

УДК 504.064.37, 551.510.534

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА ИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИКФС-2 В 2015–2022 гг.

© 2024 г. А. В. Поляков^{a, *}, Е. П. Крюковских^{a, **}, Я. А. Виrolайнен^{a, ***},
Г. М. Неробелов^{a, b, c, ****}, Д. А. Козлов^{d, *****}, Ю. М. Тимофеев^{a, *****}

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

^bСПб ФИЦ РАН – НИЦ экологической безопасности РАН,
14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

^cРоссийский государственный гидрометеорологический университет,
Малоохтинский проспект, дом 98, Санкт-Петербург, 195196, Россия

^dИсследовательский центр имени М.В. Келдыша, Онежская ул., д. 8, Москва, 125438, Россия

e-mail: *a.v.polyakov@spbu.ru, **kriukovskikh1967@mail.ru, ***yana.virolainen@spbu.ru,
****akulishe95@mail.ru, *****dakozlov@kerc.msk.ru, *****y.timofeev@spbu.ru

Поступила в редакцию 28.05.2024 г.

После доработки 14.08.2024 г.

Принята к публикации 02.09.2024 г.

Представлены результаты определения общего содержания озона (ОСО) из спектров уходящего теплового инфракрасного излучения, измеренных прибором ИКФС-2 с борта космического аппарата «Метеор-М» № 2 за 8 лет измерений. Разработанная ранее методика для интерпретации спектральных измерений, выполненных в 2015–2020 гг. с шириной полосы сканирования (ШПС) 1000 км, применена к измерениям 2021–2022 гг. с ШПС 1500 км. Показано, что наблюдаемый при этом рост разностей между данными ИКФС-2 и результатами независимых измерений вызван не расширением статистики изменчивости ОСО, а увеличением диапазона изменения угла сканирования. После доработки методики для измерений с ШПС 1500 км сравнение с независимыми данными показало, что среднеквадратичные отклонения разностей с результатами наземных и спутниковых измерений за все 8 лет не превосходят 3% и не увеличились по сравнению с первыми 6 годами измерений. Для анализа результатов в полярных областях полученные из спектров ИКФС-2 значения ОСО сравниваются с данными озонзондирования, которое выполняется непрерывно в течение всего года, включая полярную ночь. Показано хорошее качественное согласие данных ИКФС-2 и озонзондирования, включая зимне-весенние периоды экстремального уменьшения ОСО в высоких широтах обоих полушарий. Среднеквадратичные отклонения разностей данных ИКФС-2 и величин ОСО по данным озонзондирования составили для разных станций от 5.3 до 11% (17–33 е. Д.), или в среднем по всем станциям 7.9%, что согласуется с неопределенностью оценок интегрального содержания озона в вертикальном столбе по данным озонзондирования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование атмосферы, атмосферный озон, ИКФС-2, общее содержание озона

DOI: 10.31857/S0002351524060065 EDN: HUYKHN

1. ВВЕДЕНИЕ

Озон является одним из важнейших газов в составе земной атмосферы. Несмотря на его невысокие концентрации в атмосфере, озон в стратосфере жизненно важен для биосферы, т. к. он защищает растительный и животный мир (в том числе, человека) от губительного ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца [WMO, 2022]. Вместе с тем озон,

находящийся в приземном слое атмосферы, входит в список 5 важнейших загрязняющих веществ атмосферы, влияющих на здоровье населения. Кроме того, на верхней границе тропосферы озон вносит существенный вклад в парниковый эффект: от 7 до 22% [WHO, 2021].

Атмосферный озон привлек внимание человечества в связи с обнаружением в 1980-х гг. значитель-

ного уменьшения его стратосферного содержания, вплоть до возникновения «озоновых дыр», вызванного антропогенными факторами [WMO, 2022], что привело к развитию различных систем наблюдения за изменениями атмосферного озона. Хотя содержание в атмосфере разрушающих озон газов после принятия ряда международных соглашений по их ограничению и запрету уменьшается, они по-прежнему присутствуют в атмосфере, причем, в последние годы, наблюдаются вариации скорости их уменьшения, вызванные как естественными, так и антропогенными причинами [WMO, 2022]. Ожидаемое восстановление толщины озонового слоя к значениям до 1980 г. постепенно отодвигается к концу XXI в., при этом в связи с ростом эмиссий парниковых газов, перспективы изменения общего содержания озона (ОСО) в глобальном масштабе до сих пор не ясны [WMO 2022, 2023]. Таким образом, мониторинг озона остается актуальной задачей, особенно в полярных областях, где, с одной стороны, наблюдается существенно различная в разные годы изменчивость сезонного уменьшения содержания озона, а с другой стороны, в период полярной ночи и при низком Солнце затруднено использование наиболее широко применяемых методов наблюдения за озоном, основанных на измерениях солнечного излучения.

Для мониторинга атмосферного содержания озона используются различные методы, как контактные, так и дистанционные. Контактные методы отличаются более высокой точностью и наилучшим временным разрешением (напр., [Андреев и др., 2023]), в то время как методы дистанционные и, особенно, спутниковые, обеспечивают глобальный пространственный охват и непрерывность измерений. Примеры спутниковых озонметрических инструментов — приборы Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) на борту спутника Sentinel5P [Veefkind et al., 2012], Ozone Monitoring Instrument (OMI) на спутнике Aura [McPeters et al., 2008, 2015]). Дистанционные методы помимо спутников также широко применяются на наземных наблюдательных станциях. Распространенные наземные дистанционные методы используют излучение Солнца в УФ, видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. Методы измерения прошедшего через атмосферу прямого и рассеянного солнечного излучения приборами Добсона и Брюера, российским озонметром М-124, ИК Фурье-спектрометрами широко используются для валидации спутниковых методов, как при запуске новых приборов, так и на всем протяжении их работы, в частности для определения дрейфа во временных рядах данных.

Спутниковые методы мониторинга озона можно разделить на три основных типа: 1) основанные на отраженном и рассеянном солнечном излучении (примеры — OMI, TROPOMI); 2) лимбовые методы: прозрачности, использующие излучение Солнца — Atmospheric Chemistry Experiment — Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS) [Bernath et al., 2017] или других естественных источников излучения (например, звезды: Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS) [Bertaux et al., 1991]), а также собственного излучения атмосферы в микроволновой Microwave Limb Sounder (MLS) [Lee et al., 2005] или ИК — Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS) [Glatthor et al., 2006] областях спектра; и, наконец, 3) надирные методы, использующие тепловое ИК излучение атмосферы и поверхности Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) [Boynard et al., 2016], Инфракрасный Фурье-спектрометр (ИКФС-2) [Polyakov et al., 2023] и др.

