

**Общее содержание озона по спектральным
измерениям ИКФС-2 за 8 лет работы
прибора на борту КА «Метеор - М» №2**

Атмосферный озон является одним из важнейших газов в атмосфере Земли, так как он участвует в различных химических реакциях и превращениях, а также играет важную роль в биосфере Земли, поглощая опасное солнечное УФ-излучение, и способствует формированию климата. Поэтому, изменения озона и его влияние на процессы в атмосфере, необходимо отслеживать различными методами локального и дистанционного зондирования, а также различными приборами. Но только благодаря спутниковым методам зондирования возможно получение данных о глобальном распределении озона в атмосфере, временной эволюции, и различных аномалиях.

Методы измерения содержания озона в атмосфере

Наземные (локальные):

- Прямое солнечное излучение: ИК, УФ, видимое, ИК-Фурье (FTIR); Инструменты Добсона и Брюера
- Рассеянное солнечное излучение: УФ, видимое, ближний ИК
- Рассеянное солнечное излучение на низком Солнце
- Микроволновое тепловое излучение
- Лидары

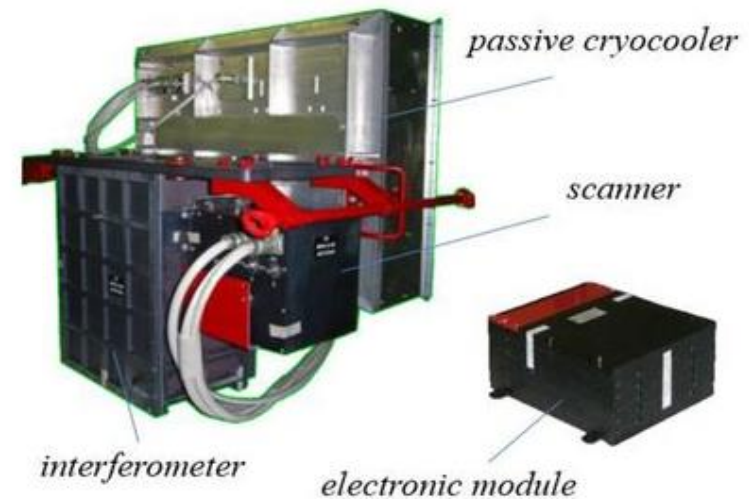
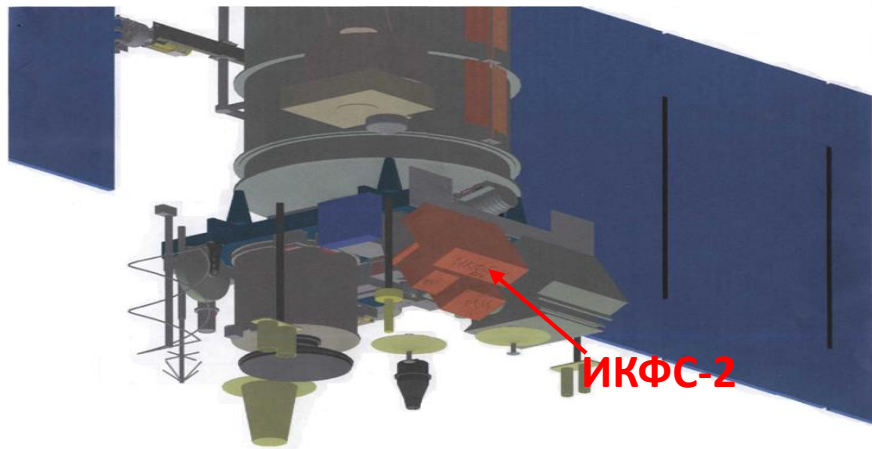
Спутниковые (глобальные):

- Рассеянное и отраженное солнечное излучение (OMI, TROPOMI)
- Метод прозрачности (ACE-FTS, звезды)
- **Уходящее тепловое излучение Земли в ИК области спектра в геометрии надира (IASI, CrIS, IKFS-2)**
- Микроволновое излучение (limb – MLS)
- Измерения излучения в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра

Прибор ИКФС-2

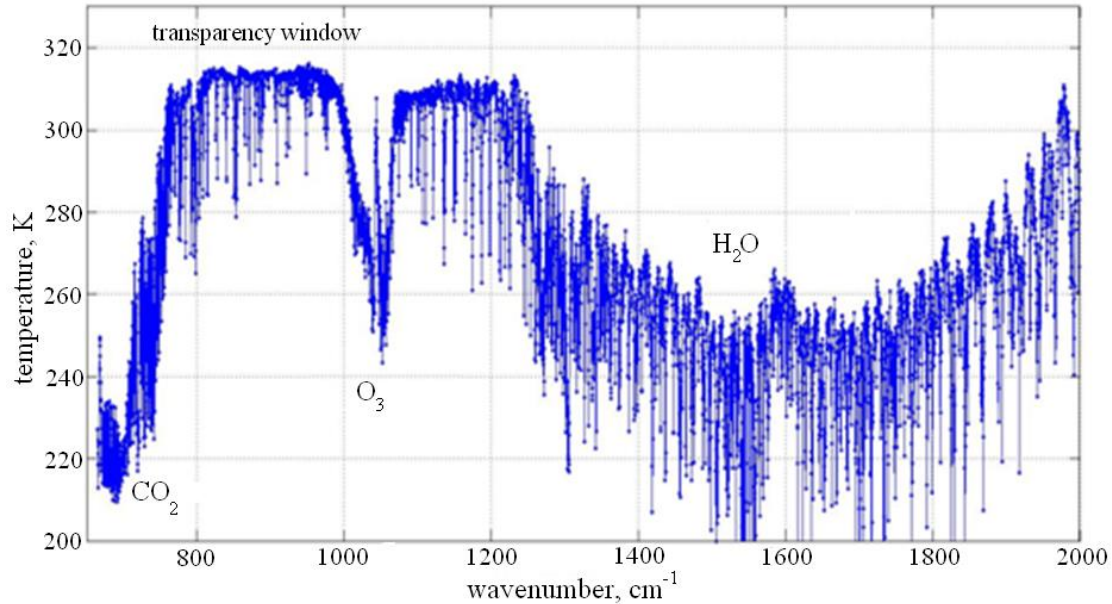
Космический инфракрасный спектрометр с преобразованием Фурье ИКФС-2 измеряет уходящее инфракрасное излучение и предоставляет данные об атмосфере для численного прогноза погоды и других задач.

