



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

# **Исследование изменчивости тропосферного содержания озона по данным наземных и спутниковых измерений в ИК-области спектра**

**Я.А. Виролайнен, А.В. Поляков, Г.М. Неробелов, С.В. Акишина**

# Тропосферный озон

В тропосфере ~10% от общего содержания озона в атмосфере

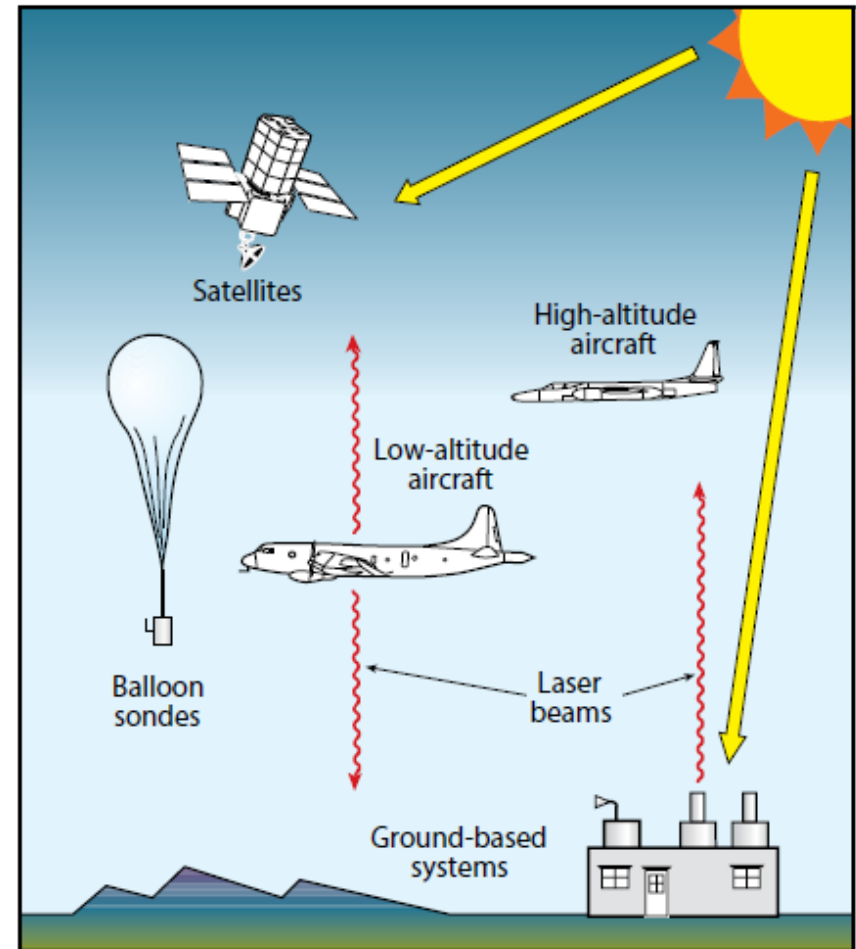
~30% - за счет антропогенных источников

Парниковый газ (~10% вклад в парниковый эффект)

Сильный окислитель: снижает рост растительности и состояние здоровья людей

Поступает из стратосферы и образуется в фотохимических реакциях с участием прекурсоров озона (CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, OH)

Measuring Ozone in the Atmosphere



## Наши исследования

**С 2009 по 2023 гг.** – исследование временной изменчивости содержания озона в различных слоях тропосферы на станции СПбГУ в Петергофе по данным наземных ИК-измерений Фурье-спекрометром Bruker IFS 125HR

**С 2009 по 2021 гг.** – анализ временной изменчивости ТрСО на станции СПбГУ в Петергофе, а также на ряде других станций IRWG-NDACC, по данным наземных (ИК Фурье-спектрометрия) и спутниковых (IASI) измерений

В рамках проекта РНФ 2023-2024 гг. **«Спутниковые исследования пространственной и временной изменчивости содержания озона в тропосфере над территорией России»**, проводился, в том числе:

- Сбор и анализ данных наземных и спутниковых измерений ТрСО;
- Определение и анализ данных по ТрСО с использованием спутниковых измерений **ИКФС-2**.

**С 2015 по 2022 гг.** – анализ временной изменчивости ТрСО на станции СПбГУ в Петергофе, а также на ряде других станций IRWG-NDACC, по данным наземных (ИК Фурье-спектрометрия) и спутниковых (ИКФС-2) измерений

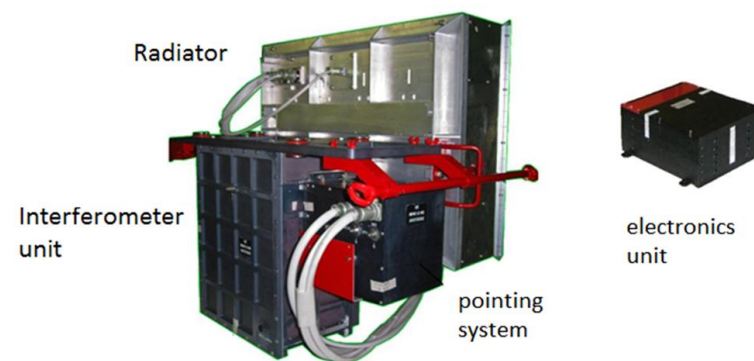
## Спутниковые измерения прибором ИКФС-2

