

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2010 г. Я. А. Виролайнен*, Ю. М. Тимофеев

Физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург

**E-mail: Yana.Virolainen@JV14952.spb.edu*

Поступила в редакцию 28.01.2009 г.

В настоящей работе рассмотрен комплексный подход к определению вертикальной структуры содержания озона в земной атмосфере, основанный на схеме, совместно использующей измерения прозрачности атмосферы в ИК-области спектра Фурье-спектрометром Брюкера с высоким спектральным разрешением, микроволновые измерения собственного излучения атмосферы в линии вращательного перехода озона и локальные наземные измерения концентрации озона хемилюминесцентным газоанализатором. Получены оценки потенциальной точности и вертикального разрешения метода. Показано, что рассматриваемый комплексный метод позволяет измерять профиль содержания озона в тропосфере и стратосфере с погрешностями 15–20% при вертикальном разрешении 1–2.5 км. При снижении вертикального разрешения до 5–8 км рассматриваемым методом можно определять вертикальную структуру содержания озона с потенциальными погрешностями 3–6%. Общее содержание озона, а также содержание озона в слое 15–50 км (стратосфера) можно определять с потенциальной погрешностью, меньшей 0.5%, в слое 0–15 км (тропосфера) – с погрешностью 2.5%.

Ключевые слова: содержание озона в тропосфере и стратосфере, вертикальный профиль, ИК-спектрометрия, микроволновое зондирование, комплексный метод, наземные измерения.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы чрезвычайно актуальными стали проблемы изменения климата Земли и разрушения озонового слоя нашей планеты. Следствия этих процессов еще трудно предсказуемы с достаточной достоверностью, но могут привести к нежелательным экологическим (изменения температуры и количества осадков, подъем уровня Мирового океана, увеличение УФ-освещенности земной поверхности и т.д.), экономическим и социальным последствиям. Актуальность современного мониторинга вертикальных профилей (ВП) и общего содержания озона (ОСО) обусловлена существенным влиянием озона на уровень биологически опасной УФ-освещенности поверхности, его парниковым эффектом, а также его токсическими свойствами в тропосфере Земли (WMO, 2003; Noughton, 2004). Изменения содержания озона в земной атмосфере, зарегистрированные с начала 80-х годов прошлого столетия, стимулировали расширение сети мониторинга и совершенствования методов измерений ВП и ОСО. В настоящее время для мониторинга озоносферы используются различные спутниковые и наземные дистанционные методы измерений (Тимофеев, 1989). В отчете (WMO, 2002) излагается концепция совместного использования раз-

личных систем мониторинга, в том числе спутникового и наземного, а также приведены современные требования по точности, вертикальному и горизонтальному разрешению, высотному диапазону измерений и периодичности измерений ВП и ОСО. Анализ этих требований, а также современной точности различных дистанционных методов свидетельствует, что во многих случаях эти методы не позволяют выполнить всю совокупность сформулированных оптимальных требований.

Так, требования к измерениям ВП озона сформулированы для нижней тропосферы (1000–500 гПа), верхней тропосферы (500–100 гПа), нижней стратосферы (100–10 гПа), верхней стратосферы и мезосферы <10 гПа. При измерениях профиля содержания озона оптимальные погрешности составляют 3–5%, предельные – 20–25%. Требуемое горизонтальное разрешение колеблется от 50/500 км (атмосферная химия, глобальный прогноз) до 10/200 км (региональный прогноз). Оптимальное вертикальное разрешение составляет 1 км, предельное – 5–10 км.

В настоящее время разработаны и используются различные спутниковые и наземные пассивные дистанционные методы измерений ВП озона, основанные на регистрации ослабления солнечного

го (звездного, отраженного от Луны солнечного) излучения, собственного излучения (равновесного и неравновесного) атмосферы, рассеянного солнечного излучения. Точность этих методов сильно варьируется в зависимости от условий измерений, высоты в атмосфере и вертикального разрешения измерений. В частности, для метода обращения она составляет 10–30% для относительно толстых атмосферных слоев. Возможности ИК-наземного метода при использовании высокого спектрального разрешения проанализированы в работе (Виролайнен, Тимофеев, 2008), его погрешности составляют 20–25% в тропосфере и 15–25% в стратосфере при восстановлении профиля содержания озона с вертикальным разрешением 1–2 км. Как следует из приведенных данных, указанные методы по отдельности не позволяют реализовать все требования, сформулированные в международных документах.