ИКФС-2 — один из основных приборов спутника «Метеор-М №2». Прибор разработан НИЦ Келдыша совместно с Красногорским заводом и Государственным техническим университетом им. Баумана (г. Москва).



Внешний вид прибора ИКФС-2

Технические характеристики прибора ИКФС-2



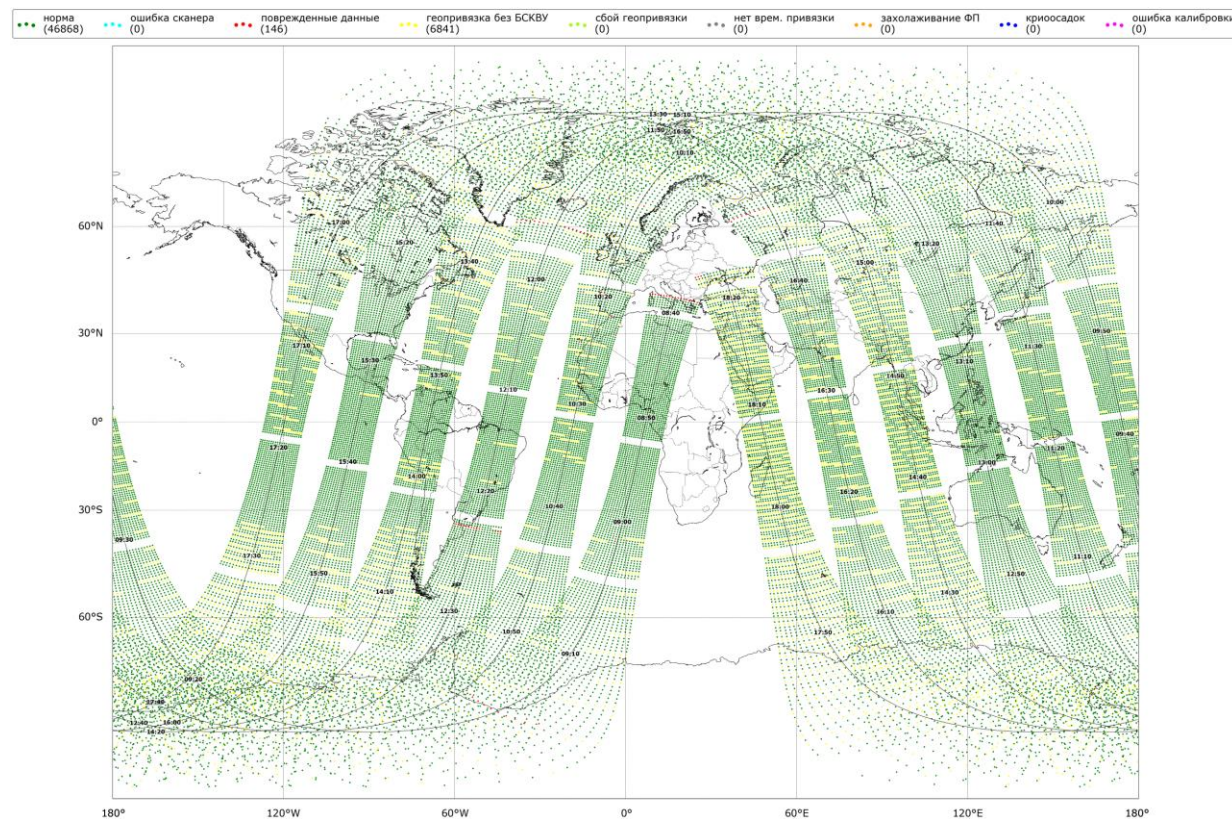
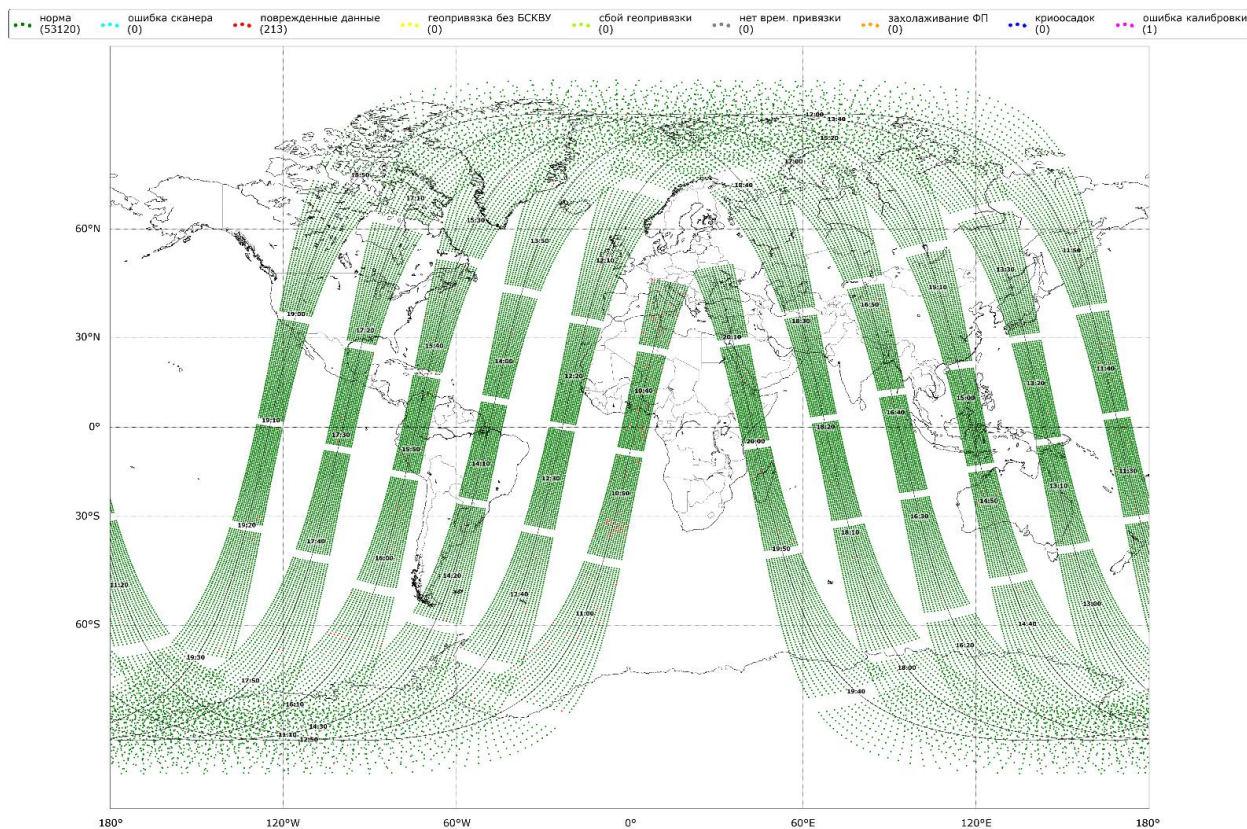
Яркостная температура излучения - пример спектра, регистрируемого ИКФС-2

