

Валидация измерений общего содержания озона с российского спутника «Арктика-М»

А. В. Поляков¹, Ю. М. Тимофеев¹, В. Д. Блощинский², П. М. Неробелов^{1,3},
Ю. А. Шапилова², А. В. Бородинская², Г. М. Неробелов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: a.v.polyakov@spbu.ru

² Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: v.bloshchinsky@dvrpod.ru

³ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия

Результаты определения общего содержания озона (ОСО) в вертикальном столбе атмосферы, полученные с помощью измерений прибором МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения) с борта российского космического аппарата «Арктика-М», сравниваются с независимыми данными. Для сравнения используются данные как наземных измерений приборами Добсона и Брюера, представленные на сайте Всемирного центра данных по озону и ультрафиолетовому излучению WOUDC (англ. World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre), Канада, так и спутниковых измерений прибором TROPOMI (англ. TROPOspheric Monitoring Instrument) с борта спутника Sentinel-5P (англ. Sentinel-5 Precursor). Исследование охватывает период с марта 2023 по октябрь 2024 г. и область севернее 50° с. ш. Данные прибора МСУ-ГС предварительно осреднены по интервалам 1 ч. Сравнение с результатами единичных наземных измерений показало, что средняя разность (СР) двух типов измерений не превышает 8 % по абсолютной величине, а стандартное отклонение разности (СОП) — 6,7 %. Причём отметим, что для трёх полярных (за полярным кругом) наблюдательных станций СР не превышает 1,1 %, а СОП менее 6,3 %. Среднедневные (осреднённые за день) результаты измерений МСУ-ГС были сопоставлены со среднедневными данными наземных станций. Для этого сопоставления СР по абсолютной величине оказалась не более 8,2 %, а СОП не превосходит 7,7 %. Сравнения с данными единичных измерений прибора TROPOMI показали СР 0,2 % при СОП 6 %. Значимого сезонного и широтного хода разности не обнаружено. Приведены примеры полученного с помощью МСУ-ГС распределения ОСО в околополярной области в сопоставлении с данными TROPOMI, показано удовлетворительное качественное согласие данных двух приборов.

Ключевые слова: атмосферный озон, «Арктика-М», МСУ-ГС, озон в Арктике

Одобрена к печати: 05.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-47-58

Введение

Озон является одной из важнейших газовых составляющих земной атмосферы, что обусловлено поглощением опасного ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца в стратосфере, вкладом в радиационный баланс планеты и его ролью загрязнителя в тропосфере (<https://wmo.int/ru/resources/magazines/vol-67-2-2018>, <https://cs1.noaa.gov/assessments/ozone/2018/>). Это обстоятельство привело к необходимости создания глобальной системы мониторинга озона, состоящей из наземной, самолётной, аэростатной и спутниковой подсистем (Тимофеев, Неробелов, 2024; Тимофеев и др., 2025a; Hassler et al., 2014).

Спутниковая подсистема использует различные типы орбит (полярные, геостационарные, высокоэллиптические и орбиту Международной космической станции), разнообразные дистанционные методы измерений и разные типы приборов, позволяющие осуществлять дистанционный глобальный и региональный мониторинг озона.

Один из таких приборов — радиометр МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения), устанавливаемый на геостационарных косми-

ческих аппаратах (КА) серии «Электро-Л» и высокоэллиптических спутниках «Арктика-М». Аппаратура МСУ-ГС предназначена для определения различных параметров атмосферы и поверхности и в том числе общего содержания озона (ОСО) с горизонтальным разрешением 4 км и периодичностью до 15 мин (Асмус и др., 2021). Примеры сравнения с независимыми измерениями ОСО, анализа и использования аппаратуры МСУ-ГС для мониторинга озоносферы приведены, например, в работах (Блощинский и др., 2022; Тимофеев и др., 2025б). Это сравнение показало, что мониторинг ОСО в Арктике с помощью радиометров МСУ-ГС на российских высокоэллиптических спутниках серии «Арктика-М» позволяет получать ценную информацию о состоянии озоносферы. Измерения ОСО прибором МСУ-ГС с погрешностью 5–8 % и высоким пространственным и временным разрешением дают возможность исследовать регулярно возникающие «озоновые дыры» — аномалии содержания озона, достигающие 50 % и более и приводящие к опасному увеличению солнечного УФ-облучения поверхности (Bernhard et al., 2020; Dameris et al., 2021; Pommereau et al., 2018; Wohltmann et al., 2020).

Так, в цитируемых работах показано, что, например, в конце зимы и весной 2020 г. в полярных районах Северного полушария наблюдалась аномалия содержания озона менее 220 е.Д. (единиц Добсона) на площадях, достигающих 0,9 млн км² (Dameris et al., 2021). Резкое необычное падение содержания озона в марте и апреле 2020 г. в Арктике привело к рекордному увеличению УФ-излучения, доходящего до поверхности, превышающему результаты предыдущих измерений более чем на 75 % в течение нескольких дней (Bernhard et al., 2020; Wohltmann et al., 2020). Измерения МСУ-ГС высокого пространственного и временного разрешения позволяют осуществлять исследования и прогноз подобных аномалий ОСО в Арктике.

Спутниковые измерения общего содержания озона МСУ-ГС на аппарате «Арктика-М»

Прибор МСУ-ГС позволяет измерять уходящее излучение всего диска Земли в видимом (3 канала с пространственным разрешением 1 км) и инфракрасном (ИК) (7 каналов с разрешением 4 км) диапазонах спектра. Три ИК-канала прибора (8,2–9,2; 9,2–10,2 и 10,2–11,2 мкм), средний из которых включает полосу поглощения озона вблизи 9,6 мкм, несут информацию об ОСО (Крамчанинова, Успенский, 2013).