**Расположение:** метеорологический спутник «Метеор-М» №2, запущен на солнечно-синхронную орбиту в июле 2014 года, местное время пересечения экватора 9:10 на нисходящем витке

**Метод:** измерения уходящего теплового излучения в спектральной области  $660\text{-}2000\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $0.4\text{ см}^{-1}$

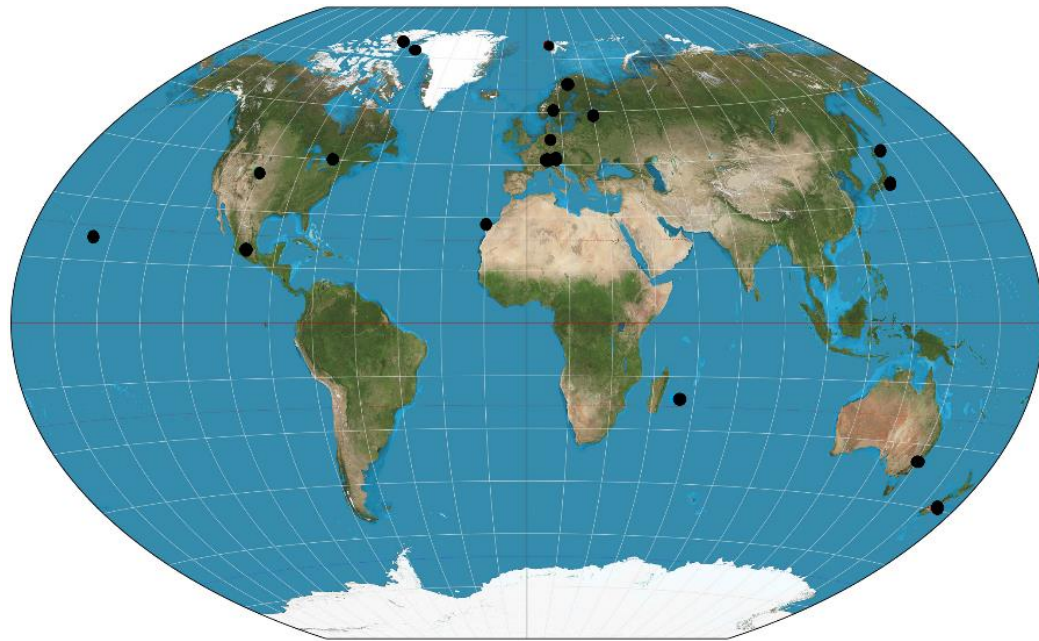
**Особенности:** основан на интерферометре Майкельсона, детектор HgCdTe, полоса сканирования в 2015-2020 гг. – 1000 км, в 2021-2022 гг. – 1500 км, горизонтальное разрешение в надир ~ 35 км, NESR -  $0.15\text{-}0.45\text{ мВт}/(\text{м}^2 \times \text{стер} \times \text{см}^{-1})$ .

**Анализ спектров:** оригинальное программное обеспечение, основанное на методах искусственных нейронных сетей (ИНС) и главных компонент



# Наземные измерения тропосферного содержания озона (TrCO) на станциях IRWG-NDACC приборами Bruker IFS 125HR

## Координаты и высоты измерительных станций IRWG-NDACC



Расположение измерительных станций IRWG-NDACC, оснащенных Фурье-спектрометрами высокого спектрального разрешения

Станция	Широта	Долгота	Высота
Eureka, Канада	80.05° N	86.42° W	610 м
Ny Ålesund, Норвегия	78.92° N	11.93° E	15 м
<b>Thule (Гренландия), Дания</b>	76.53° N	68.74° W	220 м
Kiruna, Швеция	67.84° N	20.41° E	419 м
Harestua, Норвегия	60.2° N	10.8° E	596 м
<b>St. Petersburg, Россия</b>	59.9° N	29.8° E	20 м
Bremen, Германия	53.1° N	8.8° E	27 м
Zugspitze, Германия	47.42° N	10.98° E	2964 м
<b>Jungfraujoch, Швейцария</b>	46.55° N	7.98° E	3580 м
<b>Toronto - ТАО, Канада</b>	43.66° N	79.40° W	174 м
<b>Rikubetsu, Япония</b>	43.46° N	143.77° E	380 м
<b>Boulder (Колорадо), США</b>	39.99° N	105.26° W	1634 м
<b>Tsukuba, Япония</b>	36.05° N	140.13° E	31 м
<b>Izaña Тенерифе (Испания)</b>	28.30° N	16.48° W	2367 м
<b>Mauna Loa Гавайи, США</b>	19.54° N	155.58° W	3397 м
<b>Altzomoni, Мексика</b>	19.12° N	98.66° W	3985 м
<b>Maido Остров Ре-Юнион, Франция</b>	21.1° S	55.4° E	2155 м
Wollongong, Австралия	34.41° S	150.88° E	30 м
Lauder, Новая Зеландия	45.04° S	169.68° E	370 м

# Сопоставление данных по ТрСО ИКФС-2 и IRWG-NDACC

Для получения спутниковых данных по ТрСО использовались 2 ИНС с идентичными параметрами – для ТрСО в слое до 400 мбар (~7 км) и 300 мбар (~9 км).

