

Комплексная методика интерпретации наземных микроволновых спектральных измерений в задаче определения вертикального профиля содержания озона

В.С. Косцов, А.В. Поберовский, С.И. Осипов, Ю.М. Тимофеев*

*Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1*

Поступила в редакцию 5.09.2011 г.

Описан алгоритм интерпретации наземных измерений яркостной температуры нисходящего микроволнового излучения в линиях поглощения, традиционно используемых для определения вертикальных профилей содержания озона. Обратная задача сформулирована как комплексная относительно вертикального профиля содержания озона (целевой параметр), а также вертикальных профилей температуры, давления, содержания водяного пара, влажности облаков (контролируемые параметры). Такой подход дает возможность использовать в любом сочетании независимые измерения атмосферных параметров в различных высотных диапазонах (при их наличии), а также учитывать физические взаимосвязи параметров (например, температуры и давления, обусловленные уравнением гидростатики). Представлены оценки погрешностей определения средней концентрации озона в слоях 22–30, 30–40, 40–50 и 50–60 км в летний и зимний периоды (при различных значениях общего влагосодержания тропосферы) для различных сценариев интерпретации измерений нисходящего микроволнового излучения в линии поглощения озона 110 ГГц.

Ключевые слова: наземное микроволновое дистанционное зондирование, озон, обратные задачи; ground-based microwave remote sensing, ozone, inverse problems.

Введение

Дистанционное зондирование озоносферы на миллиметровых волнах (микроволновое зондирование) с поверхности Земли позволяет решить задачу по реализации непрерывных и длительных измерений вертикального профиля содержания озона в стратосфере и мезосфере (на высотах ~20–70 км) в заданной географической точке с высоким разрешением по времени практически независимо от погодных условий [1–4]. В настоящее время такие микроволновые (МКВ) измерения осуществляются на ряде станций международной сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) [5]. В России уже длительное время МКВ-мониторинг озона осуществляется сотрудниками Физического института РАН (ФИ РАН, Москва) и Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН, Нижний Новгород) [6, 7].

Широко используемый метод обработки спектров микроволнового излучения с целью определения профиля содержания озона заключается в оценивании так называемого «тропосферного» поглощения и выделении «стратосферной компоненты» излучения, в которой содержится информация о вертикальном

распределении содержания озона в стратосфере и мезосфере [1, 2]. В качестве измеренной величины при таком подходе часто выступает оптическая толщина, обусловленная только поглощением озона.

Среди основных проблем, возникающих при решении задачи наземного микроволнового озонзондирования, следует отметить необходимость наличия информации о температуре и давлении в стратосфере и мезосфере, а также об ослаблении МКВ-излучения в тропосфере. Оценивание тропосферного поглощения, как правило, производится по измерениям в так называемых «опорных» спектральных каналах, характеризующихся большой величиной частотной отстройки от центра линии (в несколько сотен мегагерц), чтобы можно было пренебречь излучением, формируемым в стратомезосфере.

В настоящей статье описан и проанализирован новый комплексный (многопараметрический) подход к решению задачи микроволнового озонзондирования. Учет ослабления в тропосфере производится неявно и одновременно с определением вертикального распределения содержания озона. Как следствие, снижаются требования к измерениям в «опорных» каналах. При этом предложенный подход позволяет использовать все доступные данные о распределении атмосферных параметров на различных высотах в любой комбинации (например, радиозондовые и спутниковые), а также учитывать связи между параметрами состояния атмосферы (для температуры и давления, обусловленные, например, уравнением гидростатики).

* Владимир Станиславович Косцов (vlad@troll.phys.spbu.ru); Анатолий Васильевич Поберовский (avprob@troll.phys.spbu.ru); Сергей Игоревич Осипов; Юрий Михайлович Тимофеев (tim@troll.phys.spbu.ru).

Алгоритм разрабатывался для интерпретации спектров в линиях поглощения озона 110,836 и 142,176 ГГц, регистрируемых соответственно аппаратурой, изготовленной в Институте прикладной физики РАН и функционирующей на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета [8], а также аппаратурой GROMOS, функционирующей в Бернском университете, Швейцария [9]. Представленные в настоящей статье результаты получены для первого из вышеупомянутых микроволновых приборов.

