

**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 построение 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

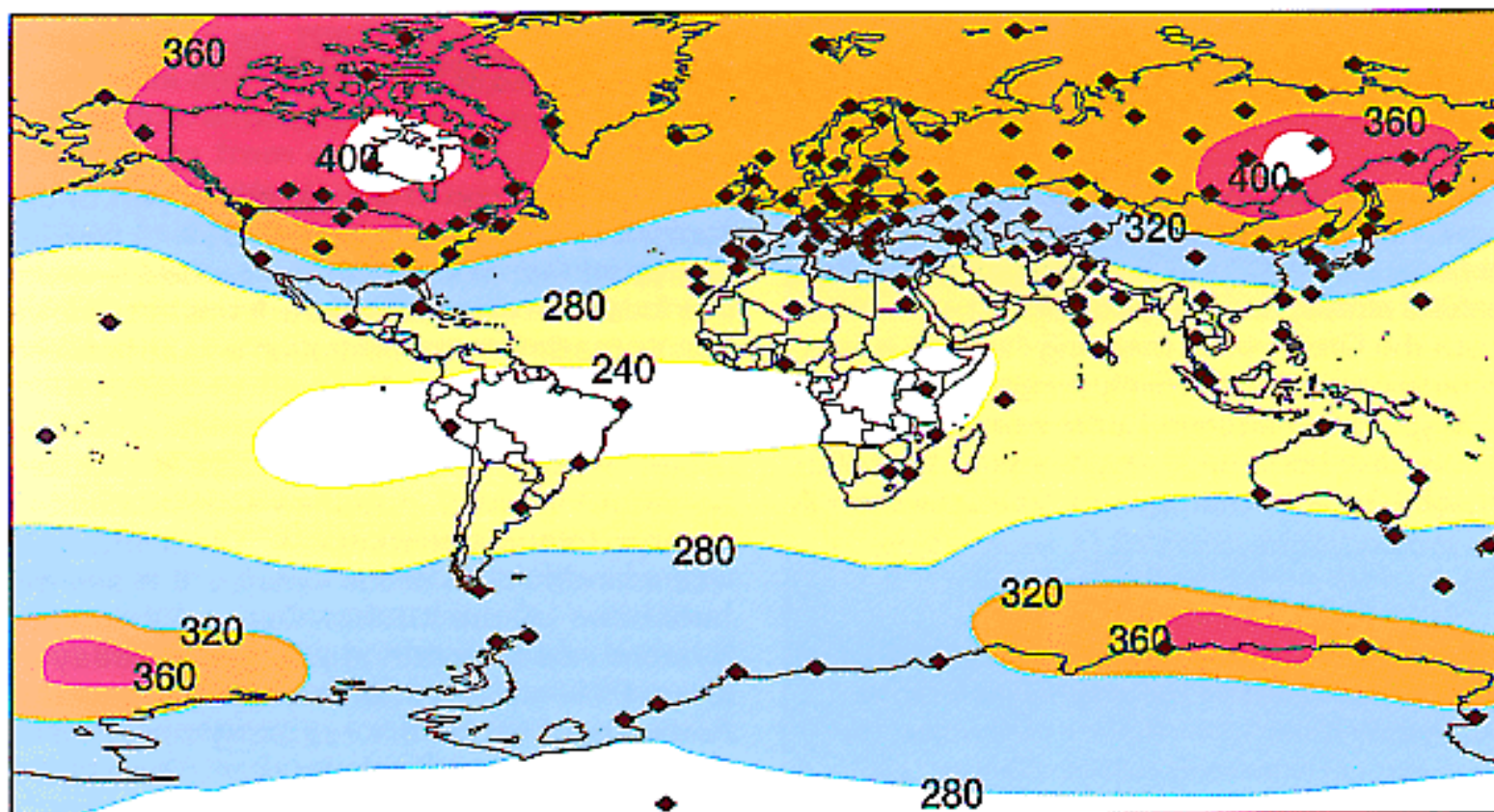
**Разные методы имеют разные погрешности  
измерений, пространственное разрешение, частоту  
наблюдений и периоды наблюдений**

# **Эталонные наземные измерения ОСО приборами Добсона и Брюера**

## **Станции ВМО, NDAСС и т.д.**

В настоящее время приборы Добсона и Брюера считаются эталонами на мировой озонметрической 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<sup>-1</sup> со спектральным разрешением 0.37-0.45 см<sup>-1</sup> и радиометрическим шумом в диапазоне 0.15-0.45 мВт/м<sup>2</sup> ср см<sup>-1</sup>.

