

АНАЛИЗ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗЕМНОГО МКВ+ИК МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

Бордовская Ю.И., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: bordovskayay@gmail.com, y.timofeev@spbu.ru, yana.virolainen@spbu.ru,

avpob@troll.spbu.ru

Озон является одной из важнейших малых газовых составляющих (МГС) атмосферы Земли. В данном исследовании анализируются синергетические наземные дистанционные методы восстановления содержания озона с использованием трёх приборов в Петергофе (СПбГУ, станция NDACC): МКВ озонметр, МКВ радиометр НАТPRO и ИК Фурье-спектрометр Bruker IFS-125HR. Численные оценки ошибок и вертикального разрешения показали, что на разных высотах неопределённости дистанционных измерений озона методом МКВ+ИК варьируют от 5 до 30%, а вертикальное разрешение такого метода варьирует от 10 до 20 км.

Введение

Атмосферный озон является основным поглотителем опасного УФ излучения Солнца в стратосфере, парниковым и токсичным газом в тропосфере [1, 2]. Важную роль в мониторинге общего содержания озона (ОСО) и вертикальных профилей (ВП) озона играют наземные пассивные методы, использующие поглощение молекулами озона ИК солнечного излучения, а также собственное тепловое излучение в МКВ вращательных линиях поглощения озона. В большинстве случаев эти измерения для определения содержания озона используются по отдельности, но в работе [3] показано, что использование совместных МКВ и ИК измерений повышает информативность дистанционного наземного зондирования озоносферы.

В настоящей работе анализируются синергетический метод дистанционных наземных измерений ВП озона с помощью МКВ+ИК измерений и в дополнение к нему метод МКВ+МКВ, поскольку ИК-измерений зачастую меньше, чем МКВ. Рассматривался только случай безоблачной атмосферы.

Параметры аппаратуры, используемой для моделирования

В настоящее время в Санкт-Петербургском государственном университете (59.88° с.ш. и 29.82° в.д.) функционирует ряд наземных приборов, позволяющих получать информацию о состоянии атмосферы по измерениям нисходящего (теплового и солнечного) излучения в разных областях спектра. В данной работе для оценки возможностей синергетического МКВ+ИК метода использовались параметры следующих приборов:

1. МКВ озонметр, измеряющий спектр нисходящего теплового МКВ излучения атмосферы в терминах яркостной температуры ($T_{1b}(\nu)$) в области линии поглощения озона

110,836 ГГц [4]. Сама линия имеет амплитуду $\sim 7\text{-}9\text{К}$ на фоне тропосферного излучения водяного пара.

2. МКВ радиометр НАТPRO имеет 7 спектральных каналов в области линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц и 7 каналов в области полосы поглощения кислорода 60 ГГц. Данный прибор позволяет получать информацию о температуре и плотности водяного пара в тропосфере [5].

3. ФС Bruker IFS 125HR регистрирует спектры прямого солнечного ИК-излучения с высоким спектральным разрешением ($\sim 0,005\text{ см}^{-1}$), для получения информации о содержании озона используются несколько «микроокон», например, MW1 (991,25–993,80 см^{-1}), MW2 (1001,47–1003,04 см^{-1}), MW3 (1005,00–1006,90 см^{-1}) и MW4 (1007,348–1009,000 см^{-1}) в полосе озона 9,6 мкм [6].

В рамках синергетического МКВ+ИК метода рассматривалась комбинация МКВ озонометра и ФС Bruker IFS 125HR, в методике МКВ+МКВ — МКВ озонометра и МКВ радиометра НАТPRO, что позволяет учесть вклад тропосферы в излучение в линии поглощения озона 110,836 ГГц.

Решение обратной задачи

Поставленная обратная задача восстановления содержания озона из наземных измерений спектров нисходящего микроволнового и солнечного излучения является некорректной в классическом смысле (по Адамару) и требует использования специальных методов с привлечением априорной информации. Одним из таких методов является метод множественной линейной регрессии, для реализации которого необходимо наличие широкого ансамбля состояний атмосферы и соответствующего ему ансамбля измерений. В этом методе используется простое соотношение [7]

$$\vec{\varphi} = R\vec{f},$$

где $\vec{\varphi}$ — искомая вариация ВП содержания озона, R — решающий оператор, \vec{f} — вектор вариаций измерений излучения относительно среднего.

В данной работе в качестве ансамбля состояний атмосферы использовался ансамбль, подготовленный в CNRM (Centre national de Recherches Météorologiques, Франция, https://iasi.aeris-data.fr/IASI-NG_4A_data/, дата доступа: 10.05.2022), были отобраны реализации безоблачной атмосферы, соответствующие широтному поясу 50-70° с.ш. — всего было отобрано 83829 реализаций. Для получения ансамбля МКВ и ИК измерений, соответствующих выбранному ансамблю реализаций атмосферы, было проведено численное моделирование наземных измерений МКВ озонометра и радиометра НАТPRO с помощью свободно

распространяемой программы с открытым исходным кодом (doi:10.21982/M81013), а ИК спектрометра с помощью кода LBLRTM. Случайная ошибка измерений ИК спектрометром составляла 1%, МКВ озонетром — 0,1 К, а МКВ радиометром RPG НАТPRO 0,1–0,2 К.