Описание аппаратуры и эксперимента

Микроволновый озонметр, работающий на физическом факультете СПбГУ, представляет собой гетеродинный радиометрический приемник миллиметрового диапазона длин волн и многоканальный анализатор спектра. Прибор регистрирует спектр нисходящего радиотеплового излучения (в терминах радиояркостной температуры) в линии поглощения озона 110,836 ГГц. При общем количестве спектральных каналов 31 полная полоса анализа исследуемого сигнала составляет 240 МГц со спектральным разрешением 1–10 МГц. Калибровка прибора осуществляется по измерениям излучения двух «черных тел» — теплового, находящегося при температуре окружающего воздуха, и холодного, находящегося при температуре кипения жидкого азота. Зенитный угол линии визирования составляет 70°.

Прибор работает в автоматическом квазипрерывном режиме. Каждые 100 с регистрируется и заносится в банк данных один спектр. Предварительный этап обработки данных включает проверку качества спектров (на основе численных критериев), усреднение данных по заданным интервалам времени и оценку случайных погрешностей усредненных значений радиояркостной температуры. Основной этап обработки данных включает подготовку результатов независимых (радиоозондовых и спутниковых) измерений параметров атмосферы для использования в алгоритме решения обратной задачи и непосредственное решение обратной задачи определения профиля содержания озона.

Формулировка задачи и анализ весовых функций

Исходным соотношением для рассматриваемой обратной задачи является интегральная форма уравнения переноса микроволнового излучения, записанная в приближении Рэлея–Джинса для радиояркостной температуры, регистрируемой прибором:

$$T_b(\nu) = \int_0^{s_0} T(s)\alpha(\nu, s) \exp\left[-\int_0^s \alpha(\nu, s') ds'\right] ds + T_0 \exp\left[-\int_0^{s_0} \alpha(\nu, s) ds\right], \quad (1)$$

где $T_b(\nu)$ — радиояркостная температура нисходящего излучения на частоте ν ; s — координата вдоль

оптической трассы; s_0 — условная верхняя граница атмосферы; T — температура атмосферы; α — коэффициент поглощения; T_0 — радиояркостная температура фонового космического излучения (2,7 К). Учитывается поглощение излучения кислородом, водяным паром, жидкокапельной влагой облаков и озоном. Линеаризованная форма уравнения переноса может быть записана следующим образом:

$$\delta T_b(\nu) = \sum_{i=1}^N \int_0^{s_0} F_i(\nu, s) \delta x_i(s) ds, \quad (2)$$

где δ — вариация (суммирование идет по числу неизвестных профилей различных параметров атмосферы, обозначенных как x_i); F_i — ядра линеаризованного уравнения (весовые функции), соответствующие вариациям различных атмосферных параметров. В рассматриваемом случае общее число неизвестных профилей равно 5 — это профили температуры, давления, содержания водяного пара, влажности облаков, содержания озона. В некоторых случаях бывает удобно анализировать весовые функции, соответствующие не абсолютным, а относительным вариациям параметров, тогда линеаризованное уравнение запишется в виде

$$\delta T_b(\nu) = \sum_{i=1}^N \int_0^{s_0} F'_i(\nu, s) \frac{\delta x_i(s)}{x_m(s)} ds, \quad (3)$$

где индекс m обозначает среднее значение параметра; F' — весовая функция, соответствующая относительным вариациям параметров ($F'(\nu, s) = F(\nu, s)x_m(s)$). Наиболее наглядным для анализа является использование разностных весовых функций, определяемых как разность весовых функций (3) на соседних частотах измерений. Анализ весовых функций позволяет оценить высотный диапазон определения параметра, достигаемое вертикальное разрешение и информативность измерений относительно значений искомого параметра на различных высотах.

Разностные весовые функции для профилей трех параметров — счетной концентрации озона, температуры и давления — представлены на рис. 1, из которого следует, что информация о содержании озона может быть получена для высот ~20–65 км.

Для весовых функций, соответствующих частотам около центра линии, полуширина весовых функций составляет 15–20 км, для функций на частотах в крыле линии примерно 10 км. Таким образом, предварительные оценки вертикального разрешения дают значения около 10 км в стратосфере и 15–20 км в мезосфере.

