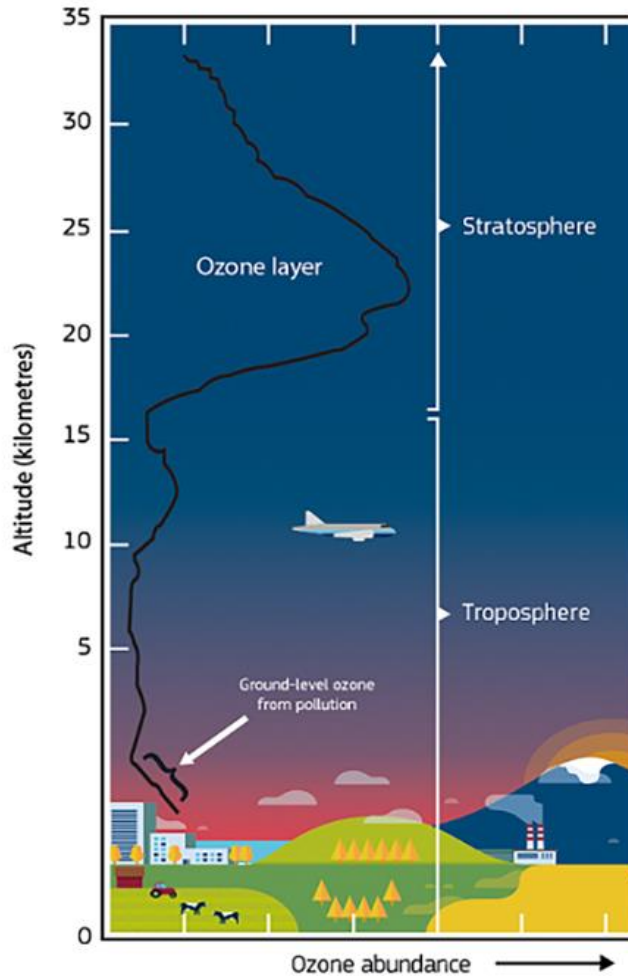
An aerial photograph of a mountain range with a valley and a river. The mountains are covered in green vegetation, and the valley floor is a mix of brown and green. A river flows through the valley. The sky is a clear, pale blue.

Анализ информативности спектров уходящего теплового излучения относительно вертикального распределения озона в атмосфере

Акишина С.В., Поляков А.В., Виролайнен Я.А.

**Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, Россия**



Стратосферный озон

- Составляет около **90 %** общего содержания озона
- Образуется в ходе цикла Чепмена при воздействии солнечного излучения
- Защищает от опасного воздействия жесткого ультрафиолетового излучения
- Проблема: **истощение озонового слоя**, как результат накопления в атмосфере озоноразрушающих веществ (ОРВ)
- Монреальский протокол (1989) – ограничение выбросов ОРВ

Тропосферный озон

- Составляет около **10 %** общего содержания озона
- Образуется в результате фотохимических реакций с участием загрязнителей CO, NOx, CH₄; переносится из стратосферы
- Вредный для живых существ в силу своей токсичности
- Вносит вклад в рост парникового эффекта

Глобальный мониторинг атмосферного озона

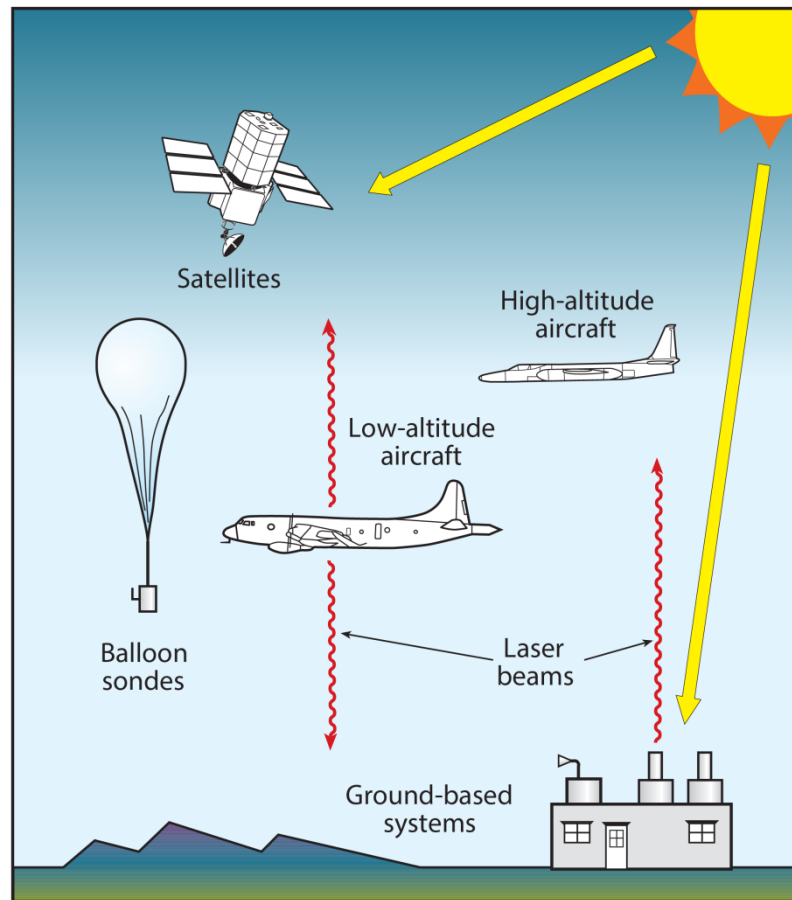
Measuring Ozone in the Atmosphere

Измерения общего содержания озона

- спектрофотометры Добсона и Брюера, фильтровый озонметр М-124
- спектрометры УФ-видимого диапазона (SOAZ, DOAS)
- ИК-Фурье-спектрометры (Bruker 125HR)
- спутниковые измерения:
 - метод прозрачности по Солнцу (ACE-FTS),
 - метод рассеянного и отраженного солнечного излучения (OMI, TROPOMI),
 - метод уходящего теплового излучения (ИКФС-2, IASI)

