

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 551.510.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА ИЗ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2008 г. Я. А. Виролайнен*, Ю. М. Тимофеев

Физический факультет Санкт-Петербургского государственного Университета

Тел.: (812) 428-43-47,

e-mail: Yana.Virolainen@JV14952.spb.edu

Поступила в редакцию 03.12.2007 г.

Проанализированы погрешности определения вертикальной структуры содержания озона по данным наземных измерений прямого солнечного ИК-излучения Фурье-спектрометром Брюкера со сверхвысоким спектральным разрешением ($0.01-0.002 \text{ см}^{-1}$). Определены спектральные каналы, информативные относительно содержания озона в тропосфере и нижней стратосфере. Исследовано влияние на точность метода таких факторов, как неопределенности в задании температурного профиля, случайный шум измерения, спектральное разрешение прибора, вертикальное разрешение метода. Показано, что рассматриваемый метод позволяет восстанавливать профиль содержания озона с высоким вертикальным разрешением в тропосфере с погрешностью 20–25%, а в стратосфере – с погрешностью 15–25%.

ВВЕДЕНИЕ

Озон, один из важнейших климатически активных газов, играет значительную роль в фотохимических, динамических и радиационных процессах в атмосфере [1]. Стратосферный озон поглощает коротковолновую ультрафиолетовую (УФ) солнечную радиацию, озон в верхней тропосфере и нижней стратосфере вносит вклад в парниковый эффект, в нижней тропосфере – оказывает негативное влияние на здоровье человека и на всю биосферу в целом [2]. Измерения вертикальных профилей содержания озона в настоящее время осуществляются многими методами: наземными, аэростатными, спутниковыми. Важную роль играют измерения с помощью озонзондов. Различные методы имеют различные преимущества и недостатки. В частности, большинство дистанционных методов (как наземных, так и спутниковых) не позволяют определять вертикальные профили содержания озона в тропосфере в соответствии с требованиями ВМО по точности, периодичности, высотному диапазону, пространственному охвату и вертикальному разрешению [3]. В связи с этим важное значение имеет совершенствование методов измерений содержания озона. Отметим также, что наземные высококачественные измерения профилей содержания озона необходимы для валидации различных спутниковых измерений на регулярной основе.

В работах [4–8] предложен и изучен метод определения вертикальных профилей содержания озона на основе интерпретации наземных измерений спектров солнечного инфракрасного

(ИК) излучения с высоким спектральным разрешением. Идея метода состоит в измерении поглощения солнечного излучения в контурах отдельных линий (для этого требуется высокое спектральное разрешение порядка $0.02-0.001 \text{ см}^{-1}$) и использовании особенностей поведения коэффициента поглощения в линиях поглощения, обусловленных соударением молекул. Как известно [9], при этом коэффициенты поглощения увеличиваются с падением давления в атмосфере в центрах линий поглощения и уменьшаются в “крыльях” линий. Это позволяет получить информацию именно об элементах вертикальной структуры содержания озона, а не только о его общем содержании. Укажем, что эффективность метода повышается с ростом длины волны, так как вклад уширения за счет столкновений молекул (лоренцевский контур линии) растет по сравнению с доплеровским уширением (доплеровский контур не зависит от давления).

Реализация наземного ИК-метода может быть осуществлена в различных полосах и линиях поглощения озона. Так, в базе данных HITRAN-2004 [10] приведены спектроскопические параметры более 300 000 спектральных линий озона. В работах [4–8] исследованы погрешности наземного ИК-метода и приведены примеры его реализации и валидации на основе сопоставлений с независимыми (контрольными) измерениями. Недостатком проведенных ранее исследований является относительно произвольный выбор спектральных областей и линий поглощения озона, а также не использование локальных приземных измерений концентрации

озона, которые в настоящее время можно производить с помощью относительно простых приборов. В частности, в цитированных работах предлагалось исследовать линии поглощения озона в полосах 4.7 и 9.6 мкм, но при этом игнорировались линии в районе полосы поглощения углекислого газа 15 мкм, влияние уширения за счет столкновений для которых более сильное.