В связи с этим актуальным является разработка новых подходов к наземным измерениям ВП и ОСО. Рассмотрение новых возможностей наземных измерений необходимо в связи с широким использованием их также для валидации спутниковых измерений содержания озона. Так, ранее наземные методы использовались для валидации спутниковых данных, в основном по общему содержанию озона в атмосфере или по его профилям в стратосфере (озонзонды, лидары, микроволновые (МКВ) методы). Предлагаемый комплексный метод может быть применен для валидации получаемых данных по профилям озона как в тропосфере, так и стратосфере, действующих спутниковых приборов (MLS, IASI) и планируемых к запуску (например, российский прибор ИКФС-2, который будет запущен в начале 2010 г.).

КОМПЛЕКСНЫЙ ИК + МКВ-МЕТОД

Предлагаемый комплексный подход основан на одновременных наземных измерениях:

- прозрачности атмосферы в ИК-области спектра с высоким спектральным разрешением (Фурье-спектрометр Брюкера);
- собственного излучения атмосферы в линии поглощения озона (МКВ-измерения);
- концентрации озона с помощью локальных наземных измерений.

Повышение точности и вертикального разрешения такого подхода к дистанционным измерениям ВП и ОСО обусловлено следующими причинами:

1) информация, содержащаяся в указанных двух типах дистанционных измерений, в значительной степени не является идентичной. ИК-измерения в основном дают информацию о содержании озона в тропосфере и нижней стратосфере,

МКВ-измерения – о средней и верхней стратосфере и нижней мезосфере;

2) использование большого количества взаимодействующих измерений в ИК- и МКВ-областях спектра позволит снизить случайные погрешности измерений, что повысит общую точность определения ВП и ОСО;

3) вертикальное разрешение синергетического дистанционного метода повысится за счет использования информации, относящейся к различным высотным областям атмосферы;

4) локальные измерения содержания озона дают информацию высокого качества о содержании озона в приземном слое атмосферы.

ИК-метод определения элементов вертикальной структуры содержания озона подробно описан и проанализирован в работе (Виролайнен, Тимофеев, 2008). В данной статье приведем основную информацию о МКВ-наземных измерениях. В рамках Национального проекта “Образование” физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) приобрел микроволновый наземный озонометрический комплекс, с помощью которого в настоящее время проводятся регулярные измерения. МКВ-озонометр измеряет спектр нисходящего радиотеплового излучения (в терминах радиояркостной температуры) в отдельной спектральной линии поглощения озона на частоте 110.83604 ГГц (Красильников и др., 2003). Прибор предназначен для оперативной дистанционной диагностики озонового слоя Земли в различных регионах, включая полярные области.

Измерения нисходящего МКВ-излучения производятся в 31 спектральном канале. В центре линии ширина каналов составляет 1 МГц, в крыльях линии 3–10 МГц. По измеренному спектру нисходящего теплового излучения в линии озона определяется его вертикальное распределение из решения обратной задачи (решения нелинейного интегрального уравнения Фредгольма первого рода).

Пример результатов измерений спектра нисходящего МКВ-излучения приведен в работе (Поберовский и др., 2008). Погрешности измерений в каналах радиометра определяются как средние вариации сигнала за 20-минутный период измерений и включают как случайный шум прибора, так и флуктуации за счет вариаций атмосферных параметров. Как следствие, значения погрешности различаются от измерения к измерению, однако незначительно. В центре линии, в каналах с самым высоким спектральным разрешением, погрешность составляет около 0.2 К. При удалении от центра линии, с понижением спектрального разрешения, погрешность уменьшается до значений 0.08–0.1 К.

Как уже упоминалось выше, измерения в МКВ- и ИК-диапазонах содержат информацию о

разных слоях в атмосфере. На рис. 1 в качестве примера представлены некоторые нормированные на максимум ядра озона (вариационные производные излучения по содержанию озона), характеризующие чувствительность солнечного ИК-излучения и теплового МКВ-излучения к изменению содержания озона на разных высотах, в отдельных каналах отобранных спектральных интервалов.

Из рис. 1 хорошо видно, что максимальные значения вариационных производных для разных каналов приходятся на различные слои атмосферы. Анализируя рис. 1, можно видеть, что измеряемое двумя приборами излучение чувствительно к изменению содержания озона на разных высотах в атмосфере: ИК-диапазон несет информацию о тропосфере и нижней стратосфере, МКВ-диапазон – о средней и верхней стратосфере. При этом в центре линии озона (3.6971 см⁻¹) максимум ядер приходится на более высокие слои стратосферы, чем в крыльях линии. Таким образом, из представленных данных видно, что в отобранных спектральных интервалах ИК-излучение чувствительно к изменениям содержания озона на различных высотах в атмосфере, т.е. существует возможность определения рассматриваемым методом не только общего содержания озона, но и элементов его вертикальной структуры. А использование в дополнение к интерферометрическим измерениям микроволновых посылит точность измерения содержания озона в стратосферных слоях.