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



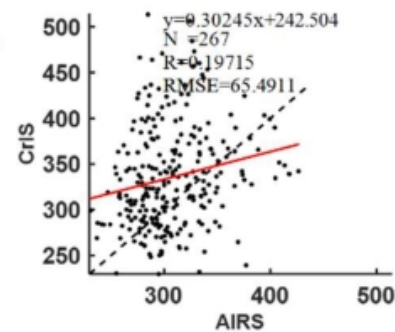
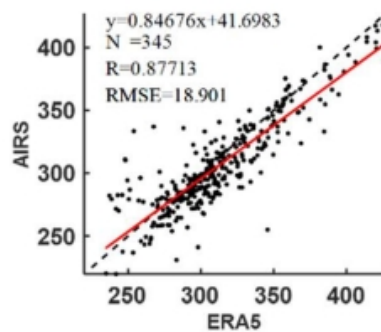
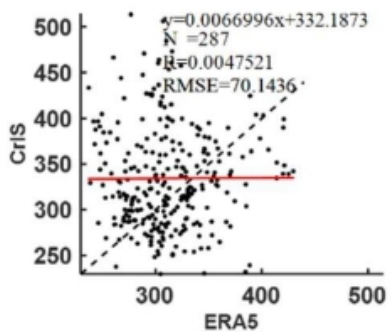
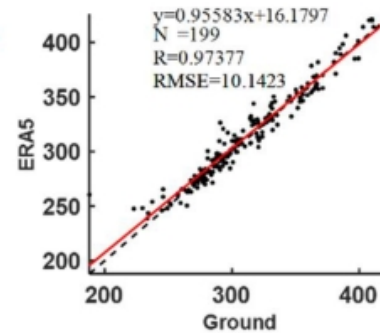
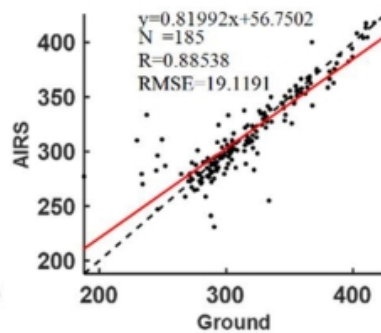
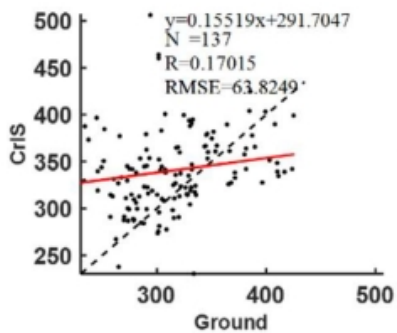
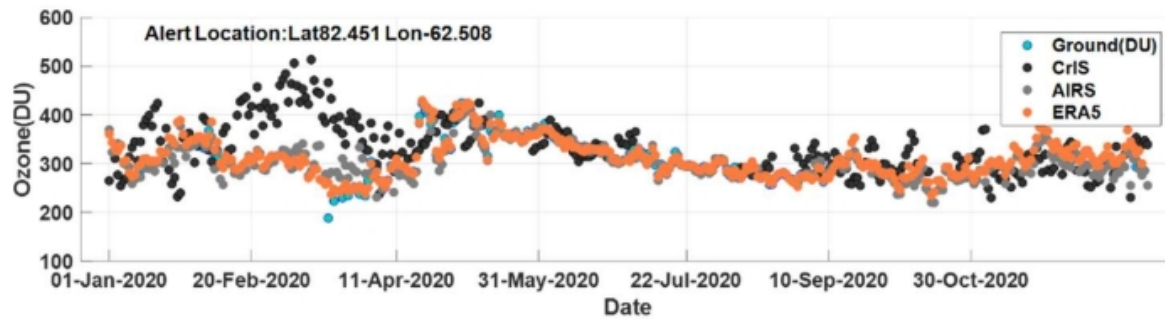
# Построение обратного оператора

