



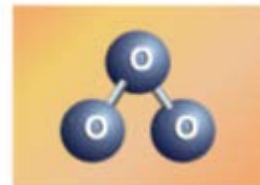
Анализ информативности спектров ИКФС-2 относительно тропосферного озона

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

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
Российская федерация



Атмосферный озон



Озон (O_3) – бесцветный газ с резким специфическим металлическим запахом, сильнодействующий яд, обладающий раздражающим и канцерогенным действием.

Молекула озона неустойчива и при достаточных концентрациях превращается в воздухе при нормальных условиях в кислород с выделением тепла в течение десятков минут.

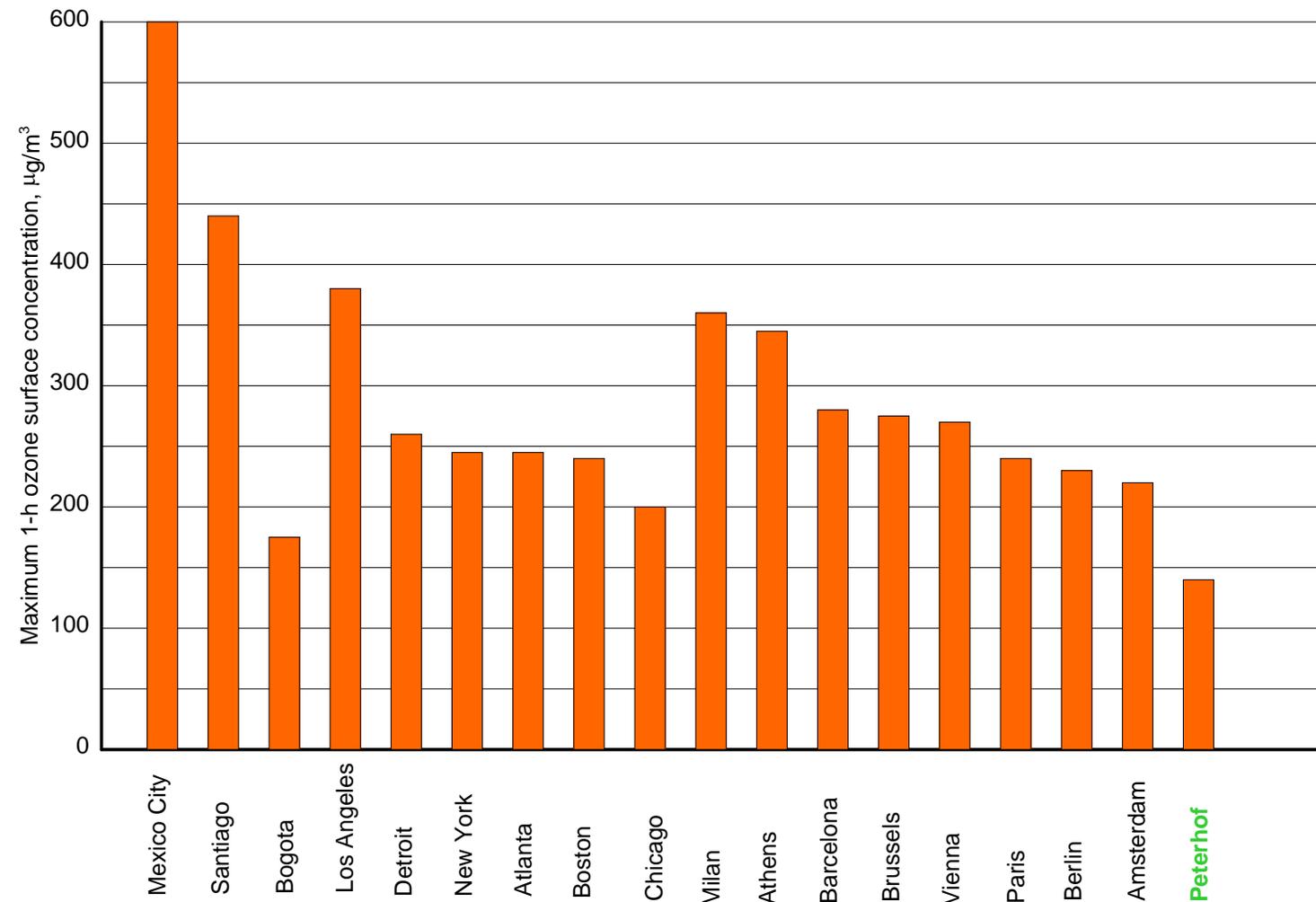
Озон является мощным окислителем.

