



Валидация измерений общего содержания оzone с российского спутника «Арктика М»

Поляков А.В.¹, Тимофеев Ю.М. ¹, Блошинский В.Д. ², Неробелов П.М. ^{1,3}, Шамилова Ю.А. ², Бородицкая А.В. ²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Лаборатория Исследований Озонового слоя и Верхней Атмосферы, Санкт-Петербург, Россия,

² ДЦ "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Хабаровск, Россия

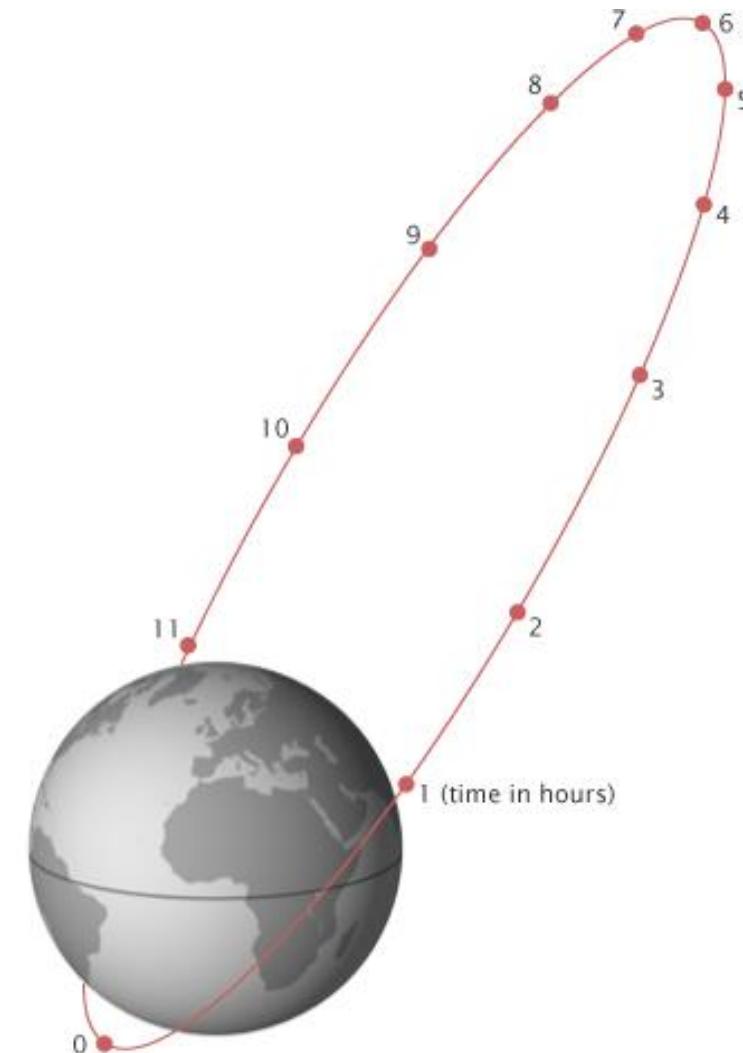
³ Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Инструмент

Спутники серии «Арктика-М», орбита типа «Молния», в перигее около 1 тыс. км, в апогее около 40 тыс. км

Прибор: МСУ-ГС

№	Спектральные интервалы (мкм)	Разрешение (км)	SNR or NEΔT @ specified input
1	0.5 – 0.65	1	200
2	0.65 – 0.8	1	200
3	0.8 - 0.9	1	200
4	3.5-4.01	4	0.35 K
5	5.7-7.0	4	0.40 K
6	7.5 – 8.5	4	0.10 K
7	8.2 - 9.2	4	0.15 K
8	9.2-10.2	4	0.15 K
9	10.2 - 11.2	4	0.15 K
10	11.2 - 12.5	4	0.25 K

