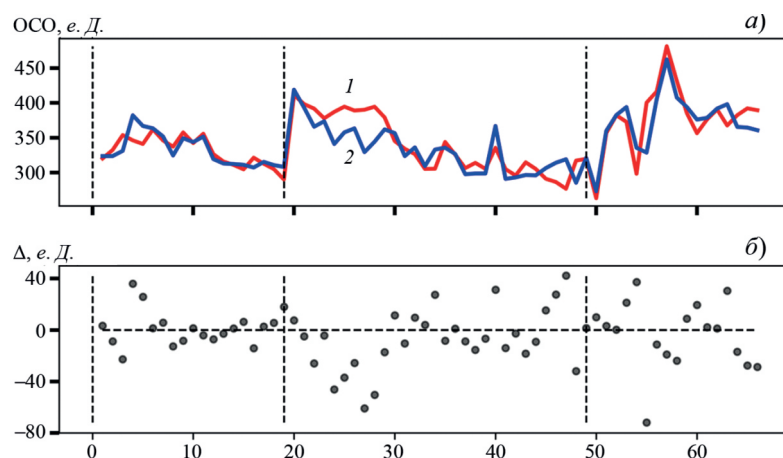


Рис. 1. Временной ряд среднедневных значений ОСО по данным наземных измерений Bruker 125HR в Петергофе (1) и спутниковых измерений МСУ “Арктика-М” в радиусе 10 км от Петергофа (2) за 2021—2023 гг. (а), а также разность между измерениями ОСО (б).

В таблице представлены абсолютные и относительные средние разности и среднеквадратическое отклонение (СКО) между значениями среднедневных ОСО на основе спутниковых измерений МСУ-ГС с пространственным усреднением 10 км и наземным прибором Bruker 125HR в Петергофе за каждый год сопоставлений и за весь период 2021—2023 гг. Разности в процентах рассчитывались относительно среднего значения ОСО по данным наземных измерений за тот же период. Отметим, что пары наземных и спутниковых измерений в рассматриваемые годы покрывают лишь небольшой период времени года, в основном весну и лето. Наименьшие средняя разность (–1,45 е. Д., или –0,4%) и среднеквадратическое отклонение (13,53 е. Д., или 3,7%) наблюдаются в 2021 г. Наибольшие разности между ОСО на основе спутниковых и наземных измерений прихо-

**Абсолютные и относительные погрешности измерений ОСО
с помощью МСУ-ГС с пространственным усреднением 10 и 200 км
по сравнению с измерениями прибором Bruker**

Параметр	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2021—2023 гг.
Усреднение 10 км				
<i>N</i>	19	30	17	66
, е. Д./%	13,53/3,7	23,69/7,1	25,66/7,3	22,45/6,2
, е. Д./%	–1,45/–0,4	–7,27/–2,2	–3,8/–1,1	–3,68/–1,1
Усреднение 200 км				
<i>N</i>	19	30	17	66
, е. Д./%	13,96/3,8	23,69/7,1	25,82/7,3	22,29/6,4
, е. Д./%	–0,91/–0,25	–7,9/–2,4	–3,47/–1	–4,23/–1,2
Примечание. Относительные погрешности считались на основе средних значений ОСО за период по данным прибора Bruker; <i>N</i> — число дней в году, когда имеются измерения прибором МСУ-ГС; — среднеквадратическое отклонение разностей; — средняя разность (спутниковые минус наземные).				

дятся на 2022 г. при средней разности и СКО $-2,2$ и $7,1\%$ соответственно. Средняя разность и СКО за весь период исследования составляют $-1,1$ и $6,2\%$ соответственно.

В таблице также приведены оценки разностей между спутниковыми и наземными измерениями при усреднении спутниковых измерений в радиусе ~ 200 км вокруг места проведения наземных измерений. Относительные разности для большего усреднения данных МСУ-ГС получены близкими к пространственному усреднению в радиусе 10 км (отличия менее 1%). Приведенные значения разностей говорят об относительно горизонтально однородном поле ОСО вблизи Санкт-Петербурга в рассматриваемый период.

Дневные вариации ОСО на основе спутниковых измерений в исследуемый период составляли ~ 89 е. Д. При этом дневные вариации ОСО на основе наземных измерений прибором Bruker 125HR были существенно меньше, достигая 30—40 е. Д. Отмеченные особенности дневных вариаций ОСО на основе измерений спутниковым и наземным приборами объясняются заметно разными случайными погрешностями измерений. Так, по данным измерений Bruker 125HR, случайные погрешности измерений оцениваются как $2,3\%$ ($8-9$ е. Д.), а у МСУ-ГС — $6-8\%$ ($18-19$ е. Д.).