Для сопоставления спутниковых и наземных измерений формировались пары данных:

- Спутниковые измерения осреднялись за день в круге радиусом 200 (100) км от станции
- Наземные измерения осреднялись за день

Стандартные отклонения разностей по всем 19 станциям (разные стратегии)

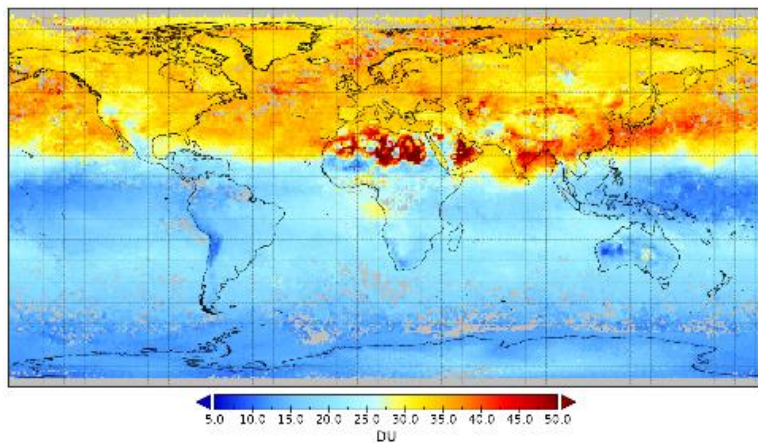
Слой до уровня	Радиус осреднения	
	100 km	200 km
300 mbar	3.17 DU	3.24 DU
400 mbar	3.29 DU	3.33 DU

Стандартные отклонения разностей по 11 станциям (IRWG2023)

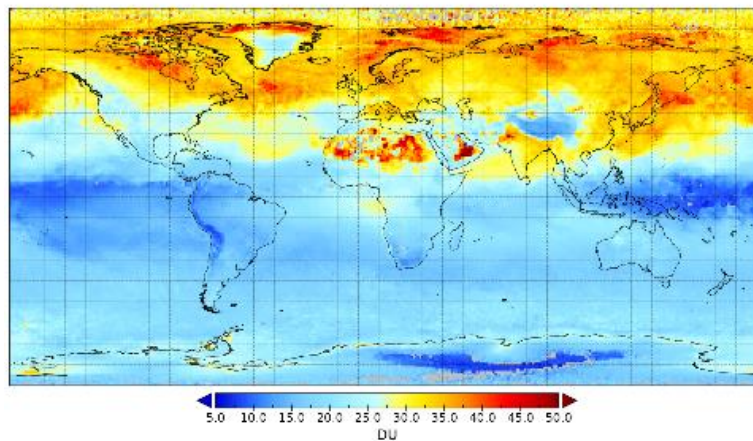
Слой до уровня	Радиус осреднения	
	100 km	200 km
300 mbar	2.91 DU	2.95 DU
400 mbar	2.87 DU	2.99 DU

# Сопоставление спутниковых измерений ТрСО по данным ИКФС-2 и IASI

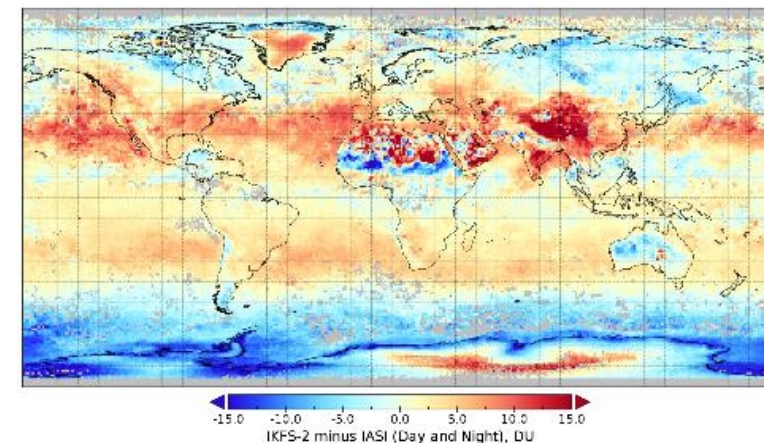
Monthly average Tropospheric Ozone by IKFS-2 (Day and Night) in May 2019