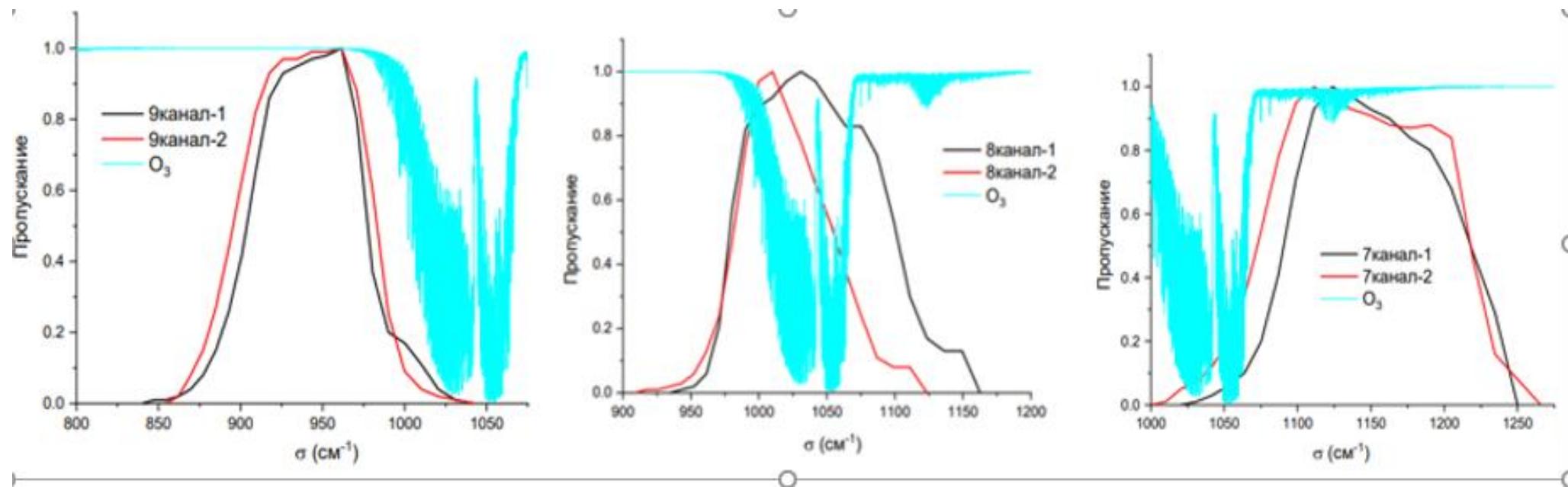


<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page2.php>

Физические основы измерения ОСО прибором МСУ-ГС

Измерения ОСО на спутниках серии Арктика-М осуществляются с помощью радиометра МСУ-ГС, использующегося на российских геостационарных спутниках. Прибор МСУ-ГС измеряет уходящее тепловое излучение в видимом (3 канала с разрешением 1 км) и инфракрасном (**7 каналов с разрешением 4 км**) диапазонах спектра **каждые 15 мин.**

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 (голубой контур)** несут основную информацию об ОСО. На рисунке схематично показаны функции пропускания атмосферы в трех используемых каналах МСУ-ГС, а также спектральные фильтры прибора, выделяющие полосу озона фоне окна прозрачности атмосферы.



Методика решения обратной задачи [Блошинский и др., 2022]

Искусственная нейронная сеть (ИНС) перцепtron с тремя скрытыми слоями. 64, 128 и 256 нейронов в скрытых слоях

Входные данные ИНС:

Интенсивность излучения в 3-х инфракрасных каналах прибора,
профиль температуры на 31 уровне (1000 - 1 гПа, GFS NCEP),
приземное давление (GFS NCEP),
зенитный угол спутника,
зенитный угол Солнца.

Обучение ИНС на основе данных об ОСО прибора ОМРС на борту Soumi NPP,
Объем «учебника» $2,5 \times 10^5$.

Один из каналов прибора включает **полосу озона 9.6 мкм**, а остальные несут информацию об **излучении поверхности**, частично о **температуре и составе** атмосферы.

Как обычно в подобных задачах, профиль температуры необходимо учесть, т.к. именно **температура определяет уходящее тепловое излучение**, и в стратосфере сильно **коррелирует с содержанием озона**.

Сходные наборы входных параметров ИНС использовался в ряде аналогичных российских и зарубежных разработок, напр. Поляков, Тимофеев 2007, 2010; Schmidt, Hoffman, 2010

Методика применяется при наличии солнечного излучения в безоблачных условиях.

Результаты измерения ОСО прибором МСУ-ГС с борта КА «Арктика-М»:

Были получены величины ОСО в различные дни в период с 13 марта по 15 сентября 2023 и с 13 марта по 2 октября 2024, всего 170 дней

месяц	год	даты	дней
Март	2023	13, 17, 18, 23, 25, 26, 27, 28, 29	9
Апрель		02, 06, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 23, 24, 25, 26, 30	13
Май		05, 06, 16, 22	4
Июнь		09, 10, 12, 17, 18, 19, 21, 22, 26, 27, 29, 30	12
Июль		1, 2, 3, 4, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 21, 23, 25, 26	16
Август		1, 2, 11, 13, 19, 20, 27, 28,	8
Сентябрь		15	1
Март,	2024	13, 21, 23, 27, 28, 29	6
апрель		4, 5, 6, 8, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29	15
Май		3, 5, 6, 7, 8, 12, 15, 17, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30	16
июнь		4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 30	21
июль		1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 25, 27, 29, 30, 31	22
август		1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 22, 24, 28, 29	17
сентябрь		2, 3, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 18,	9
октябрь		2	1

Валидация на основе данных независимых измерений

Валидация является необходимым элементом любой системы измерений. Во избежание появления в данных различных приборов ошибок, вызванных сходными причинами, желательно использовать для валидации измерения, основанные на максимально различающихся принципах.

Поскольку наша задача – валидация спутниковых данных, полученных на основе измерений уходящего ИК теплового излучения, для валидации мы используем результаты наземных измерений, основанных на измерении УФ прямого излучения Солнца, т.е. данные приборов Добсона, Брюера и М-124 на сети WOUDC, а также данные прибора TROPOMI, измеряющего рассеянное и отраженное УФ излучение Солнца.

TROPOMI на борту спутника Sentinel 5 Precursor (S5P) измеряет ТОС с пространственным разрешением от $3,5 \times 7$ км до $3,5 \times 5,5$ км. Средние разности с наземными измерениями приборами Brewer, Dobson составляли от 0 до 1,5%, а стандартное отклонение разностей - от 2,5 до 4,5%. [Garane et al., 2019,] Мы использовали измерения TROPOMI уровня 2 с флагом качества не менее 0,9 [TROPOMI DATA]. Чтобы исключить неправдоподобные значения ТОС, мы ограничили данные TROPOMI диапазоном 100-650 DU.

Данные наземных измерений сети WOUDC представлены отдельными измерениями с помощью приборов Добсона, Брюера и российского прибора М-124. Мы использовали данные, полученные по результатам измерений прямой солнечной радиации. Согласно [Kerr, 2002], точность таких измерений для приборов Добсона и Брюера составляет 1-2%. Точность измерений М-124 оценивается в 5-8%.