- 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

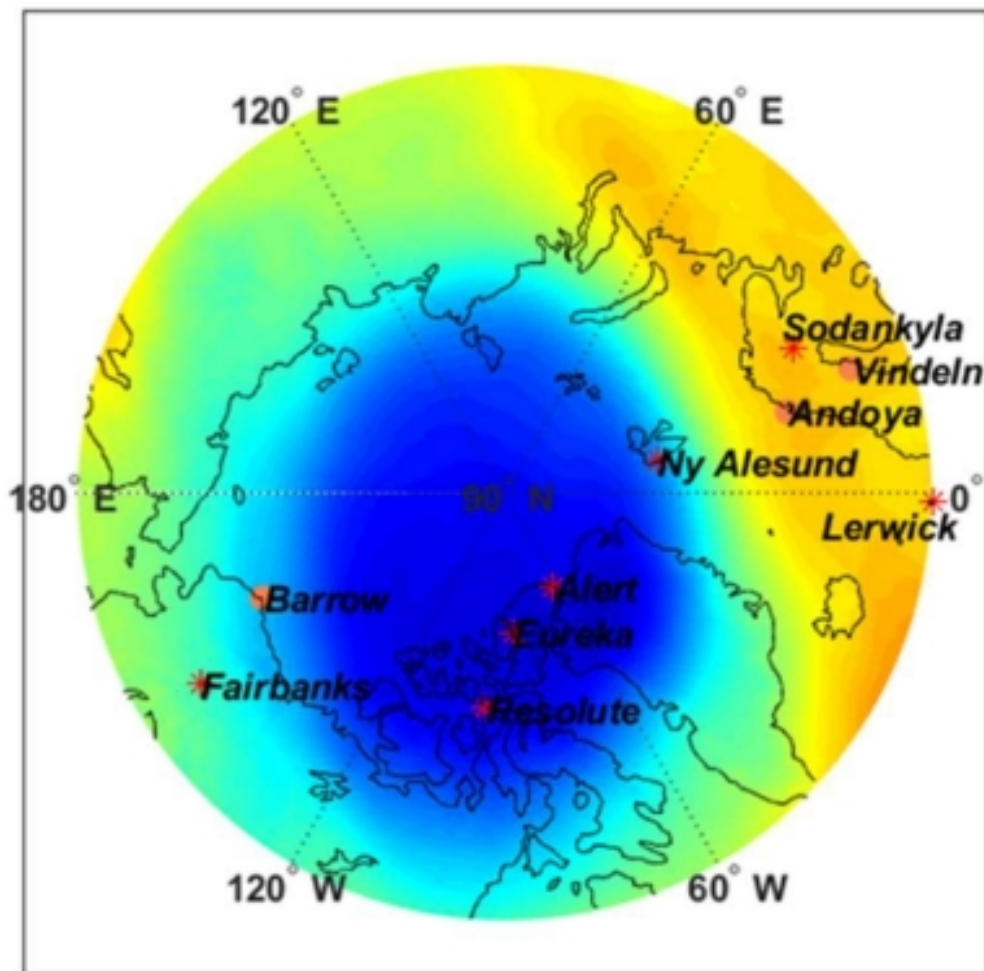
## Погрешности определения ОСО в полярных районах