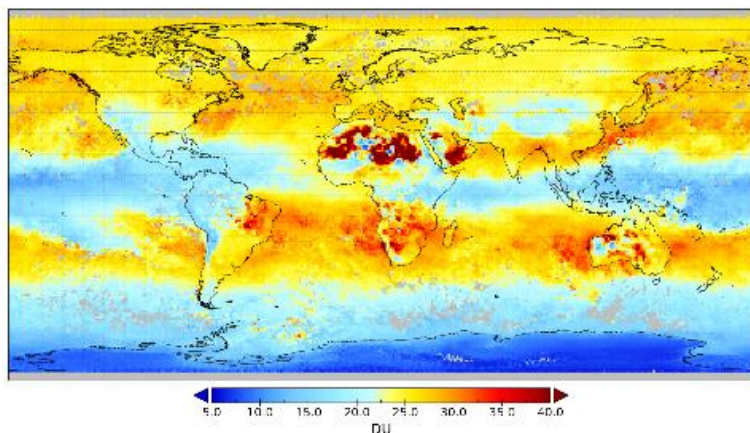
Monthly average Tropospheric Ozone by IASI (Day and Night) in May 2019



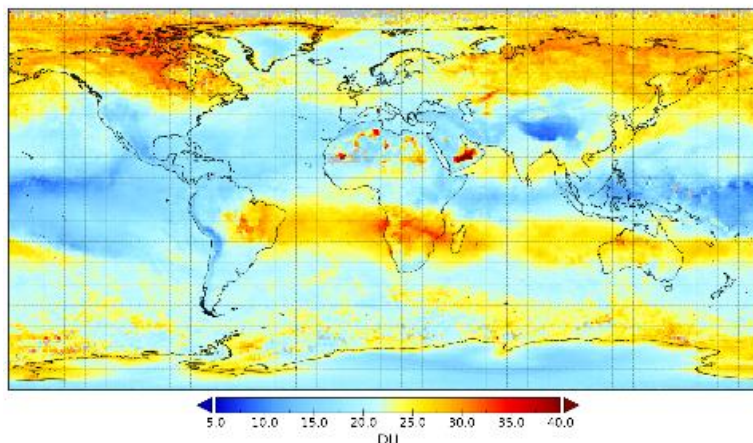
Differences in monthly averaged tropospheric ozone, May 2019



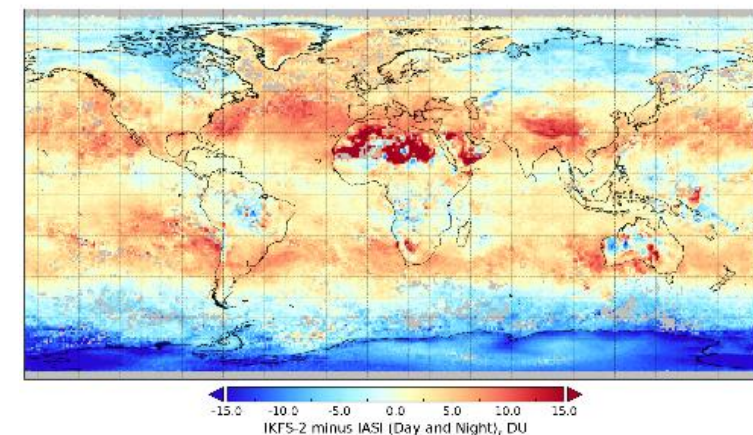
Monthly average Tropospheric Ozone by IKFS-2 (Day and Night) in Nov 2019