Анализируемый в настоящей работе метод определения ОСО (Блощинский и др., 2022) основан на использовании результатов измерения яркостной температуры уходящего излучения, регистрируемой в трёх ИК-каналах прибора МСУ-ГС, и применении полносвязной искусственной нейронной сети. Искусственная нейронная сеть решает регрессионную задачу вычисления значений ОСО, а её архитектура построена по типу многослойных перцептронов и имеет три скрытых слоя. В качестве входных данных искусственной нейронной сети помимо измеренной яркостной температуры используются данные о параметрах атмосферы из известной модели прогноза GFS NCEP (*англ.* Global Forecast System National Centers for Environmental Prediction) с разрешением 0,25° (профиль температуры на 31 уровне до давления 1 гПа от приземного давления), величины зенитного угла Солнца и зенитного угла спутника. Для обучения искусственной нейронной сети применялись данные измерений прибора OMPS (*англ.* Ozone Mapping and Profiler Suite) на борту КА Suomi NPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership).

Разработанная методика определения ОСО по данным МСУ-ГС позволяет получать его значения в области освещённой Солнцем безоблачной атмосферы. Валидация результатов на ограниченном объёме данных проводилась по данным наземных озонметрических станций, полученным из базы данных WOUDC (*англ.* World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) и AERONET (*англ.* AErosol RObotic NETwork). Сравнения ОСО по измерениям МСУ-ГС (Блощинский и др., 2022; Тимофеев и др., 2025б) с независимыми наземными и спутниковыми измерениями показали среднюю разность (СР) в 3–8 % разных знаков и стандартное отклонение разности (СОР) в диапазоне от 4 до 8 %.

В настоящей работе мы рассматриваем измерения МСУ-ГС с борта КА серии «Арктика-М», выполненные за 170 дней в периоды март–сентябрь 2023 и март–октябрь 2024 г. Были получены величины ОСО в различные дни в периоды с 13 марта по 15 сентября 2023 и с 13 марта по 2 октября 2024 г., всего 170 дней.

Общее количество измерений (осреднённых по периоду 1 ч) составляет около $4,5 \cdot 10^9$. Для получения усреднённых значений за каждый час суток отбирались три измерения: центральное измерение, выполненное ровно в заданный час, и два дополнительных, выполненных с интервалом ± 15 мин относительно центрального времени (в соответствии с временным разрешением прибора МСУ-ГС). Усреднение проводилось исключительно по временному признаку, при этом пространственное разрешение соответствует разрешению ИК-каналов (4 км в надире). Процедура усреднения применялась только к безоблачным пикселям, для которых были получены значения ОСО по трём измерениям в течение часа. Отметим, что современные требования к погрешности определения ОСО очень разнятся в зависимости от рассматриваемой задачи. Например, при исследованиях в области атмосферной химии требуются погрешности 1–3 %, а в задачах климатического мониторинга ОСО необходимо измерять глобально с погрешностями от 5 до 15 % (три уровня требований) (WMO 2026, <https://space.oscar.wmo.int/observingrequirements>) (англ. World Meteorological Organization — Всемирная метеорологическая организация).

Независимые данные об общем содержании озона, использованные для сравнения

В настоящей работе анализируются результаты сравнений измерений ОСО прибором МСУ-ГС с данными наземных измерений приборами Добсона, Брюера и озонметра М-124 (WOUDC) и данными спутниковых измерений прибором TROPOMI (англ. TROPOspheric Monitoring Instrument) (<https://www.tropomi.eu/data-products/ozone-total-column>).

Приборы Добсона и Брюера фактически являются эталонными приборами и используются в систематических калибровках и валидации различных методов измерений ОСО и приборов. Сами эти инструменты периодически калибруются по эталонам. Оценки их суммарных погрешностей около 1 % (при использовании прямого солнечного излучения) и 2 % (при применении измерений рассеянного солнечного излучения в зените) (Шаламянский, 1993; Garane et al., 2019; Stübi et al., 2021; Voglmeier et al., 2024), или, согласно исследованию (Kerr, 2002), точность таких измерений для приборов Добсона и Брюера составляет 1–2 %.

Мониторинг состояния озонового слоя над территорией России осуществляется с помощью фильтрового озонметра М-124. Эти озонметры эксплуатируются начиная с 1983 г. и продолжают работать в настоящее время. Измерения ОСО выполняются методами «по прямому Солнцу» и по рассеянному излучению «из зенита небесной сферы». Измерения могут проводиться до зенитных углов Солнца в 85° . Многолетние измерения с помощью озонметра М-124 показали, что погрешность единичного измерения ОСО не превышает 5–8 %, а погрешность определения среднего за день значения ОСО составляет 3–4 % (Шаламянский, 1993).

Прибор TROPOMI на борту спутника S5P (англ. Sentinel-5 Precursor) измеряет ОСО с пространственным разрешением от $3,5 \times 7$ до $3,5 \times 5,5$ км. При сопоставлении с наземными данными измерений приборами Брюера и Добсона СР составляла от 0 до 1,5 %, а стандартное отклонение этой разности (COP) — от 2,5 до 4,5 % (Garane et al., 2019). В настоящей работе использованы измерения TROPOMI уровня 2 (идентификатор L2_O3____, OFFL (англ. offline) и RPRO (англ. reprocessing) на момент получения данных в марте 2025 г.), т.е. результаты единичных измерений, с флагом качества не менее 0,9 (<https://www.tropomi.eu/data-products/ozone-total-column>).

Наземные и спутниковые измерения в зависимости от метеорологических и прочих условий (наличие прямого солнечного излучения, облаков, качество работы аппаратуры) позволяют измерять ОСО в разное время в течение дня. Мы использовали результаты измерений наземными приборами только по прямому Солнцу, данные МСУ-ГС — в силу особенностей

методики интерпретации — также были получены в течение светового дня и при отсутствии облачности. Число измерений в сутки, время измерений и их продолжительность различными приборами существенно варьируются в разные дни, как и периодичность измерений.