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ И ИНФОРМАТИВНОСТИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВП И ОСО

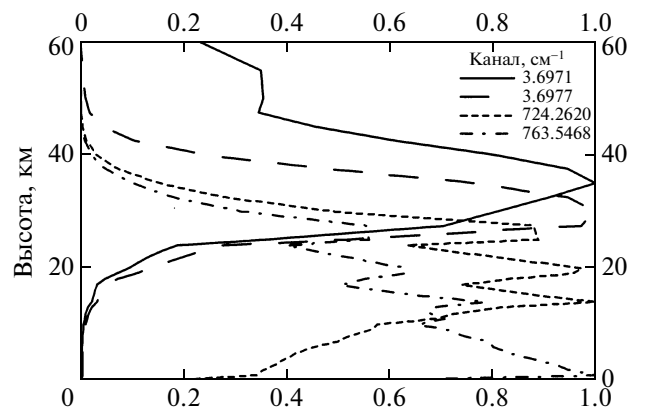
В качестве характеристики информативности измерений мы использовали матрицу ошибок дистанционного метода **S** (1) и матрицу усредняющих ядер **A** (2) (Rodgers, 2000)

$$\mathbf{S} = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K})^{-1}; \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K} = \mathbf{S} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K}. \quad (2)$$

Здесь **S_a** – априорная матрица изменчивости искомого вектора состояния атмосферы (в нашем случае вертикальные профили содержания озона, температуры, водяного пара и т.д.); **K** – матрица вариационных производных излучения по атмосферным параметрам; **S_ε** – матрица некоррелированных ошибок измерения излучения; **T** – знак транспонирования. Матрица **S** позволяет проанализировать погрешности восстановления профиля озона, а матрица **A** – вертикальное разрешение дистанционных измерений.

В качестве априорной информации использовались модельные экспоненциальные матрицы со



Вариационные производные по содержанию озона

Рис. 1. Нормированные на максимум вариационные производные излучения по содержанию озона в атмосфере в спектральных каналах рассматриваемой схемы измерений (ИК + МКВ).

средними значениями профилей атмосферных параметров из базы AFGL-86 (Anderson et al., 1986) и следующими среднеквадратичными отклонениями (СКО): для температуры и отношения смеси водяного пара – 8 К и 60% (1.5° и 5% – при наличии данных радиозондирования) соответственно, для озона – 40%, для других газов – 20%. Радиус корреляции для всех атмосферных параметров был взят равным 5 км.

Потенциальные погрешности определения профиля содержания озона в атмосфере синергетическим методом

Проанализируем погрешности измерения ВП содержания озона при использовании совместной схемы измерения озона ИК-спектрометром Брюкера, МКВ-озонотром и хемилуминесцентным газоанализатором. Для ИК-измерений использовалось спектральное разрешение в 0.01 см⁻¹ и 0.002 см⁻¹, соответствующее времени измерений 15–20 мин и 1 ч. Необходимо отметить, что ИК-измерения при высоком спектральном разрешении (0.002 см⁻¹) являются предпочтительными для получения информации о профиле содержания озона (Виролайнен, Тимофеев, 2008), но такое высокое разрешение позволяет проводить измерения только одного спектра солнечного излучения в течение часа. За это время состояние атмосферы может претерпеть значительные изменения. Поэтому для оперативного мониторинга ВП озона более приемлемы ИК-измерения с разрешением 0.01 см⁻¹. Отношение сигнал/шум при этом составляет 500. Для МКВ-измерений отношение сигнал/шум было взято равным 1000, случайная погрешность приземных измерений соответствует 1%.