Озон в **стратосфере** образуется под действием УФ излучения Солнца и защищает биосферу от того же УФ солнечного излучения. Стратосфера содержит около 90% общего количества озона в атмосфере.

Озон в **тропосфере** образуется в результате химических реакций между окислами азота и загрязняющими веществами, а также поступает из стратосферы.

Тропосферный озон - парниковый газ, он вносит вклад до 10% в радиационное воздействие атмосферных газов. Негативно влияет на растительность, продуктивность экосистем, здоровье людей. Длительное пребывание в среде с высоким содержанием озона может привести к серьезным проблемам с дыхательной системой: астма, бронхит и др. Озон усиливает аллергические реакции, вызывает проблемы со зрением. Он также является прекурсором таких опасных веществ, как формальдегид, пероксиацетилнитраты и др.

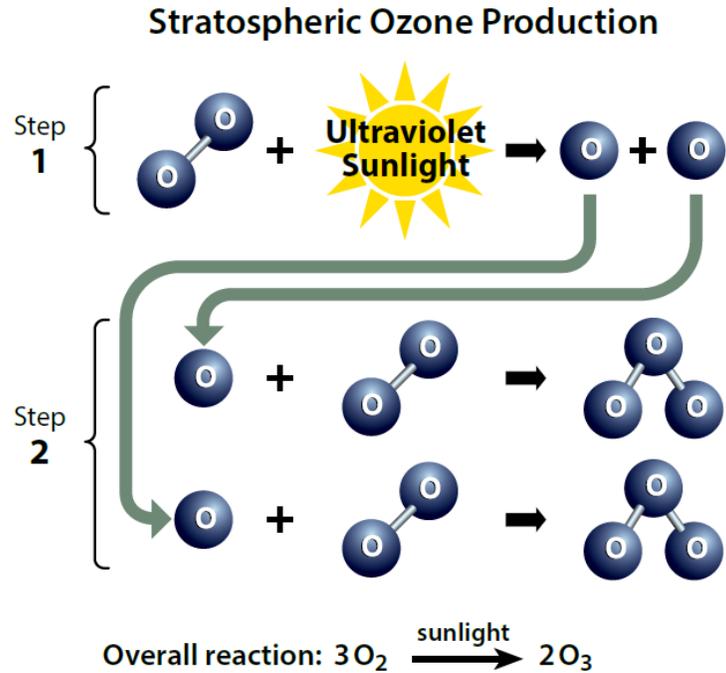
Приземные концентрации атмосферного озона (ПКО) и их влияние на человека



