

**Использование эталонных наземных измерений
общего содержания озона
для интерпретации спутниковых данных**

**Ю.М. Тимофеев, Г.М. Неробелов, Г.В. Кобзарь,
А.А. Соломатникова**

**Санкт-Петербургский государственный университет,
Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова,**

**Двадцатая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА" «14 - 18 ноября 2022 г. ИКИ, Москва,**

Актуальность и цель исследования

- **Важность глобального и регионального мониторинга общего содержания озона (ОСО)**
- **Высокие требования к точности измерений ОСО (от 1%)**
- **Наличие различных методов и средств мониторинга ОСО**
- **Наземные измерения ОСО**
- **Спутниковый мониторинг ОСО**
- **Эталонные наземные измерения ОСО приборами Добсона и Брюера**
- **Методы построения обратного оператора для решения обратной задачи**
- **Непосредственное использование эталонных измерений ОСО для построения обратного оператора**
- **Примеры реализации новой методики**

Важность глобального и регионального мониторинга содержания озона

- Поглощение УФ солнечного излучения
- Термическая структура стратосферы
- Парниковый газ
- Тропосферный загрязнитель
- Процесс восстановления озоносферы
- Прогнозы состояния озоносферы в условиях климатических изменений

Основные методы и средства измерений ОСО

Наземные

Прямое и рассеянное солнечное УФ излучение

Прямое солнечное ИК излучение

Тепловое ИК атмосферное излучение

Тепловое МКВ атмосферное излучение

Солнечное излучение отраженное от Луны

Лидарный метод

Озонзондирование

Требования к точности измерений ОСО-1-5%

Основные методы и средства измерений содержания озона

Спутниковые

Метод прозрачности

Метод собственного (теплого и неравновесного)
излучения

Метод рассеянного и отраженного солнечного излучения

Метод свечений

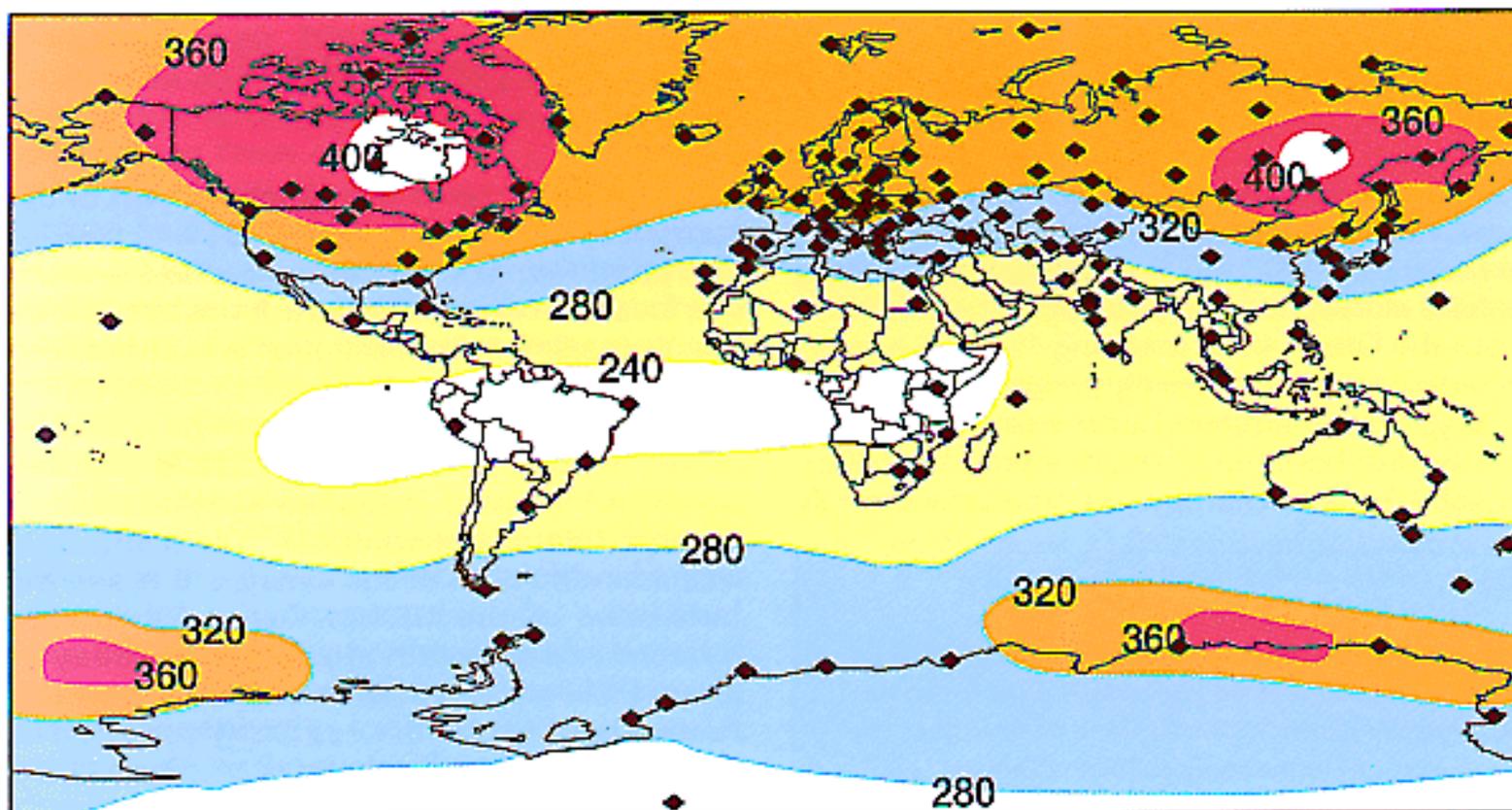
**Разные методы имеют разные погрешности
измерений, пространственное разрешение, частоту
наблюдений и периоды наблюдений**