Отметим, что в тропосфере для различных каналов микроволнового прибора весовые функции монотонны, близки по значению и на рис. 1 не показаны. Для высот «стратосфера–мезосфера» весовые функции в различных каналах существенно отличаются. Весовые функции для профили относительной вариации давления противоположны по знаку весовым функциям для профиля относительной вариации счетной концентрации озона, однако при этом близки к ним по абсолютным значениям и форме.

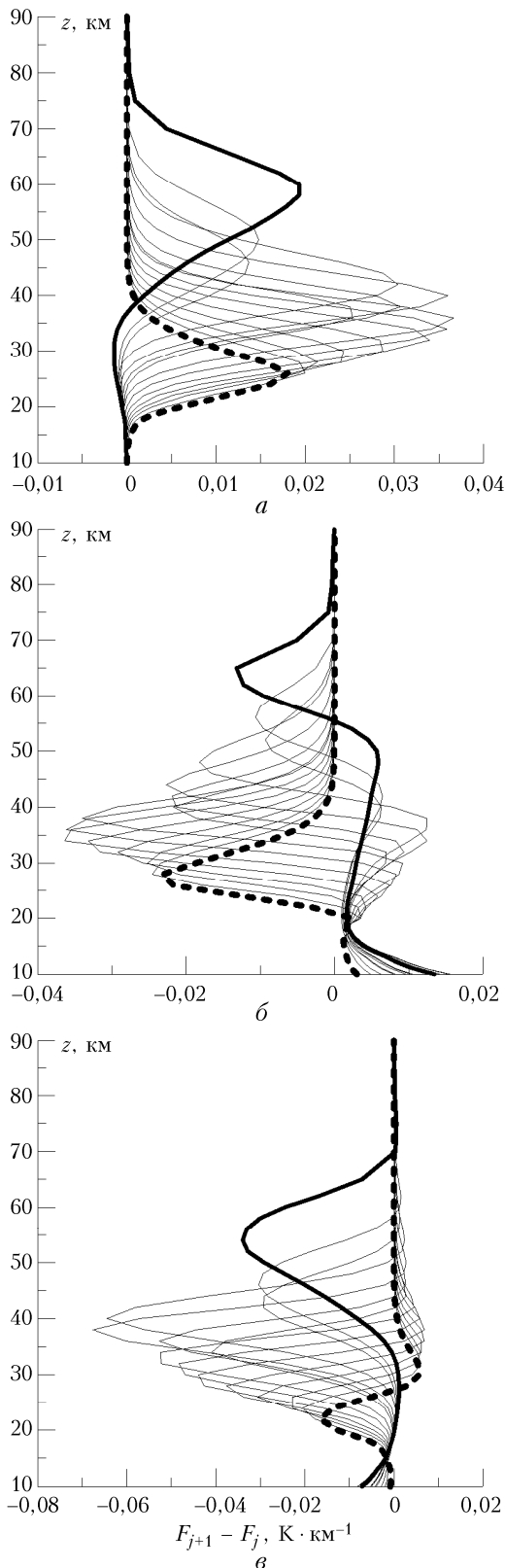


Рис. 1. Разностные весовые функции $F_{j+1} - F_j$ (j – номер спектрального канала) для профиля относительной вариации счетной концентрации озона (a), температуры (b) и давления (c). Модель атмосферы AFGL86, средние широты, лето. Жирная штриховая кривая соответствует значениям в крыле линии, жирная – в центре линии поглощения озона, тонкие линии – промежуточные частоты

Весовые функции для профиля относительной вариации температуры имеют ярко выраженные локальные особенности как в отрицательной, так и в положительной области своих значений. Эти локальные особенности смещены вверх на несколько километров по сравнению с высотами максимумов весовых функций для других параметров (содержание озона, давление). Абсолютные значения весовых функций для профилей относительной вариации температуры и давления по порядку величины сопоставимы с абсолютными значениями весовых функций для профиля относительной вариации счетной концентрации озона. Из этого следует, что, например, 5%-я неопределенность в значениях температуры или давления ухудшит относительную точность определения концентрации озона примерно на 5%, а следовательно, должны предъявляться высокие требования к точности задания значений температуры и давления.