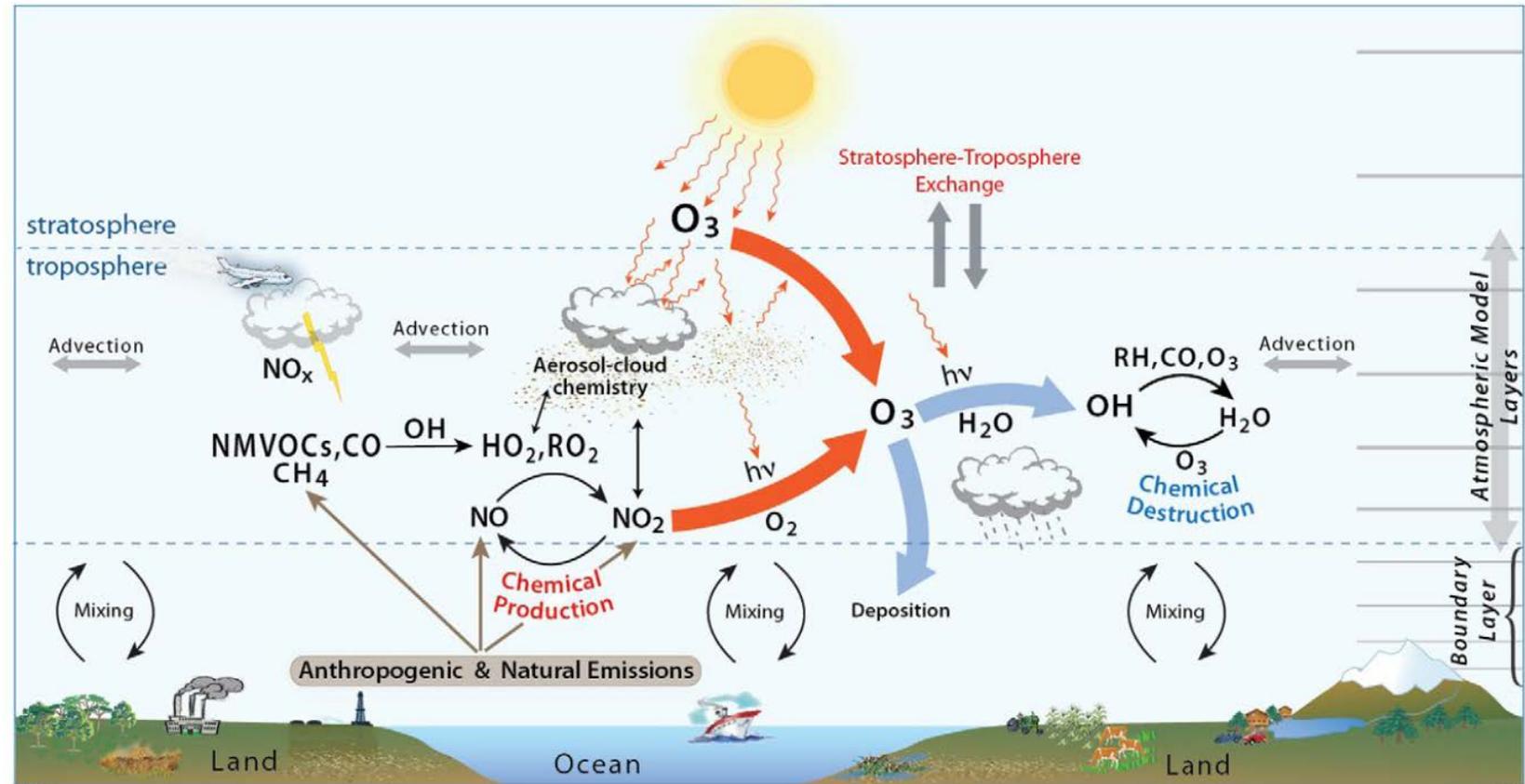
Концентрация, мкг/м ³	Эффект
4-15	Порог восприятия запаха в чистом воздухе
≥120	Снижение работоспособности при высокой нагрузке
≥160	Ухудшение функции лёгких
≥200	Кашель, хрипота, першение в горле
≥240	Потеря чувствительности к другим токсичным веществам и аллергенам
≥400	Воспаление нижних дыхательных путей, возможен отёк лёгких

Максимальные наблюдаемые величины ПКО, осредненные за час, в различных городах мира.