| parameter | requirement |
|---|---|
| Спектральное разрешение | 5-15 мкм (660-2000 см ⁻¹) |
| неаподизированное спектральное разрешение | 0.4 см ⁻¹ |
| погрешность радиометрической калибровки ($\lambda=11\dots12$ мкм, $T=280\dots300$ К), не более чем | 0.5 К |
| шумовой эквивалент спектральной яркости, [Вт \times м ⁻² ср ⁻¹ см] | $3.5 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 6$ мкм $1.5 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 13$ мкм $4.5 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 15$ мкм |
| мгновенное поле зрения пространственное разрешение в подспутниковой точке | 40 мрад 35 км |
| ширина полосы захвата пространственный шаг | 1000...2500 км 60...110 км |
| период выборки | 0.6 с |
| скорость передачи данных | 580 кбит/с |
| масса | 50 кг |
| потребляемая мощность (средняя по орбите) | 50 Вт |

Технические характеристики прибора ИКФС-2

Покрытие поверхности Земли в течение суток.

До декабря 2020 года ширина полосы составляла 1000 км, на данный момент ширина полосы составляет 1500 км.



Процесс и результаты обучения ИНС

Алгоритм для построения решающего оператора

1. Подготовка данных для обучения сети

- Подготовка спектральных измерений ИКФС-2:

I. Около 168 млн. спектров с 2015 по ноябрь 2020 г. - все данные с шириной обзора 1000 км

II. Новые спектры (более 63 млн.) с шириной полосы обзора спутника – 1500 км (с декабря 2020 по 2022гг.)

- Подготовка данных ОС озона (используются данные ОМІ за тот же период измерений)

- Расчет: среднего спектра, ковариационных матриц, ЭОФ

2. Построение обучающей выборки

- Сопоставление пар измерений (70 км, 5 часов → 16 991 382 пары)

- Расчет ГК и сборка обучающего образца

- Обучение ИНС (минимизация выражения (2))