При лимбовых измерениях информация о газовом составе атмосферы может быть получена за исключением нижних слоев (не выше 5–7 км), т. е. эти методы не позволяют получить информацию об общем содержании газов в вертикальном столбе. Кроме того, лимбовые измерения не позволяют получить данные с удовлетворительными горизонтальным разрешением и локализацией измерений. При этом получить информацию об ОСО с широким охватом в полярных областях в период полярной ночи и в близкое к нему время позволяют только методы, основанные на измерении уходящего теплового излучения атмосферы и поверхности, например, основанные на спектральных измерениях российского прибора ИКФС-2.

Ранее анализ измерений ОСО ИКФС-2 совместно с анализом данных реанализа ERA5 по температуре и потенциальной завихренности позволил подробно исследовать эволюцию полярного стратосферного вихря и озоновых мини-дыр в Северном полушарии в марте и апреле 2020 г. [Polyakov et al., 2021]. Измерения ОСО за 2015–2020 гг. [Polyakov et al., 2023] были использованы для анализа полей распределения озона в Арктике и Антарктике в зимне-весенний период разных лет.

В настоящей работе мы рассматриваем применение методики определения ОСО из спектров уходящего теплового ИК излучения, ранее использованной для обработки спектральных измерений прибором ИКФС-2 за период 2015–2020 гг., к периоду 2021–2022 гг. В итоге мы применяем усовершенствованную методику определения ОСО к измерениям ИКФС-2 в течение 8 лет, 2015–2022 гг.

2. МЕТОДИКА И ДАННЫЕ

2.1. Методика решения обратной задачи и ее исходные данные

Фурье-спектрометр ИКФС-2 предназначен для установки на российские метеорологические спутники серии «Метеор-М». Прибор выполняет измерения уходящего теплового излучения системы Земля-атмосфера в спектральной области 660–2000 см⁻¹ со спектральным разрешением 0.7 см⁻¹ в используемой нами области спектра 660–1210 см⁻¹. Погрешность спектральных измерений (Noise-Equivalent Spectral Radiance, NESR) оценивается в процессе измерений и не превосходит значений в диапазоне (0.15–0.45) мВт/(м² · ср · см⁻¹) [Головин и др., 2013]. Измеренные спектры представлены на сайте НИЦ «Планета» (http://planet.rssi.ru/calval/public-ikfs?setlang=ru_RU). В период до декабря 2020 г. измерения выполнялись с шириной полосы сканирования (ШПС) 1000 км. Начиная с декабря 2020 г., ШПС была увеличена до 1500 км, что позволило полностью сканировать территорию Российской Федерации без пропусков за каждый день наблюдений. В настоящей работе рассматриваются спектральные данные, полученные за период с 2015 по конец 2022 гг.

Методика определения ОСО из спектров уходящего ИК излучения ранее представлена в работах [Гаркуша и др., 2017, Polyakov et al., 2021, 2023]. В ее основе лежит алгоритм решения обратной задачи для получения ОСО из спектров, измеренных Фурье-спектрометром ИКФС-2 на российском спутнике «Метеор-М» №2. Алгоритм основан на использовании метода искусственных нейронных сетей (ИНС), метода главных компонент (ГК) и данных измерений ОСО спутниковым прибором ОМІ. Погрешность определения ОСО составляет менее 3%; методика позволяет анализировать глобальное распределение ОСО, в том числе, и в период полярных ночей.

В алгоритме решения обратной задачи используется простейший вид ИНС – трехслойный перцептрон (см., например, [Уоссермен, 1992]), входными параметрами которого (предикторами) являются зенитный угол спутника при наблюдении из измеряемого пикселя, доля года (отношение номера дня года к продолжительности года), широта и ГК спектра ИКФС-2. Подробности алгоритма решения обратной задачи приведены в работах [Polyakov et al., 2021, 2023]. На основании оценок работы [Гаркуша и др., 2017] используются 25 ГК участка спектра 660–1210 см⁻¹, содержащего информацию о вертикальном распределении тем-

пературы, влажности и свойствах поверхности, а также 50 ГК участка спектра, содержащего только полосу поглощения озона, а именно, 980–1080 см⁻¹. Похожий подход ранее использовался и другими исследователями, например, в работах [Turquety, et al., 2004, Clerbaux et al., 2009] для прибора IASI. Основным отличием нашей работы является использование максимально широкого ансамбля данных для обучения. Для этого был создан набор пар спектральных измерений ИКФС-2 и данных об ОСО уровня 2, т.е. единичных измерений, полученных прибором ОМІ ([McPeters, et al., 2008, 2015]). Прибор выполняет измерения с борта спутника Aura с пространственным разрешением 13×24 км, сканируя поперек направления движения спутника полосу шириной 2500 км [McPeters, et al., 2008, 2015, Kuttippurath, et al., 2018]. Прибор ОМІ измеряет рассеянное солнечное излучение в диапазоне длин волн 270–500 нм со спектральным разрешением около 0.5 нм, при этом измеряется величина ОСО с погрешностью 1–2% [McPeters, et al., 2008, 2015]. Важно также, что измерения ОМІ обеспечивают глобальный охват поверхности Земли. Использование для обучения ИНС подробно валидированных данных позволило снять вопрос о калибровке получаемых по данным ИКФС-2 результатов. Данные прибора ОМІ, версия данных 3 получены из [OMI DATA]. Мы используем как оригинальную методику обработки спектральных данных ИКФС-2, разработанную для периода 2015–2020 гг., так и ее модификацию для лучшего соответствия периоду измерений после 2020 г.

2.2. Данные для валидации результатов применения алгоритма

Для валидации измерений ОСО ИКФС-2 были собраны независимые данные об ОСО из различных источников, включающих как наземные данные озонметрической сети, представленные на сайте WOUDC [WMO/GAW, 2024], так и спутниковые данные (прибор ТРОПОМІ). Кроме того, впервые данные ОСО ИКФС-2 сопоставлены с величинами ОСО, полученными по результатам озонзондирования.