Целью настоящей работы является исследование возможности повышения точности определения профиля озона на основе использования наземных измерений солнечного излучения Фурье-спектрометра Брюкера с разрешением $0.02\text{--}0.002\text{ см}^{-1}$ путем привлечения дополнительных каналов в линиях поглощения озона в длинноволновой области спектра и наземных измерений локальных концентраций приземного озона с помощью хемилюминесцентного или оптического газоанализаторов.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Фурье-спектрометр Брюкера (закупленный физическим факультетом СПбГУ в рамках национального проекта “Образование”) позволяет измерять прошедшее через атмосферу солнечное излучение в широкой (3–18 мкм) ИК-области спектра со сверхвысоким спектральным разрешением $0.01\text{--}0.002\text{ см}^{-1}$. При таком высоком разрешении использование для решения обратной задачи всех линий поглощения озона, а также всех возможных каналов измерения спектрометра, потребует необоснованно долгих расчетов даже на современных ЭВМ, поэтому на первом этапе исследования для оптимизации схемы измерения необходимо определить наиболее информативные в отношении определения профиля озона каналы указанного прибора.

Параметры расчетов

Для устранения отрицательных значений в спектрах солнечного излучения после преобразования интерферограммы мы воспользовались аподизацией треугольником с аппаратной функцией

$$\varphi(x) = D \frac{\sin^2(\pi Dx)}{(\pi Dx)^2},$$

где D — оптическая длина пути в приборе. Поскольку при наилучшем спектральном разрешении прибора ($\sim 0.002\text{ см}^{-1}$) время измерений достигает одного часа ($D = 600\text{ см}$) и состояние атмосферы (влажность и температура) может претерпеть заметные изменения, нами также анализируются измерения с более низким разрешением (0.01 см^{-1}), но выполненные за более короткое время (10–15 мин). Отношение сигнал/шум в

первом случае составляет 100, во втором — 500 (по данным аналогичных приборов [4–6]). Нами также исследовался вариант измерений нескольких спектров солнечного излучения в течение часа со спектральным разрешением 0.01 см^{-1} при реализации отношения сигнал/шум, равного 1000, получаемого при осреднении нескольких измерений.

Выражение для прошедшей через атмосферу солнечной радиации $I_{\Delta\nu\downarrow}$, измеренной на высоте с давлением p_0 в конечном спектральном интервале $\Delta\nu$ с учетом аппаратной функции прибора, выглядит следующим образом (1):

$$I_{\Delta\nu\downarrow} = \int_{\Delta\nu} \varphi(\nu) S_\nu \exp\left\{-\frac{\sec\theta}{g} \int_0^{p_0} \sum_j k_{\nu,p,j} q_{p,j} dp\right\} d\nu. \quad (1)$$

Здесь S_ν — спектр солнечного излучения на верхней границе атмосферы [10]; $k_{\nu,p,j}$ и $q_{p,j}$ — коэффициенты поглощения всех линий и континуумов и отношения смеси различных газов соответственно, (j — индекс газа) на уровне с давлением p .

В качестве характеристик тонкой структуры полос поглощения взяты параметры банка данных HITRAN2004 [11], а для расчета спектральных характеристик солнечного излучения — профили температуры и газовых компонент для лета (средние широты) из базы данных AFGL-86 [12]. Хотя измерения солнечного излучения проводятся в линиях поглощения озона, в расчетах учитывается поглощение водяным паром (континуальное и селективное), углекислым газом, хлорфтор-углеродами CFC-11 и CFC-12, а также метаном и N_2O (параметры радиационной модели см. подробнее в [13]).