Единичные сравнения. Наземные станции, Добсоны и Брюеры, прямое Солнце, дистанция 5 км и 0.5 часа:

Название	Широта	Долгота	Высота, м	количество	Разности, %	
					CP	COP
Alert	82.4	-62.5	18	554387	1.1	6.3
Eureka	80.0	-86	315	350787	0.5	5.9
Resolute	74.7	-95.0	24	130250	0.3	5.7
Churchill	58.7	-94.1	77	38508	-7.9	6.5
Edmonton	53.5	-114.1	2	80578	-6.2	7.1
Goose Bay	53.3	60.4	76	42211	-5.5	7.2
De Bilt	52.1	5.2	316	3719	-6.8	6.7
Киев-Голошеев	50.4	30.5	498	286	4.4	4.9
итого				1200726	-0.3	6.7

СР – средняя разность, СОР – стандартное отклонение разности

Полярный круг = 66°33' широты

Сопоставление с измерениями станций озонометрической сети

Сравнения **среднедневных**. Осреднение данных «Арктики –М» сутки, «квадрат» 0.1 градуса по широте и долготе.
Рассогласование 10 км, 0.5 часа (фактически день/сутки)

ID	N	Широта градус	прибор	Разность, %		станция
				СР	СОР	
199	181	71.3	D	3.6	6.5	Barrow(AK)
476	648	69.3	B	-1.4	5.6	Andoya
117	128	69	F	4.5	4.5	Murmansk
267	99	67	B	8.2	5.8	Sondrestrom
105	204	64.8	D	0.5	7.1	Fairbanks(AK)
271	96	64.6	F	4.4	4.8	Arkhangel'sk
284	231	64.2	B	0.6	5.9	Vindeln
051	709	64.1	B	-1.0	7.1	Reykjavik
043	105	60.1	D	-1.7	6.9	Lerwick
165	472	59.9	B	-3.7	6.3	Oslo
312	399	54.9	B	-7.3	6.5	Kaunas
115	84	53.2	F	-0.6	6.7	Samara
316	136	52.1	B	-7.9	7.7	De Bilt
068	725	51.8	B	-3.8	6.4	BELSK
096	818	50.2	B	-7.3	7.3	Hradec Krlov
tot	5181			-2.7	7.6	total

B = Brewer

D = Dobson

F = Filter (M-124)

Не все станции, предоставившие данные единичных измерений, на момент наших расчетов (4 августа 2025) предоставили среднедневные данные. Последние получаются в результате обработки – анализа и отбраковки результатов единичных измерений, расчета среднедневных, поэтому поступают с большей задержкой.

Полярный круг = $66^{\circ}33'$ широты

Из таблицы исключены статистически недостоверные данные (менее 50 сравнений для станции)

Сравнения с ТРОПОМИ: (единичные измерения ТРОПОМИ) и наземными (WOUDC-Dobson+Brewer hourly) 5км, 30 мин. данными.

Номер файла	Начало гг/мм/дд : чч	Конец	Количество пар	АРКТИКА-М минус TROPOMI			
				% DU		СР	СОР
				СР	СОР		
0	23/03/13:06	23/04/23:16	222 443 248	2.0	6.6	7.3	28.1
1	23/04/23:17	23/06/26:23	285 363 849	7.9	6.4	28.4	22.8
2	23/06/27:00	23/07/26:13	414 851 302	6.2	4.8	19.2	14.8
3	23/07/26:21	24/04/06:06	219 481 821	1.5	6.3	3.4	21.0
4	24/04/06:07	24/04/29:04	279 713 208	-0.4	4.8	-1.8	21.2
5	24/04/29:05	24/05/23:08	248 854 702	-1.3	5.2	-5.9	21.9
6	24/05/23:09	24/06/08:08	326 731 014	-2.3	5.1	-9.3	20.2
7	24/06/08:09	24/06/17:04	438 734 564	-1.5	5.0	-6.3	19.0
8	24/06/17:05	24/06/30:18	406 748 942	-2.4	4.4	-9.1	16.0
9	24/06/30:19	24/07/12:16	434 840 448	-1.1	4.0	-4.3	14.0
A	24/07/12:17	24/07/25:19	342 936 442	0	4.4	-0.5	14.9
B	24/07/25:20	24/08/08:10	418 668 859	0.3	4.9	0.7	15.8
C	24/08/08:11	24/09/02:15	302 435 672	-0.8	5.7	-2.6	17.9
D	24/09/02:16	24/10/02:14	211 099 658	-1.1	6.3	-3.6	20.3
E	24/10/02:15	24/10/02:23	5 149 909	6.1	9.3	20.5	31.6
все	23/03/13:06	24/10/02:23	4 558 053 504	0.2	6.0	0.8	21

Согласование измерений «МСУ-ГС» и TROPOMI: По всему объему данных 0.5 часа, 5 км. СР 0.4%, СОР 6.0%.

СОР для разных наборов данных (см. слайд «использованные данные»)

меняются от 16.9 до 28.0 е.Д. (от 4.0

до 6.6%), кроме единственного дня в октябре, когда СОР достигло 31 е.Д.

Согласие данных независимых измерений близко к результатам сравнений для аналогичных исследований с использованием

зарубежных геостационарных спутников (6.5%) [Поляков, Тимофеев, 2007, 2010] или

приведенным в работе [Блошинский и др., 2022] (менее 20 е.Д.). Средние разности колеблются от -21.8 до +12.6 е.Д (от -2.4 до 7.9%), что также

согласуется с указанными работами.