Сравнение общего содержания озона по данным МСУ-ГС с результатами наземных измерений

Сравнение с единичными измерениями

Большинство наземных станций озонометрической сети поставляет в центр WOUDC только осреднённые за день значения ОСО, но некоторые из станций также передают и результаты каждого отдельного измерения. В рассматриваемый период и широтную зону таких станций было восемь (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение результатов измерений ОСО прибором МСУ-ГС с данными озонометрических станций широтного пояса 50,4–82,4° с. ш.

Название	Широта	Долгота	Количество	Разность, %	
				СР	СОР
Alert	82,4°	–62,5°	554 387	1,1	6,3
Eureka	80,0°	–86,0°	350 787	0,5	5,9
Resolute	74,7°	–95,0°	130 250	0,3	5,7
Churchill	58,7°	–94,1°	38 508	–7,9	6,5
Edmonton	53,5°	–114,1°	80 578	–6,2	7,1
Goose Bay	53,3°	60,4°	42 211	–5,5	7,2
De Bilt	52,1°	5,2°	3 719	–6,8	6,7
«Киев-Голосеев»	50,4°	30,5°	286	4,4	4,9
Итого	—	—	1 200 726	–0,3	6,7

Все станции, данные которых представлены в табл. 1, оборудованы приборами Брюера, за единственным исключением «Киев-Голосеев», на которой установлен прибор Добсона. Как видно из таблицы, для разных станций СР колеблется от –7,9 до +4,4 %, а СОР от 4,9 до 7,2 %. Средняя величина по всем станциям составила –0,3 для СР и 6,7 для СОР. Отметим малую величину СР для полярных станций (выделены серым цветом в табл. 1), расположенных в области за полярным кругом, представляющей наибольший интерес с точки зрения наблюдения озона. Также отметим близость к нулю средней разности, т. е. хорошую в среднем калибровку получаемых с КА «Арктика-М» величин ОСО.

Сравнение со средненежными значениями общего содержания озона

В этом сравнении данные КА «Арктика-М» осреднялись за сутки и в пространственном квадрате размером 0,1° по широте и долготе. Сопоставление осуществлялось со средненежными значениями ОСО по данным станций, удалённых от центров указанных квадратов не более чем на 10 км. Указанные данные представлены на сайте WOUDC и получены по результатам измерений приборов Добсона и Брюера, за исключением двух станций («Мурманск» и «Самара») озонометра М-124. В табл. 2 приведены результаты сравнения только для станций, с которыми удалось подобрать более 50 пар измерений двух типов.

Сопоставление средненежных данных МСУ-ГС с измерениями приборов Добсона и Брюера показали СР от –7,9 до 8,2 %, СОР — от 4,5 до 7,6 %. Сравнение с измерениями в Мурманске, Архангельске и Самаре демонстрирует практически такие же расхождения

между спутниковыми и наземными данными, хотя можно было бы ожидать их увеличения по сравнению с эталонными приборами за счёт больших погрешностей М-124. Заметной разницы в различиях между единичным сравнением и среднедневным также не наблюдается, хотя за счёт усреднения измерений при оценке среднедневных значений можно было ожидать их уменьшения. Так же как и для сравнения единичных данных, СР полярных станций невелика и не превосходит 4,3 % по абсолютной величине, исключая Sondrestrom, находящийся фактически непосредственно на линии Северного полярного круга. Среднее СОР вместе с тем незначительно возросло при сопоставлении со сравнением единичных измерений, что может объясняться некоторым рассогласованием времени измерений — не всегда как наземные, так и спутниковые данные представляют полный световой день, некоторые данные при расчёте среднедневных по разным причинам могут отсутствовать. Интересно сопоставить значения СОР и естественной изменчивости ОСО, представленные в двух последних столбцах *табл. 2*. Для трёх станций, наиболее высокоширотных из представленных в этой таблице, неопределённость в знании величины ОСО в результате измерений уменьшается в 2–3 раза. Для остальных станций понижение неопределённости величины ОСО не так велико, но наблюдается повсюду, исключая станцию в Самаре, на которой используется М-124, погрешности которого всё же выше, чем других приборов, использованных для сравнения, и измерения выполняются в ручном режиме, что не повышает их точность.

Таблица 2. Сравнения измерений ОСО прибором МСУ-ГС с измерениями станций широтного пояса 50,2–71,3° с. ш.

Станция	Широта	Долгота	Количество	Прибор	Разность, %		Изменчивость ОСО, %
					СР	СОР	
Barrow (AK)	71,3	–156,6	181	D	3,6	6,5	12,6
Andøya	69,3	16,0	648	B	–1,4	5,6	14,2
«Мурманск»	69	33,0	128	F	4,5	4,5	14,2
Sondrestrom	67	–50,9	99	B	8,2	5,8	6,8
Fairbanks (AK)	64,8	–147,9	204	D	0,5	7,1	12,8
«Архангельск»	64,6	40,6	96	F	4,4	4,8	7,5
Vindeln	64,2	19,8	231	B	0,6	5,9	10,3
Reykjavik	64,1	–21,9	709	B	–1,0	7,1	9,7
Lerwick	60,1	–1,2	105	D	–1,7	6,9	13,0
Oslo	59,9	11,0	472	B	–3,7	6,3	12,9
Kaunas	54,9	23,8	399	B	–7,3	6,5	11,2
«Самара»	53,2	50,2	84	F	–0,6	6,7	6,6
De Bilt	52,1	5,2	136	B	–7,9	7,7	9,3
Belsk	51,8	20,8	725	B	–3,8	6,4	10,3
Hradec Králové	50,2	15,8	818	B	–7,3	7,3	10,7
Итого	—	—	5181	—	–2,7	7,6	12,3

Примечание: В — Брюер (*англ.* Brewer), D — Добсон (*англ.* Dobson), F — озонометр (М-124).