Эталонные наземные измерения ОСО приборами Добсона и Брюера

Станции ВМО, NDACC и т.д.

В настоящее время приборы Добсона и Брюера считаются эталонами на мировой озонOMETрической сети, в том числе в Росгидромете, измеряющие ОСО по прямому и рассеянному солнечному излучению в УФ диапазоне **с погрешностями ~1-2% в зависимости от состояния атмосферы**

ВМО сеть наблюдений ОСО



Спутниковые измерения (ИК тепловое излучение)

Приборы: AIRS, TES, IASI, CrIS, ИКФС-2

Российский Фурье спектрометр ИКФС-2,

функционирующий на российском спутнике Метеор-М №2, измеряет уходящее тепловое ИК излучение в спектральной области 660-2000 см⁻¹ со спектральным разрешением 0.37-0.45 см⁻¹ и радиометрическим шумом в диапазоне 0.15-0.45 мВт/м² ср см⁻¹.

Аппаратура ИКФС-2 более 6 лет стабильно функционирует на борту спутника «Метеор-М No.2», обеспечивая измерения ~130 000 спектров в сутки

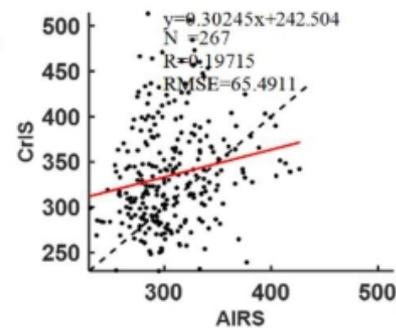
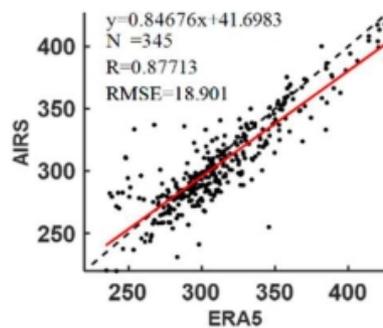
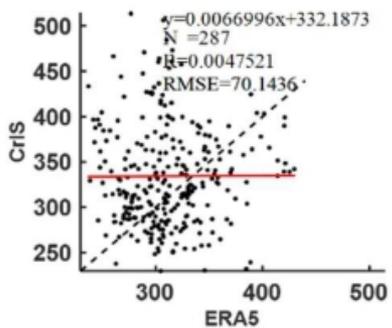
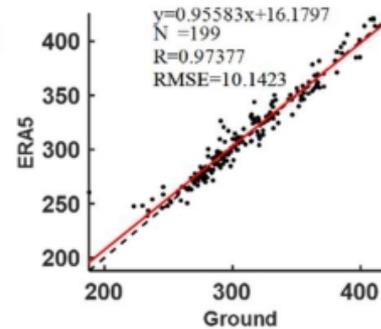
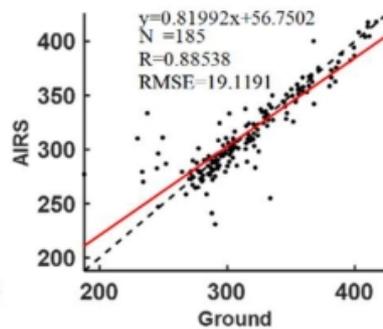
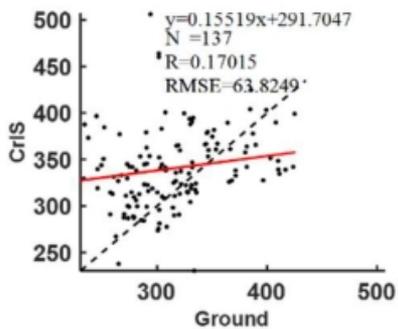
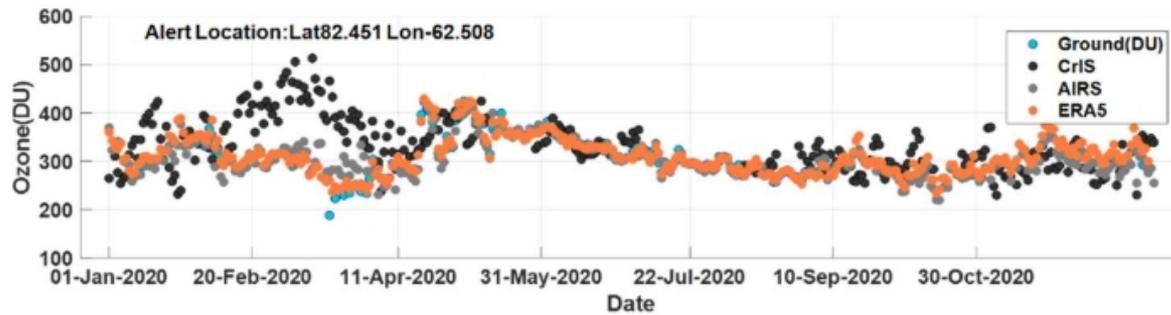
Построение обратного оператора

- Физико-математический подход – использование уравнения переноса излучения и решение нелинейного интегрального уравнения Фредгольма I рода
- Использование верифицированного спутникового прибора, например, OMI (регрессия, ИНС)
- Использование непосредственно эталонных измерений