Данные озонметрической сети представлены единичными измерениями приборами Добсона и Брюера. Спектрометр Добсона был разработан в 1924 году британским физиком и метеорологом Гордоном Добсоном. Спектрофотометр Добсона может использоваться для измерения как ОСО, так и профилей озона в атмосфере. Спектрометр сравнивает интенсивность солнечного излучения на двух различных длин волн, 305 и 325 нм, (в полосе поглоще-

ния озона и вне ее) и определяет их отношение, на основе которого вычисляется ОСО. Инструменты регулярно взаимно калибруются, что обеспечивает согласованность получаемых данных [Андреев и др., 2023]. Спектрофотометр Брюера компании Kipp&Zonen, основанный на сходных физических принципах, является в настоящее время единственным эталонным автоматизированным прибором, рекомендованным Всемирной метеорологической организацией (ВМО) для измерения общего содержания озона. Мы используем только измерения по прямому солнечному излучению, поскольку они являются наиболее точными. Согласно [Kerr, 2002], точность таких единичных измерений составляет 1–2%.

Данные озонзондирования получены с помощью специализированных датчиков, устанавливаемых как дополнительный блок на обычные метеорологические радиозонды и основанных на электрохимическом принципе. Эти данные обладают рядом существенных недостатков — в частности, озонзонды крайне редко поднимаются выше высот с уровнем давления 6 гПа, что затрудняет расчет ОСО, а абсолютная погрешность измерений достигает 10% при вертикальном разрешении 100–150 м [GAW, 2014]. Но, в отличие от измерений, основанных на солнечном излучении, данные озонзондирования поступают в течение всего года, включая период полярной ночи. Измерения выполняются с различной периодичностью на разных станциях, но в большинстве случаев еженедельно, по средам. Формат данных, поставляемых станциями озонзондирования, включает оценку ОСО, полученную путем интегрирования синтетического вертикального профиля, собранного из измерений озонзонда и дополненного сверху среднеклиматическими данными. Отмечается, что такие профили определяются с точностью до множителя, не превышающего 0.1 по абсолютной величине. При наличии синхронных оптических измерений ОСО приборами Добсона или Брюера они калибруются по последним [WMO, 2021]. Хотя такая калибровка не может быть выполнена в период полярной ночи, данные озонзондирования являются единственным источником информации об ОСО, основанным на физических принципах, отличных от используемых в нашем подходе, что принципиально важно при валидации.

Прибор TROPOMI начал измерения ОСО с борта спутника Sentinel 5 Precursor (S5P) [Veefkind, et al., 2012] с мая 2018 г., с пространственным разрешением 3.5×7 км [Garane et al., 2019], позднее, 3.5×5.5 км [TROPOMI DATA]. В работе [Garane

et al., 2019] были сопоставлены ОСО по данным TROPOMI с наземными измерениями приборами Брюера, Добсона и приборами, использующими методику DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), при этом средние разности (CP) колебались от 0 до 1.5%, а стандартные отклонения разностей (COP) от 2.5 до 4.5%. Для сравнения с данными ОСО ИКФС-2 мы использовали результаты измерений TROPOMI уровня 2 [TROPOMI DATA], отфильтрованные по флагу качества (более 0.9). Использовались данные вида RPRO (reprocessed, окончательно переработанная версия данных) (до 26 августа 2022) и OFFL (offline, первая версия данных, полученная после получения спектральных измерений) после указанной даты, т.е. результаты наиболее качественной обработки данных, доступные на момент получения данных из интернета 05 марта 2024. В связи с особенностями орбит спутников «Метеор-М» № 2 и Sentinel 5P, мы использовали данные с временным рассогласованием до 6 ч. Меньшие рассогласования ограничивают доступность данных в тропических и средних широтах. Чтобы исключить ненадежные околонулевые и абсурдно большие значения ОСО, мы рассматривали для сравнения данные TROPOMI в диапазоне 100–650 е. Д. (единиц Добсона).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ К ПЕРИОДУ 2021–2022 ГГ.

На первом этапе нашего исследования мы применили методику, разработанную на основе данных 2015–2020 гг. для обработки спектров 2021–2022 гг. без каких-либо изменений. Полученные величины ОСО мы сопоставили с данными прибора TROPOMI и данными наземной озонметрической сети WOUDC [WMO/GAW, 2024]. В табл. 1 мы привели средние и среднеквадратичные разности данных ИКФС-2 и данных, полученных из независимых источников, показав также результаты аналогичных сопоставлений для периодов 2015–2020 и 2015–2022 гг. Здесь и везде далее мы использовали следующие критерии согласованности пар данных: измерения ИКФС-2 и наземных приборов в пределах 1 часа по времени и в пределах 70 км по расстоянию от центра пикселя зондирования до наземного прибора; измерения ИКФС-2 и TROPOMI в пределах 6 часов по времени и в пределах 35 км по расстоянию центров пикселей друг от друга. Выбор параметров допустимого рассогласования и список из 21 станций, предоставивших данные отдельных измерений ОСО, с которыми и выполнялось сопоставление, обоснованы в работах [Polyakov et al., 2021,

Таблица 1. Результаты сравнения ОСО по данным ИКФС-2 с данными спутниковых (TROPOMI) и наземных (приборы Добсона, Брюера) измерений. Средние разности (СР) и стандартное отклонение разности измерений (СОР).

1 №	2 Период обучения ИНС (ширина полосы сканирования)	3 Период сравнения (ширина полосы сканирования)	4 Спутниковые измерения		5 Наземные измерения	
			СР, %	СОР, %	СР, %	СОР, %
1	2015–2020 (1000)	2015–2020 (1000)	-2.14	2.71	-0.47	2.73
2		2015–2022 (1500)	-2.04	3.00	-0.22	2.83
3		2021–2022 (1500)	-1.91	3.29	0.14	2.94
4		2021–2022 (1000)	-2.61	2.88	0.89	2.52
5		2021–2022(1000–1500)	-0.57	3.60	-0.02	3.0
6	2015–2022 (1500)	2015–2022 (1500)	-2.22	2.73	-0.41	2.67
7		2021–2022 (1500)	-2.36	2.82	-0.80	2.35
8		2021–2022 (1000)	-2.52	2.77	0.21	2.28
9		2021–2022(1000–1500)	-2.05	2.88	-1.02	2.30
10		2015–2020 (1000)	-2.09	2.64	-0.40	2.71

2023]. Список и положение станций представлены в первых нескольких столбцах табл. 2. Как видно из табл. 2, озонметрические станции, результаты которых мы используем, расположены преимущественно в средних широтах Северного полушария на территории Европы и США. Тем не менее, две станции находятся севернее Северного полярного круга, четыре в тропическом поясе, две из них – в Южном полушарии. Последние три столбца табл. 2 будут проанализированы ниже.