- 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



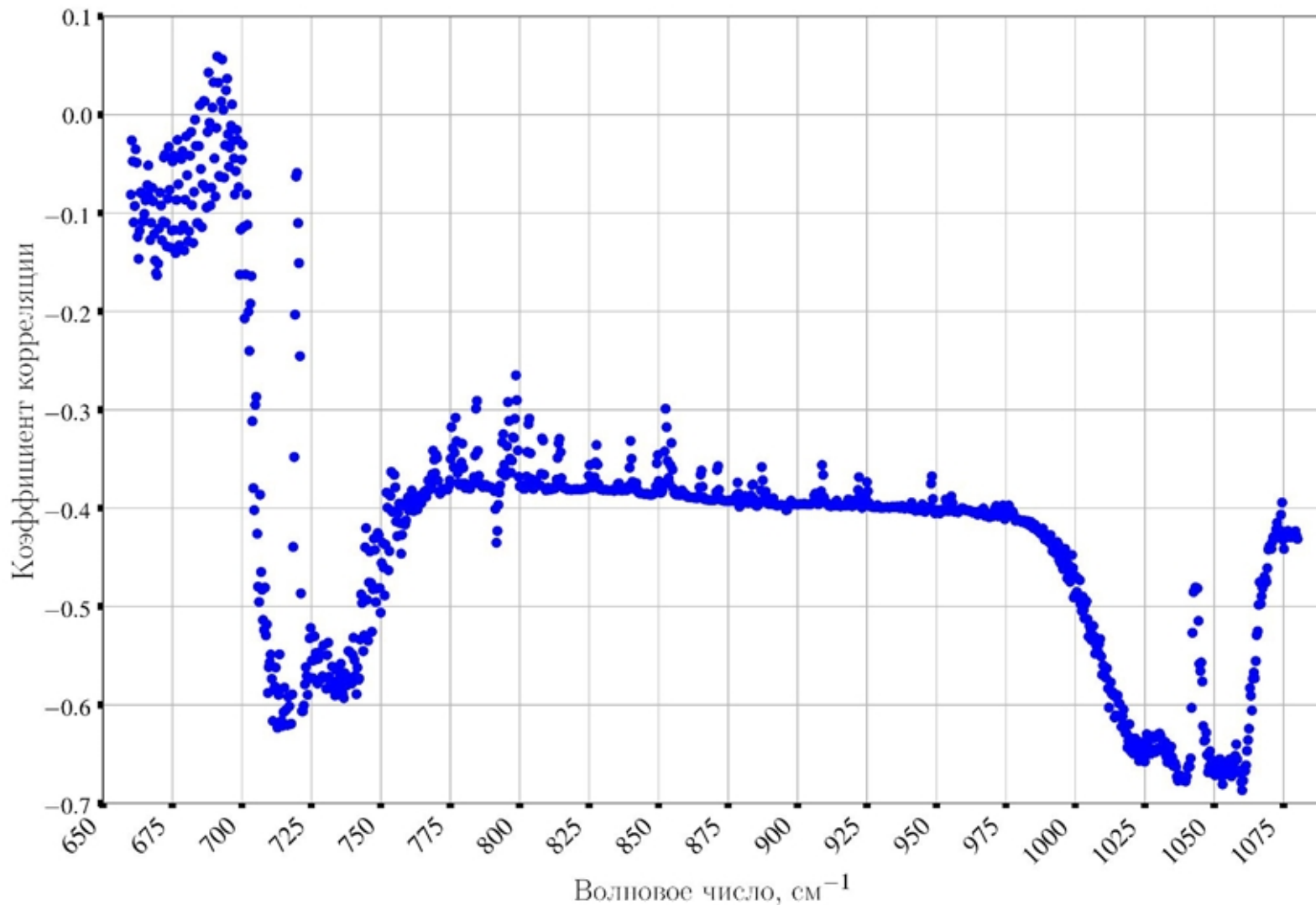
# Построение обратного оператора для решения обратной задачи-множественная регрессия на основе эталонных измерений

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 ( $R$ )