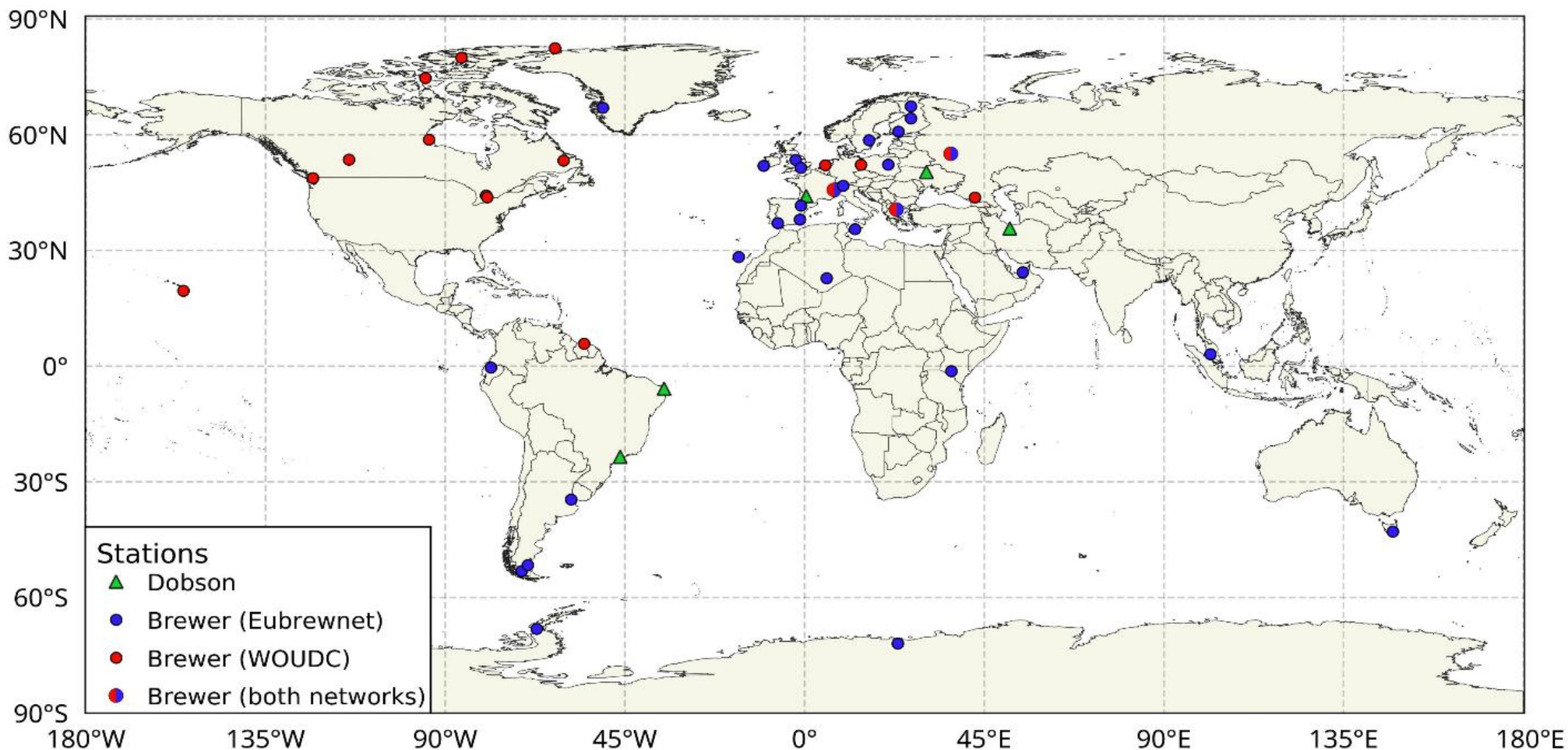
3. Тестирование различных ИНС (различное количество ГК, нейронов скрытого слоя, включение широтно-сезонных параметров в предикторы)

Валидация результатов измерений ИКФС-2 на основе наземных измерений ОСО

- Для проверки измерений ИКФС-2 использовались единичные (hourly) измерения наземных станций, оснащенных приборами Брюера и Добсона
- Использовались сетевые данные WUOUDC и сетевые данные Eubrewnet
- Использовались только прямые солнечные измерения
- Критерии совпадения спутниковых и наземных данных (1 час и расстояние менее 70 км) были получены ранее.

Расположение наземных станций, оснащенных приборами ОСО Брюера и Добсона

Здесь приведены только станции, данные которых использовались для проверки данных ИКФС-2.