Анализ информативности измерений

Для сокращения времени расчетов и оптимизации схемы измерения были проанализированы возможности восстановления профиля озона по измерениям излучения в различных спектральных областях. В качестве характеристики информативности измерений использовались матрица ошибок дистанционного метода \mathbf{S} (2) и матрица усредняющих ядер \mathbf{A} (3) [14].

$$\mathbf{S} = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K})^{-1}, \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K} = \mathbf{S} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{S}_a — априорная матрица изменчивости искомого вектора состояния атмосферы (в нашем случае температуры, влагосодержания, содержания озона и т.д.); \mathbf{K} — матрица вариационных производных излучения по атмосферным параметрам; \mathbf{S}_ε — матрица некоррелированных ошибок измерения; T — знак транспонирования. Матрица \mathbf{S} — позволяет проанализировать погрешности

Таблица 1. Отобранные для решения обратной задачи спектральные интервалы (см^{-1}) и число каналов при спектральном разрешении прибора $\delta\nu = 0.002/0.01 \text{ см}^{-1}$

Интервал	724.1–724.55	763.5–763.8	992.8–993.1	1002.6–1003.05	1043.5–1043.8	1079.1–1079.4	1124.2–1124.5
Число каналов	500/100	330/66	330/66	500/100	330/66	330/66	330/66

восстановления профиля озона, а матрица \mathbf{A} – вертикальное разрешение дистанционных измерений.

Для численных оценок информативности измерений для каждого рассмотренного случая был рассчитан прирост информационного содержания эксперимента H [14]

$$H = \frac{1}{2} \frac{\lg_2 |S|}{\lg_2 |S_a|}. \quad (4)$$

В качестве априорной информации использовались модельные экспоненциальные матрицы со средними значениями из базы AFGl-86 [12] и следующими среднеквадратичными отклонениями (СКО): для температуры и отношения смеси водяного пара – 8°K 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.

Схема измерений

За основу выбора спектральных областей измерений при решении обратной задачи были взяты области, рекомендованные в работах [4–6]. Для отбора дополнительных спектральных каналов были рассчитаны и проанализированы вариационные производные по вертикальному профилю содержания озона K , демонстрирующие чувствительность излучения к изменениям озона в различных слоях атмосферы, в широкой спектральной области 700–1200 см^{-1} . Также были проанализированы вариации излучения в зависимости от вариаций озона, температуры и влагосодержания. Из дальнейшего рассмотрения были исключены спектральные интервалы, в которых излучение значительно более чувствительно к изменениям других параметров, а также те интервалы, в которых модель недостаточно точно описывает экспериментальные данные (влияние плохо изученной интерференции линий). Для более подробного анализа были отобраны интервалы из разных участков полосы поглощения озона, в которых ядра озона имеют локальные максимумы на различных высотах.

В табл. 1 представлены отобранные в ходе предварительного исследования спектральные интервалы, используемые в дальнейшем для анализа потенциальных погрешностей восстановления профиля содержания озона в атмосфере. Как

видно из табл.1, кроме каналов из полосы поглощения озона 9.6 мкм были также отобраны каналы из коротковолнового “крыла” полосы поглощения CO_2 15 мкм. Эти каналы, вследствие особенности поглощения излучения в крыльях линий (лоренцевский контур), позволят получить информацию об озоне в более низких слоях тропосферы. Кроме того, в них содержится дополнительная информация о температурном профиле, позволяющая уменьшить “эффективный шум” за счет неопределенности знаний о температуре.

На рис. 1 в качестве примера представлены некоторые нормированные на максимум ядра озона (вариационные производные излучения по содержанию озона), характеризующие чувствительность солнечного 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 приходится на различные слои атмосферы. Каналы в полосе 15 мкм взяты из крыльев линий озона разной интенсивности. Так, в канале 763 см^{-1} излучение более чувствительно к изменению озона в тропосфере, в канале 724 см^{-1} – в нижних слоях стратосферы. Канал 1002 см^{-1} взят в центре линии озона, максимум чувствительности приходится на высоты 27–33 км. Таким образом, из представленных данных видно, что в отобранных спектральных интервалах излучение чувствительно к изменениям содержания озона на различных