Для перехода к векторно-матричному представлению уравнений введем совокупный вектор вариаций искомых параметров:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x}^+ = & (\delta T(z_1), \delta T(z_2), \dots, \delta T(z_L), \\ & \delta p(z_1), \delta p(z_2), \dots, \delta p(z_L), \\ & \delta q(z_1), \delta q(z_2), \dots, \delta q(z_L), \\ & \delta w(z_1), \delta w(z_2), \dots, \delta w(z_L), \\ & \delta n(z_1), \delta n(z_2), \dots, \delta n(z_L)), \end{aligned} \quad (4)$$

где z – высотные уровни, пронумерованные от 1 до L ; T – температура; p – давление; q – содержание водяного пара; w – водность облака; n – концентрация озона; «+» обозначает транспонирование.

В алгоритм решения обратной задачи необходимо включить всю имеющуюся информацию о параметрах состояния атмосферы (априорную статистическую, результаты измерений, соответствующих времени и месту конкретного сеанса микроволнового зондирования, при наличии таковых), а также о взаимосвязях параметров. Эту информацию (дополнительные условия) формально можно представить в виде набора независимых «обобщенных» измерений. Таким образом, обратная задача формулируется в виде следующей системы векторно-матричных уравнений:

$$\begin{cases} \delta \mathbf{y} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x}, \\ \delta \mathbf{r}_1 = \mathbf{C}_1 \delta \mathbf{x}, \\ \dots \\ \delta \mathbf{r}_M = \mathbf{C}_M \delta \mathbf{x}. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь первое уравнение представляет собой векторно-матричный аналог линейризованного уравнения переноса излучения (2), а последующие M векторно-матричных уравнений описывают в линейризованной форме дополнительные измерения атмосферных параметров или дополнительные условия, накладываемые на них. Вектор $\delta \mathbf{y}$ – это вектор вариаций радиояркостной температуры по отношению к средним значениям, рассчитанным на основе средних профилей атмосферных параметров; \mathbf{A} – линейризованный интегральный оператор «прямой»

задачи, образованный из значений весовых функций с соответствующими квадратурными коэффициентами. Вектор $\delta\mathbf{r}$ — это вектор вариаций результатов «обобщенных» измерений по отношению к их средним значениям; \mathbf{C} — линеаризованный оператор, описывающий обобщенные измерения.

Такой подход к решению обратной задачи (комплексный, с привлечением дополнительных условий различного рода в виде обобщенных измерений) успешно использовался при интерпретации спутниковых измерений уходящего излучения в экспериментах с аппаратурой CRISTA и описан в работе [10], где дано выражение для нахождения решения в итерационном процессе. Следует особо отметить, что одно из дополнительных условий учитывает априорную ковариационную матрицу параметров, что соответствует стандартному методу статистической регуляризации.

Анализ погрешностей решения обратной задачи

Основными факторами, влияющими на погрешность определения профиля содержания озона, являются:

- 1) погрешности спектральных измерений;
- 2) погрешности задания значений контролируемых параметров состояния атмосферы, влияющих на перенос излучения;
- 3) величина тропосферного поглощения (ослабляет «полезный» сигнал, формирующийся в стратосфере и содержащий информацию о профиле озона).

Для исследования степени влияния второго и третьего факторов нами были проведены расчеты матрицы ошибок для нескольких сценариев обработки спектров в линии 110,836 ГГц для двух типичных примеров измерений в летнее и зимнее время, проведенных с помощью микроволновой аппаратуры на физическом факультете СПбГУ. В качестве исходных данных были взяты спектры, зарегистрированные 26.01.2011 (зима, безоблачно) и 25.07.2009 (лето, слоисто-кучевые облака), и данные радиои спутникового зондирования для этих дат и района Санкт-Петербурга. Сценарии, представленные в табл. 1, отличаются объемом дополнительной информации.