Сравнения со спутниковыми измерениями TROPOMI

Измерения МСУ-ГС и TROPOMI для сравнения подбирались с рассогласованием по времени 0,5 ч и по пространству 5 км. По всему объёму данных МСУ-ГС ($4,5 \cdot 10^9$ значений) было подобрано для сравнения также около $4,5 \cdot 10^9$ пар измерений (совпадение с количеством данных МСУ-ГС случайно, с некоторыми измерениями МСУ-ГС сравнивалось несколько

измерений TROPOMI, удовлетворяющих критериям отбора, и с некоторыми измерениями TROPOMI сравнивалось несколько измерений МСУ-ГС, удовлетворяющих критериям отбора). В среднем СР составила 0,4 %, а СОР — 6,0 %. В разные дни СОР меняется от 16,9 до 28,0 е.Д. (от 4,0 до 6,6 %), СР колеблется от –21,8 до +12,6 е.Д. (от –2,4 до 7,9 %).

Изменчивость расхождения для различных дат демонстрирует *табл. 3*. Поясним, что по техническим причинам из-за большого объёма данные измерений МСУ-ГС для обработки были сгруппированы по отдельным периодам. В первом столбце *табл. 3* эти периоды проиндексированы цифрами и буквами, всего 14 периодов.

Таблица 3. Сравнения с TROPOMI: единичные измерения

Номер файла	Начало	Конец	Количество пар	МСУ-ГС минус TROPOMI			
	ГГ/ММ/ДД:ЧЧ			СР		СОР	
				%	е.Д.	%	е.Д.
0	23/03/13:06	23/04/23:16	222 443 248	2,0	7,3	6,6	28,1
1	23/04/23:17	23/06/26:23	285 363 849	7,9	28,4	6,4	22,8
2	23/06/27:00	23/07/26:13	414 851 302	6,2	19,2	4,8	14,8
3	23/07/26:21	24/04/06:06	219 481 821	1,5	3,4	6,3	21,0
4	24/04/06:07	24/04/29:04	279 713 208	−0,4	−1,8	4,8	21,2
5	24/04/29:05	24/05/23:08	248 854 702	−1,3	−5,9	5,2	21,9
6	24/05/23:09	24/06/08:08	326 731 014	−2,3	−9,3	5,1	20,2
7	24/06/08:09	24/06/17:04	438 734 564	−1,5	−6,3	5,0	19,0
8	24/06/17:05	24/06/30:18	406 748 942	−2,4	−9,1	4,4	16,0
9	24/06/30:19	24/07/12:16	434 840 448	−1,1	−4,3	4,0	14,0
A	24/07/12:17	24/07/25:19	342 936 442	0	−0,5	4,4	14,9
B	24/07/25:20	24/08/08:10	418 668 859	0,3	0,7	4,9	15,8
C	24/08/08:11	24/09/02:15	302 435 672	−0,8	−2,6	5,7	17,9
D	24/09/02:16	24/10/02:14	211 099 658	−1,1	−3,6	6,3	20,3
E	24/10/02:15	24/10/02:23	5 149 909	6,1	20,5	9,3	31,6
Все	23/03/13:06	24/10/02:23	4 558 053 504	0,2	0,8	6,0	21,0

Из *табл. 3* можно видеть, что СР достигает максимальных значений до 28,4 е.Д. или 6,4 % весной и в начале лета 2023 г. (*табл. 3*, строки 1 и 2), а также в октябре 2024 г. — 20,5 е.Д. или 6 % (*табл. 3*, строка E). Но стоит отметить, что последняя величина получена за очень ограниченный период времени (8 ч в октябре), в отличие от прочих приведённых в таблице периодов, а количество сопоставлений в период E на два порядка меньше, чем в любой из периодов 1–D, что делает эту величину статистически значительно менее достоверной, чем СР в прочие периоды. Изменчивость характеристик разности в различные периоды составляет (в %): СР — от –2,4 до 7,9, СОР — от 4,0 до 9,3; и (в абсолютных значениях): СР — от –9,3 до 28,4 е.Д., СОР — от 14,0 до 28,1 е.Д.

Большое количество сравнений результатов измерений МСУ-ГС и TROPOMI позволило нам проанализировать широтную (севернее 50° с. ш.) и сезонную (с марта по октябрь) зависимости разностей. Результаты представлены в *табл. 4* и *5*.

Как видно из *табл. 4*, замечен рост значений СР как абсолютных, так и относительных, весной и осенью относительно летних месяцев. Для СОР можно отметить снижение значений в конце лета.

Таблица 5 показывает снижение СР в широтном поясе 70–80° с. ш. практически до нуля, при достаточно стабильной величине СОР, около 6 %. Отметим малость средней разности, что говорит о хорошей абсолютной калибровке метода измерения ОСО с КА «Арктика-М».

Таблица 4. Сравнение с TROPOMI: единичные измерения, разность по месяцам

Месяц	СР		COP	
	%	е. Д.	%	е. Д.
Март	–1,2	–7,0	6,3	26,8
Апрель	1,6	6,2	6,0	25,4
Май	–1,0	–4,3	6,0	24,2
Июнь	–0,2	–1,5	6,4	22,5
Июль	1,6	4,5	5,4	17,6
Август	0,1	–0,2	5,7	17,6
Сентябрь	–1,0	–3,5	6,1	19,8
Октябрь	2,9	9,3	9,0	29,1

Таблица 5. Сравнение с TROPOMI: единичные измерения, разность по широтным поясам

с. ш.	СР		COP	
	%	е. Д.	%	е. Д.
50–60°	–0,81	–3,66	5,43	20,23
60–70°	–0,78	–3,75	6,08	22,49
70–80°	0,29	0,20	6,20	22,06
80–90°	1,60	5,33	5,66	19,83

Примеры качественных сравнений

На рис. 1 показаны СР (слева) и COP (справа) по результатам сопоставления измерений МСУ-ГС и TROPOMI.