Сопоставление с TROPOMI

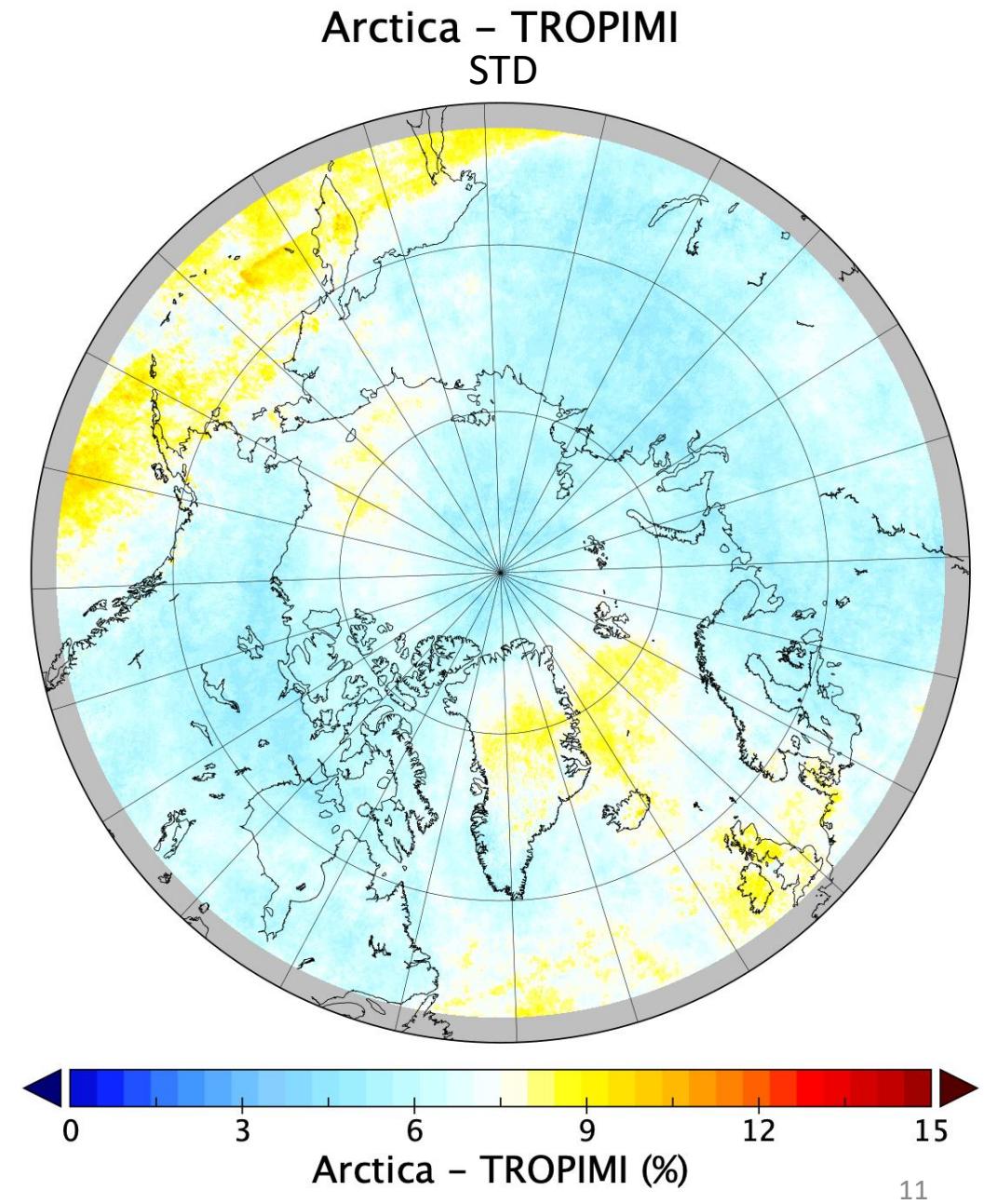
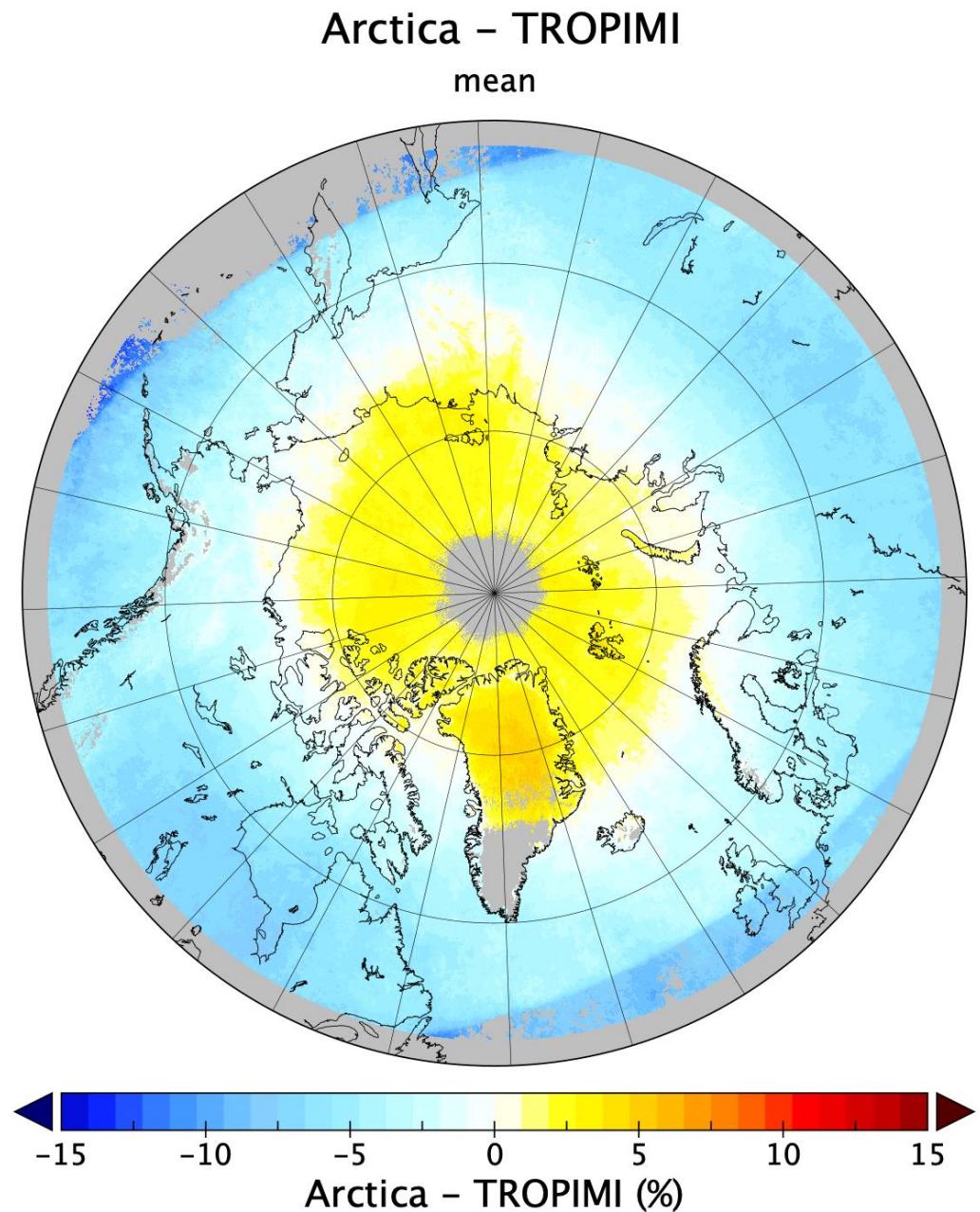
То же, среднее по месяцам