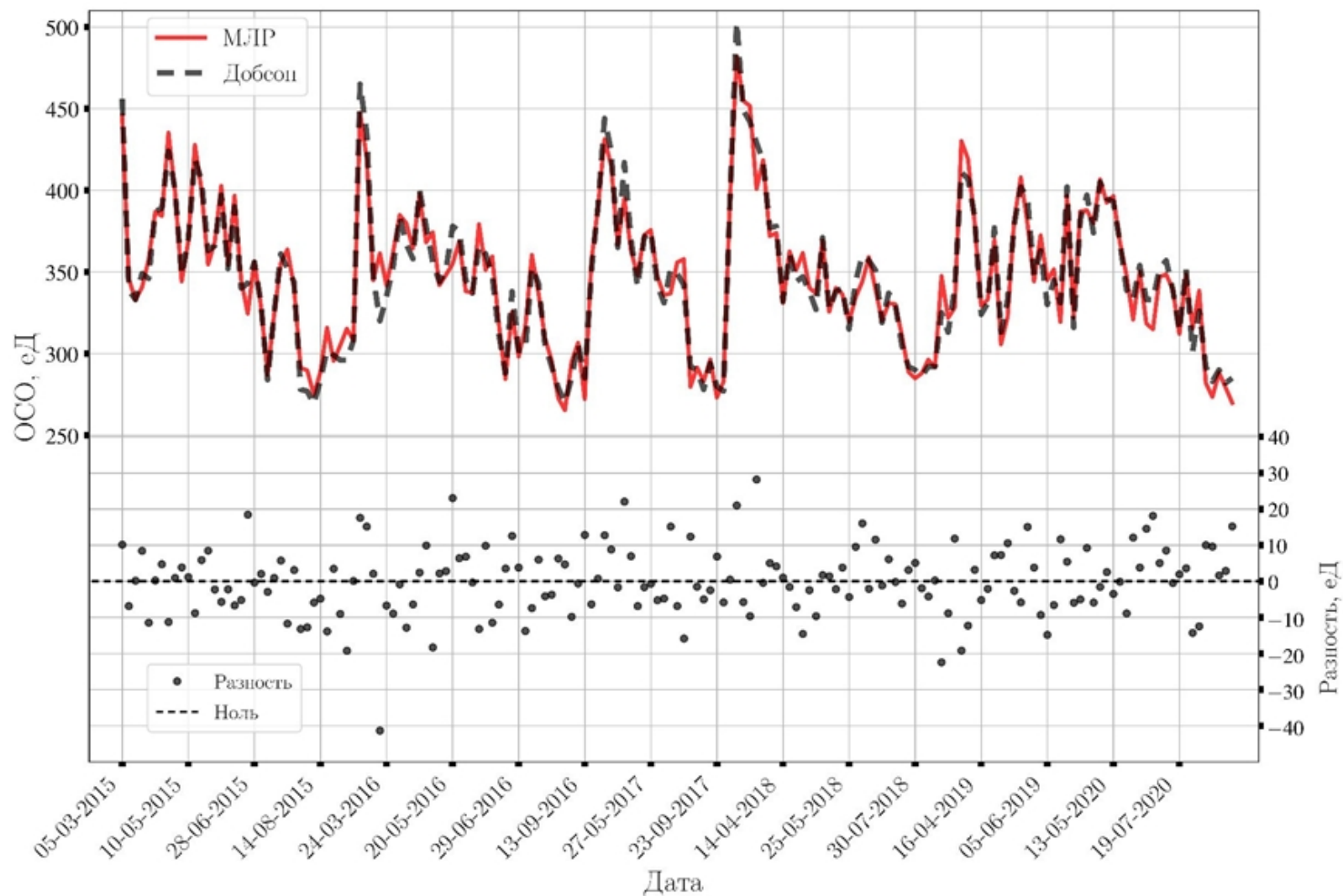
$$R = K_{\varphi f} (K_f + I\alpha^2)^{-1}$$