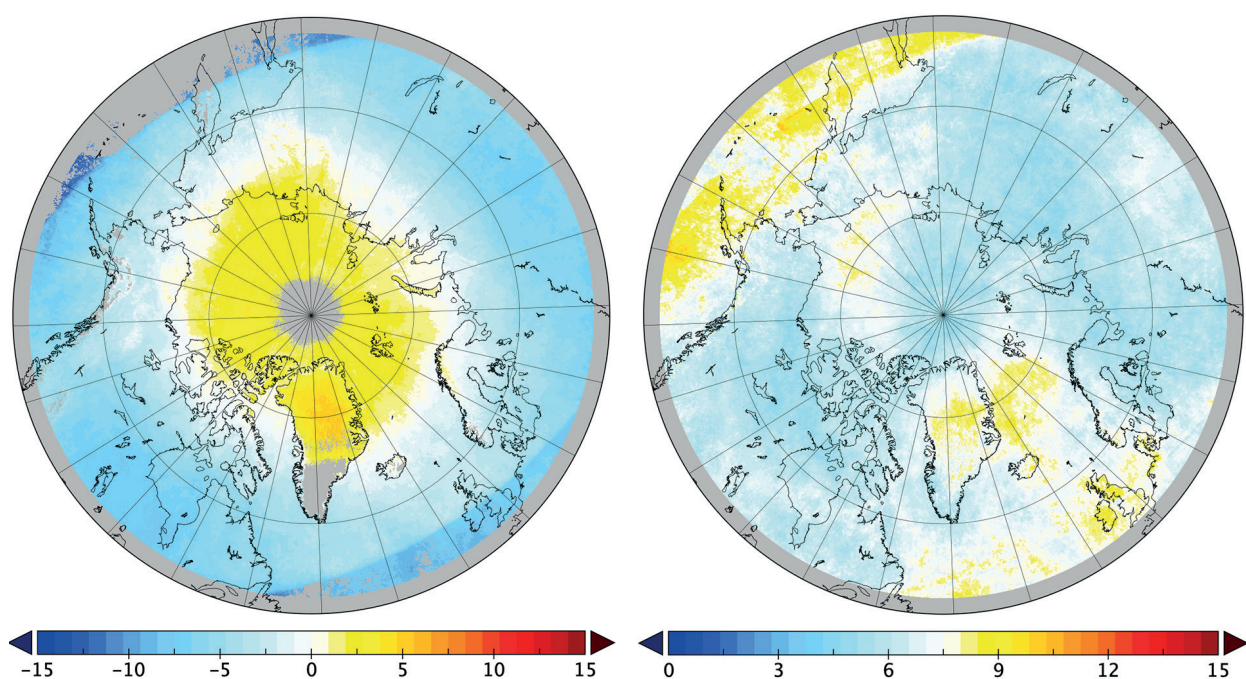


Рис. 1. Сравнение данных МСУ-ГС с TROPOMI. Среднедневные, осреднение по сетке $0,1 \times 0,1^\circ$; СР (слева) и COP (справа) по всем данным

Как можно видеть, СР вблизи полюса в круге приблизительно до 70° с. ш. положительна (данные КА «Арктика-М» больше) и близка к 2–3 %, а южнее Северного полярного круга становится отрицательной, достигая –5 % и менее. Разброс разности — СОР — в правой части *рис. 1* колеблется в пределах 6–9 %, причём остаётся в пределах 6 % над большей частью территории России и Северной Америки. Более высокие — до 9 % — значения наблюдаются над водами Атлантического и Тихого океанов.

Рисунки 2 и 3 показывают ОСО по данным TROPOMI в левой своей части и разность между данными МСУ-ГС и TROPOMI в правой в течение одного дня с относительно низким (см. *рис. 2.*) и высоким (см. *рис. 3.*) ОСО, 28 августа 2023 и 21 марта 2024 г. соответственно.