Таблица 1

Сценарии расчетов матрицы ошибок

Описание сценария	Сезон	
	Лето	Зима
Стандартный: радиозондовые измерения давления, температуры, влажности; спутниковые измерения температуры; приближение гидростатического равновесия	S1	W1
Стандартный без радиозондовых измерений	S2	W2
Стандартный без спутниковых измерений	S3	W3
Стандартный без учета гидростатического равновесия	S4	W4
Стандартный без всех дополнительных условий	S5	W5

Сценарии S1 и W1 используют максимальный объем информации — радиозондовые измерения давления, температуры, влажности; спутниковые измерения температуры, а также приближение гидростатического равновесия. Другие рассмотренные сценарии обработки наземных МКВ-измерений используют отдельные дополнительные измерения и условия или никакие (сценарии W5 и S5). В проведенных расчетах были взяты следующие значения погрешности радиозондовых измерений: для давления 0,5%, для температуры 2 К, для влажности воздуха 7%, а также данные, полученные на станции радиозондирования Воейково (50 км от места наземных микроволновых измерений) [11].

В качестве спутниковых измерений температуры использовались данные прибора AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), которые находятся в свободном доступе в виде вертикальных профилей среднесуточных значений на координатной сетке с шагом 1° [12]. Погрешность спутниковых данных по температуре принималась равной 2 К. Высотный диапазон радиозондирования и спутникового зондирования составлял 26.01.2011 соответственно 0–24 и 0–44 км, 25.07.2009 — 0–30 и 0–50 км.

Анализ табл. 2, в которой приведены погрешности определения средней концентрации озона в слоях толщиной 8–10 км и общего содержания в диапазоне высот 22–60 км, полученные на основе расчетов матрицы ошибок для различных сценариев, приводит к следующим выводам:

1. Максимальные точности определения содержания озона наблюдаются в безоблачной атмосфере зимой в двух нижних рассматриваемых слоях атмосферы (22–30 и 30–40 км) при использовании максимального объема дополнительных измерений и приближения гидростатического равновесия. Они составляют 7,0 и 5,3%, т.е. достаточно малы по сравнению с априорной неопределенностью, составляющей ~40% (последний столбец табл. 2).

Таблица 2

Погрешности определения средней концентрации озона (в процентах по отношению к априорным значениям) в слоях толщиной 8–10 км и общего содержания в диапазоне высот 22–60 км. Усреднение микроволновых измерений радиояростной температуры в течение 1 ч (36 индивидуальных спектров). σ_a — значение априорной неопределенности средней концентрации озона в процентах по отношению к априорным значениям

Слой, км	Сценарий					σ_a
	W1/S1	W2/S2	W3/S3	W4/S4	W5/S5	
22–30	7,0/13,8	7,7/14,2	8,0/13,9	9,7/14,3	15,2/22,0	42
30–40	5,3/7,3	9,1/10,4	6,0/7,9	12,9/9,7	16,3/21,1	41
40–50	13,1/16,1	14,8/17,8	14,5/16,4	22,8/23,7	23,4/27,9	41
50–60	22,7/27,2	23,0/27,6	23,2/27,5	27,0/29,7	27,4/31,6	41
60–70	26,4/33,6	26,5/33,6	26,7/33,6	29,3/34,4	29,7/35,3	42
22–60	3,5/7,7	5,6/8,9	4,8/8,0	3,5/7,8	9,4/16,7	33

2. С увеличением высоты расположения слоев погрешности возрастают и на высотах 60–70 км при использовании даже максимального объема

информации составляют ~26–34% как в летних, так и в зимних условиях. Сравнения этих значений с априорной неопределенностью в содержании озона демонстрируют относительно низкую информативность прибора для высот 60–70 км.

3. Увеличение влагосодержания тропосферы в летнее время приводит к заметному увеличению погрешностей определения содержания озона, особенно в двух нижних слоях стратосферы. Погрешности увеличиваются в этих слоях с 5–7 до 7–14%. В менее информативных высотных слоях это увеличение незначительно, в связи с тем, что сами погрешности на высотах 50–70 км достаточно велики.

4. С уменьшением объема используемой дополнительной информации наблюдается рост погрешностей определения содержания озона. Этот рост может быть невелик (1–2%), когда исключаются отдельные измерения, которые в определенной степени дублируют измерения другого типа (например, спутниковые измерения температуры по отношению к радиозондовым). Но рост погрешностей может быть и очень велик, если дополнительная информация не используется вовсе. В частности, в этом последнем случае погрешности определения содержания озона в двух нижних слоях атмосферы увеличиваются в 2–3 раза (сравним погрешности для сценариев W1/S1 и W5/S5 в слоях 22–30 и 30–40 км). Это увеличение относительно незначительно в области верхней стратосферы и нижней мезосферы, так как на этих высотах погрешности существенны даже для сценариев W1/S1 и достигают 22–33%.