Вернемся к табл. 1. Строка 1 табл. 1 фактически представляет собой повторение результатов, представленных в работе [Polyakov et al., 2023], но с использованием для сравнений обновленных и дополненных независимых данных. Отметим, что приведенные в строке 1 табл. 1 величины незначительно отличаются от результатов работы [Polyakov et al., 2023], в которой были получены величины СОР 2.9% для единичных наземных и 2.75% для спутниковых измерений. Изменения в наземных данных обусловлены их пополнением: данные от измерительных станций поступают на сайт WOUDC постепенно в течение нескольких лет после измерений. Обновление данных TROPOMI происходит за счет различия окончательной RPRO и предварительной OFFL версий обработки спектральных измерений прибора, данные версии RPRO.

Из строки 2 табл. 1 можно видеть, что при добавлении измерений за последние два года СР незначительно уменьшились, а СОР увеличились для обоих типов сравнений. Причинами увеличения

могут быть как а) расширение полосы сканирования, так и б) неадекватность статистики изменчивости озона за 6 лет ей же за период 2021–2022 гг. Из строк 3–5 видно, что сравнение всех данных за последние два года измерений приводит к росту СОР для наземных измерений до 2.94%, а для спутниковых до 3.29% (строка 3), в то время как сравнение за тот же период только с данными внутри полосы шириной 1000 км за эти два года (строка 4) даже уменьшает СОР для наземных измерений и незначительно увеличивает для спутниковых. Выделение измерений с ШПС между 1000 и 1500 км (строка 5) показывает существенный рост СОР: 3.0% для наземных данных и до 3.6% для спутниковых. Из этого можно заключить, что рост СОР вызван преимущественно расширением полосы сканирования.

Строки 6–10 табл. 1 показывают результаты сравнений, повторяющих строки 1–5, но для ИНС, обученной на всем объеме данных. Анализ этой части табл. 1 показывает, что «новая» ИНС позволяет для всего 8-летнего периода измерений получить рассогласования не хуже, чем для первых 6 лет, не ухудшая результатов за первые 6 лет относительно «старой» ИНС. Отметим при этом, что величины стандартных отклонений разностей остаются достаточно взаимно близкими для разных периодов измерений и ширины полосы сканирования.

Таким образом, анализ табл. 1 позволяет заключить, что изменчивость ОСО за первые 6 лет измерений представляет ансамбль данных, достаточно широкий и адекватный и для оценки ОСО из спектральных измерений в последующие 2 года.

Таблица 2. Различия между данными ИКФС-2 и наземными ОСО (WOUDC) относительно наземных измерений; пространственное и временное несоответствие составляет 70 км и 1 ч; столбец «I» обозначает тип приборов (Б-Брюер, Д-Добсон). ИНС обучена на данных за 8 лет, статистика за 8 лет.

№	I	Название станции	Широта, градусы	Долгота, градусы	Высота, м	Число сравнений	СР, %	СОР, %
1	Б	Eureka	80.05	-86.42	9	162224	-0.4	2.5
2	Б	Resolute	74.70	-94.97	68	73496	-0.8	2.3
3	Б	Churchill	58.75	-94.07	26	15630	-1.5	2.5
4	Б	Obninsk	55.10	36.610	100	972	-0.1	3.0
5	Б	Edmonton	53.55	-114.11	752	20089	0.7	3.0
6	Б	Goose Bay	53.31	-60.36	26	17773	-0.2	2.2
7	Б	Lindenberg	52.21	14.12	127	12778	-1.5	2.8
8	Б	De Bilt	52.10	5.18	24	13801	-2.7	2.1
9	Д	Kyiv-Goloseyev	50.36	30.50	206	3780	-0.2	2.0
10	Б	Saturna Island	48.77	-123.13	202	17458	-0.1	2.2
11	Б	Aosta	45.74	7.36	570	1736	0.6	1.7
12	Б	Egbert	44.23	-79.78	264	12256	-1.4	2.0
13	Д	Lannemezan	44.13	0.37	590	118	2.0	1.8
14	Б	Toronto	43.78	-79.47	202	56548	-1.0	2.2
15	Б	Kislovodsk	43.73	42.66	2070	3768	1.6	2.4
16	Б	Thessaloniki	40.63	22.96	60	8121	-1.2	2.2
17	Д	Univ. of Tehran	35.73	51.38	1419	852	1.0	2.1
18	Б	Mauna Loa (HI)	19.54	-155.58	3397	32487	2.2	3.5
19	Б	Paramaribo	5.81	-55.21	16	11571	-0.4	2.1
20	Д	Natal	-5.84	-35.21	49	32	0.9	1.2
21	Д	Cachoeira-Paulista	-22.69	-46.20	574	24	-3.1	1.8
		Все станции				469158	-0.4	2.7

4. ОБСУЖДЕНИЕ – СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ОТДЕЛЬНЫХ ОЗОНОМЕТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ДАННЫМИ ОЗОНОЗОНДИРОВАНИЯ

В последних трех колонках табл. 2 представлены результаты сравнения данных ИКФС-2 с данными наземных озонметрических станций за 8 лет. Как можно видеть, средние разности ОСО по спутниковым и наземным данным изменяются от -3.1 до 2.2%. Такая изменчивость может быть связана как с различной калибровкой наземной аппаратуры, так и с различным рельефом поверхности вблизи озонметрических станций. В частности, максимальная положительная разность (т. е. превышение данных ИКФС-2 над данными наземных измерений) соответствует измерениям на станции Мауна Лоа (строка 18), расположенной на вершине горы на острове на высоте 3307 м. Данные этой станции сравниваются с измерениями ИКФС-2

с пространственным разрешением 35 км в надир, отобранными в круге радиусом 70 км, т. е. по большей части над поверхностью океана. Это различие достаточно для появления заметной систематической разности. Максимальная отрицательная разность -3.5% для станции Cachoeira-Paulista (строка 21) не является статистически достоверной, т.к. получена всего на основе 24 измерений. Вместе с тем следующая по абсолютной величине разность для станции De Bilt (строка 8) не может быть связана с топографией местности и, вероятно, объясняется калибровкой наземного прибора. Максимальное стандартное отклонение разности (последний столбец) также соответствует станции Мауна Лоа (строка 18) и вызвано, по нашим предположениям, неоднородностью поверхности – частично гористая местность, частично – поверхность океана, следствием чего является различная толщина атмосферы и, соответственно, изменчивость ОСО.