Monthly average Tropospheric Ozone by IASI (Day and Night) in Nov 2019



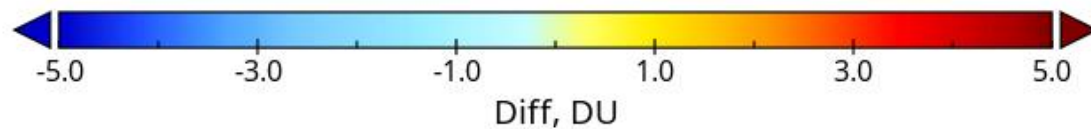
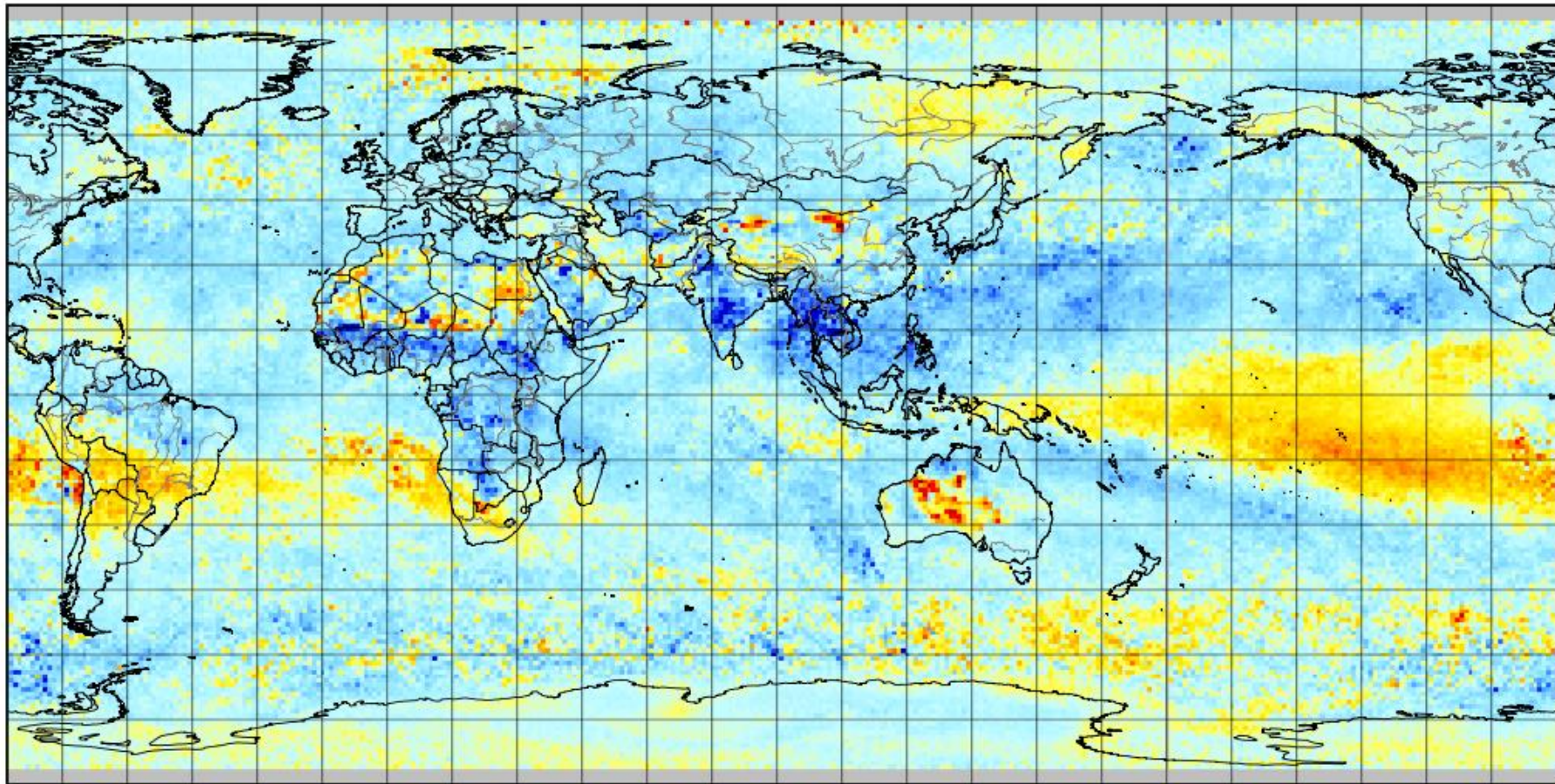
Differences in monthly averaged tropospheric ozone, Nov 2019



Пример сопоставления среднемесячных величин ТрСО (поверхность – 300 мбар) ИКФС-2 (слева), IASI (в середине) и разность ИКФС-2 минус IASI (справа). Вверху мая 2019 года, внизу – ноябрь 2019 года