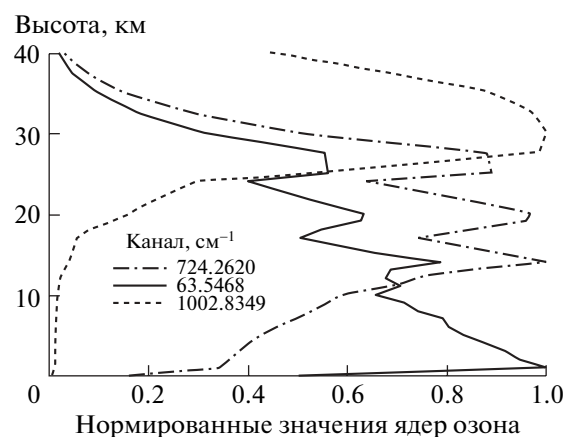


Рис. 1. Нормированные на максимум вариационные производные излучения по содержанию озона в атмосфере в спектральных каналах рассматриваемой схемы измерений.

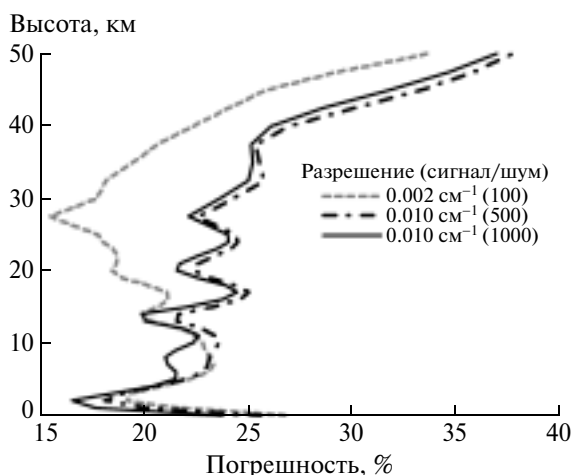


Рис. 2. Погрешность восстановления профиля отношения смеси озона при разном спектральном разрешении и отношении сигнал/шум.

высотах в атмосфере, т.е. существует возможность определения рассматриваемым методом не только общего содержания озона, но и элементов его вертикальной структуры.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

В работах [4–8] анализировались возможные факторы, влияющие на погрешности восстановления содержания озона, — такие, как шум измерения, неопределенность задания температурного профиля, погрешности в описании тонкой структуры полос поглощения, различные типы ошибок, связанных с особенностями измерительной аппаратуры. В нашем исследовании мы решили проанализировать следующие факторы, которые могут определять информативность и точность измерения озона:

— спектральное разрешение прибора $\delta\nu$; отношение сигнал/шум (С/Ш); спектральная схема измерения; наличие приземных измерений концентрации озона; точность задания профилей температуры и влажности; вертикальное разрешение измерений.

Спектральное разрешение и шум интерферометрических измерений

На рис. 2 приведен вертикальный ход погрешности восстановления профиля озона для трех вариантов наземного эксперимента: с разрешением 0.002 см^{-1} (отношением сигнал/шум 100 (1)) и разрешением 0.01 см^{-1} (отношением сигнал/шум 500 (2) и 1000 (3)). Напомним, что первый и третий эксперименты относятся к измерениям с временным разрешением в 1 ч, второй — в ем 10–15 мин.

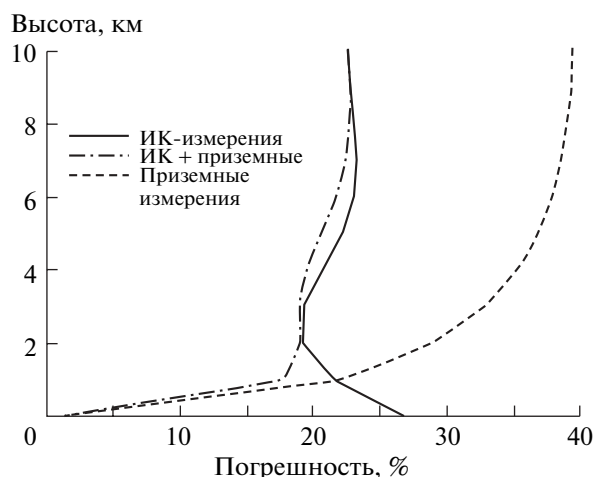


Рис. 3. Потенциальная погрешность восстановления профиля содержания озона в тропосфере при измерениях разными приборами.