Образование атмосферного озона



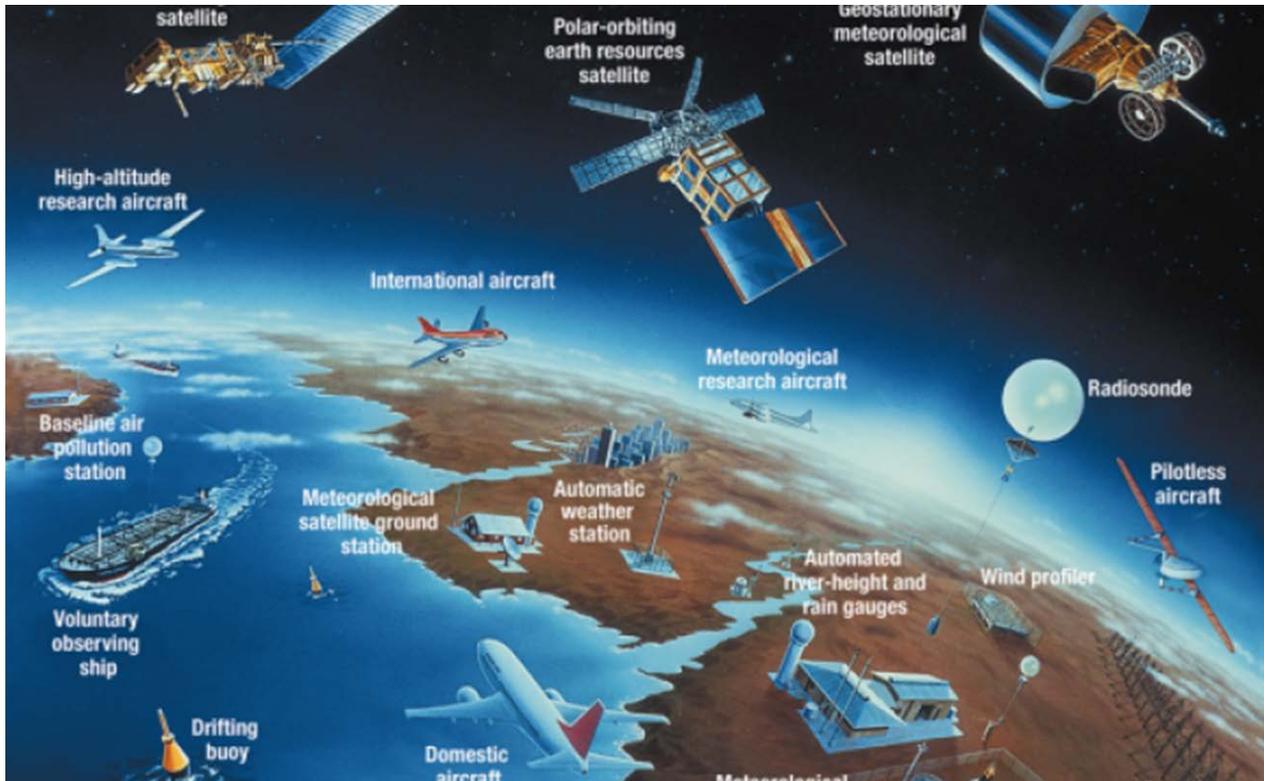
Стратосферный озон образуется в ходе химических реакций под воздействием солнечного света (цикл Чепмена: фотолиз кислорода и последующее образование озона). Больше всего озона образуется над тропическим поясом вследствие более высокой инсоляции.



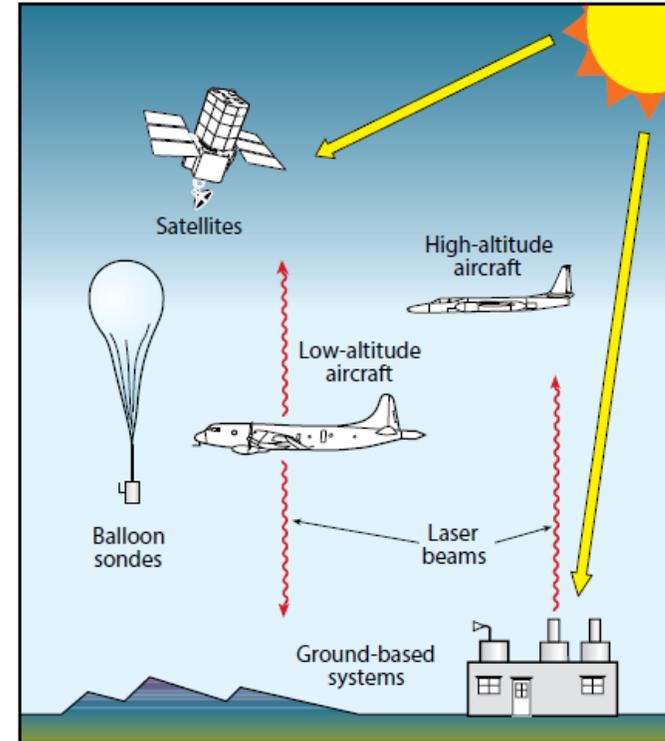
Young, P.J., et al. 2018 Tropospheric Ozone Assessment Report: Assessment of global-scale model performance for global and regional ozone distributions, variability, and trends. *Elem Sci Anth*, 6: 10. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.265>