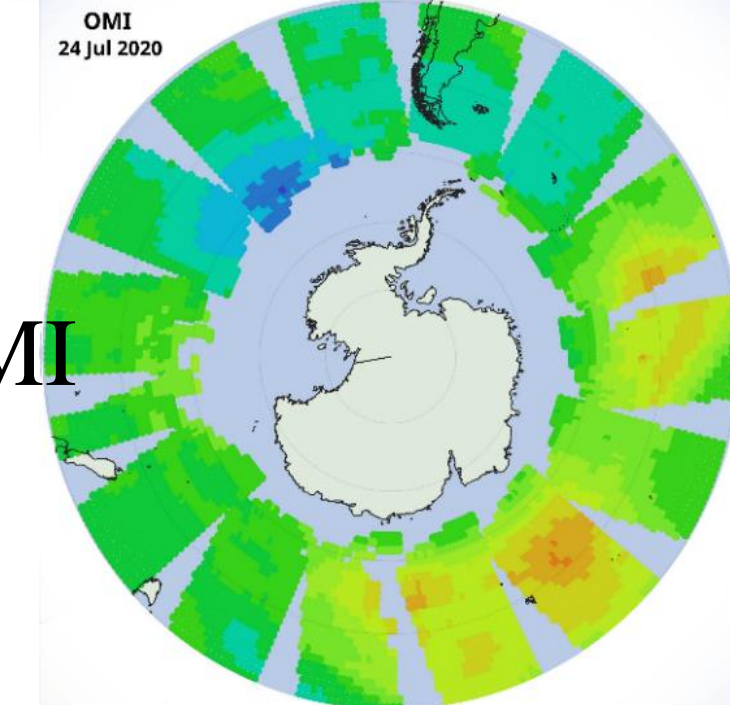
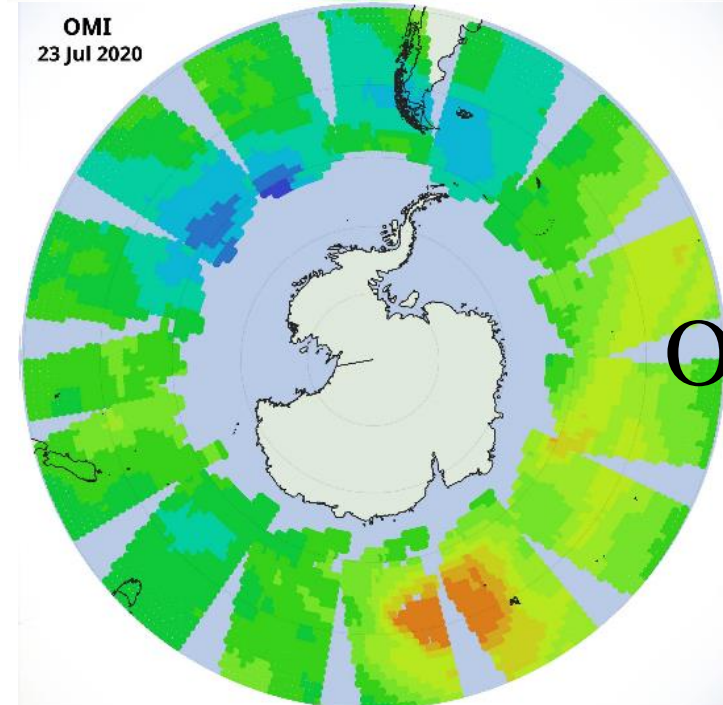
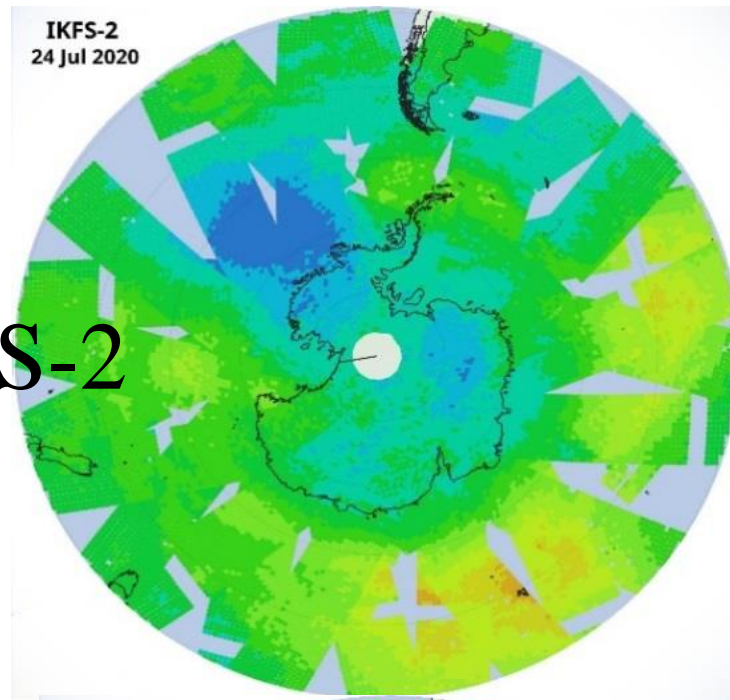
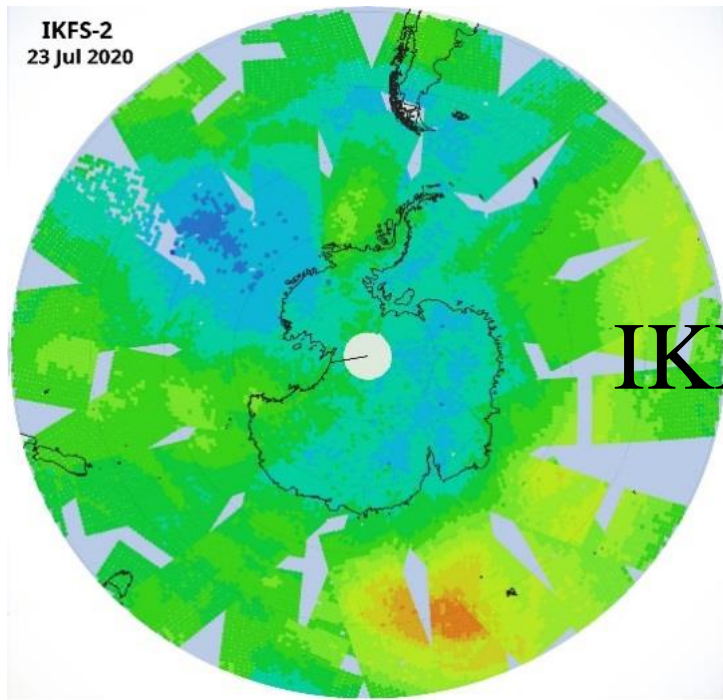
Широтная зависимость различий между данными ИКФС-2 и почасовыми наземными ОСО (сети WOUDC + Eubrewnet)

В средних и высоких широтах Северного полушария разница между данными ИКФС-2 и наземными данными - (отрицательная, немного $> 1\%$) близко к разнице по данным OMI. На эти широты приходится более 80% всех пар данных.

Для низких широт Северного полушария разница между ИКФС-2 и наземными данными - положительна ($> 1\%$).

В Южном полушарии различия со спутниками (наземными базами) близки к 0.