Месяц	% CP COP		е.Д. CP COP	
	CP	COP	CP	COP
Март	-1.2	6.3	-7.0	26.8
Апрель	1.6	6.0	6.2	25.4
Май	-1.0	6.0	-4.3	24.2
Июнь	-0.2	6.4	-1.5	22.5
Июль	1.6	5.4	4.5	17.6
Август	0.1	5.7	-0.2	17.6
Сентябрь	-1.0	6.1	-3.5	19.8
октябрь	2.9	9.0	9.3	29.1

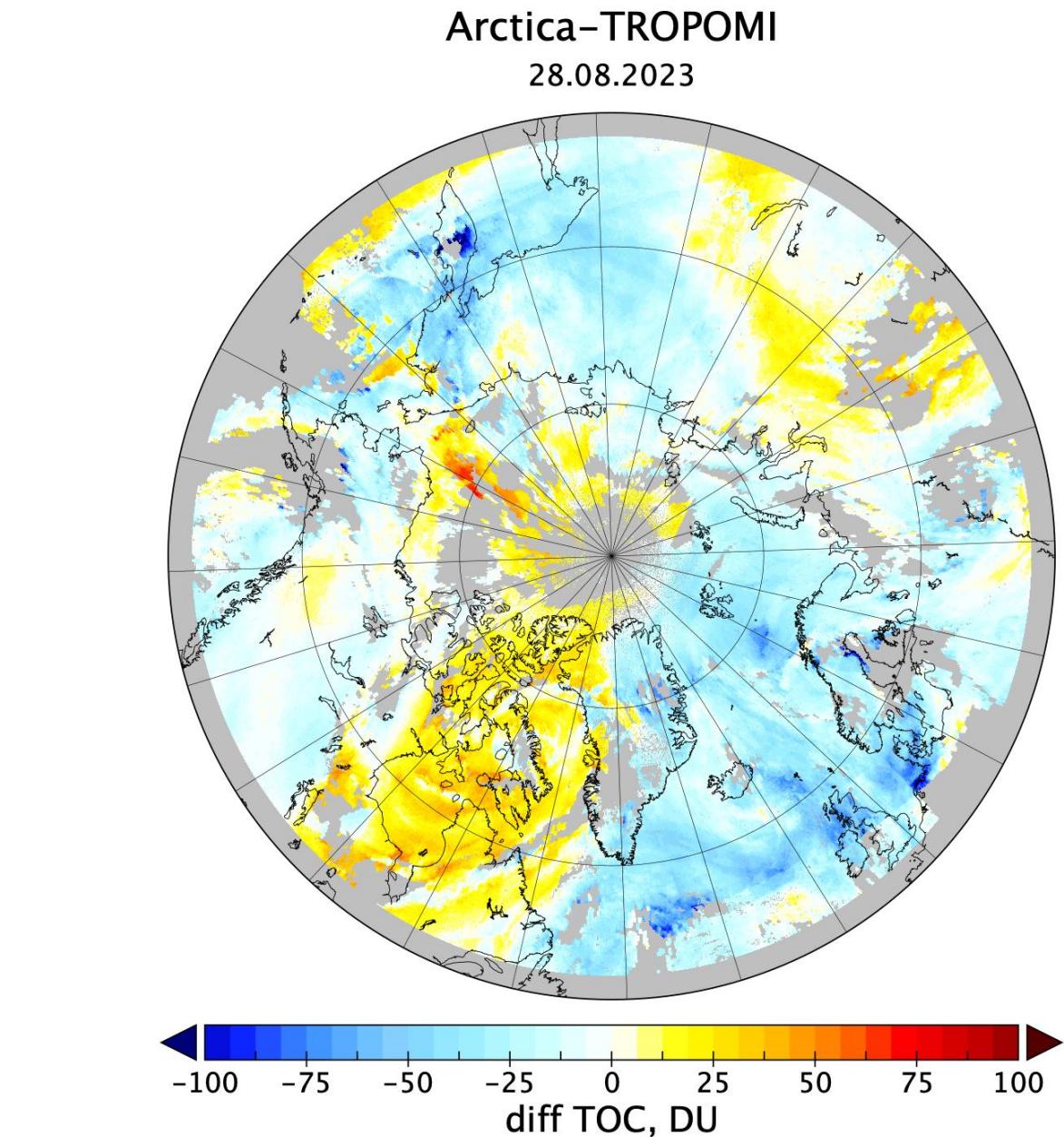
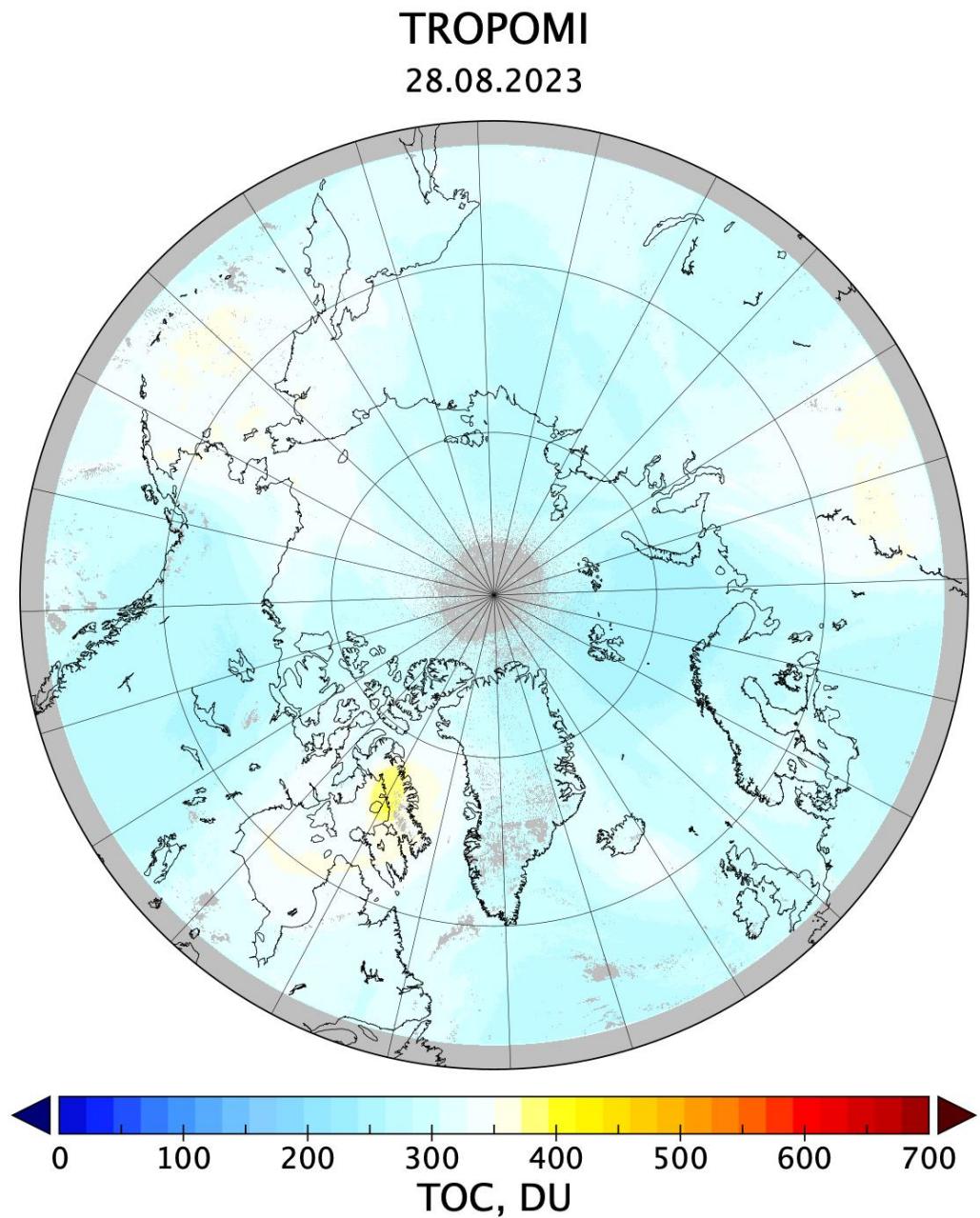
То же, по широтам