# Глобальные тренды в изменении ТрСО (до 400 мбар) по данным ИКФС-2

IKFS-2, 2022 minus 2016

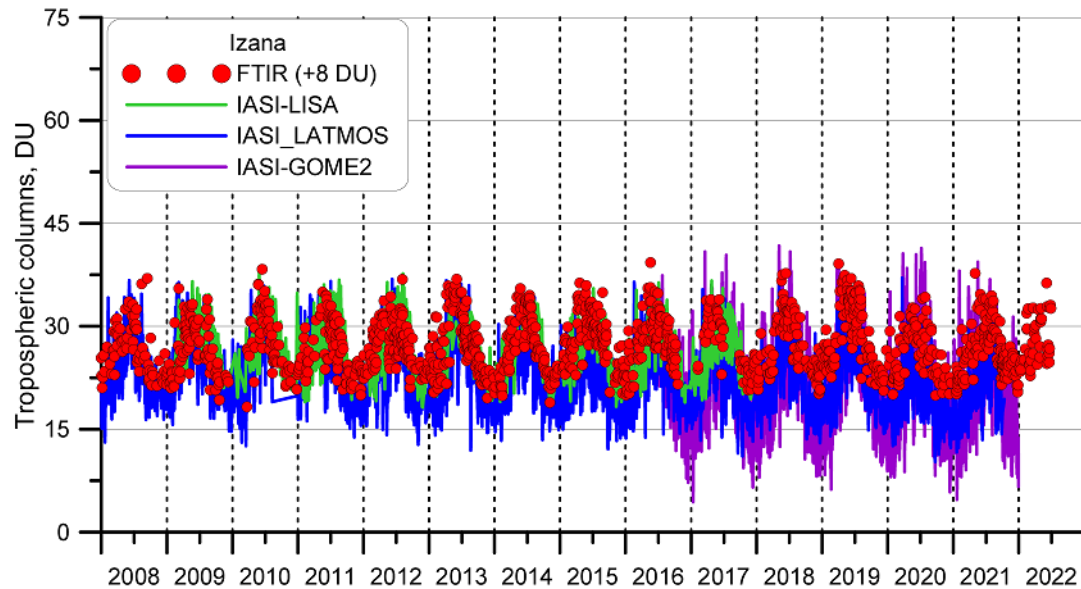
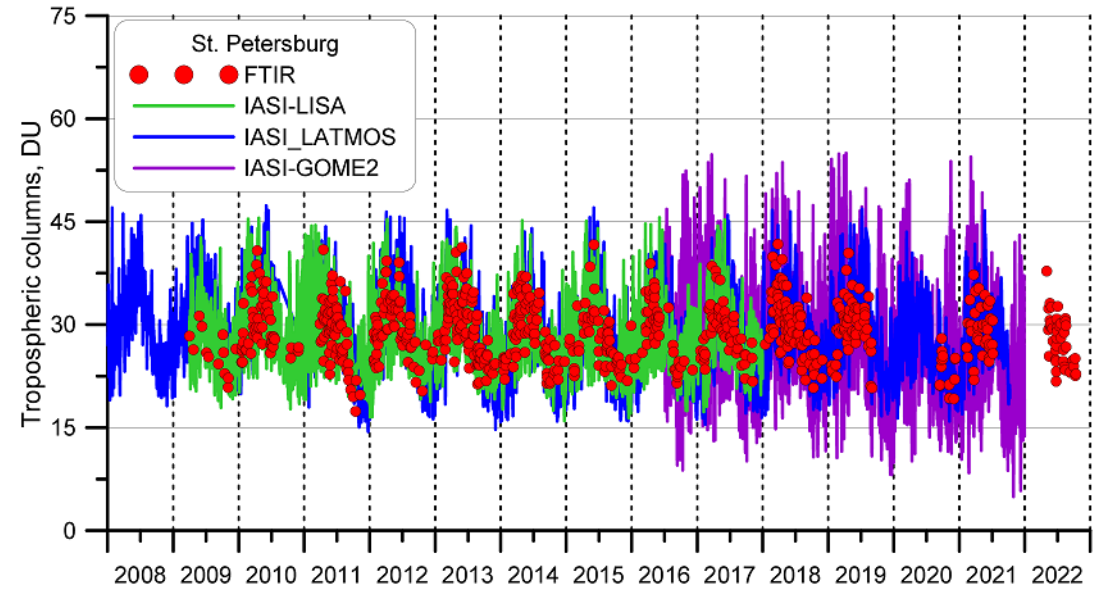
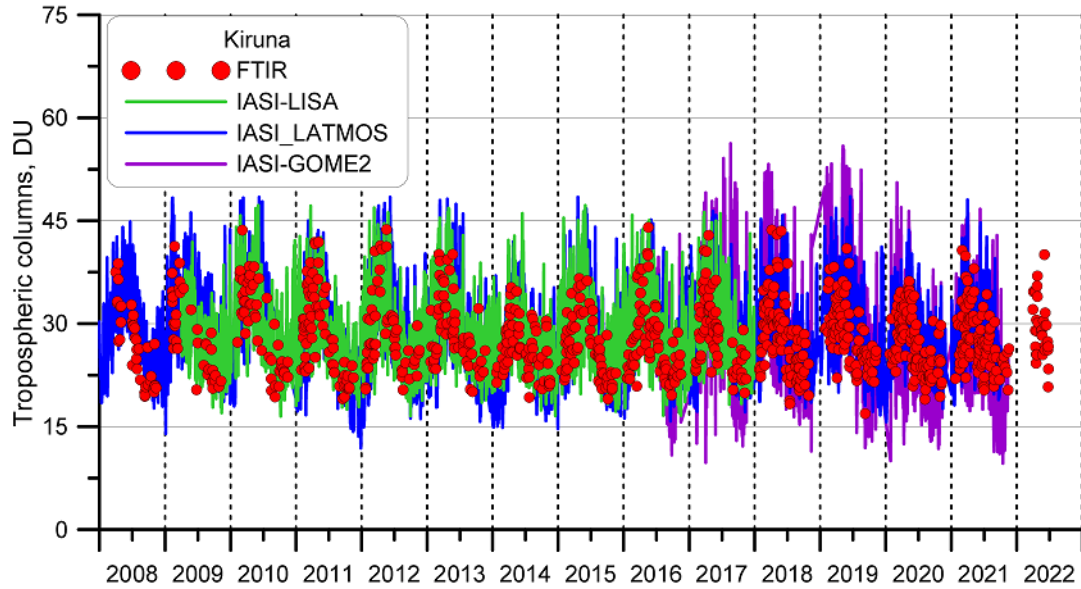


Изменение  
среднегодовых величин  
ТрСО в слое от  
поверхности до 400 мбар  
по данным ИКФС-2 за  
период с 2016 по 2022 гг.