Основные источники тропосферного озона – поступление из стратосферы и образование в результате фотохимических реакций с участием загрязнителей, прекурсоров озона (CO, NO_x, CH₄, OH). Антропогенные источники ответственны за 30% содержания тропосферного озона.

Глобальная система измерений атмосферного озона



Measuring Ozone in the Atmosphere



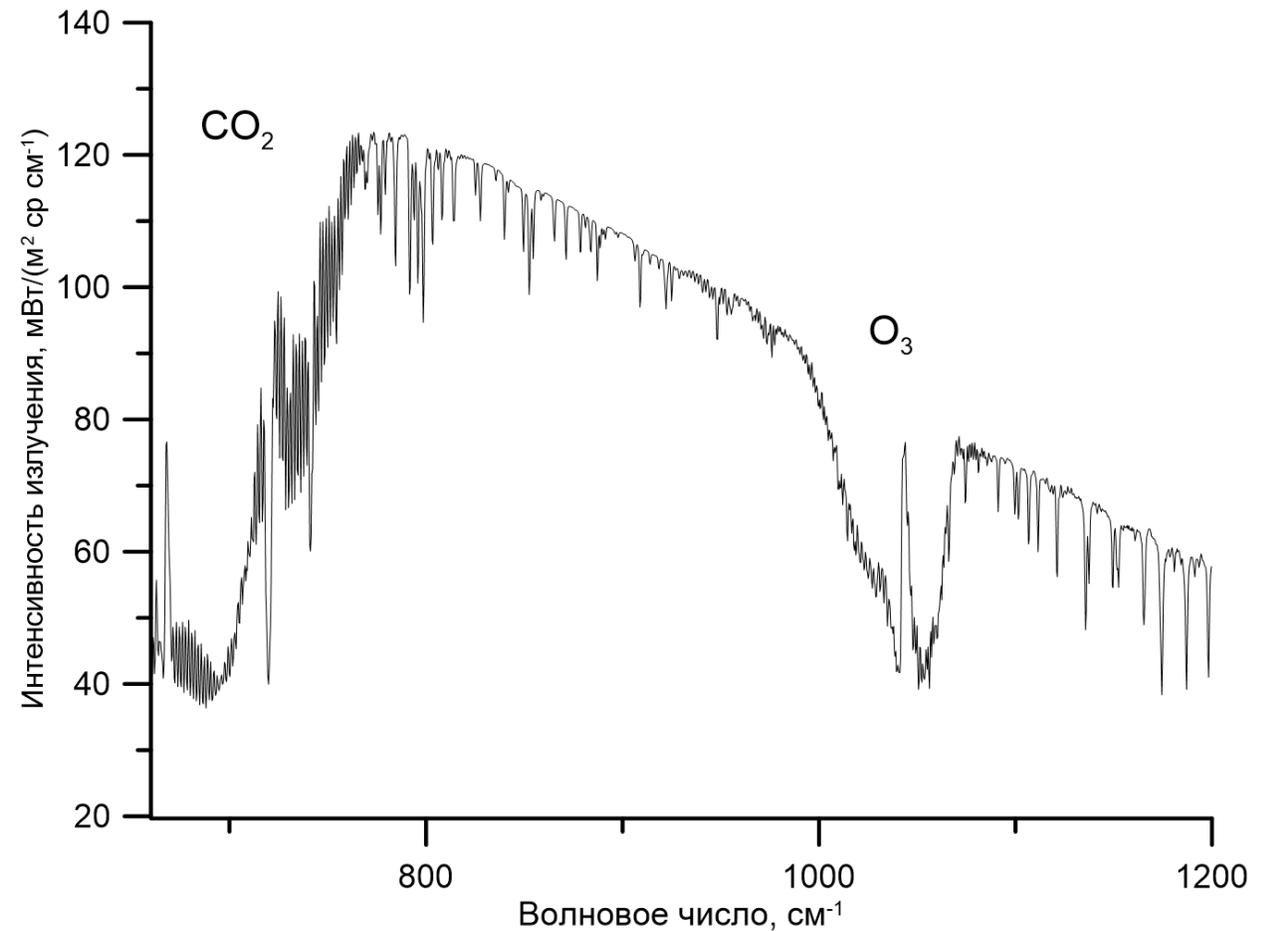
В настоящее время глобальная система измерений атмосферного озона насчитывает тысячи станций измерения ПКО, сотни станций измерений общего содержания озона, десятки станций озонозондирования, спутниковую систему мониторинга озона, использующую измерения теплового и солнечного излучения. Периодически проводятся измерительные кампании, включающие самолетные, аэростатные измерения и измерения на кораблях. Каждому методу измерения свойственны свои достоинства и недостатки, и метод уходящего теплового излучения занимает свое место среди других.