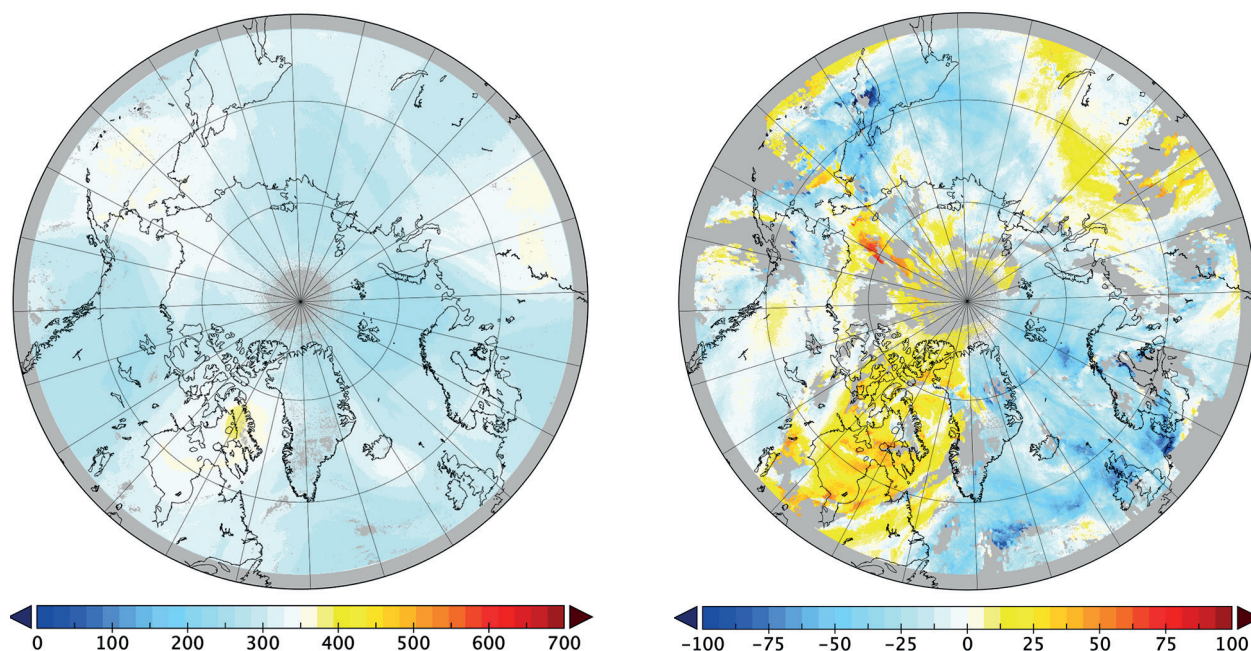


Рис. 2. Сравнение данных КА «Арктика-М» и TROPOMI в день с низким содержанием озона; ОСО (слева) и СР (справа), средние за день 28 марта 2023 г.

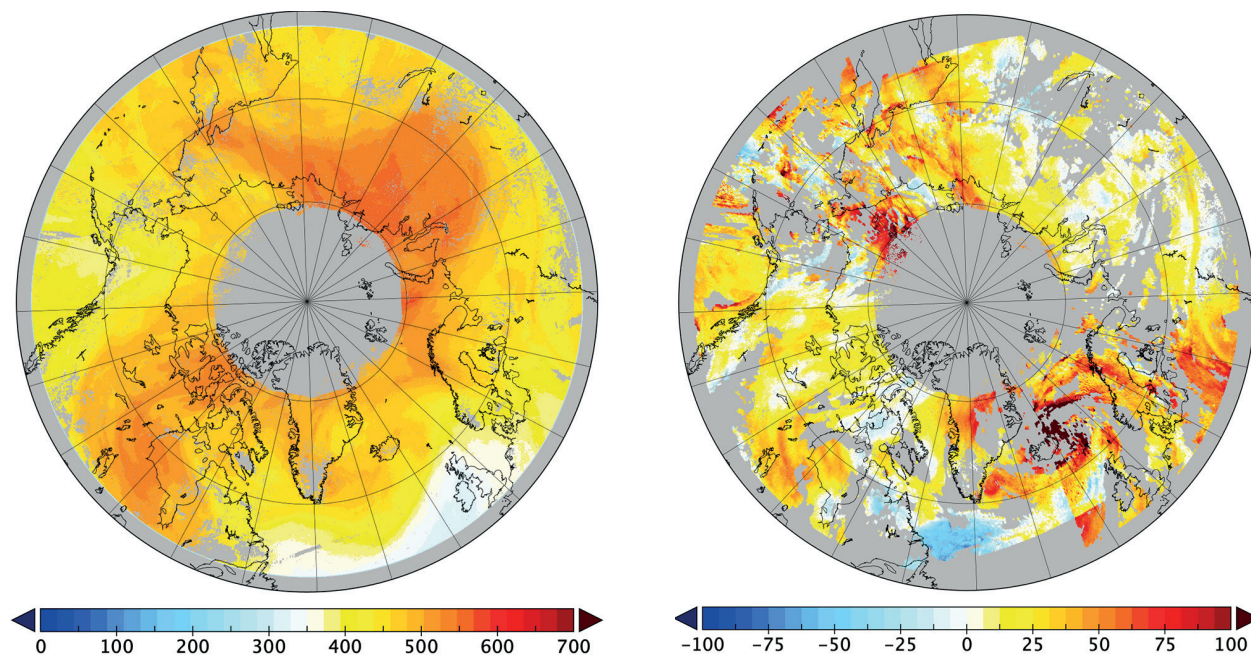


Рис. 3. Сравнение данных КА «Арктика-М» и TROPOMI в день с высоким содержанием озона; ОСО (слева) и СР (справа), средние за день 21 августа 2024 г.

Из *рис. 2* видно, что, хотя в сравнении с TROPOMI прибор МСУ-ГС на первый взгляд завышает вариации ОСО, т.е. занижает сами значения ещё больше при малом ОСО, на самом деле картина сложнее. Так, в левой части *рис. 2*, где значения ОСО относительно невелики, их разность, показанная в правой части рисунка, преимущественно отрицательна, но не везде: напротив, в областях наиболее малых ОСО над Гренландией и Сибирью эта разность положительна. Так что нельзя сделать однозначного вывода о превышении тех или иных данных. Вместе с тем *рис. 3*, в левой части которого показаны высокие значения ОСО до 500 е.Д. и более, в правой своей части демонстрирует почти исключительно положительную разность, до 50 е.Д. и более, т.е. подтверждает тезис о превышении в данных МСУ-ГС изменчивости ОСО в сравнении с TROPOMI. Несмотря на это, как можно видеть из последней строки *табл. 3*, в среднем данные МСУ-ГС и TROPOMI практически взаимно не смещены.