Измерения профилей озона

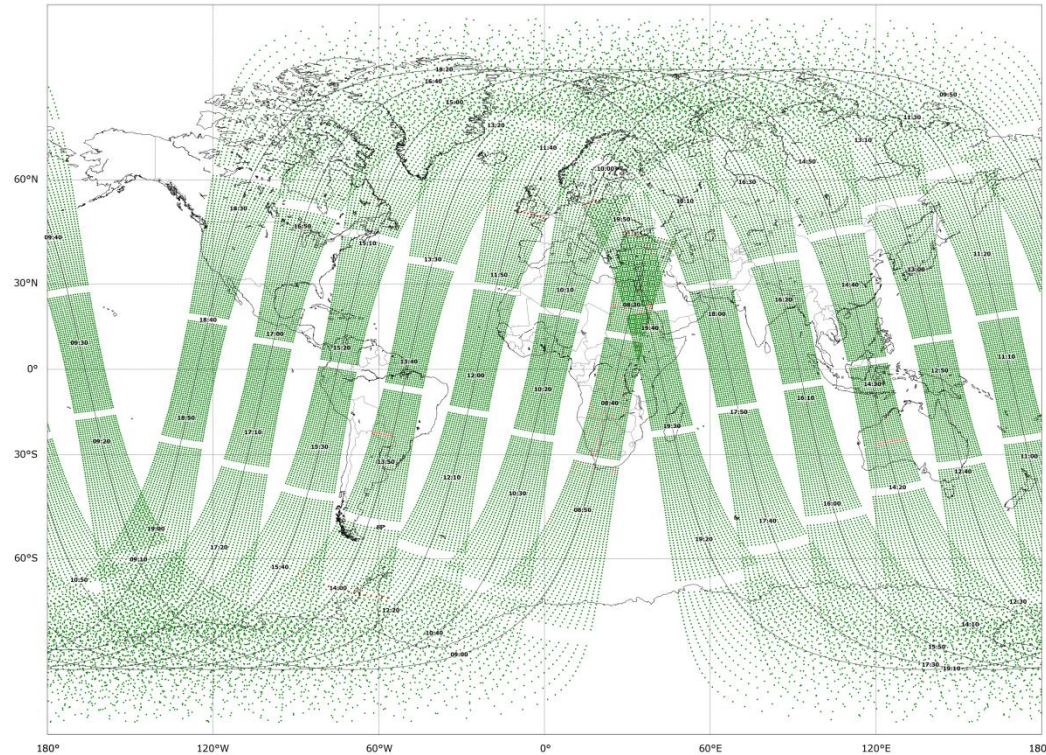
- озонзонды (до высоты ~ 30 км)
- спутниковые измерения (MLS)
- озоновые лидары и МКВ радиометры



Фурье-спектрометр ИКФС-2

Информацию о содержании озона в атмосфере содержат спектры **уходящего теплового излучения**, измеренные прибором **ИКФС-2** на борту российского метеорологического спутника «Метеор-М» №2. **Измерения производятся на всех широтах, включая период полярной ночи**

● ошибка сканера (0)
 ● поврежденные данные (196)
 ● геопривязка без БСКВУ (0)
 ● сбой геопривязки (0)
 ● нет врем. привязки (0)
 ● заглаживание ФП (0)
 ● криосадок (0)
 ● оциф (1)



Пример регистрируемых сигналов прибором ИКФС-2 при сканировании от 2021.07.19 - 01:00

<http://planet.rssi.ru/calval/public-ikfs>

Основные технические характеристики:

Рабочий спектральный диапазон	5-15 мкм ($660-2000 \text{ см}^{-1}$)
Спектральное разрешение (без аподизации)	$0,4 \text{ см}^{-1}$
Спектральная плотность энергетической яркости, эквивалентная шуму (NESR)	$(0,1-0,5) \cdot \text{мВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$
Полоса обзора	от 1000 до 2500 км
Пространственное разрешение в надире	35 км

Методика исследования

Цель: **оценить информативность** спектров ИКФС-2 относительно вертикального распределения озона

Физико-математический аппарат задачи:

Прямая задача:
$$f(v) = F\varphi(s) + \varepsilon \quad (1)$$

Для исследования информативности измерений
будем рассматривать линейную задачу:

$$f(v) - F\varphi_0 = \left| \frac{\partial F}{\partial \varphi} \right| (\varphi - \varphi_0) = K(\varphi - \varphi_0) + \varepsilon \quad (2)$$

Решение обратной задачи методом статических оценок:

$$\varphi = \varphi_a + (K^T S_\varepsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_\varepsilon^{-1} (f - F\varphi_a) \quad (3)$$

Матрица осредняющих ядер:

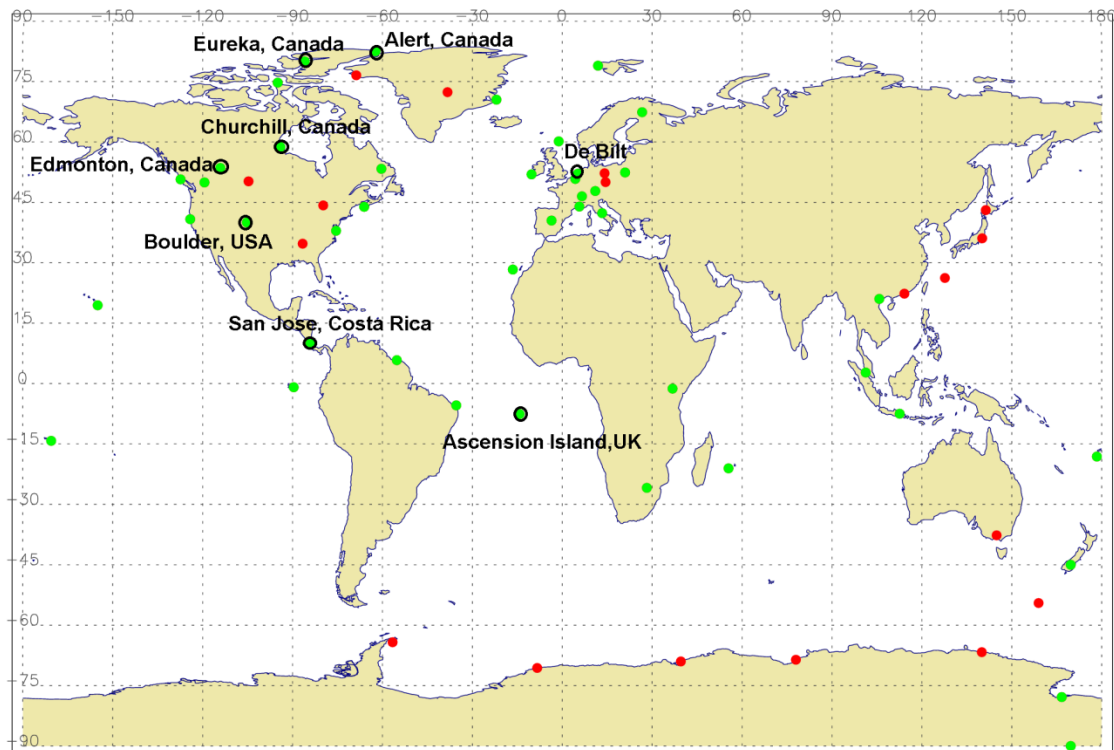
$$A = (K^T S_\varepsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_\varepsilon^{-1} K \quad (4)$$

Матрица погрешностей решения:

$$S = (K^T S_\varepsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} \quad (5)$$

Построение ковариационной матрицы

Для построения ковариационной матрицы озона и кросс-ковариационной матрицы озон-температура использованы данные **озонзондирования**



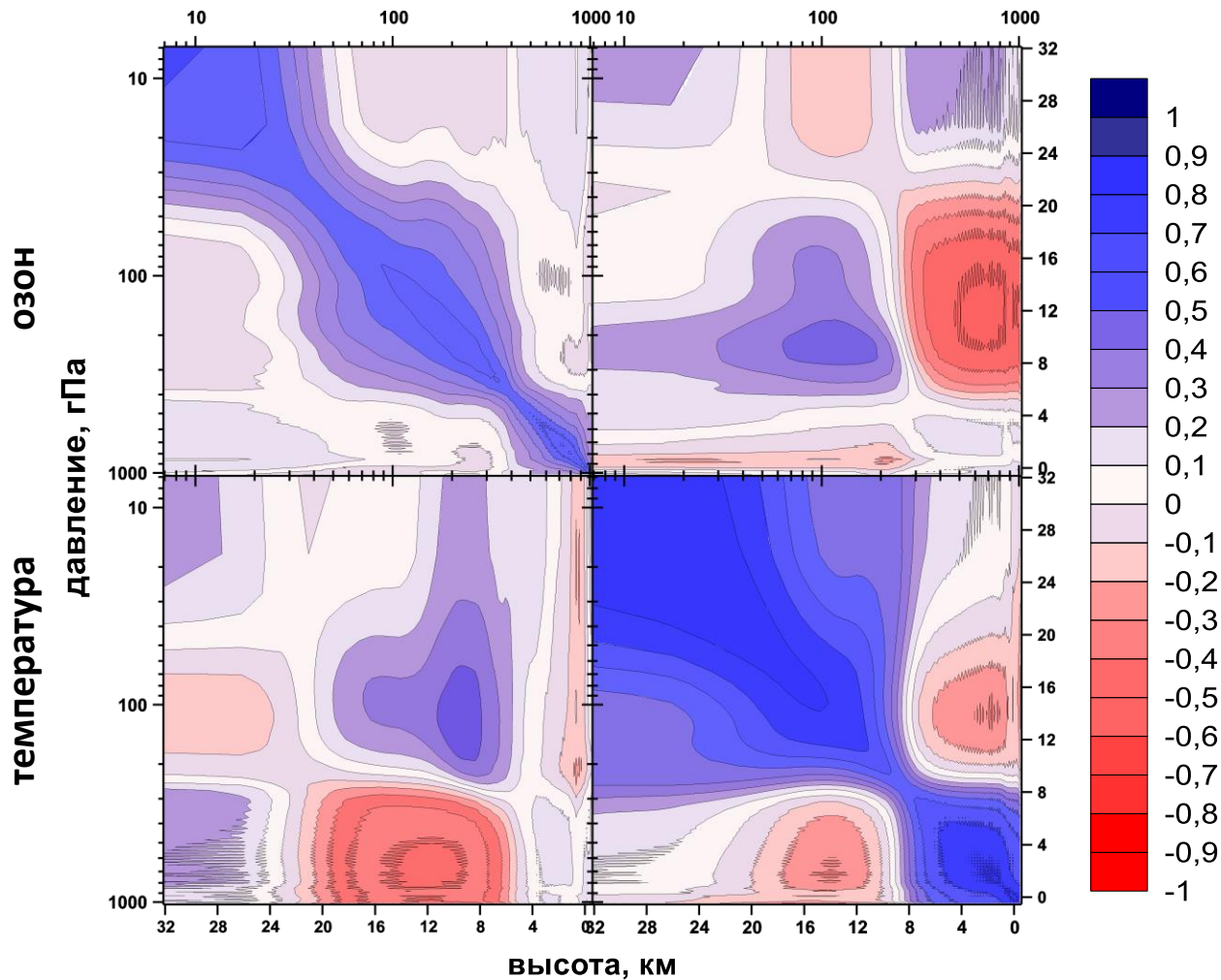
Критерии отбора профилей:

- 2015-2022 гг.
- Интерполяция на сетку модели RTTOV - 101 уровень (от 1100 до 0.005 гПа)
- $P_{min} < 6.957$ гПа
- «Вверх» (< 6.957 гПа) непрерывно достраивали моделью WACCM
- «Вниз» (> 1013.948 гПа) продолжали константой

<https://hegiftom.meteo.be/datasets/ozonesondes>

Активные станции озонзондирования (~ 60). Зеленым отмечены станции с гомогенизированными данными. Подписаны станции с наличием измеренных профилей, удовлетворяющих критериям отбора и используемых для построения ковариационной матрицы озона

Кросс-корреляционная матрица озон-температура



Можно выделить **три зоны** корреляции озона:

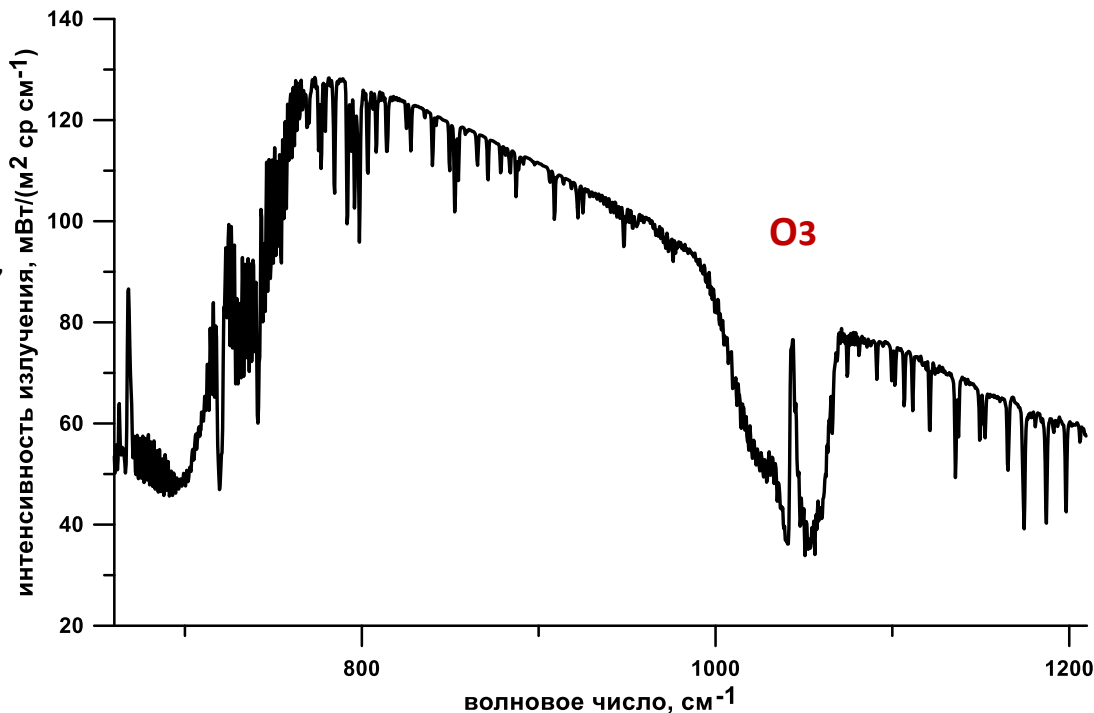
- Нижняя тропосфера (пограничный слой)
- Верхняя тропосфера
- Стратосфера

Матрица прямого оператора

Матрица производных прямого оператора рассчитывалась по модели переноса излучения **LBLRTM**
(**The Line-By-Line Radiative Transfer Model**)

Параметры расчетов LBLRTM:

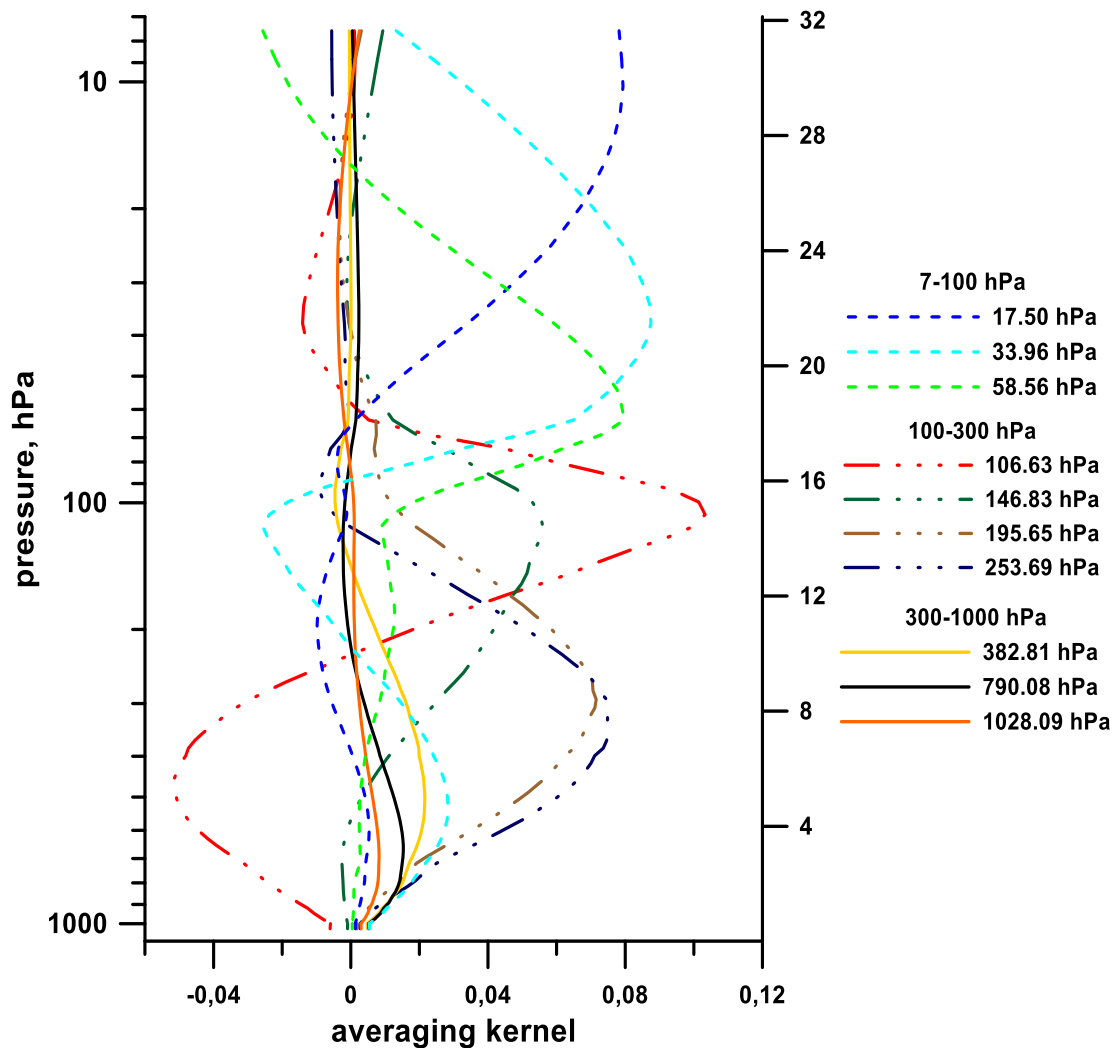
- профили газовых составляющих:
озон – среднеэкспериментальный,
H₂O – средний из профилей влажности,
CH₄, N₂O – среднеклиматическая модель WACCM,
CO₂ – 400 ppm (константа)
- зенитный угол в точке наблюдения: 180 град
- спектральная область: **660–1210 см⁻¹**
с **аподизированным** спектральным разрешением **0,7 см⁻¹**
- модель водной/снежной поверхности
- безоблачные условия