На рис. 2 сопоставлены временные ряды ОСО в виде средних за каждые 30 мин (рис. 2а) и среднедневных (рис. 2б) значений на основе спут-

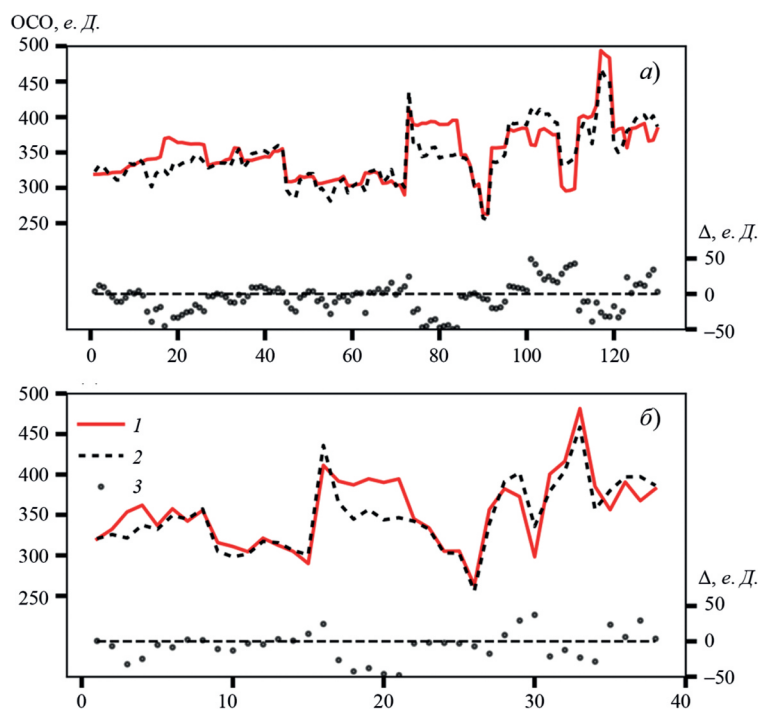


Рис. 2. Временные ряды ОСО в районе Петергофа за отдельные дни 2021—2023 гг. в виде средних за 30 мин (а) и за день (б) по данным спутниковых (“Арктика-М”, радиус 2 км от Петергофа, кривая 1) и наземных (Bruker 125HR, кривая 2) измерений и разность между ними : наземные минус спутник (3).

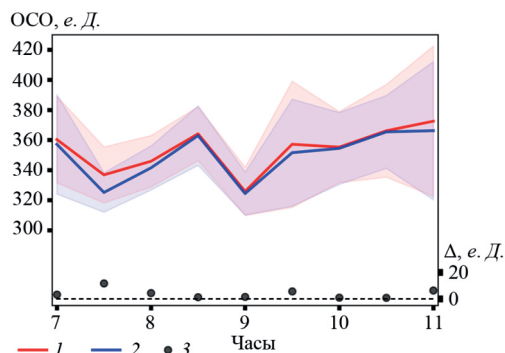


Рис. 3. Средний суточный ход (за 5—13 ч ВСВ) ОСО в районе Петергофа (Санкт-Петербург) за 2021—2023 гг. по данным измерений наземного прибора Bruker 125HR (1) и спутника “Арктика-М” (2); 3 — разность (наземные минус спутник); цветом выделен доверительный интервал вероятности 95%.

доверительного интервала указывает на количество измерений в данный час, равное 1). Видно, что в период с 6 ч до 11 ч 30 мин ВСВ разности между двумя наборами данных измерений находятся в диапазоне 1—7 е. Д. Наибольшие разности наблюдаются в сроки до 6 ч ВСВ и в интервале 12 ч — 12 ч 30 мин (12—43 е. Д.) при наибольшей разности в 12 ч ВСВ, но на основе всего трех измерений. Вероятно, заметно меньшая разность в период 6 ч — 11 ч 30 мин ВСВ в том числе связана с большим количеством измерений в данный период (максимальное в 8 ч 30 мин — 9 ч ВСВ — 18 и 16 соответственно). Представленный временной ряд не является репрезентативным средним суточным ходом и находится под влиянием отдельных сроков измерений, в которые тем не менее наблюдается хорошее согласие между данными наземных и спутниковых измерений (на примере разностей).