Оценка погрешностей методов

Для определения погрешностей наземного синергетических МКВ+МКВ и МКВ+ИК метода определения содержания озона были проведены численные эксперименты по замкнутой схеме. Ансамбль реализаций атмосферы и соответствующий ему ансамбль измерений были разделены на две части: обучающую выборку, которая использовалась для реализации самого метода множественной линейной регрессии, и тестовую, непосредственно использовавшуюся для оценки погрешностей. В ИК области окна MW1-MW4 рассматривались как единое окно. Результаты приведены на рис. 1 (левая панель) для разных схем измерений.

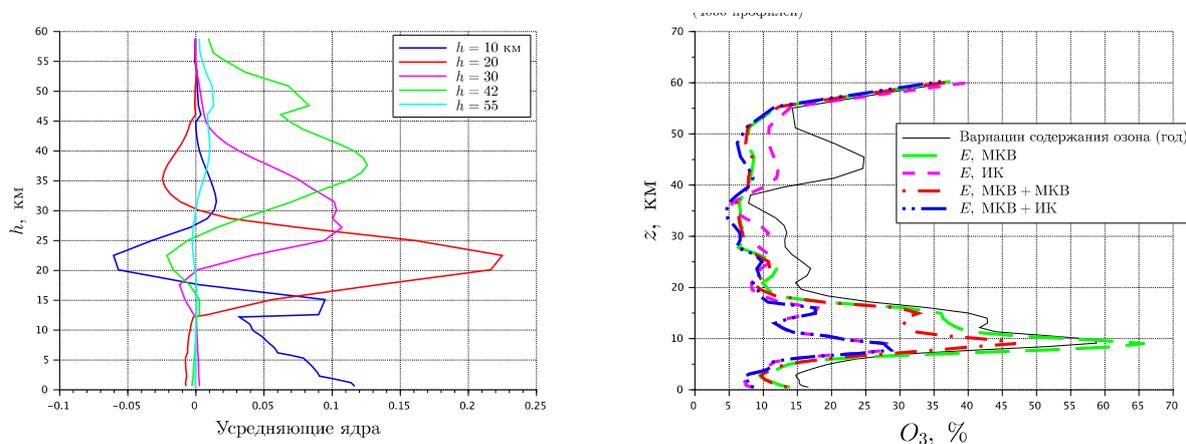


Рисунок 1 — Левая панель: оценка потенциальных погрешностей синергетических МКВ+МКВ и МКВ+ИК (окна MW1-MW4) методов восстановления объёмного отношения смеси озона. Здесь E — погрешность восстановления. Правая панель: усредняющие ядра синергетического МКВ+ИК-метода. Диагональная ковариационная матрица озона

Согласно рис. 1, озона вблизи 10 км МКВ+МКВ метод уменьшает априорную неопределённость (АН) содержания озона с 65 до 50%, МКВ+ИК метод — в 2 раза. В тропосфере погрешности МКВ+ИК метода не превышают 27%, в слое 10-20 км — 17%. В слое 20-40 км оценка погрешности метода составляет ~5-10%, в слое 40-50 — 5-8% при АН 14-25%, выше 50 км наблюдается рост оценки погрешности вместе с ростом АН содержания озона.

Важной характеристикой дистанционного метода является его вертикальное разрешение, которое обычно определяется как ширина усредняющего ядра на половине его максимума. На рис. 1 (правая панель) приведены расчеты усредняющих ядер МКВ+ИК-метода при использовании диагональной априорной матрицы. Полуширины усредняющих ядер составляют 10-20 км, а высотный потолок зондирования составляет ~ 50 км.

Основные выводы

1. МКВ+МКВ метод позволяет уменьшить погрешность восстановления содержания озона в области высот 9-16 км
2. Объединение МКВ- и ИК-методов приводит к увеличению диапазона высот, для которых наблюдается значимые уменьшения АН при определении ВП О₃.
3. МКВ+ИК метод показывают наилучшее вертикальное разрешение в тропосфере и нижней стратосфере. В тропосфере вертикальное разрешение ~ 10 км, в стратосфере от 10 до 20 км.

Благодарности

Работа по анализу различных дистанционных методов измерений элементов вертикальной структуры содержания озона выполнена в лаборатории “Исследование Озонного слоя и верхней атмосферы” Санкт-Петербургского государственного университета и при финансовой поддержке СПбГУ (номер Проекта 116234986).

1. 1 WMO (World Meteorological Organization) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018 // Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 58. Geneva, Switzerland. 2018. P. 588.
2. *Seinfeld, J.H.; Pandis, S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA. 2006. p. 1225
3. *Yuriy Timofeyev, Vladimir Kostsov, and Yana Virolainen* Synergetic ground-based methods for remote measurements of ozone vertical profiles // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1531. No 1. P. 380-383. doi: 10.1063/1.4804786
4. *Косцов В.С., Поберовский А.В., Осипов С.И., Тимофеев Ю.М.* Комплексная методика интерпретации наземных микроволновых спектральных измерений в задаче определения вертикального профиля содержания озона // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 354–360.
5. *Зайцев Н.А., Тимофеев Ю.М., Косцов В.С.* Сравнение радиозондовых и наземных дистанционных микроволновых измерений профилей температуры в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 5. С. 392-398.
6. *Виrolайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Еременко М., Дюфор Г.* Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектрометрии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 191–200.
7. *Rodgers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics – V. 2. World Scientific. Singapore, New Jersey, L., Hong Kong, 2000. 238 p.