Расчеты погрешностей восстановления в этом случае осуществлялись для высокого вертикального разрешения, равного 1 км.

Из рис. 2 хорошо видно, что интерферометрические измерения, проводимые с разрешением 0.002 см^{-1} (эксперимент 1), дают значительную информацию о профиле содержания озона в стратосфере (с погрешностями 15–20%). В тропосфере наименьшие погрешности (17–23%) могут быть получены при спектральном разрешении 0.01 см^{-1} и отношении сигнал/шум 1000 (эксперимент 3).

Дополнительные приземные измерения концентрации озона

В настоящее время имеются возможности локальных приземных измерений концентраций озона, например, с помощью хемилюминесцентных или оптических газоанализаторов. Мы проанализировали влияние дополнительных измерений приземной концентрации озона на восстановление профиля его содержания в тропосфере. На рис.3 показан вертикальный ход погрешности измерения озонного профиля при использовании только интерферометрических измерений (спектральное разрешение 0.002 см^{-1}), только измерений хемилюминесцентным газоанализатором (погрешность измерения приземного содержания озона 1%) и при использовании данных обоих приборов.

Из рис. 3 видно, что использование приземных измерений концентрации озона позволяет значительно повысить точность восстановления профиля содержания озона для пограничного слоя атмосферы. Потенциальная погрешность определения профиля озона в тропосфере в рассматриваемой схеме составляет 20–24%. Для слоя атмо-

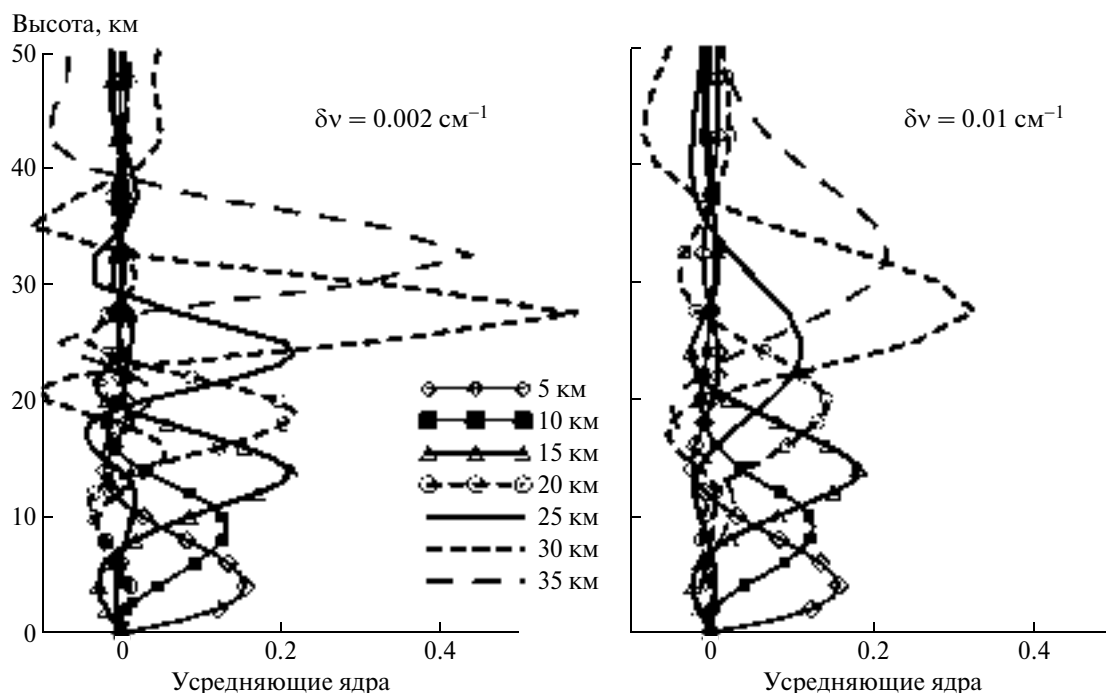


Рис. 4. Усредняющие ядра дистанционного метода измерения профиля озона, полученные по интерферометрическим и приземным измерениям озона (для разного спектрального разрешения ИК-спектрометра).