На рис. 2 приведены погрешности восстановления вертикального профиля озона по данным изме-

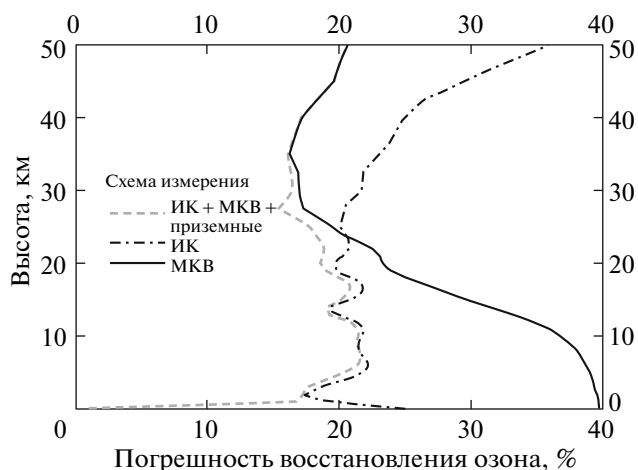


Рис. 2. Погрешность восстановления профиля отношения смеси озона при различных схемах эксперимента.

рения ИК-спектрометра (штрихпунктирная кривая), МКВ-озонметра (сплошная кривая) и по данным совместной схемы измерения ИК + МКВ с добавлением локальных приземных измерений концентрации озона (серая пунктирная кривая).

Из рис. 2 хорошо видно, что, во-первых, ИК-измерения дают меньшие погрешности в тропосфере, а МКВ-измерения — в стратосфере, а, во-вторых, использование синергетического подхода позволяет определять профиль содержания озона (на высотной сетке в 1–2.5 км) с погрешностями в 15–20% (для высот 0–50 км). Приземные измерения озона, выполняемые хемилюминесцентным газоанализатором, позволяют повысить точность определения профиля содержания озона в пограничном слое атмосферы (до 5–15%).

Таким образом, на основе анализа погрешности восстановления профиля содержания озона можно сделать следующий вывод: использованием совместной схемы измерений двух (ИК + МКВ) приборов, работающих в различных спектральных диапазонах, а также при дополнении схемы данными приземных измерений озона, можно определять высотные профили озона с погрешностью 15–20% в тропосфере и стратосфере с высоким временным разрешением.

Анализ точности и информативности синергетического подхода для определения содержания озона в различных слоях атмосферы

Погрешности определения профиля содержания озона на высотной сетке в 1–2.5 км (~15–20%) могут быть значительно уменьшены при определении содержания озона в более толстых слоях атмосферы. Рассмотрим погрешности измерения содержания озона в более толстых слоях атмосферы. Для начала проанализируем матрицу усредня-

ющих ядер метода (см. (2)). Напомним, что усредняющие ядра характеризуют вертикальное разрешение метода.

В работе (Виролайнен, Тимофеев, 2008) анализировались усредняющие ядра ИК-дистанционного метода, основанного на наземных измерениях прошедшего через атмосферу солнечного излучения Фурье-спектрометром с разрешением 0.01 и 0.002 см^{-1} с учетом приземных измерений концентрации озона. При этом было показано, что в тропосфере вертикальное разрешение метода составляет 8–10 км (без добавления локальных измерений) и 5–8 км (с добавлением приземных измерений), т.е. фактически ИК-методом возможно получить только общее содержание тропосферного озона. Для высот 15–35 км при спектральном разрешении 0.002 см^{-1} вертикальное разрешение метода составляет 4–6 км, при разрешении 0.01 см^{-1} — 7–10 км.

На рис. 3 приведены усредняющие ядра МКВ-метода (справа) и совместной схемы МКВ + ИК (слева). Усредняющие ядра приведены для различных высот от 5 до 50 км. Отметим, что в рассматриваемой схеме приземные измерения хемилюминесцентным газоанализатором не учтены. ИК-измерения в этой схеме проводятся со спектральным разрешением 0.01 см^{-1} . Сравнимые данные, приведенные на рис. 3, с описанными выше (только для ИК-схемы), можно видеть, что МКВ-измерения позволяют повысить вертикальное разрешение в стратосфере до 5–8 км. В тропосфере, при наличии приземных измерений, также можно добиться такого разрешения. Таким образом, при одновременном включении в схему измерений содержания озона в атмосфере всех трех приборов (ИК-спектрометра Брюкера, МКВ-радиометра-озонметра и хемилюминесцентного газоанализатора) можно определять вертикальную структуру озона в атмосфере с разрешением 5–8 км.

Проанализируем потенциальную точность синергетического метода в отношении определения вертикальной структуры озона в слоях атмосферы. В таблице приведены априорная погрешность содержания озона в слоях и погрешности его определения на основе синергетического подхода к измерению вертикальной структуры озона.