Все прочие значения $СОР$ не превосходят 3%. Учитывая наличие погрешности в данных наземных измерений, можно заключить, что погрешность измерений ИКФС-2 не превосходит 3% для измерений вблизи всех рассмотренных озонметрических станций.

Как отмечено выше, в период полярной ночи как измерения спутниковыми приборами ТРОМОИ, ОМИ и аналогичными, так и наземными приборами по солнечному излучению, невозможны. Помимо подобных ИКФС-2 ИК-зондировщиков единственным источником данных об ОСО в этот период в полярных областях являются данные озонзондирования. Проанализируем, как с этими данными соотносятся результаты расчетов ОСО по нашей методике. Мы использовали данные озонзондирования, гармонизированные рабочей группой HEGIFTOM в рамках проекта TOAR-II [база данных HEGIFTOM]. База данных этого проекта на момент нашего к ней обращения 20.02.2024 содержала данные о 57 станциях озонзондирования в разной степени подготовки (гармонизации). Фактически готовы к использованию были данные 40 станций.

Для сопоставления отбирались измерения ИКФС-2 в круге с центром с координатами станции озонзондирования и радиусом 70 км и расогласованием измерений по времени в пределах 1 часа. Из-за особенностей траектории спутника круг радиусом около 150 км вокруг Южного полюса недоступен для измерений даже для полосы сканирования 1500 км. Поэтому для сопоставлений с данными этой станции использовались данные ИКФС-2 в круге радиусом 200 км, но даже при этом сравнения возможны только начиная с декабря 2020.

Как уже упоминалось ранее, для расчета ОСО на станциях озонзондирования использовались профили, полученные с помощью озонзондов, дополненные среднеклиматическими данными [WMO, 2021]. Поскольку максимальная достигнутая зондом высота случайна и ограничена разрывом баллона, верхняя граница измеренного профиля (ВГП) изменяется в широком диапазоне уровней атмосферного давления, от единиц до нескольких сотен гПа. Очевидно, точность расчета ОСО улучшается с достижением максимальной ВГП (минимального давления). Поэтому мы использовали только те измерения, в которых ВГП была выше уровня с давлением 10 гПа. Данные станций поставляются в различных форматах. 10 станций из рассмотренных нами использует формат, в котором представлено интегральное содержание озона в вертикальном

столбе только до ВГП. Остальные станции предоставляют ОСО, рассчитанное на основе данных озонзонда, дополненных сверху среднеклиматическими данными. Мы использовали для сравнения оба типа данных, поскольку, несмотря на большую абсолютную величину $СР$, величины $СОР$ для данных первого типа показывают удовлетворительное согласие с величинами ОСО по измерениям ИКФС-2. Поскольку количество данных таких станций невелико, их вклад в рост суммарной величины $СР$ также оказался незначительным.

$СОР$ данных ИКФС-2 и величин ОСО по данным озонзондирования составили для разных станций от 5.3 до 11% (17–33 е. Д.), осредненные по всем станциям величины $СР$ и $СОР$ составили 1.2 и 7.9%, что согласуется с неопределенностью полученного интегрального содержания озона в вертикальном столбе по данным озонзондирования.

Для качественного сопоставления в форме графического представления мы выбрали станции, которые предоставляют данные об ОСО и для которых как количество измерений за 2015–2022 гг., так и количество пар измерений озонзонд-ИКФС-2 превышают 100. Чтобы детальнее представить изменчивость озона, мы показываем не подобранные в пары значения результатов измерений, а осредненные в течение суток в круге с центром местоположения станции величины ОСО для ИКФС-2. Радиус этого круга для станции South Pole составляет 500 км, а для прочих станций — 70 км. Такая большая величина круга для станции South Pole выбрана, чтобы была возможность проанализировать измерения с ШПС 1000 км, которые из-за специфики орбиты спутника не могут быть получены ближе 400 км к Южному полюсу. Достаточно высокая однородность поверхности и атмосферы в этой области позволили использовать для сравнений фактически среднюю величину в кольце шириной 100 км с внутренним радиусом 400 км. Для данных озонзондирования показаны единичные измерения.

Такие качественные сопоставления были выполнены для станций, для которых а) были предоставлены данные об ОСО б) имелись измерения в достаточном количестве в период работы ИКФС-2 2015–2022 гг. Таких станций озонзондирования в базе данных HEGIFTOM нашлось 13, расположены они во всех широтных поясах. Сопоставления показали хорошее согласие результатов двух типов измерений, как по величине разброса значений, так и по самим величинам ОСО.

Для примера на рис. 1–3 показаны величины ОСО по данным радиозондирования и ИКФС-2 в

районе обоих полюсов и вблизи тропической зоны. Как говорилось выше, только часть озонозондов поднимается до уровня 10 гПа, что определяется, по-видимому, в первую очередь качеством баллона. Очевидно, что чем выше поднялся озонозond, тем точнее на основе данных его измерений может быть рассчитано ОСО. Поэтому мы выделили данные, полученные при подъеме зонда выше уровня 10 гПа.

Рис. 1 показывает, что в области Южного полюса между данными ИКФС-2 и данными озонозондирования наблюдается хорошее качественное согласие: в период декабрь-июль наблюдаются высокие значения ОСО, которые также сопровождаются относительно большой (и взаимно близкой) величиной изменчивости данных как ИКФС-2, так и зондов. При этом случайные различия между ними велики, что обусловлено большой изменчивостью величин ОСО. Вместе с тем в период уменьшения ОСО с июля по ноябрь его изменчивость хотя и увеличивается, но носит систематический характер (спад и затем рост), и данные ИКФС-2 и зондов хорошо взаимно согласованы. Отметим особенность – менее значительное, чем в другие годы, уменьшение ОСО весной 2019 г., зарегистрированное обоими типами измерений. Таким образом, ОСО ИКФС-2 в области Южного полюса хорошо качественно согласуется с данными озонозондов.

Рис. 2 показывает аналогичные сопоставления для наблюдательной станции Eureka, расположенной на 80° с.ш. Здесь, видимо, по каким-то техническим причинам, в период полярной ночи резко

уменьшается количество зондов, достигших уровня 10 гПа. Вместе с тем в тот же период наблюдается рост случайной изменчивости ОСО по данным обоих типов измерений, но тенденция роста ОСО согласованно сохраняется в течение всей полярной ночи. Отметим, что экстремально высокие величины ОСО в марте ряда лет согласованно наблюдаются по данным обоих типов измерений. Последующее весенне-летнее уменьшение ОСО также наблюдается согласованно для обоих типов измерений. Заключаем, что в высоких широтах Северного полушария также наблюдается хорошее качественное согласие двух типов измерений.