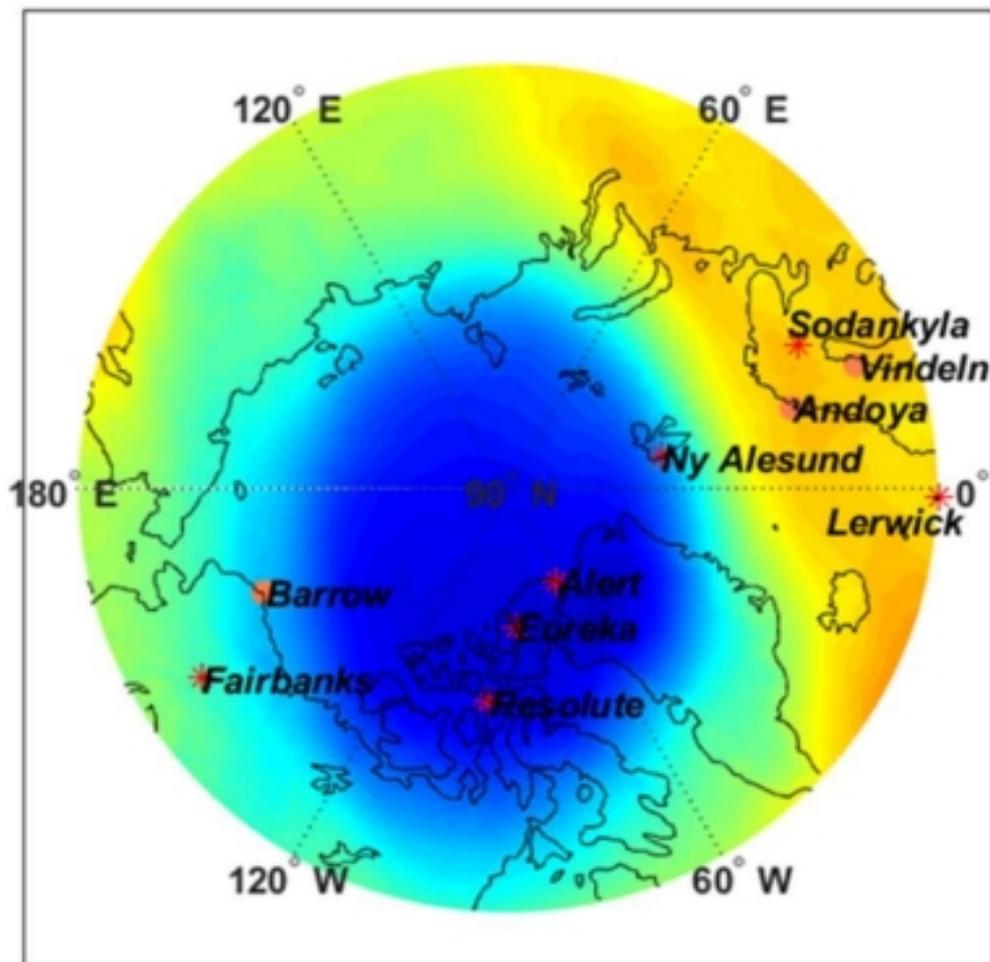
Погрешности определения ОСО в полярных районах

- В среднем 3-5%
- В условиях аномалий достигают 8-20 и более процентов
- Причины
 - низкие температуры,
 - малые вертикальные градиенты температуры,
 - наличие облачности

Примеры сопоставлений ОСО



Озонная аномалия и расположение наземных станций эталонных измерений ОСО в полярных районах