$\alpha$  - параметр регуляризации

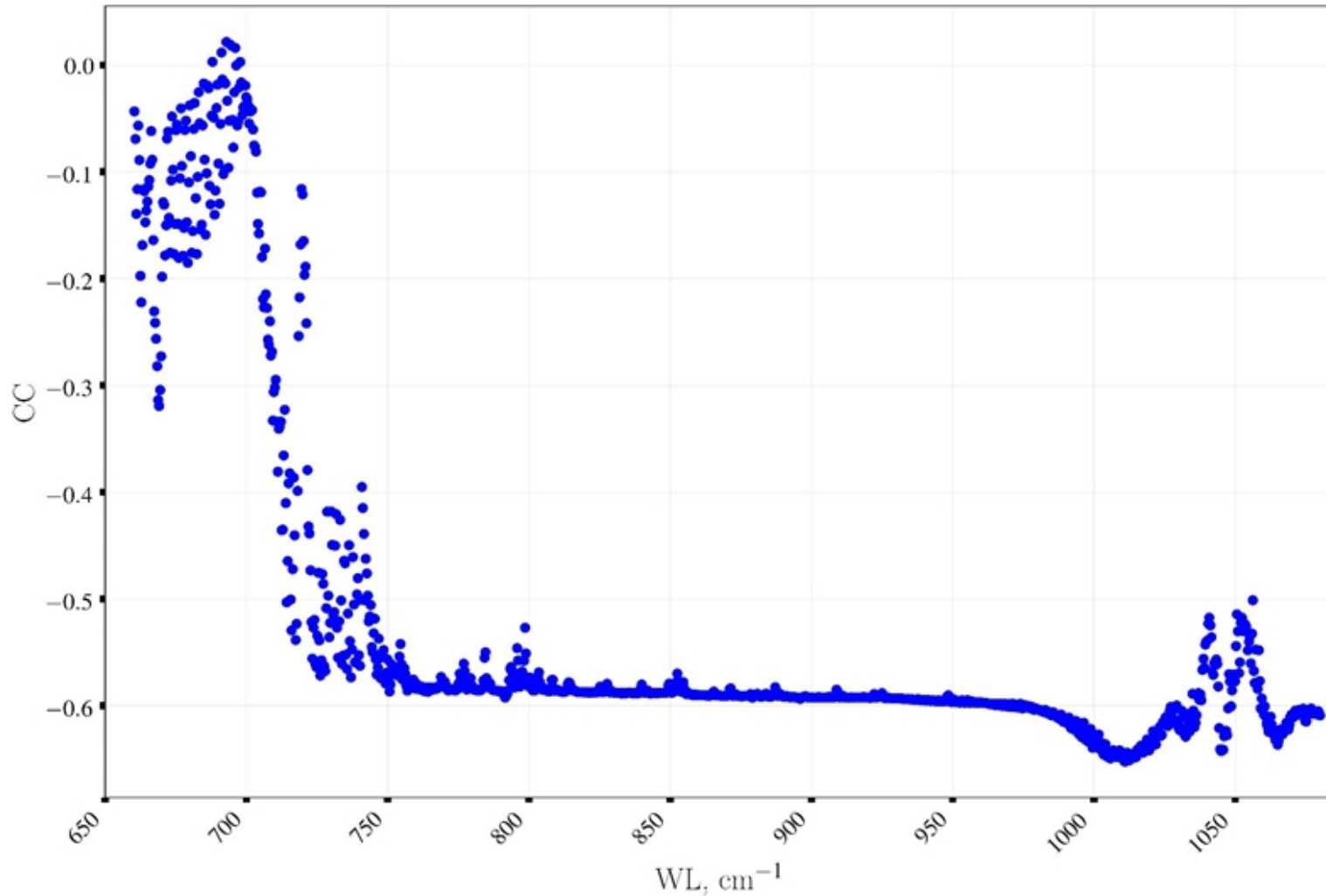
# Спектральный ход коэффициента корреляции между наземными измерениями ОСО и спутниковыми измерениями уходящего ИК излучения (п. Воейково)