Рис. 3, на котором показано сопоставление для станции на острове Tenerife, также демонстрирует хорошее согласие как изменчивости величины ОСО, так и ее сезонного хода.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование ИНС, обученной на данных измерений в период 2015 — ноябрь 2020 с ШПС 1000 км, для получения ОСО из спектральных измерений ИКФС-2 в период декабрь 2020–2022 гг. с ШПС 1500 км показывает рост рассогласования от 2.7 до 3 и 3.3% при сопоставлениях с данными независимых наземных и спутниковых измерений, соответственно.
2. Указанный рост вызван в первую очередь расширением полосы сканирования, а не неадекватностью статистики изменчивости озона в 2015–2020 и 2021–2022 гг.

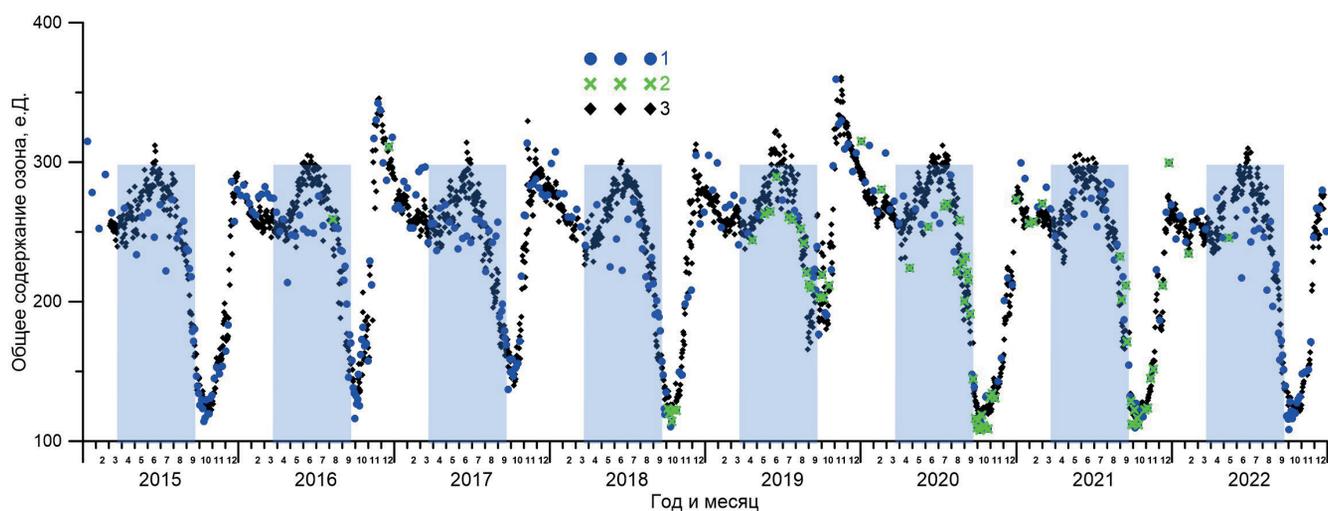


Рис. 1. ОСО по данным озонозондирования станции South Pole (Южный полюс) и среднесуточные ОСО ИКФС-2 в круге радиусом 500 км. Цветом выделены периоды полярной ночи. 1 — все озонозонды, 2 — озонозонды, достигшие уровня 10 гПа, 3 — ИКФС-2, среднесуточное в круге радиусом 500 км.

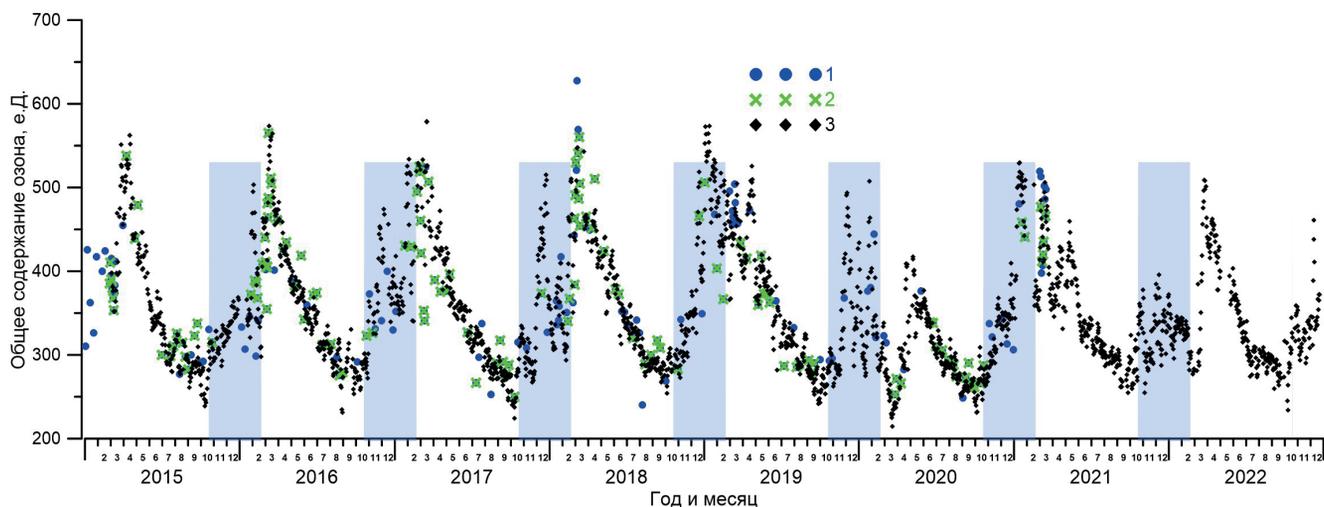


Рис. 2. ОСО по данным озонзондирования станции Eureka (80° с.ш.) и среднесуточные ОСО ИКФС-2 в круге радиусом 70 км. Цветом выделены периоды полярной ночи. 1-все озонзонды, 2 — озонзонды, достигшие уровня 10 гПа, 3 — ИКФС-2, среднесуточное в круге радиусом 70 км.