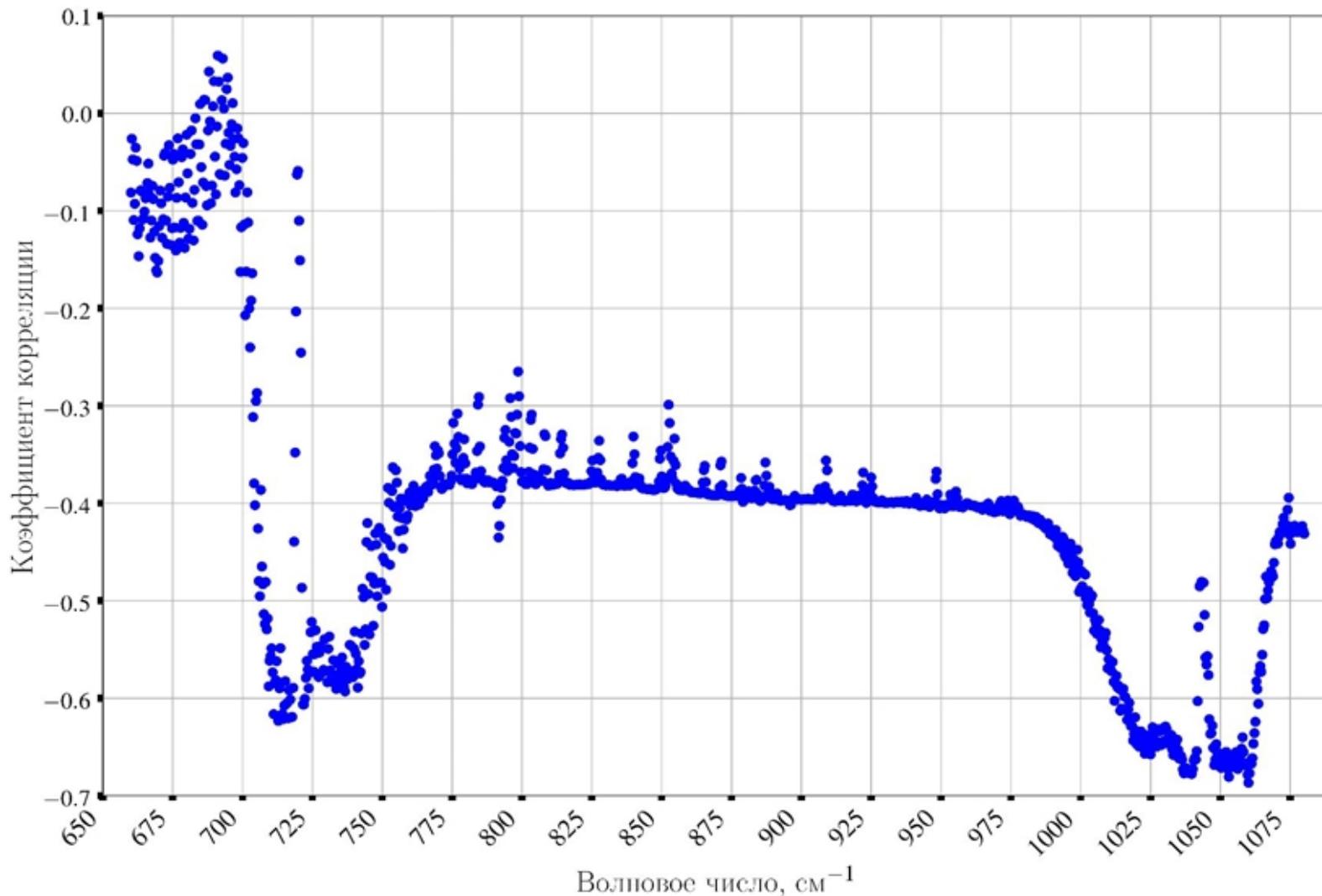
Построение обратного оператора для решения обратной задачи-множественная регрессия на основе эталонных измерений

1. Создание совместного ансамбля – наземные эталонные измерения ОСО (Добсоном и Брюером) и спутниковые измерения спектров уходящего ИК теплового излучения атмосферы (ИКФС-2)
2. Расчеты ковариационных матриц $K_{\varphi f}$ и K_f
3. Решении обратной задачи методом множественной регрессии с помощью обратного оператора (R)