Расчеты выполнены для различных среднеклиматических профилей температуры (модель AFGL)

Пример спектрального излучения в области 660-1210 см⁻¹ (профиль температуры – модель лето средние широты), моделируемого по LBLRTM относительно спектральных каналов ИКФС-2.

Осредняющие ядра (Averaging Kernels)

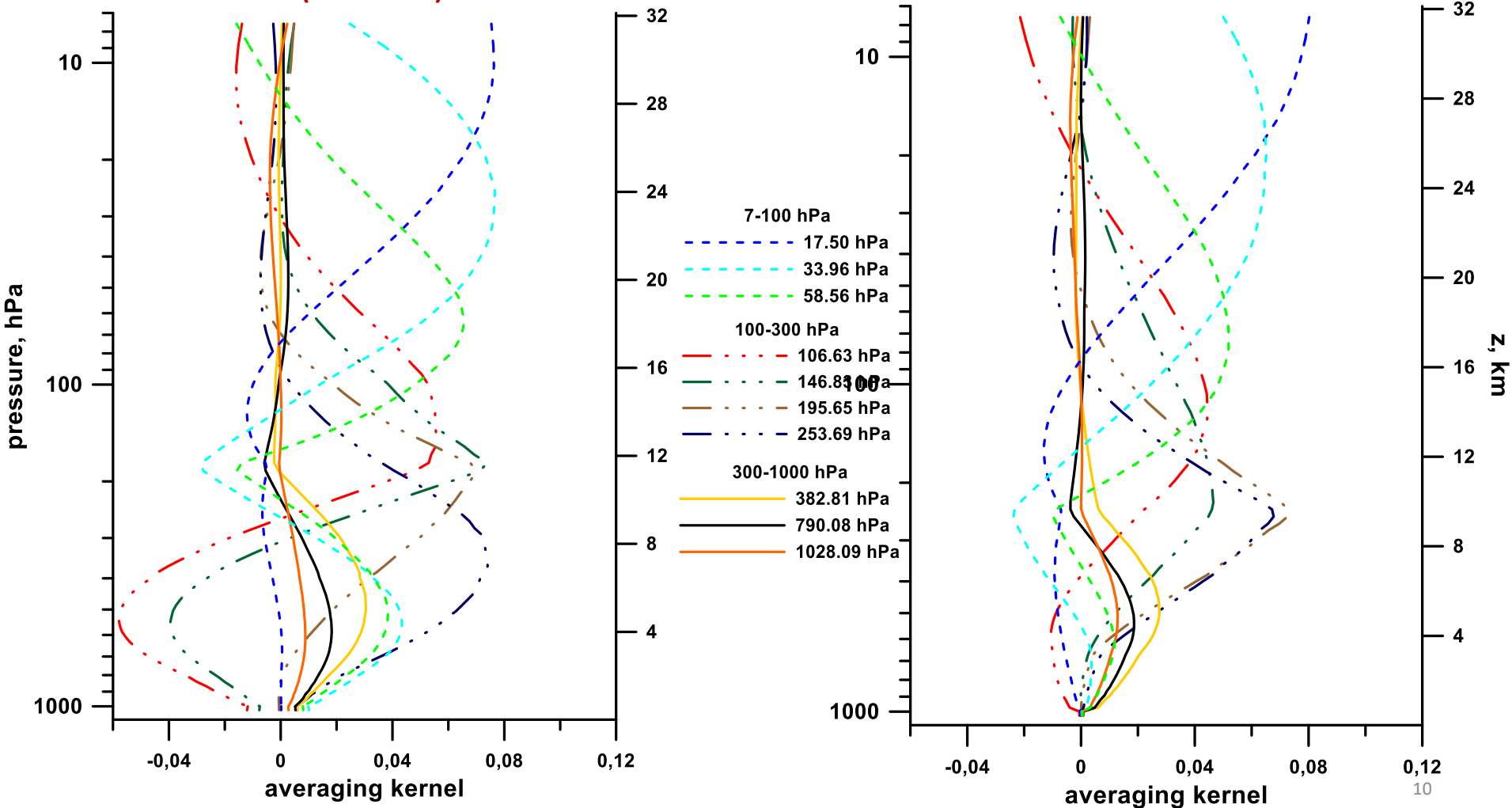


Тропики
(15N среднегодовой)