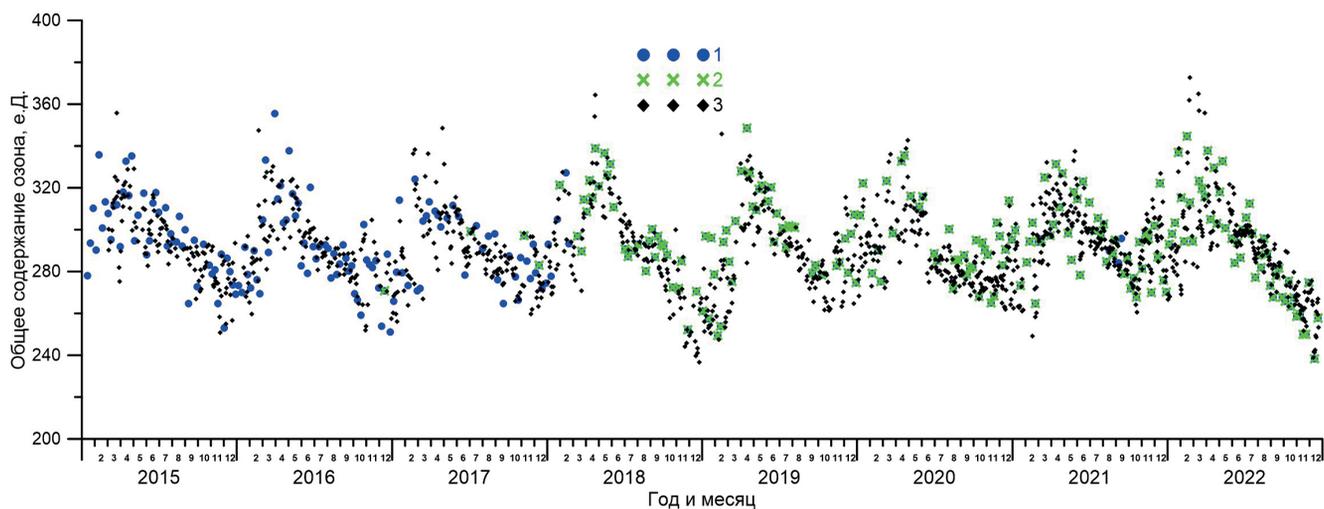


Рис. 3. ОСО по данным озонзондирования станции Tengerife (28° с.ш.) и среднесуточные ОСО ИКФС-2 в круге радиусом 70 км. 1 — все озонзонды, 2 — озонзонды, достигшие уровня 10 гПа, 3 — ИКФС-2, среднесуточное в круге радиусом 70 км.

3. После переобучения ИНС рассогласование с данными независимых измерений как за последние 2 года, так и за весь период измерений ИКФС-2, не ухудшилось по сравнению с периодом 2015–дек. 2020, что дает оценку погрешности данных ИКФС-2 не превышающую 3%.
4. Сопоставление изменчивости ОСО по данным ИКФС-2 с данными озонзондирования показало хорошее качественное согласие данных, полученных из двух независимых источников, в том числе, и в период полярной ночи.
5. Количественное сравнение результатов ИКФС-2 с данными озонзондирования так же проде-

монстрировало их хорошее согласие: средние разности составили 1.2%, а стандартные отклонения разностей 7.9%, что соответствует погрешностям измерения ОСО по данным озонзондирования.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 116234986.

Благодарим Центр обслуживания данных и информации GES DISC за предоставление доступа к данным TROPOMI и OMI, НИЦ «Планета» за предоставление доступа к результатам спектральных

измерений ИКФС-2, рабочую группу HEGIFTOM в рамках проекта TOAR-II за предоставление доступа к гармонизированным данным озонзондовых измерений.

Для определения времени полярной ночи мы воспользовались онлайн калькулятором начала и конца дня <https://planetcalc.ru/300/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев В.В., Баженов О.Е., Белан Б.Д., Варгин П.Н., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Куликов М.Ю., Невзоров А.В., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Розанов Е.В., Скороход А.И., Соломатникова А.А., Степанов Е.В., Тимофеев Ю.М., Фейгин А.М., Ходжер Т.В. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2019–2022 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 7. С. 1034–1060. doi: 10.31857/S0002351523070027.
- База данных озонзондирования. [Электронный ресурс]. URL: <https://hegiftom.meteo.be/> (дата обращения 20.02.2024)
- База данных спутниковых измерений озона. [Электронный ресурс]. URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 03.03.2024)
- Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 493–501. doi: 10.7868/S0003351517040079
- Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г., Козлов Д.А., Монахов Д.О., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С. Бортовые инфракрасные Фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25. doi: 10.7868/S0205961413060018.
- Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир, 1992. 236.
- Bernath P.F. The Atmospheric Chemistry Experiment (ACE). J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2017, V. 186. P. 3–16.
- Bertaux J.L., Mégie G., Widemann T., Chassefière E., Pellinen R., Kyrola E., Korpela S., Simon P. Monitoring of ozone trend by stellar occultations: the GOMOS instrument // Advances in Space Research. V. 11. № 3. 1991. P. 237–242. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(91\)90426-K](https://doi.org/10.1016/0273-1177(91)90426-K).
- Boynard A., Hurtmans D., Koukouli M.E., Goutail F., Bureau J., Safieddine S., Lerot C., Hadji-Lazaro J., Wespes C., Pommereau J.-P. Seven years of IASI ozone retrievals from FORLI: Validation with independent total column and vertical profile measurements // Atmos. Meas. Technol. 2016. 9. 4327–4353.
- Garane K., Koukouli M.-E., Verhoelst T., Lerot C., Heue K.-P., Fioletov V., Balis D., Bais A., Bazureau A., Dehn A. et al. TROPOMI/S5P total ozone column data: Global ground-based validation and consistency with other satellite missions // Atmos. Meas. Technol. 2019. V. 12. P. 5263–5287.
- GAW Report No. 201, Quality Assurance and Quality Control for Ozone Sonde Measurements in GAW. WMO. Geneva. 2014, 94 P. https://library.wmo.int/viewer/55131/download?file=gaw_201_en.pdf&type=pdf&navigator=1
- Glatthor N., von Clarmann T., Fischer H., Funke B., Gil-López S., Grabowski U., Höpfner M., Kellmann S., Linden A., López-Puertas M., Mengistu Tsidu G., Milz M., Steck T., Stiller G.P. and Wang D.-Y. Retrieval of stratospheric ozone profiles from MIPAS/ENVISAT limb emission spectra: a sensitivity study // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. № 10. 2767–2781. <https://doi.org/10.5194/acp-6-2767-2006>.
- Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C. and Coheur P.-F. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. 6041–6054. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>.
- Kerr J.B. New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra // J. Geogr. Res. 2002. V. 107. ACH 22-1–ACH 22-17.
- Kuttippurath J., Kumar P., Nair P.J., Chakraborty A. Accuracy of Satellite Total Columnzone Measurements in Polar Vortex Conditions: Comparison with Ground-Based Observations in 1979–2013 // Remote Sens. Environ. 2018. V. 209. P. 648–659.
- Lee K.A., Lay R.R., Jarnot R.F., Cofield R.E., Pickett H.M., Stek P.C., Flower D.A. Flower EOS Aura MLS: first year post-launch engineering assessment // Proc. SPIE 5882, Earth Observing Systems X, 2005. 58821D. <https://doi.org/10.1117/12.620130>
- Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Zeebe D.C.S., Duncan B.N., Streets D.G., Eskes H., van der A.R., et al. The Ozone Monitoring Instrument: Overview of 14 Years in Space. Atmos. Chem. Phys. 2018. 18. 5699–5745.
- McPeters R.D., Kroon M., Labow G., Brinksma E., Balis D., Petropavlovskikh I., Veefkind J.P., Bhartia P.K.,