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

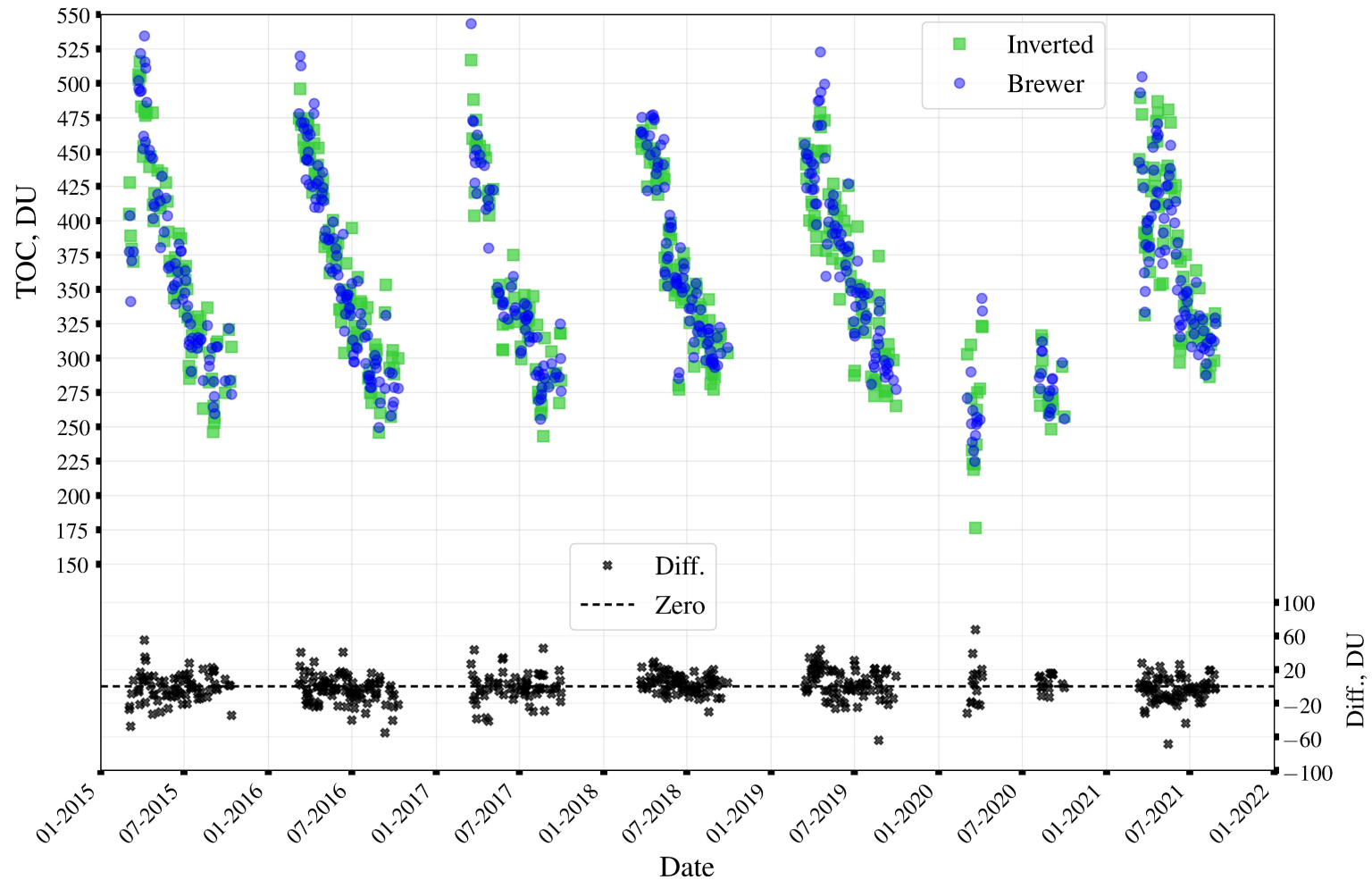


# Спектральный ход коэффициента корреляции между наземными измерениями ОСО и спутниковыми измерениями уходящего ИК излучения (Резольют)





# 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<sup>-1</sup> 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
<b>2018</b>	<b>11.2 (3.1)</b>	<b>76</b>
2019	17.9 (4.9)	79
<b>2020</b>	<b>19.4 (5.3)</b>	<b>30</b>
2021	15.5 (4.3)	74

Благодарим за внимание!