Наша работа посвящена оценке возможности измерения тропосферного содержания озона с российского КА «Метеор М» №2 прибором ИКФС-2 методом теплового излучения.

Основные параметры прибора:

- Спектральная область измерений 660-2000 см^{-1} (использовалась область 660-1210 см^{-1})
- Спектральное разрешение 0.5 см^{-1} неаподизированное (в используемых спектрах аподизация, 0.7 см^{-1})
- Погрешность измерений от 0.1 мВт/(м² ср см^{-1})
- Пространственное разрешение 35км в надире
- Ширина полосы сканирования 1000-2500 км (использовалось 1000 и 1500 км)
- Рассматриваются измерения в отсутствие облачности

Средний измеренный безоблачный спектр: 2015 г., водная поверхность



Используемые соотношения и подходы

Опираясь на изложение теории в известной книге Rodgers, 2000, мы оценили погрешности и чувствительность к вариациям профиля озона при определении содержания озона в тропосфере (точнее, в слое 0-8 км) на основе спектров, измеряемых прибором ИКФС-2 с борта спутников серии «Метеор-М» №2.

Для этого мы рассчитали остаточную матрицу неопределенности (матрицу погрешностей) и осредняющие ядра профиля содержания озона и свернули их для слоя 0-8 км.

Оценки были получены для нескольких среднесезонных профилей температуры, для водной поверхности (или снега). Рассмотрен вариант использования ковариаций озон-температура при решении обратной задачи.

Матрица погрешностей S вычислена на основе соотношения (1)

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

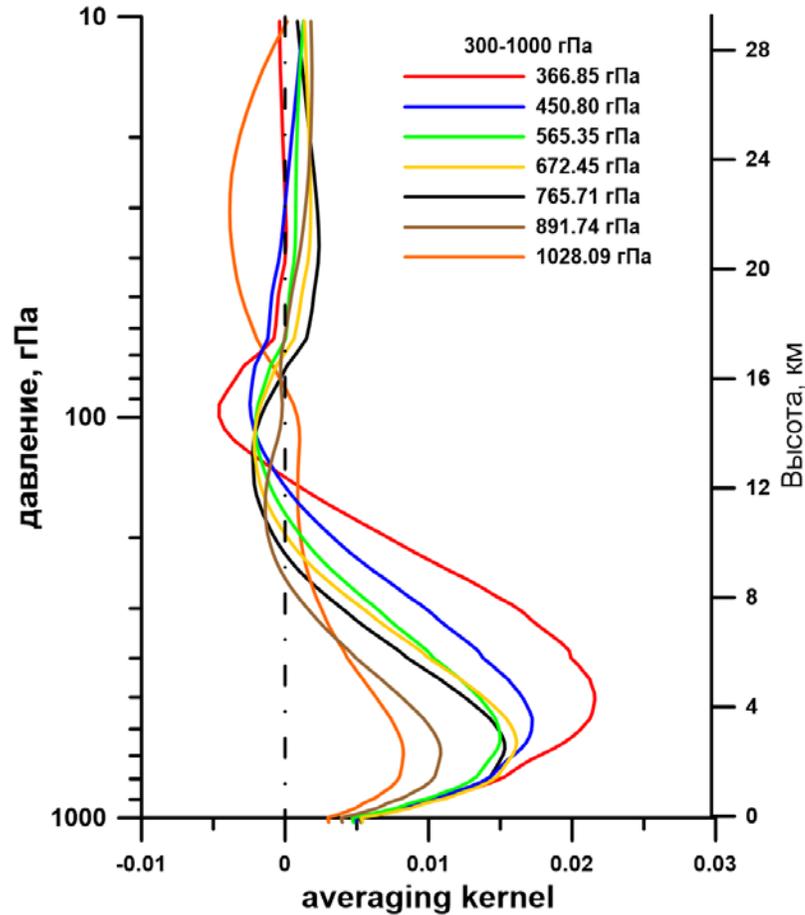
А матрица осредняющих ядер A на основе соотношения (2)