Месяц	% CP COP		е.Д. CP COP	
	CP	COP	CP	COP
50-60	-0.81	5.43	-3.66	20.23
60-70	-0.78	6.08	-3.75	22.49
70-80	0.29	6.20	0.20	22.06
80-90	1.60	5.66	5.33	19.83

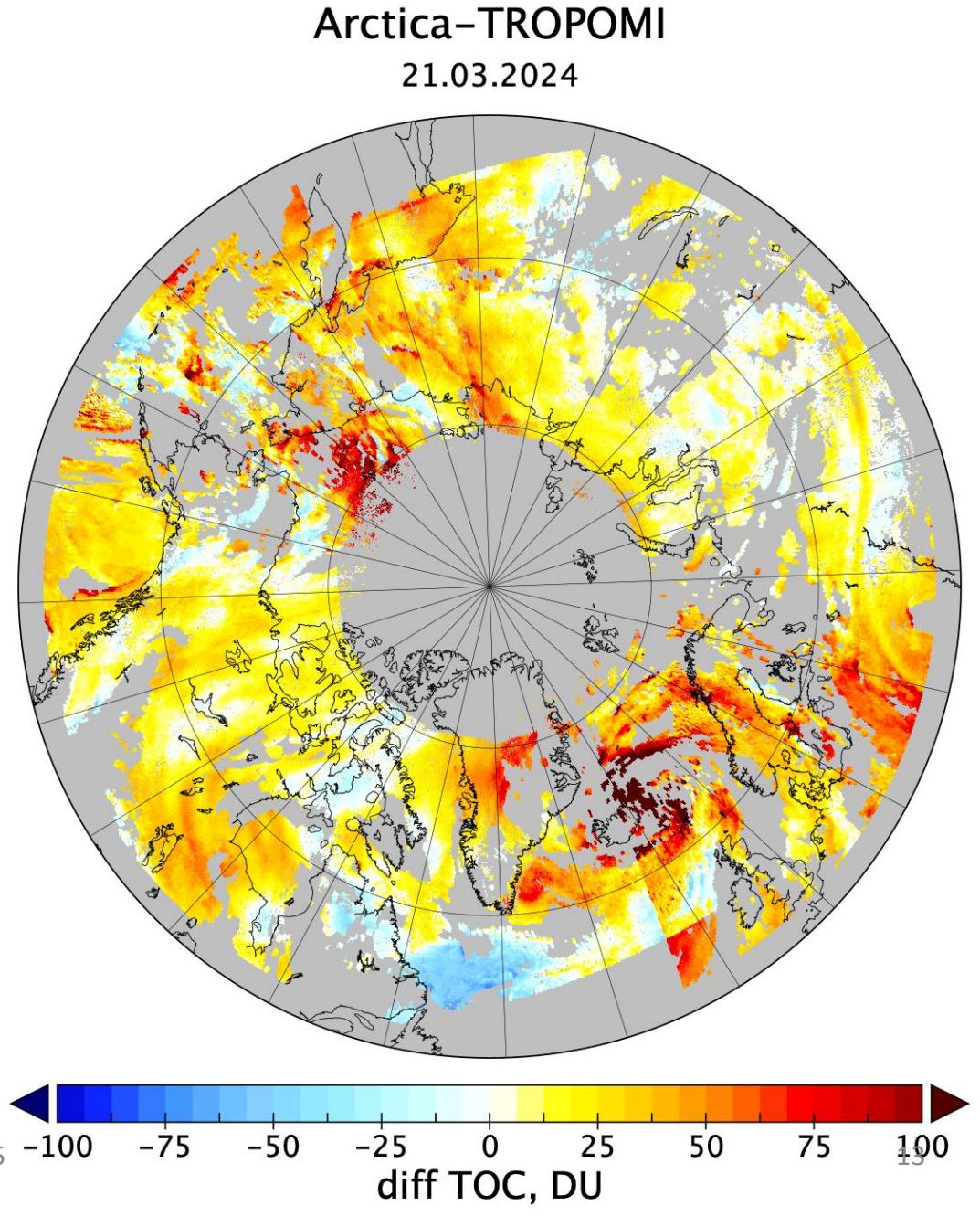
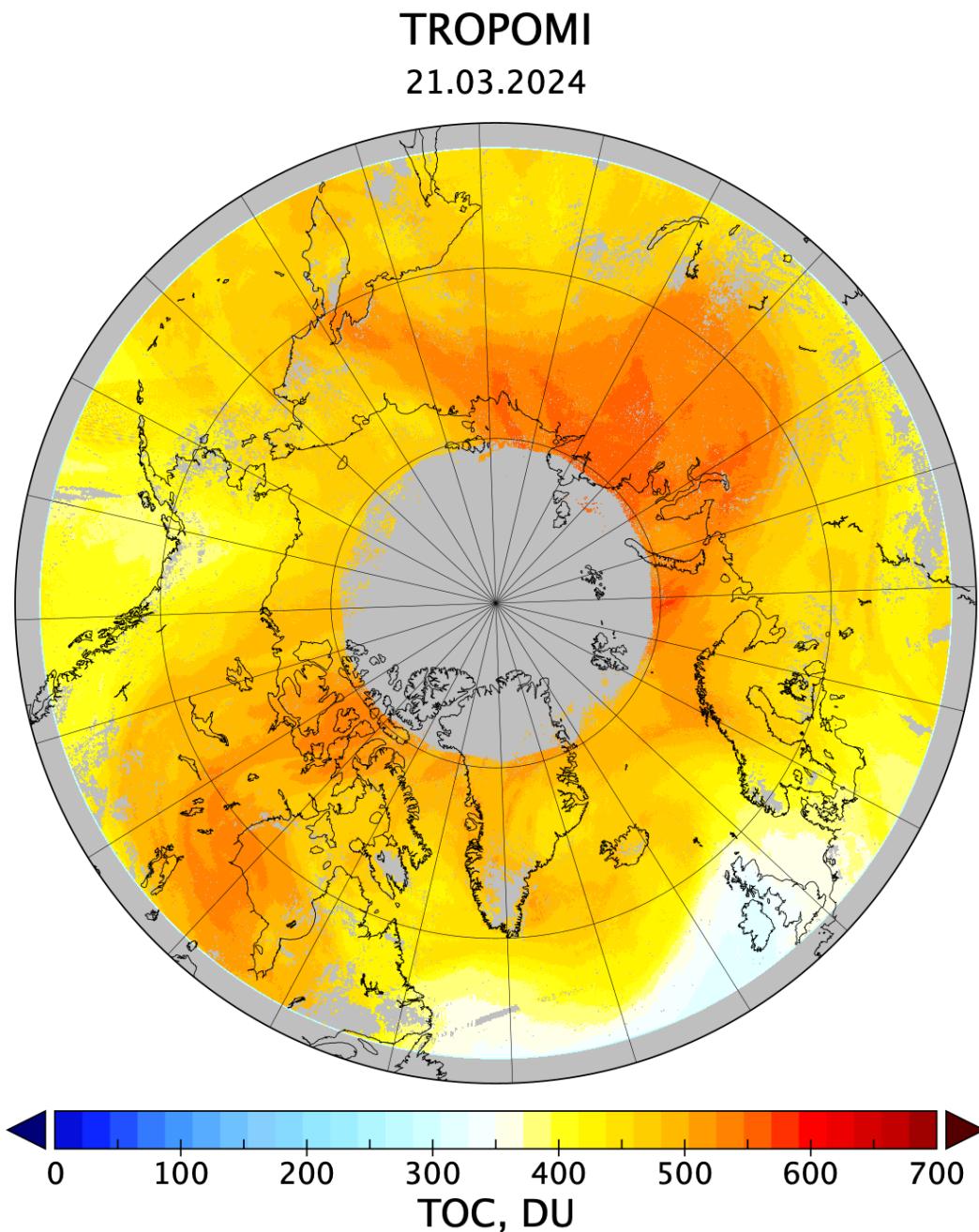
Сравнение с TROPOMI. Среднедневные, осреднение по сетке 0.1x0.1 градуса. СР и СОР по всем данным