сферы 0–4 км потенциальная погрешность метода, использующего данные двух приборов, не превышает 18–20%.

Вертикальное разрешение метода

Относительно высокие погрешности определения профиля содержания озона на высотной сетке в 1 км (~15–25%) могут быть значительно уменьшены при определении содержания озона в более толстых слоях атмосферы. Для определения вертикального разрешения наземного дистанционного ИК-спектроскопического метода были рассчитаны матрицы усредняющих ядер (см. формула 3) [14].

На рис. 4 приведены усредняющие ядра дистанционного метода, характеризующие его вертикальное разрешение, 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. Усредняющие ядра приведены для различных высот от 5 до 35 км. Из анализа рисунка следует, что в тропосфере вертикальное разрешение составляет 5–8 км. Отметим также, что без добавления данных приземных измерений концентрации озона вертикальное разрешение в тропосфере ухудшается до 8–10 км, 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} вертикальное разрешение в стратосфере составляет 6–8 км.

Измерение содержания озона в слоях

В табл. 2 приведены погрешности измерения содержания тропосферного озона в слое

0–10 км (при задаваемой априорной неопределенности 30%) для разных типов эксперимента (спектрального разрешения, отношения сигнал/шум и набора спектральных каналов). В двух случаях были взяты каналы только из полосы поглощения озона 9.6 $\mu\text{м}$, в трех других – к схеме добавлены каналы в линиях поглощения озона, расположенных в крыле полосы поглощения CO_2 (см. табл.1). Таким образом, было проанализировано влияние спектральной схемы измерения излучения на восстановление тропосферного содержания озона. В последней строке также приведены значения приращения информации о содержании озоне за счет проведения интерферометрических измерений (4).

Из табл. 2 хорошо видно, что добавление в схему измерений спектральных каналов из полосы 15 $\mu\text{м}$ позволяет уменьшить погрешность измерения содержания тропосферного озона. Особенно это заметно при высоком спектральном разрешении, когда априорная неопределенность для схемы

Таблица 2. Потенциальная погрешность определения содержания озона в слое тропосферы 0–10 км (содержание озона в слое – 34.4 Д.Е., априорная неопределенность – 30%) и приращение информационного содержания H для разных схем эксперимента

Разрешение	$\delta\nu = 0.01 \text{ см}^{-1}$			$\delta\nu = 0.002 \text{ см}^{-1}$	
	без 15 мкм с/ш = 500	с 15 мкм с/ш = 500	с 15 мкм с/ш = 1000	без 15 мкм с/ш = 100	с 15 мкм с/ш = 100
σ , %	5.8	4.7	3.6	5.9	4.4
H , бит	10.3	12.2	14.5	19.6	21.4

Таблица 3. Потенциальная погрешность определения содержания озона в отдельных слоях стратосферы (U_{O_3} – содержание озона в слое, $\sigma_{\text{a priori}}$ – априорная неопределенность, σ – погрешность измерения: $I - \delta\nu = 0.002 \text{ см}^{-1}$, с/ш = 100, приземные измерения с точностью 1%, $II - \delta\nu = 0.01 \text{ см}^{-1}$, с/ш = 1000, приземные измерения)

Слой, км	10–15	15–20	20–25	25–30	30–40	40–50	H , бит
U_{O_3} , Д.Е.	38.2	62.2	100.7	86.1	82.2	14.2	
$\sigma_{\text{a priori}}$, %	33	32	32	32	30	31	
σ^I , %	7.3	5.9	3.5	4.2	3.5	10.0	23.8
σ^{II} , %	7.5	10.6	9.7	10.1	8.8	16.4	16.8

интерферометрических измерений без длинноволновых каналов уменьшается в 5 раз (до 5.9%), с использованием длинноволновых каналов – в 7 раз (до 4.4%). Повышение отношения сигнал/шум при спектральном разрешении 0.01 см^{-1} до 1000 (при использовании каналов из полосы 15 мкм) позволяет получить наименьшие погрешности определения тропосферного озона (3.6%).