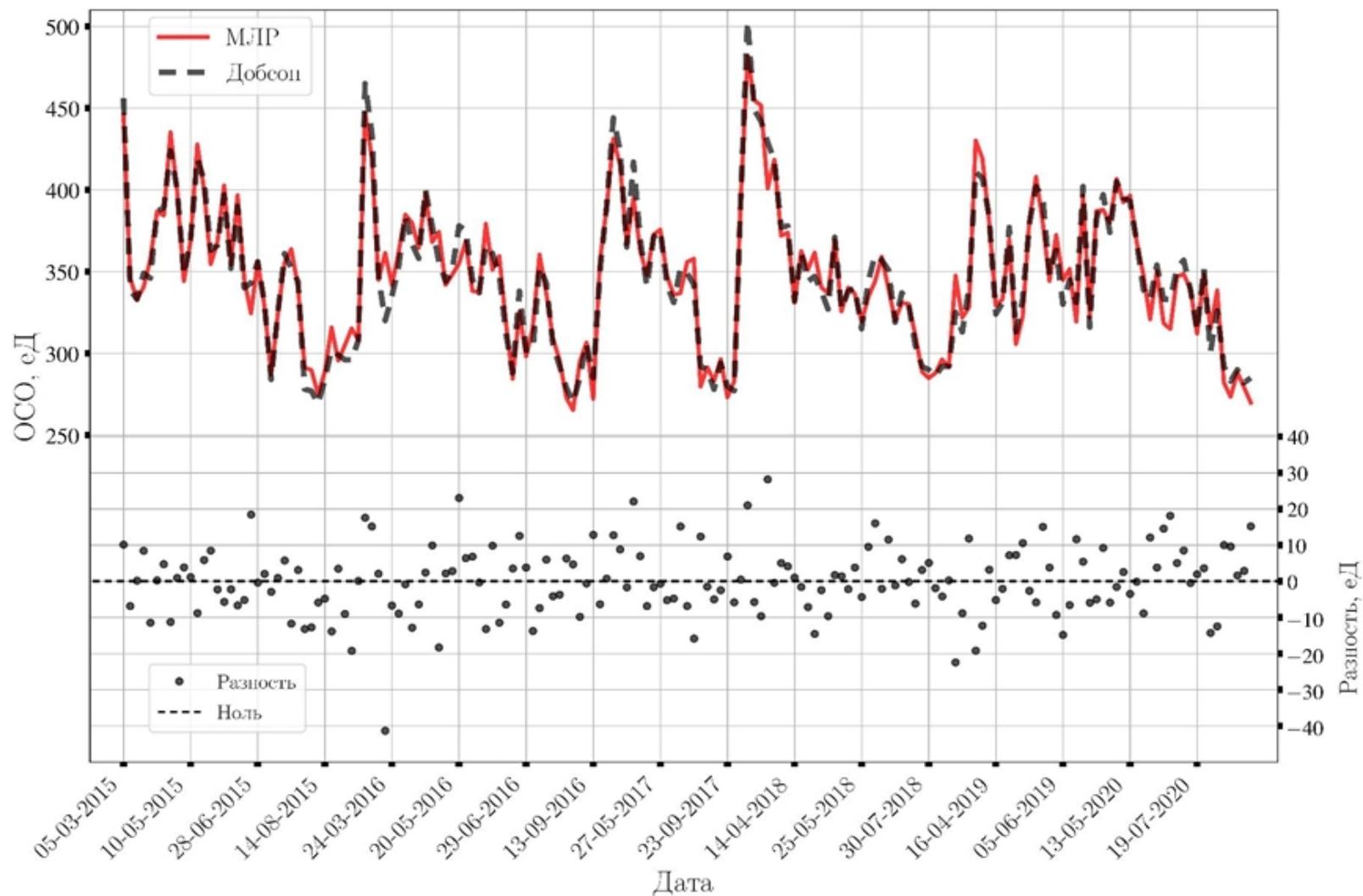
$$R = K_{\varphi f} (K_f + I\alpha^2)^{-1}$$