3.2. Сравнения измерений ОСО с помощью МСУ-ГС со спутниковыми измерениями приборами ИКФС-2 и TROPOMI

Глобальные и регулярные измерения ОСО осуществляются различными приборами на полярных и геостационарных спутниках [10]. Представляет интерес сравнение измерений ОСО с помощью МСУ-ГС на высокоэллиптическом спутнике “Арктика-М” с данными измерений на основе другого российского спутникового прибора — ИКФС-2 (на борту “Метеор-М”) и европейского прибора TROPOMI (на борту спутника “Sentinel-5”).

Согласно сопоставлениям измерений ОСО спутниковыми приборами МСУ-ГС и ИКФС-2 за 2021—2022 гг. средняя разность составляет 8 е. Д. (2,2%) при СКО разности 15 е. Д. (4,3%). МСУ-ГС в среднем завышает ОСО относительно данных ИКФС-2.

Сравнения также были проведены с использованием спутниковых измерений прибора TROPOMI (Tropospheric Ozone Monitoring Instrument) [16].

никовых (в радиусе 2—4 км от наземной измерительной станции) и наземных измерений в районе Петергофа. Для средних через каждые 30 мин средняя разность составляет 5,9 е. Д. при СКО 21,3 е. Д. Коэффициент корреляции Пирсона равен 0,85. Что касается средних за день, то средняя разность и СКО составляют 16,4 и 22,1 е. Д. при коэффициенте корреляции 0,86.

На рис. 3 приведен средний суточный ход (5—13 ч ВСВ через 30 мин) ОСО в районе Петергофа за 2021—2023 гг. по данным спутниковых и наземных измерений. Показаны также доверительные интервалы 95% для каждого срока (отсутствие

Сравнения измерений ОСО прибором МСУ-ГС с данными измерений TROPOMI были осуществлены для 32 дней в разные месяцы в течение зим 2022/23 и 2023/24 гг. Даты измерений выбирались таким образом, чтобы охватить как минимальные, так и максимальные значения ОСО, наблюдаемые в указанный период. На рис. 4 приведен пример диаграммы рассеяния измерения ОСО спутниковыми приборами МСУ-ГС и TROPOMI в дни 6, 7 и 18—26 марта 2024 г.

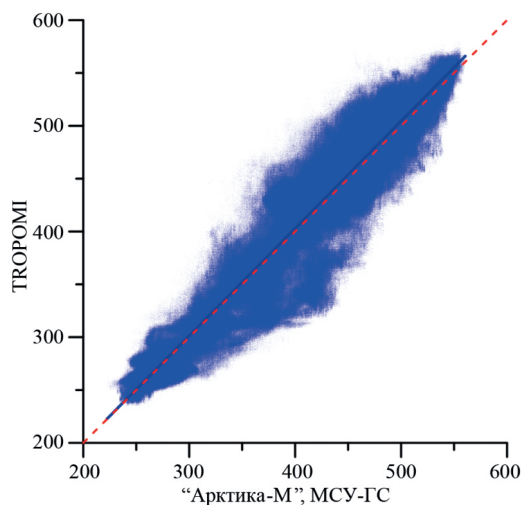


Рис. 4. Диаграмма рассеяния спутниковых измерений ОСО с помощью приборов МСУ-ГС и TROPOMI в марте 2024 г.

В рассмотренные дни средние разности между спутниковыми измерениями ОСО МСУ-ГС и TROPOMI колеблются в пределах 0,36—5,0% по абсолютной величине, а среднеквадратическое отклонение разностей — в пределах 5,4—7,9%, что согласуется с результатами приведенных ранее сравнений.

4. Заключение

Сравнение данных измерений ОСО на спутниках “Арктика-М” с помощью аппаратуры МСУ-ГС показало следующее.

Отличия измерений ОСО прибором МСУ-ГС от наземных измерений Фурье-спектрометром Bruker 125HR составляли в разные годы (2021—2023 гг.) в среднем: систематические — 3,7—16,4 *е. Д.* (1,1—4,7%), случайные СКО разности — от 10,5 до 23 *е. Д.* (3,8—7,3%). В отдельные дни отличия достигали ~70—80 *е. Д.* и имели случайный характер. Их исключение снижало средние величины отличий между наземными и спутниковыми измерениями МСУ-ГС на 1—1,5%.