Точность задания температуры и влажности

Отметим, что во всех расчетах подразумевалось, что мы имеем данные о профилях температуры и влажности с точностью 1.5 К и 5%, соответственно, например из данных радиозондирования или объективного анализа. Однако не всегда есть возможность использовать эту дополнительную информацию. Поэтому также было исследовано влияние отсутствия данных радиозондирования о профилях температуры и влажности на результаты определения содержания тропосферного озона. При этом априорная неопределенность температурного профиля была задана равной 8 К, отношения смеси водяного пара – 60%. Расчеты показали, что в этом случае для разрешения 0.002 см^{-1} погрешность определения как тропосферного озона, так и озона в нижней стратосфере ощутимо возрастает при отсутствии в измерениях длинноволновых каналов (до 6.4% для слоя 0–10 км и до 8.7% для слоя 10–15 км). В то же время при наличии этих каналов погрешность определения содержания озона меняется незначительно, составляя 4.6% и 7.6% для слоев 0–10 км и 10–15 км соответственно.

В табл. 3 представлены потенциальные погрешности определения озона в толстых слоях стратосферы, примерно соответствующих вертикальному разрешению метода. Оценки приведены для двух схем эксперимента (с разрешением 0.002 см^{-1} при отношении сигнал/шум 100 и с разрешением 0.01 см^{-1} при отношении сигнал/шум 1000). Во второй строке приведено содержание озона в рассматриваемых слоях (лето средних широт модели AFGl-86), в третьей – априорная неопределенность содержания озона. В последнем столбце табл.3 показано приращение информационного содержания в битах (см. формулу 4) в ходе измерительных экспериментов. Анализируя табл.3, можно видеть, что для высот 10–40 км при спектральном разрешении прибора 0.002 см^{-1} погрешности измерения озона не превышает 3–7% при вертикальном разрешении порядка 5 км. При интерферометрических измерениях с более низким разрешением (0.01 см^{-1}) указанная погрешность хуже (7–10%).

В отличие от восстановления профиля озона в тропосфере (см. рис.3 и табл.2) добавление приземных измерений концентраций озона незначительно влияет на погрешность определения озона в слоях стратосферы. Это обусловлено относительно малой корреляцией приземных содержания озона с его содержанием в верхней тропосфере и стратосфере (нами был использован радиус корреляции в 5 км). Анализируя приращение информационного содержания (последняя строка табл.2 и последний столбец табл. 3), можно отметить, что больше всего информации содержится в

измерениях с высоким спектральным разрешением при использовании одновременных приземных измерений концентрации озона (I) — 24 бита. При измерениях с более низким спектральным разрешением приращение информации, в зависимости от схемы эксперимента, составляет 10–17 бит.

Отметим, что общее содержание озона во всех проведенных численных экспериментах определяется с погрешностью меньшей 0.5%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе проанализированы погрешности определения вертикальной структуры содержания озона по данным наземных измерений прямого солнечного ИК-излучения Фурье-спектрометром Брюкера со сверхвысоким спектральным разрешением (0.01 – 0.002 см⁻¹). Рассчитаны и проанализированы вариационные производные солнечного излучения по содержанию озона на различных высотах, величины “эффективного шума”, обусловленного возможными погрешностями задания температуры и влажности атмосферы в спектральной области 700 – 1200 см⁻¹. Определены дополнительные спектральные области и линии O_3 в длинноволновой части ИК-спектра, информативные относительно содержания озона в тропосфере. Получены потенциальные погрешности дистанционного метода, основанные на расчетах матриц ошибок дистанционного метода. Проанализировано вертикальное разрешение метода и его информационное содержание (по Шеннону). Исследовано влияние на точность метода таких факторов как неопределенности в задании температурного профиля, случайный шум измерения, спектральное разрешение прибора, вертикальное разрешение метода. Оценено влияние дополнительных измерений приземных концентраций озона.

Показано, что рассматриваемый метод позволяет восстанавливать профиль содержания озона с высоким вертикальным разрешением в тропосфере с погрешностью 20–25%. Использование измерений с разрешением 0.002 см⁻¹ позволяет также определять вертикальный профиль содержания озона в стратосфере с погрешностью 15–25%.