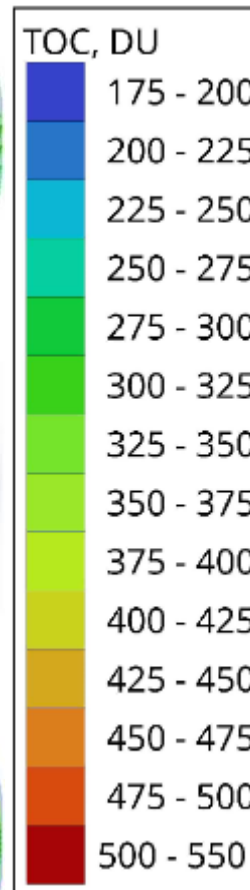
| Широтный диапазон | Кол-во пар измерений | Разница ОСО (%) | |
|-------------------|----------------------|-----------------|------|
| | | Bias | SD |
| 90° S - 90° N | 579642 | -0.75 | 2.91 |
| 0 - 90° N | 558906 | -0.78 | 2.89 |
| 0 - 90° S | 20736 | 0.30 | 3.32 |
| 60 - 90° N | 213704 | -1.06 | 2.90 |
| 30 - 60° N | 262147 | -1.06 | 2.58 |
| 0 - 30° N | 83055 | 1.22 | 3.16 |
| 0 - 30° S | 1057 | 0.01 | 2.34 |
| 30 - 60° S | 19208 | 0.32 | 3.35 |
| 60 - 90° S | 471 | -0.13 | 3.25 |