Сравнение данных Арктики-М и TROPOMI в день с низким содержанием озона. ОСО и средние разности за день



Сравнение данных Арктики-М и TROPOMI в день с высоким содержанием озона. ОСО и средние разности за день.



Выводы

- Методика обработки измерений излучения прибором МСУ-ГС позволяет получать оценки общего содержания озона в вертикальном столбе атмосферы в отсутствие облачности при наличии солнечного излучения
- Сопоставление со среднедневными данными наземных измерений сети WOUDC приборами Добсона и Брюера по прямому Солнцу показало, что смещение спутниковых и наземных данных составляет от -30 до 26 е.Д. или от -7.9 до 8.2 %. При этом стандартные отклонения разностей колеблются от 0.7 до 30 е.Д. или от 0.1 до 7.3%. Средние разности -9.6 и СОР 27 е.Д., или 2.3 и 7.5 %
- Сравнение единичных измерений с наземными данными по всем рассмотренным станциям составили 1.1 е.Д (-0.3 %) для средней разности и 24 е.д. (6.7%) для стандартного отклонения разности.
- Средние разности единичных измерений для полярных станций – 0.3 - 1.1%, СОР 5.7 – 6.3%
- Сопоставление с данными измерений прибора TROPOMI на борту спутника Sentinel5P показало средние разности 0.8 е.Д. (0.2%) и стандартное отклонение разности 21 е.Д. (6.0%).
- Качественные сопоставления показали удовлетворительное согласие данных TROPOMI и МСУ-ГС
- Анализ пространственного распределения разностей двух измерений показал, что разности стремятся к постоянству по большим площадям, размером до сотен и тысяч километров.

Литература

1. Блощинский В.Д., М. О. Кучма, А. В. Кухарский. Определение общего содержания озона в столбе атмосферы по данным КА ЭЛЕКТРО-Л № 3 с использованием нейронных сетей © 2022 г. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2022, № 4, с. 79–85.
2. TROPOMI DATA Copernicus Sentinel data processed by ESA, *German Aerospace Center (DLR)*, *Sentinel-5P TROPOMI Total Ozone Column 1-Orbit L2 5.5km x 3.5km, Greenbelt, Md.*, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2024. <https://doi.org/10.5270/S5P-fqouvyz> (accessed on March 5, 2024)
3. Тимофеев Ю.М., А. В. Поляков, Л. С. Крамарева, В. Д. Блощинский, Г. М. Неробелов, П. М. Неробелов, А. А. Филей, Ю. А. Шамилова, А. В. Бородицкая, Я. А. Виролайнен, Ю. И. Бордовская, Г. В. Кобзарь. 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 , 43-54, УДК 551.510.534:551.507.362.2

Спасибо за внимание!

Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского университета
(шифр проекта 124032000025-1)