Заключение

Содержание озона является одним из важнейших параметров земной атмосферы, регулярный глобальный и региональный мониторинг которого осуществляется в настоящее время различными локальными и дистанционными методами. Спутниковые методы определения общего содержания озона позволяют контролировать состояние озоносферы и УФ-освещённость поверхности, в том числе в полярных районах, где периодически наблюдаются существенные аномалии общего содержания озона. Важным элементом глобального мониторинга ОСО служат высокоэллиптические КА серии «Арктика-М», устанавливаемые на которых сканеры МСУ-ГС позволяют определять ОСО в безоблачных условиях с высоким пространственным (4 км) и временным разрешением (15 мин). Проведено сравнение измерений ОСО прибором МСУ-ГС, осреднённых в течение часа, с различными наземными измерениями (в том числе с эталонными приборами Добсона и Брюера) и спутниковыми измерениями TROPOMI. Показано, что средняя разность и стандартное отклонение разности осреднённых результатов измерения МСУ-ГС и единичных измерений других приборов изменяются в широком диапазоне от 3–4 до 8 %, что позволяет использовать данные МСУ-ГС для обнаружения и изучения аномалий ОСО (озонные дыры) в Арктике. При этом информативность измерений МСУ-ГС позволяет снизить априорную неопределённость ОСО в среднем ~2 раза, наиболее эффективно в высокоширотных областях за полярным кругом. Показано хорошее согласие средних значений ОСО по данным МСУ-ГС и результатам независимых измерений, в среднем 0,2 % в сравнении с данными TROPOMI и 2,7 % в сравнении с данными наземных измерений.

Данные наземных измерений ОСО предоставлены в свободном доступе «Сообществом мониторинга озона», WMO — Программа глобального мониторинга атмосферы WMO GAW (*англ.* Global Atmosphere Watch)/Всемирный центр данных по озону и ультрафиолетовому излучению (WOUDC); получены 21 августа 2025 г. с <https://woudc.org>. Список всех участников доступен на веб-сайте (DOI: 10.14287/10000001).

Данные Copernicus Sentinel-5P (обработаны ESA, *англ.* European Space Agency), 2020, TROPOMI Level 2 Ozone Total Column products. Version 02. ESA. <https://doi.org/10.5270/S5P-ft13p57>.

Исследование выполнено на кафедре физики атмосферы и в Лаборатории исследования озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ при поддержке Санкт-Петербургского университета, шифр проекта 124032000025-1.

Литература

1. Асмус В. В., Милехин О. Е., Крамарева Л. С. и др. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11–26. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
2. Блощинский 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 // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 4. С. 79–85. DOI: 10.31857/S0205961422040029.
3. Крамчанинова Е. К., Успенский А. Б. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере по данным российского геостационарного метеоспутника «Электро-Л» // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 12–18. DOI: 10.7868/S020596141302005X.
4. Тимофеев Ю. М., Неробелов Г. М. Спутниковые исследования газового состава атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 6. С. 912–946. DOI: 10.31857/S0002351524060056.
5. Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Виролайнен Я. А. (2025a) Дистанционные методы измерений содержания озона. 2. Спутниковые методы // Метеорология и гидрология. 2025. № 8. С. 19–42. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-8-19-42.
6. Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Крамарева Л. С. и др. (2025b) Сравнение оценок общего содержания озона в атмосфере по данным высокоэллиптического спутника «Арктика-М» с наземными наблюдениями и независимыми спутниковыми оценками // Метеорология и гидрология. 2025. № 8. С. 43–53. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-8-43-53.
7. Шаламянский А. М. Озонометрическая сеть СНГ // Метеорология и гидрология. 1993. № 9. 100–104.
8. Bernhard G. H., Fioletov V. E., Grooß J.-U. et al. Record-breaking increases in Arctic solar ultraviolet radiation caused by exceptionally large ozone depletion in 2020 // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. Article e2020GL090844. <https://doi.org/10.1029/2020GL090844>.
9. Dameris M., Loyola D. G., Nützel M. et al. Record low ozone values over the Arctic in boreal spring 2020 // Atmospheric Chemistry and Physics. 2021. V. 21. Iss. 2. P. 617–633. DOI: 10.5194/acp-21-617-2021.
10. Garane K., Koukoulis M.-E., Verhoelst T. et al. TROPOMI/S5P total ozone column data: global ground-based validation and consistency with other satellite missions // Atmospheric Measurement Techniques. 2019. V. 12. Iss. 10. P. 5263–5287. DOI: 10.5194/amt-12-5263-2019.
11. Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J. et al. Past changes in the vertical distribution of ozone — Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // Atmospheric Measurement Techniques. 2014. V. 7. Iss. 5. P. 1395–1427. DOI: 10.5194/amt-7-1395-2014.
12. Kerr J. B. New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2002. V. 107. Iss. D23. Article 4731. DOI: 10.1029/2001JD001227.
13. Pommerehne J.-P., Goutail F., Pazmino A. et al. Recent Arctic ozone depletion: Is there an impact of climate change? // Comptes Rendus Geoscience. 2018. V. 350. Iss. 7. P. 347–353. DOI: 10.1016/j.crte.2018.07.009.
14. Stübi R., Schill H., Maillard Barras E. et al. Quality assessment of Dobson spectrophotometers for ozone column measurements before and after automation at Arosa and Davos // Atmospheric Measurement Techniques. 2021. V. 14. Iss. 6. P. 4203–4217. DOI: 10.5194/amt-14-4203-2021.
15. Voglmeier K., Velasco V. A., Egli L. et al. The transition to new ozone absorption cross sections for Dobson and Brewer total ozone measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2024. V. 17. Iss. 8. P. 2277–2294. DOI: 10.5194/amt-17-2277-2024.
16. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R. et al. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020 // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. Iss. 20. Article e2020GL089547. <https://doi.org/10.1029/2020GL089547>.