5. Можно отметить, что исключение радиозондовых измерений оказывает несколько более сильное отрицательное влияние на качество озонного зондирования, чем исключение спутниковых измерений. Это связано с тем, что в рассмотренном исследовании использовалась спутниковая информация только о температуре атмосферы, но не о содержании водяного пара в тропосфере.

6. Учет условия гидростатического равновесия важен вплоть до высоты порядка 60 км. Пренебрежение этим условием приводит, например, к росту погрешностей определения озона в слое 30–40 км в зимнее время с 5,3 до 12,9%, а в слое 40–50 км с 13,1 до 22,8%.

7. Интегральное содержание озона в слое 22–60 км при учете всего доступного дополнительного объема информации может определяться с погрешностью ~3,5% в зимнее время и ~8% в летнее время. Если никакие дополнительные измерения и условия не используются, то погрешности определения интегрального содержания озона в слое 22–60 км существенно возрастают – до 9,4 и 16,7% соответственно.

Сопоставим полученные оценки с погрешностями определения вертикальных профилей озона другими наземными методами и приборами. В работе [4] представлены оценки погрешностей и вертикального разрешения при определении профиля озона по микроволновым измерениям в линии 110 ГГц прибором, разработанным для сети NDSC

(прежнее название NDACC). Величина вертикального разрешения декларировалась как 8–10 км ниже 3 мбар (~40 км) с возрастанием до 17 км на уровне 0,2 мбар (~60 км), что полностью согласуется с результатами настоящей работы – около 10 км в стратосфере и около 15–20 км в мезосфере. Значения полной случайной и полной систематической погрешности, полученные авторами [4], равны соответственно 4–6 и 6–10%. Они меньше, чем значения, приведенные в настоящей статье, что может объясняться разным количеством спектральных каналов и различиями в характеристиках приборов. Для прибора, близкого по характеристикам к используемому на физическом факультете СПбГУ, независимые оценки дают значение погрешности определения профиля озона в диапазоне высот 20–60 км как «не хуже 20%» [7], что соответствует представленным в настоящей статье оценкам.

Для мониторинга газового состава с поверхности Земли широко используются измерения прозрачности атмосферы в ИК-диапазоне с помощью Фурье-спектрометров высокого разрешения, работающих по прямому солнечному излучению. Поэтому представляется интересным сравнить погрешности МКВ- и ИК-методов определения вертикального профиля содержания озона. Детальное исследование ИК-метода представлено в работе [14]. Согласно ей высотный диапазон определения профиля содержания озона ИК-методом составляет 0–40 км, вертикальное разрешение – 5 и 10 км на высотах 10–20 и 20–30 км соответственно. Декларируются следующие величины случайной погрешности определения профиля содержания озона: 4, 13,4 и 1,6% соответственно в слоях 0–10, 12,5–17, 20–30,5 км. Таким образом, сравнение МКВ- и ИК-методов позволяет сделать два основных вывода: 1) высотные диапазоны определения профилей содержания озона наземными МКВ- и ИК-методами смещены друг относительно друга (20–60 и 0–40 км соответственно); 2) в области высот 20–40 км ИК-метод характеризуется существенно меньшими погрешностями, чем МКВ-метод. Тем не менее подчеркнем, что преимуществом МКВ-метода является возможность проводить измерения круглосуточно (вне зависимости от погодных условий), а также зондировать мезосферу.

Пример работы комплексной методики представлен на рис. 2. Показан профиль концентрации озона, полученный из микроволновых измерений 26.01.2011, и для сравнения профиль концентрации озона по данным спутникового микроволнового зондировщика MLS [13]. Эти два профиля согласуются в пределах суммарных погрешностей спутникового и наземного методов. Кроме того, показаны спектры радиояркостной температуры – зарегистрированный и рассчитанный по полученным профилям параметров атмосферы. Смещение спектральной невязки относительно середины «коридора» случайных погрешностей спектральных измерений свидетельствует о наличии корреляций между погрешностями в различных спектральных каналах прибора.