$$A = (K^T S_\varepsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_\varepsilon^{-1} K \quad (2)$$

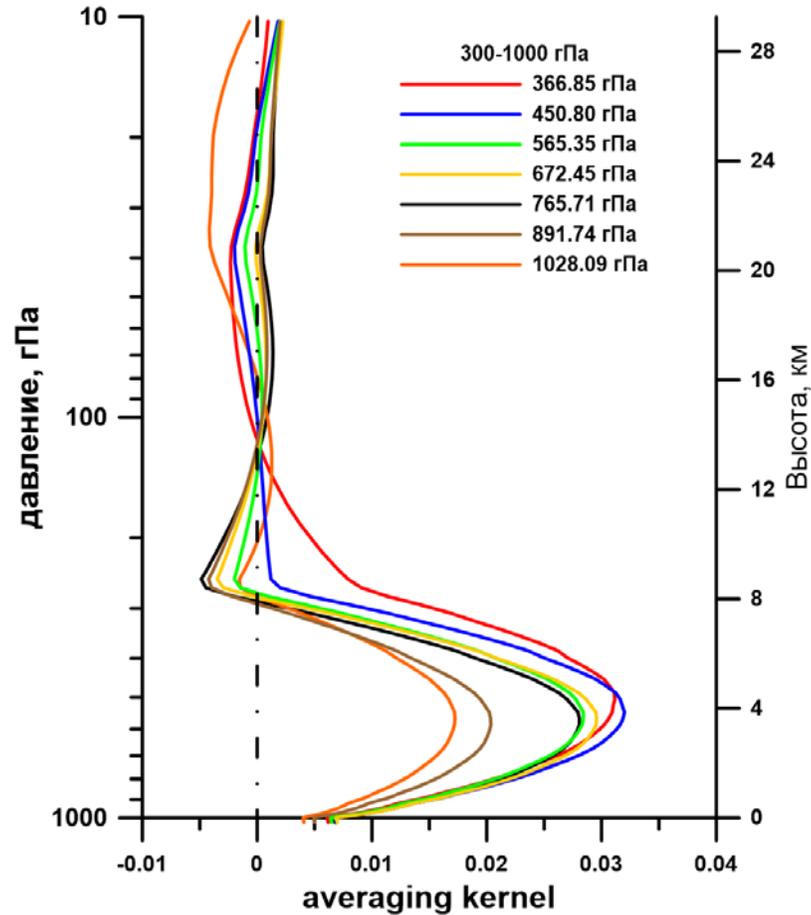
Здесь K – матрица ядер прямой задачи, S_ε ковариационная матрица погрешностей измерения спектров, S_a априорная ковариационная матрица профилей озона. Для расчета S_a использовались профили озонзондирования. Подробности расчета K и S_a представлены в докладе XXI.A.263.