Использование дополнительных линий поглощения озона в полосе CO_2 15 мкм позволяет повысить точность определения содержания озона в атмосфере, а также компенсировать недостаток данных радиозондирования по температуре и влажностному содержанию. Локальные приземные измерения концентрации озона позволяют значительно уменьшить погрешности определения содержания озона в нижних слоях тропосферы, а также повысить вертикальное разрешение дистанционного метода в тропосфере. Существенное сниже-

ние погрешностей определения озона может быть достигнуто для относительно толстых атмосферных слоев, толщина которых согласована с вертикальными возможностями дистанционного метода. Тропосферный озон (0 – 10 км) определяется с погрешностью 3–4%, наилучшая точность достигается при увеличении отношения сигнал/шум до 1000 (за счет увеличения времени измерений) и использовании длинноволновых линий поглощения озона. Для высот 10 – 40 км при спектральном разрешении измерений 0.002 см⁻¹ и при вертикальном разрешении порядка 5 км погрешность измерения концентрации озона составляет 3–7%, при спектральном разрешении 0.01 см⁻¹ — 8–10%.

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 05-05-65305 и 06-05-64909.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project-Rep.t № 47. Geneva, 2003. 498 p.
2. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics. N. Y.: J. Wiley and Sons, Inc., 1998, 715 p.
3. WMO/CEOS Report on a Strategy for integrated satellite and ground-based observations of ozone. MO GAW № 1046. 2002. P. 124 (GAW report № 140).
4. *Pougatchev N.S., Connor B.J., Rinsland C.P.* Infrared measurements of the ozone vertical distribution above Kitt Peak // J. Geophys. Res., 1995. V. 100. № D8. P. 16.689–16.697.
5. *Pougatchev N.S., Connor B.J., Jones N.B., Rinsland C.P.* Validation of ozone profile retrievals from infrared ground-based solar spectra // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 1637–1640.
6. *Nakajima H., Liu X., Murata I. et al.* Retrieval of vertical profiles of ozone from high-resolution infrared solar spectra at Rikubetsu, Japan // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D25. P. 29.981–29.990.
7. *Barret B. et al.* Retrieval and characterization of ozone profiles from solar infrared spectra at the Jungfrauoch // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D24 4788. doi:10.1029/2001JD001298
8. *Kagawa A. et al.* Characteristics and error estimation of stratospheric ozone and ozone-related species over Poker Flat ($65^\circ N$, $147^\circ W$), Alaska observed by a ground-based FTIR spectrometer from 2001 to 2003 // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 3791–3810
9. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
10. *Fontenla J., White O. R., Fox P. A. et al.* Calculation of solar irradiances. I. Synthesis of the solar spectrum // Astrophys. J. 1999. V. 518. P. 480–500.
11. *Rothman L.S. et al.* The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 2005. V. 96. P. 139–204.

12. *Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X. et al.* AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km). AFGL-TR-86-0110 // *Environ. Res. Pap.* 1986. № 954. 43 p.
13. *Виролайнен Я.А., Поляков А.В.* Алгоритм прямого расчета функций пропускания в задачах наземного дистанционного зондирования атмосферы // *Вестн. СПбГУ. Сер. 4.* 1999. Вып. 1 (№ 4). С. 29–35.
14. *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.

The Ozone Vertical Structure Determination from Ground-Based High Spectral Resolution Solar IR Radiance Measurements

Ya. A. Virolainen, Yu. M. Timofeyev

Physical Faculty of St. Petersburg State University

The potential errors of ozone vertical structure retrieval from ground-based solar IR radiance measurements made by high resolution ($0.01\text{--}0.002\text{ cm}^{-1}$) Bruker spectrometer have been analyzed. The influence of different factor on ozone retrieval accuracy such as temperature profile uncertainty, measurement noise, spectral resolution, vertical resolution, has been investigated. It has been shown that considered remote sensing method allow retrieving of the ozone profile with 20–25% in troposphere and with 15–25% in stratosphere potential accuracy.