Анализ сопоставлений дневных вариаций ОСО по данным наземных и спутниковых измерений (МСУ-ГС) показал очень разные картины — имеются дни и временные периоды хорошего согласия, а также дни противоположных по знаку значений.

Сопоставление данных измерений ОСО спутниковыми приборами МСУ-ГС и российского Фурье-спектрометра ИКФС-2 — полярный спутник “Метеор-М” (2021—2022 гг.) дало следующие характеристики отличий: среднее рассогласование — 8 *е. Д.* (2,2%), среднеквадратическое отклонение разности — 15 *е. Д.* (4,3%), МСУ-ГС в среднем завышает ОСО относительно данных ИКФС-2.

Многочисленные сопоставления измерений ОСО прибором МСУ-ГС на спутнике “Арктика-М” № 2 и прибором TROPOMI (спутник “Sentinel-5 Precursor”) для различных месяцев 2023 и 2024 гг. показали, что средние отличия в зависимости от месяца и года находятся в диапазоне 1,3—21,8 *е. Д.*

(0,7—5,0%), среднеквадратические отклонения — 16,9—26,4 *е. Д.* (5,4—7,9%). В среднем для миллионов сопоставлений результатов измерения ОСО двумя спутниковыми приборами получены значения 2,0—25 *е. Д.* (1,1—7,2%)

Основной результат проведенных исследований состоит в том, что мониторинг ОСО в Арктике с помощью радиометров МСУ-ГС российских высокоэллиптических спутников “Арктика-М” позволяет получать ценную информацию о состоянии озоносферы. Измерения ОСО прибором МСУ-ГС с погрешностями 5—8% и высоким пространственным (4 км) и временным (15 мин) разрешением позволяют исследовать регулярно возникающие озоновые аномалии, достигающие 50% и более и приводящие к опасному увеличению приходящего к поверхности Земли солнечного УФ-излучения, а также пространственные и временные вариации ОСО (достигающие 20—30% и более [21, 23]) в Арктике.

Благодарим Центр обслуживания данных и информации GES DISC за предоставление доступа к данным TROPOMI.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 124032000025-1.

Литература

1. Асмус В. В., Милехин О. Е., Крамарева Л. С., Хайлов М. Н., Ширшаков А. Е., Шумаков И. А. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система “Арктика-М”. — Метеорология и гидрология, 2021, № 12, с. 11—26.
2. Блошинский В. Д., Кучма М. О., Кухарский А. В. Определение общего содержания озона в столбе атмосферы по данным КА ЭЛЕКТРО-Л № 3 с использованием нейронных сетей. — Исследование Земли из космоса, 2022, № 4, с. 79—85.
3. Виролайнен Я. А., Тимофеев Ю. М. Дистанционные методы измерений содержания озона. 1. Наземные методы. — Метеорология и гидрология, 2025, № 8, с. 5—18.
4. Виролайнен Я. А., Ионов Д. В., Поляков А. В. Анализ результатов многолетних измерений содержания озона в тропосфере на станции СПбГУ в Петергофе. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2023, т. 59, № 3, с. 336—345.
5. Крамчанинова Е. К., Успенский А. Б. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере по данным российского геостационарного спутника “ЭЛЕКТРО-Л”. — Исследование Земли из космоса, 2013, № 2, с. 12—18.
6. Поляков А. В., Крюковских Е. П., Виролайнен Я. А., Неробелов Г. М., Козлов Д. А., Тимофеев Ю. М. Определение общего содержания озона из спектральных измерений ИКФС-2 в 2015—2022 гг. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2024, т. 60, № 6.
7. Поляков А. В., Тимофеев Ю. М. О точности определения общего содержания озона с помощью аппаратуры SEVIRI на геостационарном спутнике Meteosat-8. — Исследование Земли из космоса, 2007, № 2, с. 3—9.
8. Поляков А. В., Тимофеев Ю. М. Усовершенствованная методика определения общего содержания озона с помощью аппаратуры SEVIRI на геостационарных спутниках Meteosat. — Исследование Земли из космоса, 2010, № 5, с. 42—45.
9. Тимофеев Ю. М., Неробелов Г. М. Спутниковые исследования газового состава атмосферы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2024.
10. Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Виролайнен Я. А. Дистанционные методы измерений содержания озона. 2. Спутниковые методы. — Метеорология и гидрология, 2025, № 8, с. 19—42.
11. Bernhard G. H., Fioletov V. E., Groo J.-U., Ialongo I., Johnsen B., Lakkala K., et al. Record-breaking increases in Arctic solar ultraviolet radiation caused by exceptionally large ozone depletion in 2020. — Geophys. Res. Lett., 2020, vol. 47, e2020GL090844; <https://doi.org/10.1029/2020GL090844>.
12. Chubachi S. Preliminary result of ozone observations at Syowa from February 1982 to January 1983. — Mem. Natl. Inst. Polar Res., Special Issue, 1984, vol. 34, pp. 13—19.