α - параметр регуляризации

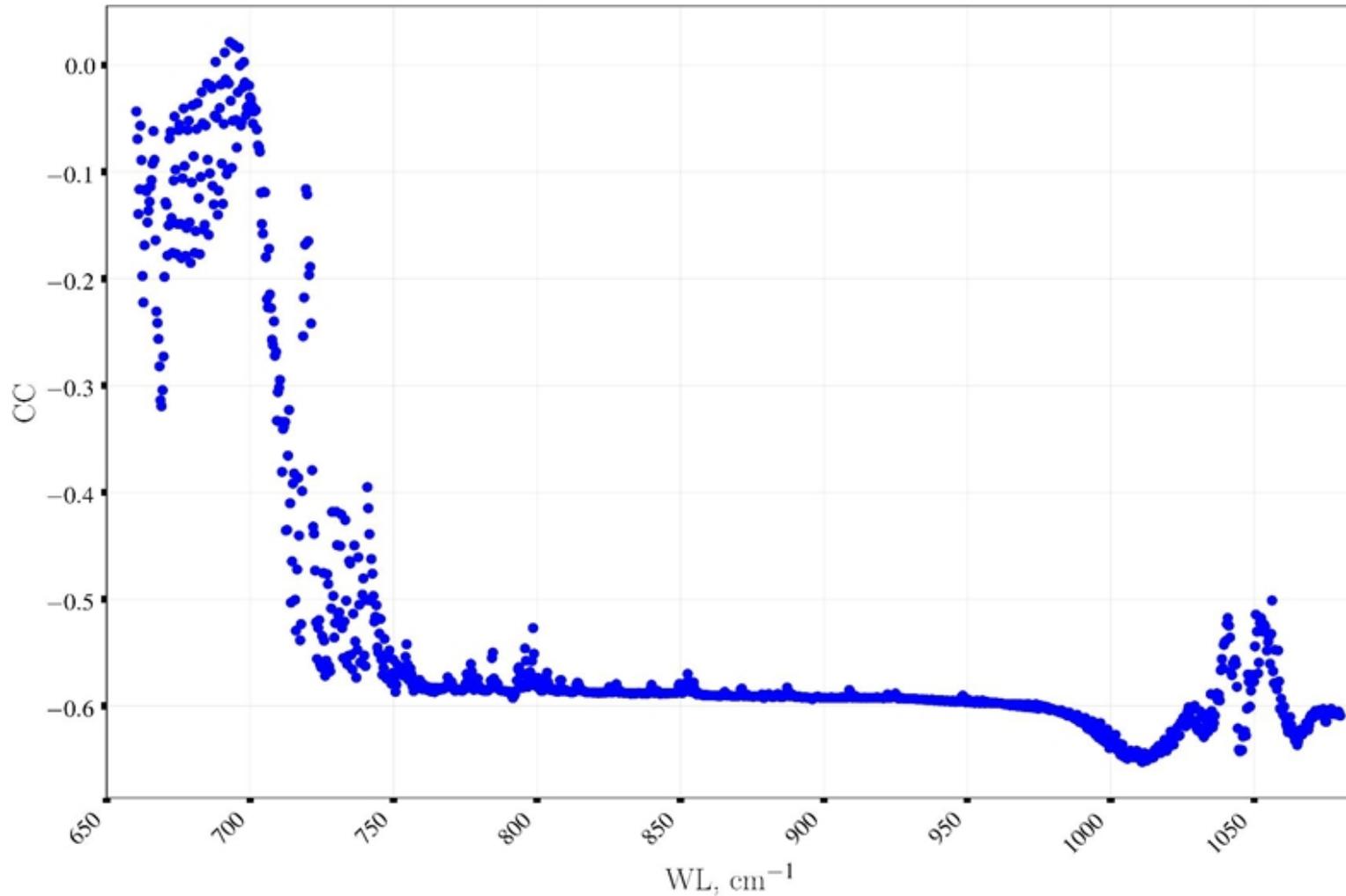
Спектральный ход коэффициента корреляции между наземными измерениями ОСО и спутниковыми измерениями уходящего ИК излучения (п. Воейково)