показывают какой вклад вносят вариации профиля озона на всех уровнях в результат решения обратной задачи на рассматриваемом уровне

лето (45N июль)

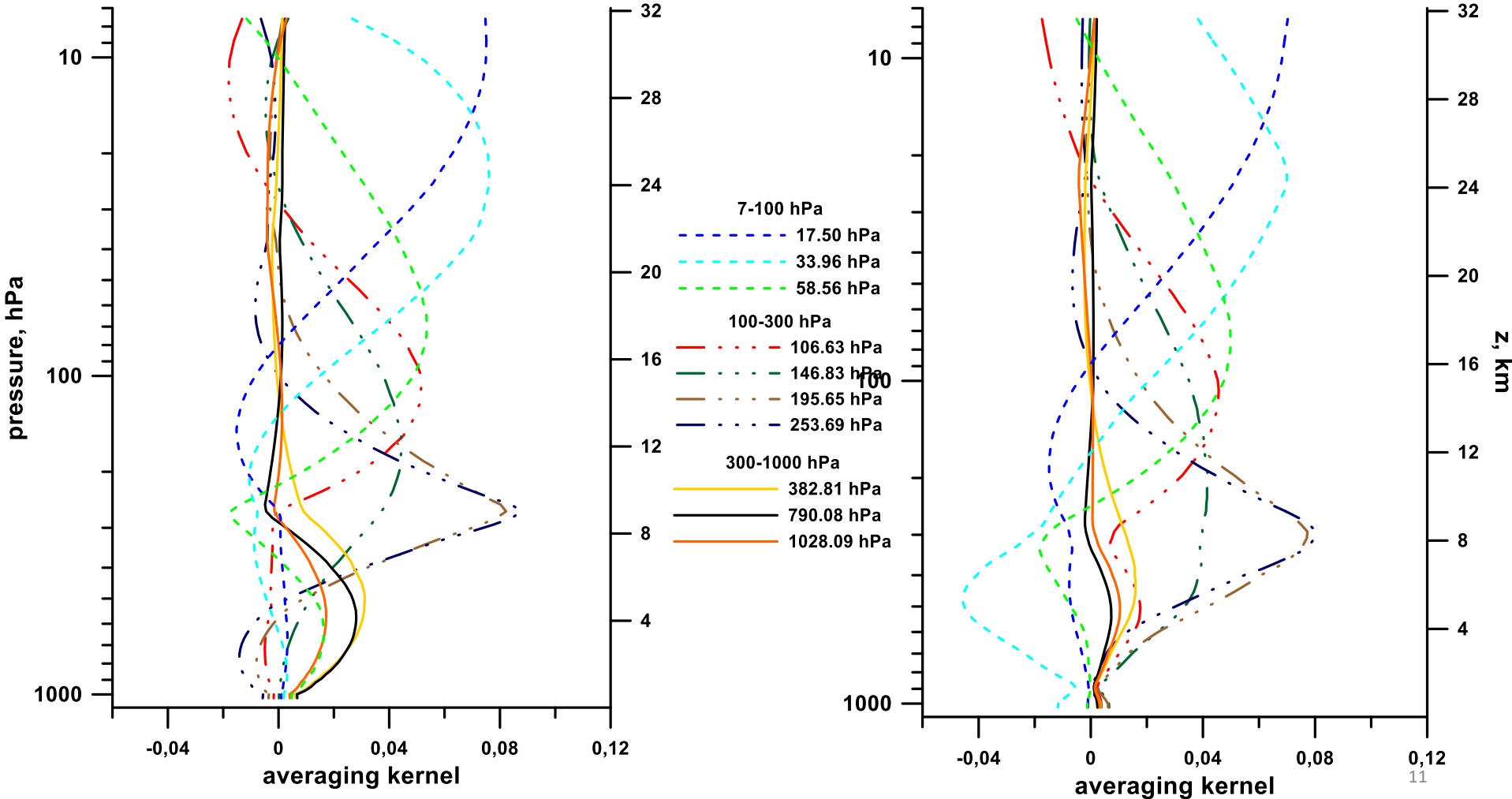
зима (45N январь)



Осредняющие ядра (Averaging Kernels)

лето (60N июль)

зима (60N январь)



Результат оценки информативности (DOFS)

Число степеней свободы (DOFS) описывает информативность измерений – число независимых параметров профиля, возможных для определения в ходе решения обратной задачи – находится как след матрицы осредняющих ядер A [Rodgers, 2000].