- 13. Dameris M., Loyola D. G., Nutzel M., Coldewey-Egbers M., Lero C., Romahn F., van Roozendaal M.** First description and classification of the ozone hole over the Arctic in boreal spring 2020. — *Atmos. Chem. Phys.*, 2021, vol. 21, No. 2, pp. 617—633; doi: 10.5194/acp-21-617-2021.
- 14. Farman J. C., Gardiner B. G., and Shanklin J. D.** Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. — *Nature*, 1985, vol. 315, pp. 207—210; <https://doi.org/10.1038/315207a0>.
- 15. Hassler B., Petropavlovskikh I., et al.** Past changes in the vertical distribution of ozone. Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability. — *Atmos. Meas. Tech.*, 2014, vol. 7, pp. 1395—1427.
- 16. Ingmann P., Veihelmann B., Langen J., Lamarre D., Stark H., and Courreges-Lacoste G. B.** Requirements for the GMES Atmosphere Service and ESA's implementation concept: Sentinels-4/-5 and -5p. — *Remote Sens. Environ.*, 2012, vol. 120, pp. 58—69.
- 17. Jin X., Li J., Schmidt C. C., Schmit T. J., and Li J.** Retrieval of total column ozone from imagers onboard geostationary satellites. — *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2008, vol. 46, No. 2, pp. 479—488; <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.910222>.
- 18. Kuttippurath J., Kumar P., Nair P. J., and Pandey P. C.** Emergence of ozone recovery evidenced by reduction in the occurrence of Antarctic ozone loss saturation. — *Climate Atmos. Sci.*, 2018, vol. 42, No. 1; <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0052-6>.
- 19. Kuttippurath J., Lefevre F., Pommereau J.-P., Roscoe H. K., Goutail F., Pazmino A., and Shanklin J. D.** Antarctic ozone loss in 1979–2010: First sign of ozone recovery. — *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, vol. 13, pp. 1625—1635; <https://doi.org/10.5194/acp-13-1625-2013>.
- 20. Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G., Kozlov D., and Timofeyev Y.** Six years of IKFS-2 global ozone total column measurements. — *Remote Sens.*, 2023, vol. 15, p. 2481; <https://doi.org/10.3390/rs15092481>.
- 21. Pommereau J. P., Goutail F., Pazmino A., Lefevre F., Chipperfield M. P., Feng W., Van Roozendaal M., Jepsen N., Hansen G., Kivi R., Bogner K., Strong K., Walker K., Kuzmichev A., Khattatov S., and Sitnikova V.** Recent Arctic ozone depletion: Is there an impact of climate change? — *Comptes Rendus Geosci.*, 2018, vol. 350, pp. 347—353; <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.07.009>.
- 22. Quarterly Validation Report of the Sentinel-5 Precursor Operational Data Products 25: April 2018 — November 2024, S5P/TROPOMI Total Ozone ATBD S5P-L2-DLR-ATBD-400A Issue 2.4.** — 2022-07-11 — Released Page 2 of 62 Copernicus Sentinel-5 Precursor Operational Data Products 25: April 2018 — November 2024.
- 23. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018.** WMO No. 58; <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2018>.
- 24. Timofeyev Y. M., Uspensky A. B., Zavelevich F. S., Polyakov A. V., Virolainen Y. A., Rublev A. N., Kukharsky A. V., Kiseleva J. V., Kozlov D. A., Kozlov I. A., et al.** Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2—four years in orbit. — *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2019, vol. 238, 106579.
- 25. Wohltmann I., Gathen P., Lehmann R., Maturilli M., Deckelmann H., Manney G. L., et al.** Near complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020. — *Geophys. Res. Lett.*, 2020, vol. 47, e2020GL089547; <https://doi.org/10.1029/2020GL089547>; <https://doi.org/10.1029/2020GL090844>.
- 26. World Meteorological Organization (WMO).** Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion. — Geneva, 2022, GAW Report No. 278, 56 p.