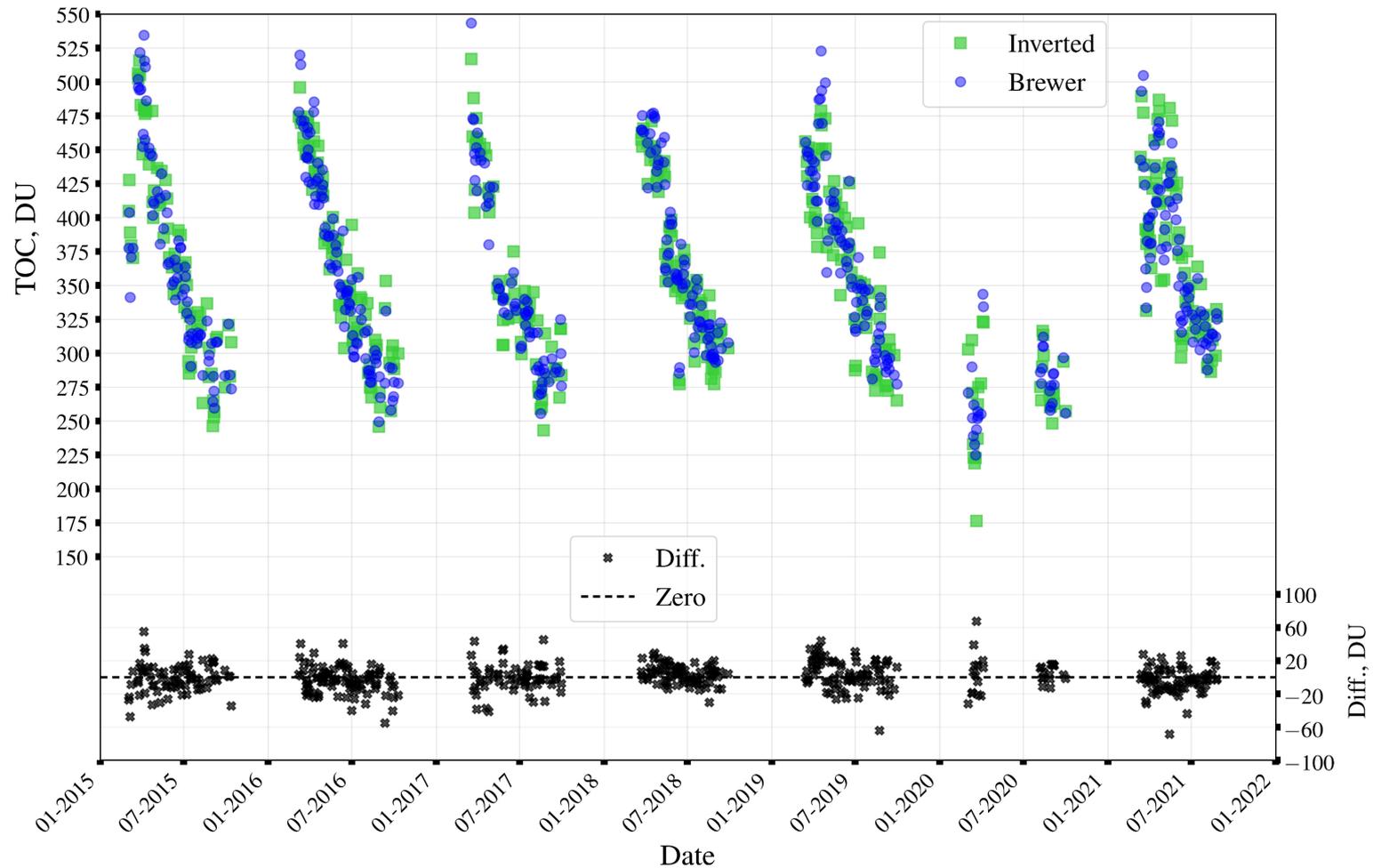
Временной ряд ОСО в Воейково за 2015-2020 гг. на основе наземных измерений прибором Добсона и аппроксимации множественной линейной регрессией



Спектральный ход коэффициента корреляции между наземными измерениями ОСО и спутниковыми измерениями уходящего ИК излучения (Резольют)



Сравнения наземных (Брюер) и спутниковых измерений ОСО (Резольют)



ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ новой методики построения обратного оператора для спутниковых измерений ОСО (ИКФС-2) с использованием эталонных наземных измерений приборами Добсона и Брюера для станций Воейкова и Резольют показывает ее перспективность.
2. Аппроксимация связи между ОСО и уходящим ИК излучением российского прибора ИКФС-2 с помощью множественной линейной регрессии позволяет получить погрешности аппроксимации **~2.8%** и **КК=0.973** (Воейково) и **6.6%** с **КК около 0.94** (Резольют) .

Основные выводы

3. Средние относительные разности (COP) или погрешности спутниковых (ИКФС-2) определений вариации ОСО с помощью предложенной методики при использовании измерений спектров уходящего ИК излучения в области 660-1100 см⁻¹ составляют 3.1% с КК=0.97 (Воейково) и 3.1 – 5.3% и КК=0.94 (Резольют)

4. Погрешности спутниковых измерений ОСО различны в разные года – максимальны в год наблюдения «озонной дыры» - 2020 год

Год	COP, ед (%)	N
2015	17.2 (4.8)	73
2016	16.2 (4.5)	89
2017	17.3 (4.8)	64
2018	11.2 (3.1)	76
2019	17.9 (4.9)	79
2020	19.4 (5.3)	30
2021	15.5 (4.3)	74

Благодарим за внимание!