Примеры осредняющих ядер профилей содержания озона

Тропики



Субарктика, лето



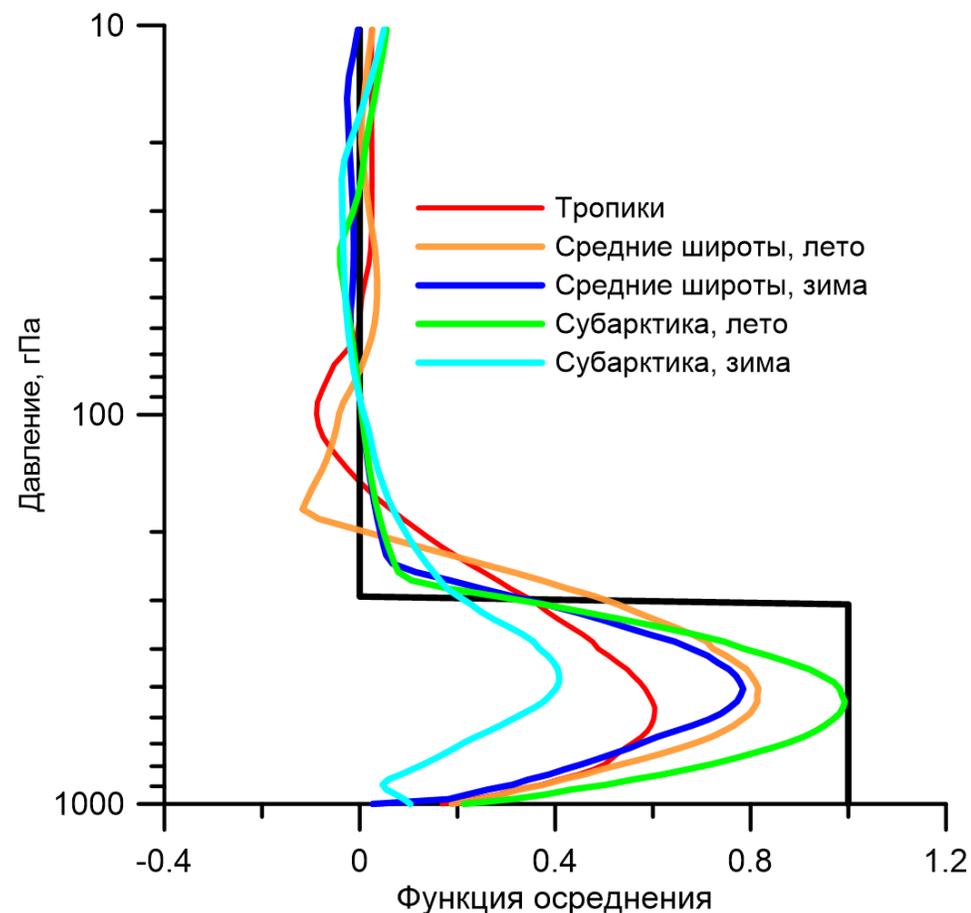
Осредняющие ядра показывают вклады вариаций профиля озона в различных слоях атмосферы в результат дистанционного зондирования на одном уровне.

Оценки погрешностей и осредняющих функций определения тропосферного озона для среднеклиматических профилей температуры (AFGL 86).

Погрешности определения содержания тропосферного озона, %. Рассмотрен также подход одновременного восстановления профилей озона и температуры с учетом их корреляций.

Осредняющие функции определения содержания тропосферного озона

Профиль температуры	Без учета корреляций T-O ₃	Учет корреляций T-O ₃
Тропики	10	7.7
Средние широты, лето	8.7	6.9
Средние широты, зима	9.8	9.1
Субарктика, лето	7.7	7.2
Субарктика, зима	12	11



Заключение

Из спектральных измерений ИКФС-2 с борта КА «Метеор-М» №2 может быть получено содержание озона в слое **0-8 км**, с погрешностью **7.7-12%**, в зависимости от профиля температуры.

При этом одновременное восстановление содержания озона и температуры с учетом их корреляций позволяет уменьшить погрешность определения тропосферного озона на **0.5 – 2.3%**.

Благодарим за интерес к нашей работе.

Мы использовали данные озонозондирования, гармонизированные рабочей группой HEGIFTOM в рамках проекта TOAR-II, представленные в открытом доступе 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>

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