IKFS-2

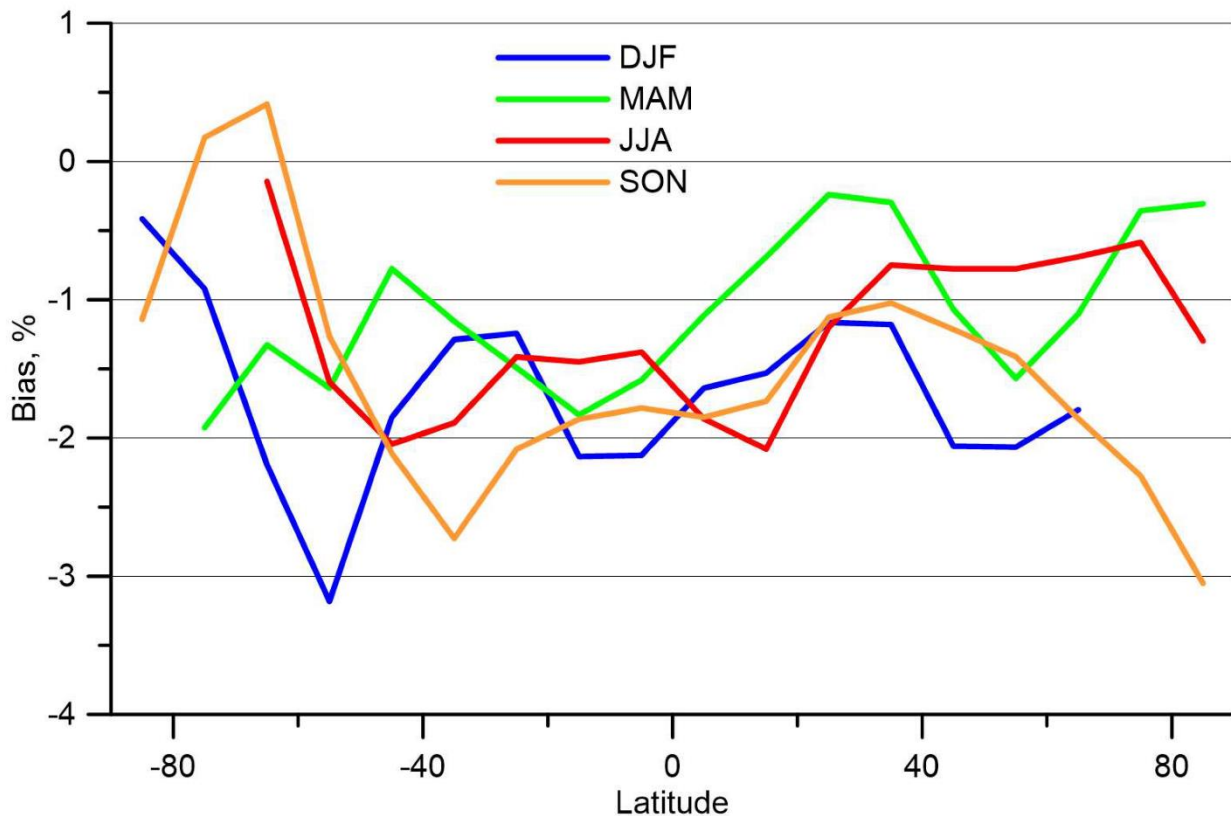
OMI

23,24 июля 2020г

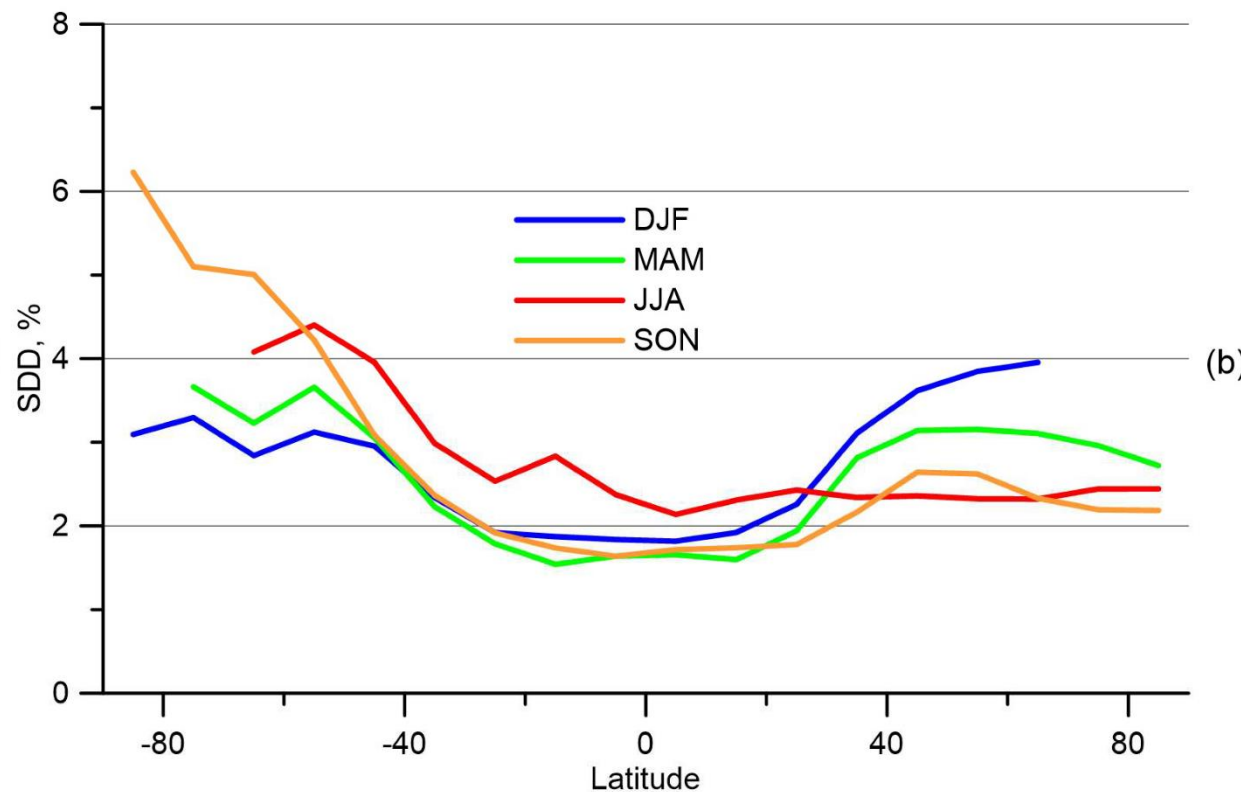


На рисунке показано пространственно-временное распределение ОСО вокруг Южного полюса по данным измерений ИКФС-2 (вверху) и ОМІ (внизу) 23, 24 июля 2020 г. Измерения проходили во время полярной ночи. Распределение ОСО по ИКФС-2 показывает низкое содержание озона вблизи Южного полюса, тогда как ОМІ - большие пробелы в данных из-за отсутствия солнечной радиации во время полярной ночи.

<https://doi.org/10.3390/rs15092481>



(a)



(b)

Широтные и сезонные вариации средней разности ОСО (a) и стандартного отклонения разности (b) между данными IKFS-2 и TROPOMI относительно измерений TROPOMI