Спутниковые  
измерения ТрСО  
позволяют  
отслеживать  
тенденции в  
изменении ТрСО в  
глобальном  
масштабе.



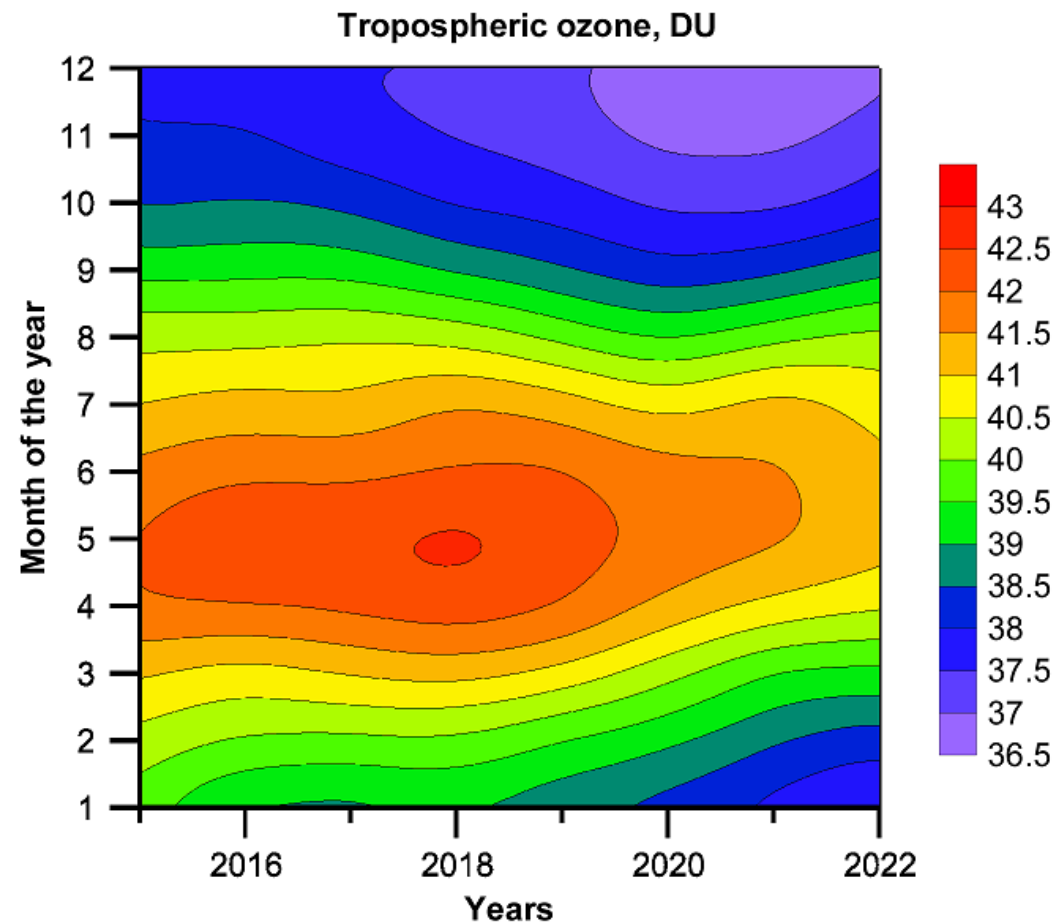
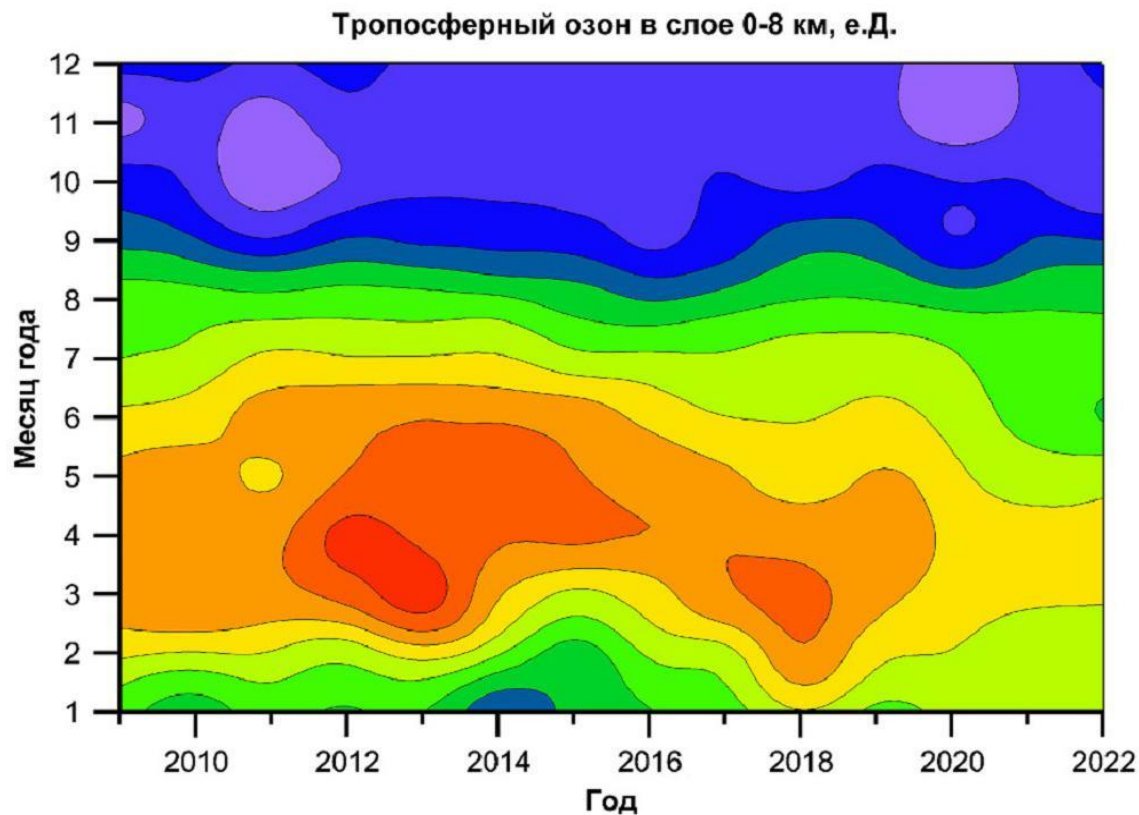
# Сопоставление наземных и спутниковых измерений ТрСО на станциях IRWG-NDACC