В синергетическом подходе использованы одновременные измерения двух приборов: ИК-спектрометра и МКВ-радиометра. В отличие от определения вертикального профиля в тропосфере, добавление данных третьего прибора — газоанализатора — не вносит значимых изменений в определение содержания озона в тропосфере в целом. Во второй строке таблицы приведено собственно содержание озона в рассматриваемых слоях (лето средних широт модели AFGl-86).

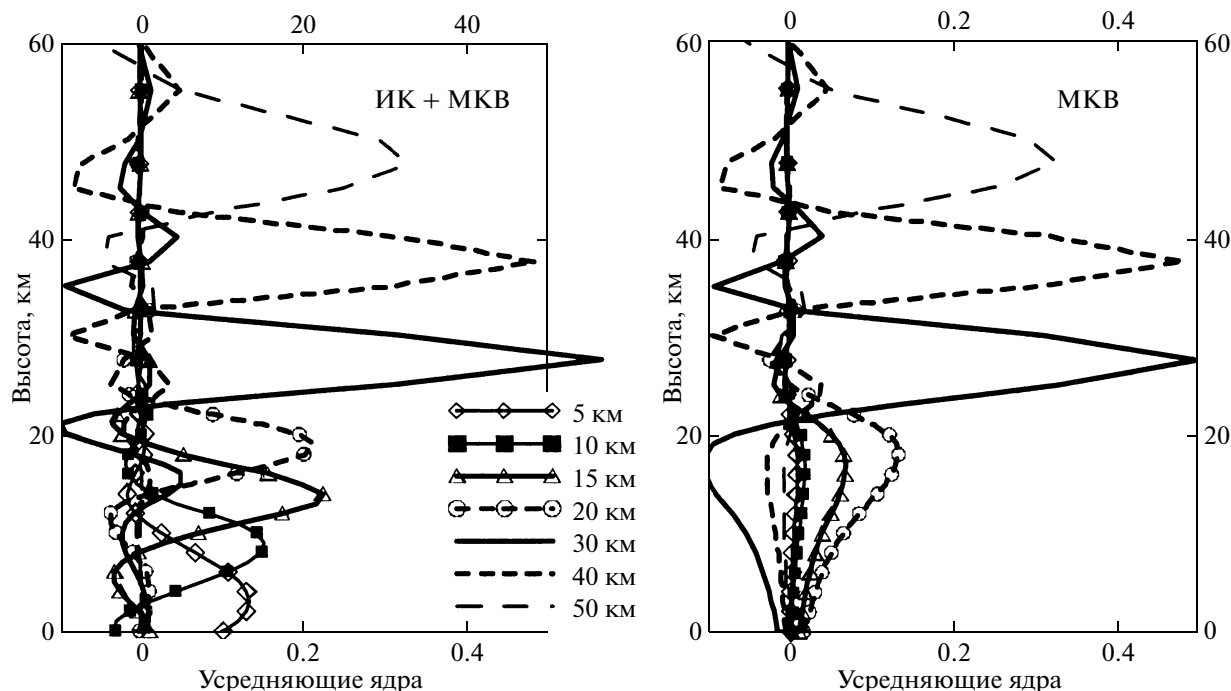


Рис. 3. Усредняющие ядра МКВ и ИК + МКВ методов измерения профиля озона.

Из таблицы хорошо видно, что рассматриваемый синергетический подход к определению содержания озона в слоях толщиной 5–10 км позволяет уменьшать априорную неопределенность содержания озона в 5–10 раз. При таком вертикальном разрешении потенциальная погрешность дистанционного метода составляет 3–6%. Синергетический метод позволяет отслеживать вариации вертикальной структуры содержания озона с временным разрешением 15–20 мин.

Отметим также, что общее содержание озона, а также содержание озона в слое 15–50 км определяется с потенциальной погрешностью, меньшей 0.5%, в слое 0–15 км – с погрешностью 2.5%.

Как известно, на основных станциях сети NDAAC, предназначенных для контроля состава атмосферы, используются и ИК-Фурье-спектрометры, и МКВ-озонometry (<http://www.ndsc.ncsr.noaa.gov/news/>). Следовательно, предложенную синергетическую методику можно широко использовать для повышения качества наземного озонного зондирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложен и изучен комплексный подход определения ВП и ОС озона, основанный на одновременных наземных измерениях прозрачности атмосферы в ИК-области спектра (3–17 мкм) с высоким спектральным разрешением Фурье-спектрометром Брюкера, МКВ-измерениях собственного излучения атмосферы в линии вращательного перехода озона на частоте 110.83604 ГГц и локальных приземных измерениях концентрации озона.