Validation of total ozone measurements from Arktika-M Russian satellite

A. V. Polyakov¹, Yu. M. Timofeyev¹, V. D. Bloshchinsky², P. M. Nerobelov^{1,3},
Yu. A. Shamilova², A. V. Boroditskaya², G. M. Nerobelov¹

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: a.v.polyakov@spbu.ru

² Far Eastern Center of SRC “Planeta”, Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: v.bloshchinsky@dvrpod.ru

³ Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS, Saint Petersburg 197110, Russia

The results of determining total ozone content (TOC) in the vertical atmospheric column obtained using measurements by the MSU-GS multi-zone scanning device for hydrometeorological support on board the Arktika-M Russian spacecraft are compared with independent data. The comparison includes data from both ground-based measurements by the Dobson and Brewer instruments presented on the website of the World Ozone and Ultraviolet Data Centre (WOUDC), Canada, and satellite measurements by the TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) instrument onboard the Sentinel-5P (Sentinel-5 Precursor) spacecraft. The study covers the period from March 2023 to October 2024 and the region north of 50° N. The MSU-GS data are preliminarily averaged over 1-hour intervals. Comparison with the results of individual ground-based measurements shows that the mean differences (MD) of the two types of measurements do not exceed 8 % in absolute value, and the standard deviations of the differences (SDD) are no more than 6.7 %. It should be noted that for three polar (beyond the Arctic Circle) observing stations, the MD do not exceed 1.1 %, and the SDD are less than 6.3 %. Daily averaged MSU-GS measurements are compared with daily averaged data from ground-based stations. For this comparison, the absolute MD are no more than 8.2 %, and the SDD do not exceed 7.7 %. Comparisons with single TROPOMI measurements show MD of 0.2 % with SDD of 6 %. No significant seasonal or latitudinal variations are detected. Examples of TOC distributions in the circumpolar region obtained using MSU-GS are presented in comparison with TROPOMI data, demonstrating satisfactory qualitative agreement between the two instruments.

Keywords: atmospheric ozone, Arktika-M, MSU-GS, Arctic ozone

Accepted: 05.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-47-58

References

1. Asmus V. V., Milekhin O. E., Kramareva L. S. et al., Arktika-M: The world's first highly elliptical orbit hydrometeorological space system, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021, V. 46, No. 12, pp. 805–816, DOI: 10.3103/S1068373921120013.
2. Bloshchinskiy V. D., Kuchma M. O., Kukharsky A. V., Determination of the total ozone content in atmospheric column according to data of Elektro-L No. 3 spacecraft using neural networks, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, No. 4, pp. 79–85 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422040029.
3. Kramchaninova E. K., Uspensky A. B., Monitoring of the total ozone content in the atmosphere based on data from the Russian geostationary weather satellite “Electro-L”, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 2, pp. 12–18 (in Russian), DOI: 10.7868/S020596141302005X.
4. Timofeev Yu. M., Nerobelov G. M., Satellite investigation of atmospheric gas composition, *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2024, V. 60, No. 6, pp. 912–946 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002351524060056.
5. Timofeev Yu. M., Polyakov A. V., Virolainen Ya. A. (2025a), Remote sensing of atmospheric ozone. 2. Satellite methods, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2025, V. 50, No. 8, pp. 649–666, DOI: 10.3103/S1068373925080023.
6. Timofeev Yu. M., Polyakov A. V., Kramareva L. S. et al. (2025b), Comparison of atmospheric total ozone estimated from Arktika-M high-elliptical satellite data with ground-based observations and independent satellite measurements, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2025, V. 50, No. 8, pp. 667–675, DOI: 10.3103/S1068373925080035.

7. Shalamyansky A. M., Ozonometric network of the CIS, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1993, No. 9, pp. 100–104 (in Russian).
8. Bernhard G. H., Fioletov V. E., Grooß J.-U. et al., Record-breaking increases in Arctic solar ultraviolet radiation caused by exceptionally large ozone depletion in 2020, *Geophysical Research Letters*, 2020, V. 47, Article e2020GL090844, <https://doi.org/10.1029/2020GL090844>.
9. Dameris M., Loyola D. G., Nützel M. et al., Record low ozone values over the Arctic in boreal spring 2020, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, V. 21, Iss. 2, pp. 617–633, DOI: 10.5194/acp-21-617-2021.
10. Garane K., Koukouli M.-E., Verhoelst T. et al., TROPOMI/S5P total ozone column data: global ground-based validation and consistency with other satellite missions, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, V. 12, Iss. 10, pp. 5263–5287, DOI: 10.5194/amt-12-5263-2019.
11. Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J. et al., Past changes in the vertical distribution of ozone — Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, V. 7, Iss. 5, pp. 1395–1427, DOI: 10.5194/amt-7-1395-2014.
12. Kerr J. B., New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, V. 107, Iss. D23, Article 4731, DOI: 10.1029/2001JD001227.
13. Pommereau J.-P., Goutail F., Pazmino A. et al., Recent Arctic ozone depletion: Is there an impact of climate change?, *Comptes Rendus Géoscience*, 2018, V. 350, Iss. 7, pp. 347–353, DOI: 10.1016/j.crte.2018.07.009.
14. Stübi R., Schill H., Maillard Barras E. et al., Quality assessment of Dobson spectrophotometers for ozone column measurements before and after automation at Arosa and Davos, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, V. 14, Iss. 6, pp. 4203–4217, DOI: 10.5194/amt-14-4203-2021.
15. Voglmeier K., Velazco V. A., Egli L. et al., The transition to new ozone absorption cross sections for Dobson and Brewer total ozone measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, V. 17, Iss. 8, pp. 2277–2294, DOI: 10.5194/amt-17-2277-2024.
16. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R. et al., Near complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020, *Geophysical Research Letters*, 2020, V. 47, Iss. 20, Article e2020GL089547, <https://doi.org/10.1029/2020GL089547>.