- Levelt P.F.* Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument Total Column Ozone Product. *J. Geophys. Res.* 2008, 113, D15S14.
- McPeters R.D., Frith S. and Labow G.J.* OMI Total Column Ozone: Extending the Long-Term Data Record // *Atmospheric Measurement Techniques* 2015. V. 8 № 11. P. 4845–4850. doi:10.5194/amt-8-4845-2015.
- OMI DATA https://aura.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/Aura_OMI_Level2/OMTO3.003/ доступ: 25 Апреля 2023 г.
- Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G., Timofeyev Y., Solomatnikova A.* Total ozone measurements using IKFS-2 spectrometer aboard Meteor-M N2 satellite in 2019–2020 // *International Journal of Remote Sensing*. 2021. V. 42. № 22. P. 8709–8733. doi: 10.1080/01431161.2021.1985741
- Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G., Kozlov D., Timofeyev Y.* Six Years of IKFS-2 Global Ozone Total Column Measurements // *Remote Sens.* 2023. V. 15. № 9. 2481. <https://doi.org/10.3390/rs15092481>
- TOAR-II HEGIFTOM: Description of homogenized ozonesonde free-tropospheric ozone time series (<https://hegiftom.meteo.be/>)
- TROPOMI DATA Copernicus Sentinel data processed by ESA, German Aerospace Center (DLR) (2020), Sentinel-5P TROPOMI Total Ozone Column 1-Orbit L2 5.5km × 3.5km, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), доступ: 05 марта 2024, 10.5270/S5P-fqouvyz
- Veefkind J.P., Aben I., McMullan K., Förster H., De Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H.J., De Haan J.F., Kleipool Q. et al.* TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES Mission for Global Observations of the Atmospheric Composition for Climate, Air Quality and Ozone Layer Applications // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 120. P. 70–83.
- WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- WMO/GAW Ozone Monitoring Community, World Meteorological Organization-Global Atmosphere Watch Program (WMO-GAW)/World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC) Total Ozone - Hourly Observations. Retrieved March 17, 2024, from <https://woudc.org>. A list of all contributors is available on the website. doi:10.14287/10000001
- WMO, Ozonesonde Measurements Principles and Best Operational Practices – GAW Report No. 268, 2021 <https://library.wmo.int/records/item/57720-ozonesonde-measurement-principles-and-best-operational-practices>
- WMO, Ozone Research and Monitoring – GAW Report No. 278, 2022 <https://library.wmo.int/viewer/58360/download?file=2022OzoneAssessment.pdf&type=pdf&navigator=1>
- WMO, State of the Global Climate 2023, 2023 <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023>

DETERMINATION OF TOTAL OZONE COLUMN FROM SPECTRAL MEASUREMENTS OF IKFS-2 DURING 2015–2022.

A. V. Polyakov^{1,*}, E. P. Kriukovskikh^{1,**}, Ya. M. Virolainen^{1,***}, G. M. Nerobelov^{1,2,3,****},
D. A. Kozlov^{4,*****}, Yu. M. Timofeyev^{1,*****}

¹*St Petersburg University, 7–9 Universitetskaya Embankment, St Petersburg, Russia, 199034*

²*SPC RAS - Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, Korpusnaya 18, St Petersburg, Russia, 187110*

³*Russian State Hydrometeorological University, Malohtinskii prospect 98, Saint-Petersburg, Russia, 195196*

⁴*Keldysh Research Center, 8, Onezhskaya Str., Moscow, 125438, Russia*

*e-mail: *a.v.polyakov@spbu.ru, **kriukovskikh1967@mail.ru, ***yana.virolainen@spbu.ru,
****akulische95@mail.ru, *****dakozlov@kerc.msk.ru, *****y.timofeev@spbu.ru*

The results of determining the ozone total column (OTC) from the spectra of the outgoing thermal infrared radiation measured by the IKFS-2 instrument from the “Meteor-M” No. 2 spacecraft during 8 years of measurements are presented. The previously developed methodology for the interpretation of spectral measurements made in 2015–2020 with a scanning bandwidth (SBW) of 1000 km is applied to the measurements in 2021–2022 with SBW of 1500 km. It is shown that the observed increase in the differences between the IKFS-2 data and the results of independent measurements is caused not by the expansion of the OTC variability statistics, but by the increase in the range of scanning angle variation. After finalization of the methodology for the measurements with a 1500–km SBW, the comparison with independent data showed that the standard deviations of differences with the results of ground and satellite measurements for all 8 years do not exceed 3% and did not increase compared to the first 6 years of measurements. To analyze the results in the polar regions, the OTC values obtained from the IKFS-2 spectra are compared with the ozonesonde data, which are performed continuously throughout the year, including the polar night. A good qualitative agreement of the IKFS-2 data and ozone sounding data, including winter-spring periods of extreme OTC decrease at high latitudes of both hemispheres, is shown. The standard deviations of the differences between the IKFS-2 data and the OTC values from ozone sounding data were from 5.3 to 11 % (17–33 D.U.) for different stations, or on average for all stations 7.9 %, which is consistent with the uncertainty of the estimates of the integrated ozone content in the vertical column from ozonesonde data.

Keywords: remote sensing of the atmosphere, atmospheric ozone, IKFS-2, ozone total column