Разработана физико-математическая модель переноса излучения в ИК- (солнечного) и МКВ- (собственного) областях спектра. На основе физико-математической модели переноса ИК- и МКВ-излучений построены алгоритмы и программы расчета нисходящего излучения и его вариационных производных по атмосферным параметрам, а также программы для оценки точности и информативности рассматриваемого синергетического метода.

Получены оценки потенциальной точности и вертикального разрешения комплексного подхода.

Потенциальная погрешность определения содержания озона в отдельных слоях атмосферы (U_{O_3} – содержание озона в слое; $\sigma_{\text{априори}}$ – априорная неопределенность; $\sigma_{\text{апостериори}}$ – погрешность измерения в совместной схеме измерения)

Слой, км	0–10	10–15	15–20	20–25	25–30	30–40	40–50
U_{O_3} , Д.Е.	34.4	38.2	62.2	100.7	86.1	82.2	14.2
$\sigma_{\text{априори}}$, %	30	33	32	32	32	30	31
$\sigma_{\text{апостериори}}$, %	3.7	6.4	5.6	3.8	4.0	3.6	5.9

да при определении вертикальной структуры содержания озона и проанализировано влияние вертикального разрешения метода на погрешности восстановления содержания озона. Показано, что комплексный подход, включающий в себя одновременные наземные измерения прошедшего через атмосферу солнечного излучения Фурье-спектрометром Брюкера в ИК-области, собственного излучения атмосферы МКВ-озонотроном и локальных приземных измерений позволяет измерять профиль содержания озона в тропосфере и стратосфере с вертикальным разрешением 1–2.5 км и погрешностями 15–20%.

При снижении вертикального разрешения до 5–8 км рассматриваемым комплексным методом возможно определять вертикальную структуру содержания озона с потенциальными погрешностями 3–6%. Общее содержание озона, а также содержание озона в слое 15–50 км можно определять с потенциальной погрешностью, меньшей 0.5%, в слое 0–15 км – с погрешностью 2.5%.

Продемонстрированы существенные преимущества предложенного наземного комплексного подхода озонного мониторинга, который может быть реализован с помощью существующей аппаратуры на основных станциях международной сети NDAAC.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Минобрнауки России РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836, а также грантов РФФИ 08-05-00857 и 08-05-00952.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виролайн Я.А., Тимофеев Ю.М.* Определение элементов вертикальной структуры содержания озона из наземных измерений солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 3. С. 3–10.
- Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М.* Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2003. Т. 67. № 12. С. 1791–1795.
- Поберовский А.В., Косцов В.С., Тимофеев Ю.М., Красильников А.А., Куликов Ю.Ю.* Первые результаты МКВ-зондирования озоносферы над Санкт-Петербургом // Вестн. СПбГУ. Физика и химия. 2008.
- Тимофеев Ю.М.* Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.
- Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X. et al.* AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km). AFGL-TR-86-0110 // Environ. Res. Papers. 1986. № 954. 43 p.
- Houghton J.T.* Global warming: the complete briefing. Third ed. Cambridge: Univ. Press, 2004. 351 p.
- 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.
- WMO Global Atmosphere Watch, Report on a Strategy for Integrating Satellite and Ground-Based Observations of Ozone // WMO/CEOS. Rep. № 140. 2002. 147 p.
- WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project-Rep. №. 47. Geneva, 2003. 498 p.

Synergetic Ground-Based Method for Atmospheric Ozone Profiles Determining

Ya. A. Virolainen, Yu. M. Timofeyev

Physical Faculty of Saint-Petersburg State University, St. Petersburg

Synergetic method for determining the ozone vertical profiles and the combined method for interpreting the different ground-based measurements are considered. The method is based on simultaneous measurements of absorption spectra of IR solar radiation by Bruker Fourier-spectrometer with high spectral resolution, microwave measurements of thermal radiation spectra in ozone rotation line and local measurements of ozone concentration in the near-surface layer. The potential accuracy and vertical resolution of the method has been obtained and analyzed. It has been shown that combined method allows the retrieving of ozone vertical profile in troposphere and stratosphere with 15–20% errors for 1–2.5 km vertical resolution. With the decreasing of vertical resolution to 5–8 km the ozone vertical structure can be measured with 3–6% potential accuracy. The ozone total column as well as stratospheric ozone column (15–50 km) can be retrieved with the potential errors less than 0.5%, tropospheric ozone column (0–15 km) – with 2.5% potential error.

Key words: ozone in troposphere and stratosphere, vertical profile, IR spectrometry, microwave sensing, combined method, ground-based measurements.