DJF — декабрь, январь, февраль

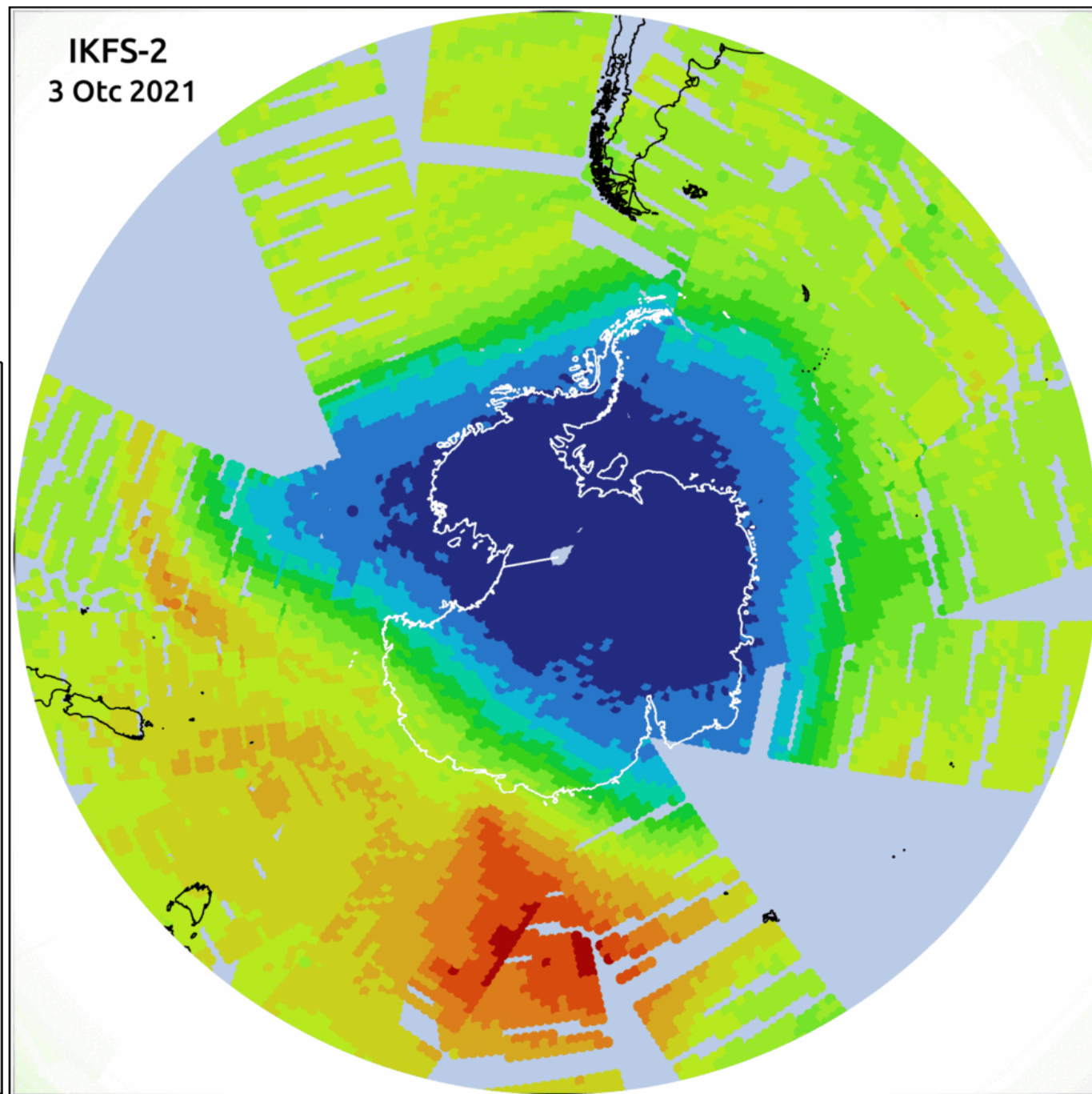
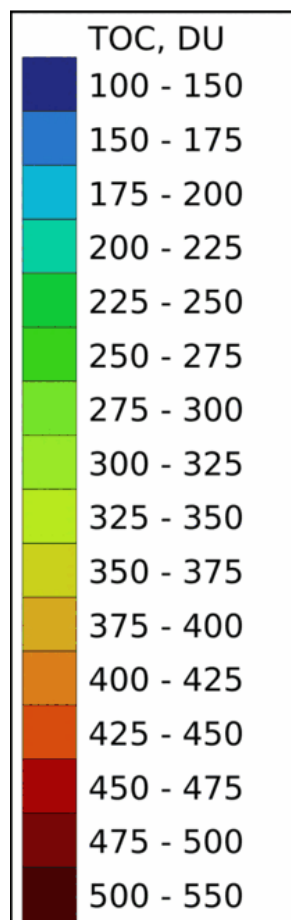
MAM – март, апрель, май

JJA – июнь, июль, август

SON — сентябрь, октябрь, ноябрь

<https://doi.org/10.3390/rs15092481>

Пример того,
как ИКФС-2
проводит
зондирование



Сравнения ОСО по данным ИКФС-2 со спутниковыми и наземными данными. Средние разности и стандартные отклонения разностей

| Измерения | Период обучения ИНС, лет | Период сравнений, лет | Bias, % | SDD, % |
|--|--------------------------|-----------------------|---------|--------|
| Наземные WOUDC, Dobson, Brewer, Direct Sun | 6 | 8 | -0.1 | 2.9 |
| | | 6 | -0.2 | 2.9 |
| | | 2 | -0.1 | 2.7 |
| | 8 | 8 | -0.2 | 2.6 |
| | | 6 | -0.1 | 2.7 |
| | | 2 | -0.8 | 2.3 |
| Спутниковые TROPOMI | 6 | 6 | -1.2 | 2.8 |
| | | 2 | -1.9 | 3.3 |
| | 8 | 8 | -2.2 | 2.7 |
| | | 6 | -2.1 | 2.6 |
| | | 2 | -2.4 | 2.8 |
| | | 2 | -2.4 | 2.8 |

Периоды : 2015-2022 гг. - 8 лет (полоса захвата 1000 км, 1500 км), 2015-2021 гг. - 6 лет (полоса захвата 1000 км),
2021-2022 гг. - 2 года (полоса захвата 1500 км)

Выводы

- По разработанной методике и данным наземных измерений средние разности ОСО составляют от -0,6 до -0,8%, а стандартные отклонения этих разностей не превышают 3%
- Средние разности ОСО по разработанной методике и данным измерений прибором ТРОПОМІ составляют от -2 до 0 %, стандартные отклонения - от 2 до 4 %
- Методика, которая была разработана для измерений с шириной полосы захвата 1000 км (период за 6 лет), применима к измерениям с более широкой полосой захвата - 1500км (данные 2021-2022гг), при этом разности между наземными и спутниковыми измерениями незначительно увеличились из-за расширения полосы сканирования.
- Обучение ИНС на всем массиве данных за 8 лет измерений позволило улучшить согласие за последние 2 года, практически не ухудшая за предыдущие 6 лет измерений. Средние расхождения (bias) между данными независимых измерений и данными ОСО, полученными ИКФС-2, составляют менее 2%, а стандартные отклонения разностей (SDD) - менее 3%.
- Показано преимущество разработанной методики (ИК-метода) перед измерениями на аппаратуре ОМІ и ТРОПОМІ (метод рассеянного и отраженного солнечного излучения), возможность проведения измерений в период полярной ночи.

Исследование выполнено в лаборатории «Исследования озонового слоя и верхней атмосферы» СПбГУ (соглашение с Минобрнауки РФ № 075–15-2021-583)

Благодарим НИЦ «Планета» за предоставление доступа к данным спектральных измерений

Спасибо за внимание