Оценки трендов ТрСО по данным IASI vs. FTIR за 2012-2021

Site	Trend, % year <sup>-1</sup>		IASI Drift, % year <sup>-1</sup>
	FTIR	IASI_LATMOS	
Kiruna	<b>-0.41±0.33</b>	-0.03±0.22	+0.47±0.53
St. Petersburg	<b>-0.59±0.30</b>	<b>-0.53±0.21</b>	+0.51±0.72
Izaña	-0.04±0.26	<b>-1.55±0.18</b>	<b>-1.23±0.32</b>

# Временная изменчивость ТрСО вблизи Санкт-Петербурга



Вариации содержания озона в слое тропосферы 0-8 км в окрестностях Санкт-Петербурга по данным наземных (Bruker IFS 125HR) и спутниковых (ИКФС-2) измерений

## Заключение и выводы

1. Проведен первичный анализ данных спутниковых измерений  $\text{TrCO}$ , полученных из спектров уходящего теплового излучения, измеренных российским прибором ИКФС-2 с борта метеорологического спутника «Метеор-М» №2, с помощью разработанной методики решения обратной задачи, основанной на методе ИНС и методе главных компонент.
2. Проведено сопоставление спутниковых измерений  $\text{TrCO}$  в слое от поверхности до уровня с давлением 300 мбар и 400 мбар с данными наземных измерений на станциях наблюдательной сети IRWG-NDACC. Средние стандартные отклонения разностей (COP) для обоих слоев составили около 3 е.Д. Средние разности зависят от высоты и географического расположения наземной станции, варьируя от +3 до -12 е.Д.
3. Приведены примеры сопоставления распределения среднемесячных величин  $\text{TrCO}$  по данным спутниковых измерений ИКФС-2 и IASI. В зависимости от широтного пояса и сезона средние величины COP в 2019 году варьируют от 2 до 5 е.Д.
4. Приведены примеры сопоставления временной изменчивости  $\text{TrCO}$  по данным наземных и спутниковых измерений. Показано, что ИКФС-2 может отслеживать изменчивость  $\text{TrCO}$ .

## Благодарности

- Благодарим 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 озонозондовых измерений, сеть NDACC и PI наблюдательных станций за доступ к данным FTIR измерений профилей озона.
- Авторы благодарят AERIS за обеспечение доступа к данным IASI; ULB-ATMOS за разработку методик измерения озона; Eumetsat/AC SAF за создание готового продукта. Данные измерений IASI доступны на сайте <https://iasi.aeris-data.fr/catalog/>, данные FTIR-измерений – на сайте <https://www-air.larc.nasa.gov/missions/ndacc/data.html#>.
- Благодарим авторов программ из библиотеки программ МГУ за предоставление свободного доступа к исходным текстам программ
- Наземные спектроскопические измерения на станции NDACC St.Petersburg были выполнены на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ “Геомодель”.
- Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда №23-27-00166, <https://rscf.ru/project/23-27-00166/>.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**