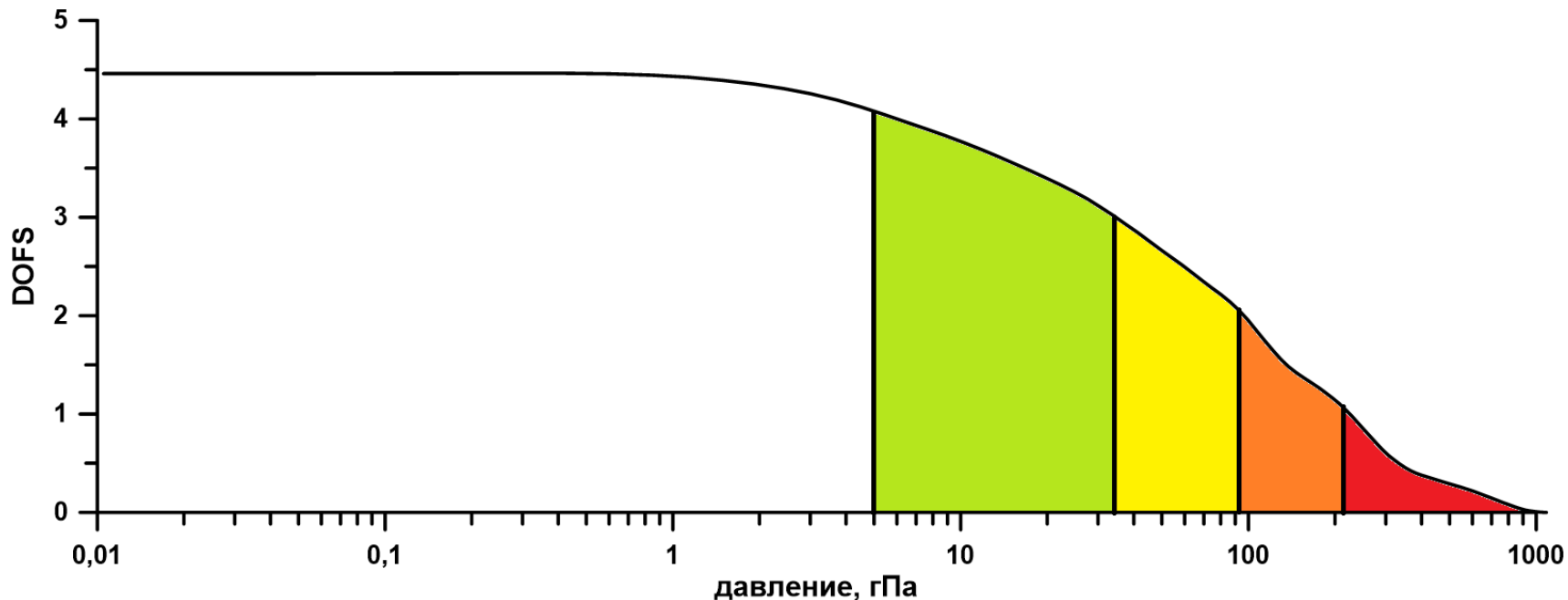
АК	DOFS				
	Тропики	Сред.широты, лето	Сред.широты, зима	Субарктика, лето	Субарктика, зима
cov(O3,O3)	4.5	4.3	3.8	4.3	3.4
cross-cov (O3,T)	4.2	4.0	3.4	3.9	3.0

ИКФС-2 наиболее чувствителен относительно вертикального распределения озона в тропиках и летом (как средних, так и высоких широт)

Это коррелирует с широтно-сезонной изменчивостью температуры поверхности и, соответственно, более сильным градиентом профиля температуры для тропиков и лета всех широт

Границы информативных слоев

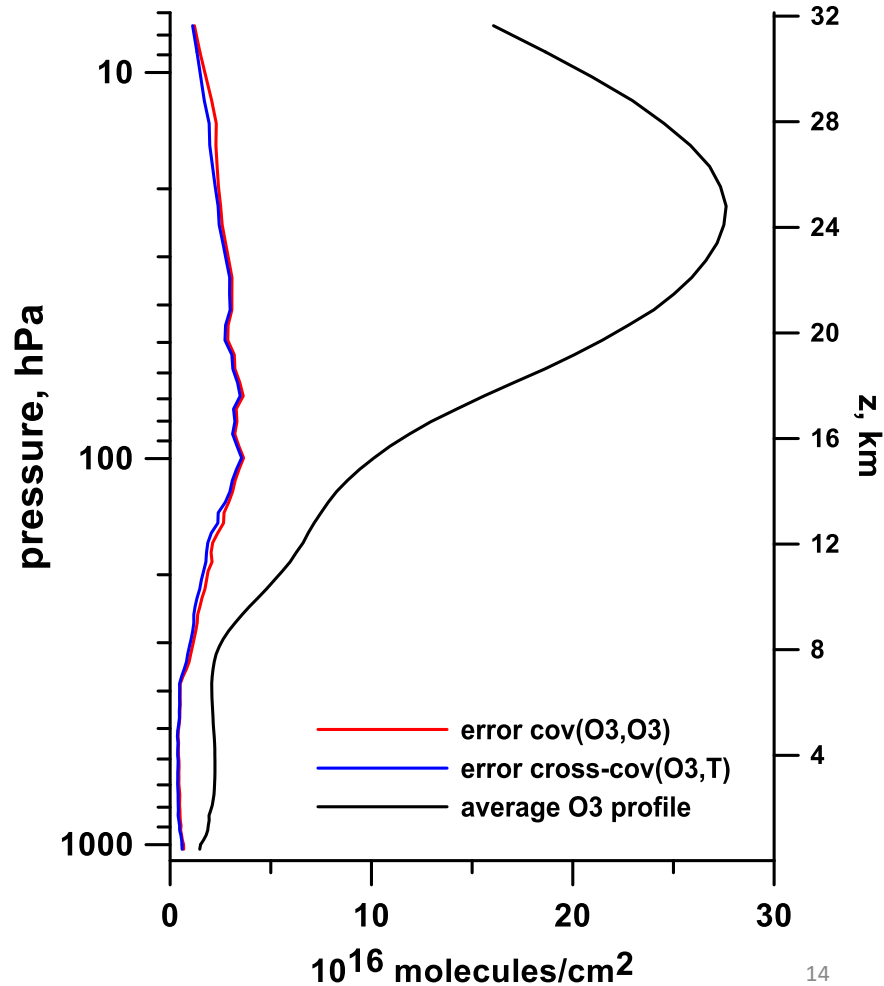
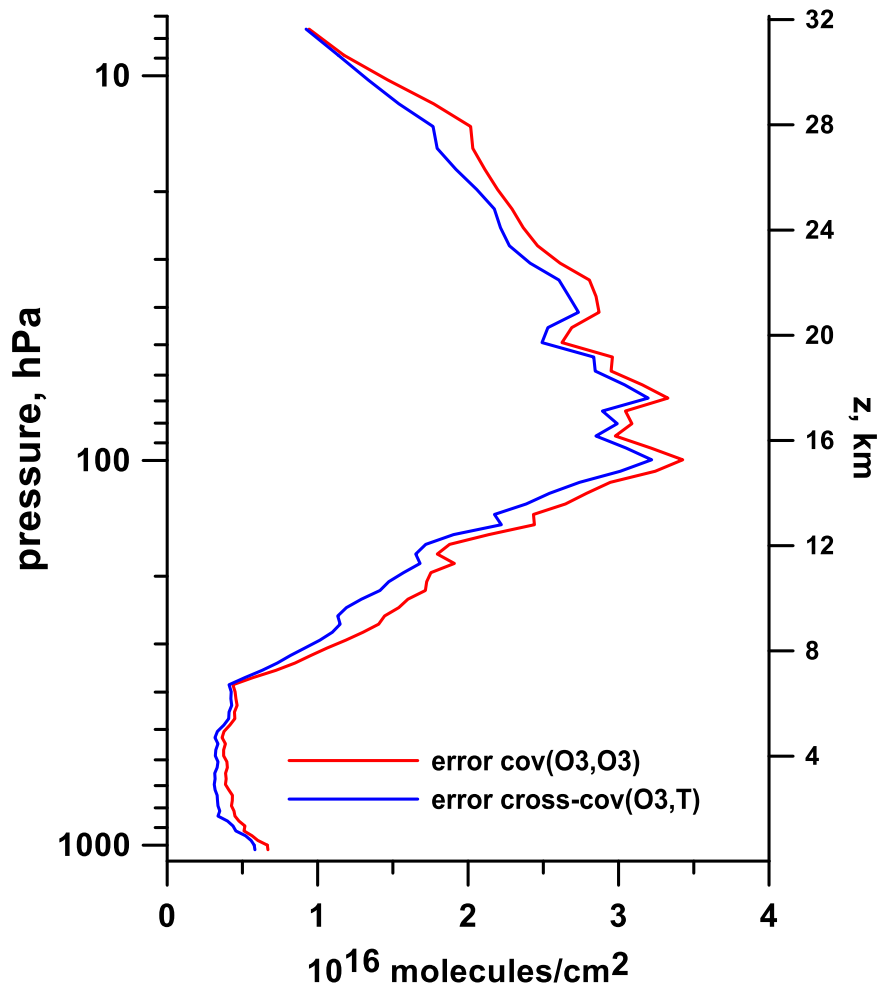
Тропики