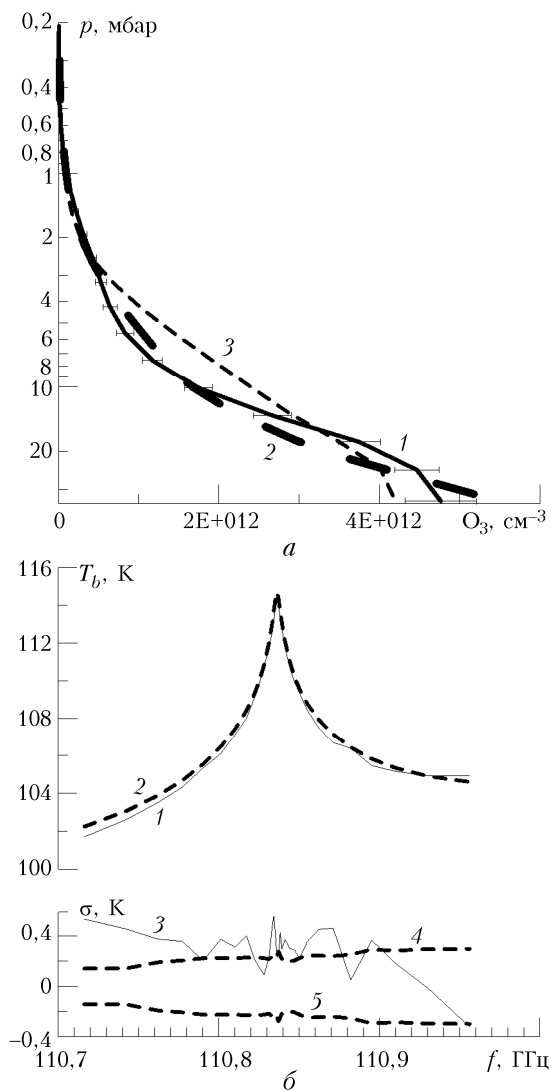


Рис. 2. Содержание озона вблизи Санкт-Петербурга 26.01.2011: *а* – по данным микроволновых (1) и спутниковых измерений MLS (2). Кривая 3 – априорный профиль содержания озона; *б* – вверху исходный спектр (1) и спектр, рассчитанный по восстановленному профилю содержания озона (2); внизу спектральная невязка (3) и «коридор» погрешностей измерений (4, 5)

Заключение

Разработана новая комплексная методика интерпретации наземных измерений нисходящего МКВ-излучения в линиях поглощения озона с целью получения информации о вертикальных профилях содержания озона. Методика основана на статистической регуляризации и использовании дополнительных (доступных) измерений (радиозондовых и спутниковых) различных параметров состояния атмосферы. Преимуществами методики являются: 1) возможность учета информации различного рода о параметрах атмосферы в алгоритме решения обратной задачи; 2) отсутствие жестких требований к наличию и качеству измерений в каналах, используемых при традиционном подходе для оценивания тропосферного ослабления.

Исследованы зависимости погрешностей определения содержания озона в различных слоях атмосферы от объема используемой дополнительной информации в зимних и летних условиях для прибора, изготовленного в ИПФ РАН (Нижний Новгород) и эксплуатирующегося в СПбГУ. Показано, что максимальная точность озонного зондирования может быть реализована при совместном использовании радиозондовых измерений вертикальных профилей температуры, давления и влажности до высоты 25–30 км, спутниковых измерений температуры до высоты 44–50 км и учета условия гидростатического равновесия. При этом погрешности определения содержания озона в стратосфере могут составлять зимой 5–7%, летом 7–14%. В нижней мезосфере погрешности могут достигать ~22–26% зимой и 27–33% летом. Интегральное содержание озона в слое 22–60 км при учете всего доступного дополнительного объема информации может определяться с погрешностями ~3,5% зимой и ~8% летом.

Профили счетной концентрации озона, полученные разработанным методом из микроволновых измерений в СПбГУ, находятся в хорошем согласии с независимыми результатами спутниковых наблюдений (прибор MLS). Метод также был успешно провалидирован на основе использования данных микроволнового радиометра в Бернском университете (Швейцария), работающего в линии 142 ГГц, однако детальное описание соответствующих результатов выходит за рамки настоящей статьи.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (16.740.11.0048 от 31.08.2010) и НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011.

1. Parrish A., Zafra R.L., Solomon P.M., Barrett J.W. A ground-based technique for millimeter wave spectroscopic observations of stratospheric trace constituents // *Radio Sci.* 1988. V. 23, N 2. P. 106–118.
2. Parrish A., Connor B.J., Tsou J.J., McDermid I.S., Chu W.P. Ground-based microwave monitoring of stratospheric ozone // *J. Geophys. Res. D.* 1992. V. 97, N 2. P. 2541–2546.
3. Соболев И.И., Соломонов С.В., Сороченко Р.Л. Миллиметровые волны: новые возможности мониторинга озоносферы // *Вестн. РАН.* 1993. Т. 63, № 8. С. 721–729.
4. Connor B.J., Parrish A., Tsou J.J., McCormick M.P. Error analysis for the ground-based microwave ozone measurements during STOIC // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100, N 5. P. 9283–9291.
5. Интернет-ресурс 1: Network for the Detection of Atmospheric Composition Change. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/> свободный. Загл. с экрана.
6. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б. Исследование вертикального распределения озона в стратосфере и мезосфере на миллиметровых волнах // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2003. Т. 46, № 8–9. С. 764–770.
7. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И. Микроволновое радиометрическое зондирование верхней атмосферы над Нижним Нов-

- городом // Изв. вузов. Радиофиз. 1998. Т. 41, № 11. С. 1405–1418.
8. Тимофеев Ю.М., Косцов В.С., Поберовский А.В., Куликов Ю.Ю., Красильников А.А. Измерения вертикальных профилей содержания озона над Санкт-Петербургом наземной микроволновой аппаратурой // Вестн. СПб. ун-та. Сер. 4. 2008. Вып. 4. С. 44–53.
 9. Dumitru M.C., Hoche K., Kaempfer N., Calisesi Y. Comparison and validation studies related to ground-based microwave observations of ozone in the stratosphere and mesosphere // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68, N 7. P. 745–756.
 10. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Озон в мезосфере по данным спутникового эксперимента CRISTA-1: 1. Метод определения вертикальных профилей и анализ его точности. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2005. Т. 41, № 2. С. 201–214.
 11. Интернет-ресурс 2: University of Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. Weather. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> свободный. Загл. с экрана.
 12. Интернет-ресурс 3: National Aeronautics and Space Administration. Goddard Earth Sciences. Data and Information Services Center. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/homepageAlt.pl?keyword=AIRX3STD> свободный. Загл. с экрана.
 13. Интернет-ресурс 4: National Aeronautics and Space Administration. Goddard Earth Sciences. Data and Information Services Center. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS> свободный. Загл. с экрана.
 14. Schneider M., Hase F., Blumenstock T., Redondas A., Cuevas E. Quality assessment of O₃ profiles measured by a state-of-the-art ground-based FTIR observing system // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 5579–5588.

V.S. Kostsov, A.V. Poberovsky, S.I. Osipov, Yu.M. Timofeyev. Integrated method of interpretation of ground-based microwave spectral measurements in the problem of ozone vertical profile retrieval.

The algorithm for interpretation of ground-based measurements of brightness temperature of down-welling microwave radiation in the absorption lines, which are traditionally used for ozone profile remote sensing, is described. The inverse problem is formulated as a multiparameter one with respect to ozone vertical profile (target parameter), and also vertical profiles of temperature, pressure, water vapor, cloud liquid water (controlled interfering parameters). Such an approach gives the possibility to utilize additional measurements of atmospheric parameters in different altitude regions (if available) in any combination and also to take into account physical links between parameters (for example, hydrostatic equation for temperature and pressure). Error estimates for retrieval of ozone average concentration in the layers 22–30, 30–40, 40–50, and 50–60 km are presented for summer and winter conditions (for different atmospheric total water content) and for different scenarios of interpretation of down-welling microwave radiation measurements in ozone absorption line 110 GHz.