Разделим атмосферу на **4 слоя** таким образом, что на верхней границе каждого набирается одна степень свободы. В выделенных слоях (цветные области на графике) можно определить содержание озона.

Оценка погрешности профиля озона сглаженного осредняющими ядрами

Средние широты, лето



Относительные погрешности

учитывая ковариации ошибок на разных уровнях, найдем относительную погрешность содержания озона в эмпирически выделенных слоях, соответствующих выделенным независимым компонентам сглаженного профиля озона

	Относительная погрешность, %					Номер слоя	Средние границы слоя
	Тропики	Сред.широты лето	Сред.широты зима	Субарктика лето	Субарктика зима		
cov(O3,O3)	5.4	5.0	8.5	7.7	8.4	1	1100-230 гПа
cross-cov (O3,T)	4.0	4.5	7.0	6.7	6.7		
cov(O3,O3)	7.0	7.4	7.6	10.1	5.4	2	230-100 гПа
cross-cov (O3,T)	4.6	6.5	5.2	7.9	3.4		
cov(O3,O3)	4.6	3.9	3.6	3.8	4.2	3	100-30 гПа
cross-cov (O3,T)	3.4	3.8	3.0	3.4	3.4		
cov(O3,O3)	3.2	3.6	-	4.0	-	4	30-4 гПа
cross-cov (O3,T)	2.8	3.5	-	-	-		

Учет взаимных ковариаций озона и температуры приводит к уменьшению погрешностей

Заключение

- **Построена ковариационная матрица вертикального распределения озона, кросс-ковариационная матрица между озоном и температурой** на основе данных озонозондирования за годы работы прибора ИКФС-2 на орбите (2015-2022 гг.).
- С помощью модели переноса излучения LBLRTM **рассчитана матрица прямого оператора задачи. Расчеты выполнены для различных среднеклиматических профилей температуры.**
- На основе полученных ковариационных матриц и рассчитанных производных уходящего теплового излучения **построены осредняющие ядра обратной задачи, получены оценки DOFS** - информативности измерений спектров ИКФС-2 относительно сглаженного профиля озона.
Максимум числа степеней свободы, равный ~ 4 , приходится на тропики и лето всех широт. Минимальная информативность – на зиму средних и субарктических широт (3.0 - 3.8).
- **Получены оценки относительных погрешностей** определения содержания озона в выделенных слоях атмосферы.
- Рассмотрены варианты как отдельного восстановления профилей отношения смеси озона, так и с учетом кроссковириаций. **Учет взаимных ковариаций озона и температуры приводит к уменьшению погрешностей восстановления содержания озона на 0.5 - 2.5 %.**

Таким образом, показана возможность определения элементов вертикального распределения озона по данным спутниковых измерений уходящего теплового излучения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта **РНФ № 23-27-00166**, в Лаборатории Исследований Озонового слоя и Верхней Атмосферы СПбГУ.

Данные озонзондирования, представленные рабочей группой HEGIFTOM в рамках проекта TOAR-II, взяты из открытого доступа на сайте <https://hegiftom.meteo.be/datasets/ozonesondes>.

Расчеты ядер прямой задачи выполнялись с помощью свободного пакета программ LBLRTM <https://github.com/AER-RC/LBLRTM>

Спасибо за внимание!