

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

УДК 551.521.32

**ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ПРИБЛИЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИ
ОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЫ В ЗАДАЧЕ СПУТНИКОВОГО
ДИСТАНЦИОННОГО ИК-ЗОНДИРОВАНИЯ МЕЗОСФЕРЫ
НА КАСАТЕЛЬНЫХ ТРАССАХ**

© 2005 г. А. В. Ракитин*, В. С. Косцов

Научно-исследовательский институт физики, Санкт-Петербургский государственный университет

**e-mail: kit@troll.phys.spbu.ru*

Поступила в редакцию 19.11.2004 г.

Проведены расчеты спектров (среднее и высокое разрешение) интенсивности уходящего инфракрасного излучения в полосах поглощения углекислого газа 15 мкм и озона 9.6 мкм на касательных трассах (диапазон прицельных высот 40–90 км) как с учетом горизонтальных градиентов параметров атмосферы, так и с использованием приближения сферически однородной атмосферы (СОА). В области 15 мкм погрешности расчета уходящего излучения в приближении СОА составляют для прицельной высоты 60 км в среднем 1.5%. В области 9.6 мкм в случае пересечения оптической трассой терминатора погрешности достигают 10–14% при значении прицельной высоты 70 км. Абсолютные значения погрешности, обусловленной использованием приближения СОА, сравниваются с погрешностями спектральных измерений современных спутниковых приборов. Показано, что в центре полосы 15 мкм полученные значения погрешности превышают шум детектора прибора CRISTA, но существенно меньше суммарной погрешности спектральных измерений. В центре полосы 9.6 мкм погрешности, обусловленные приближением СОА, при среднем спектральном разрешении составляют около $0.005 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$, что сравнимо по величине с погрешностями спектральных измерений в эксперименте CRISTA. При высоком спектральном разрешении в полосе 9.6 мкм погрешности достигают в центрах линий $0.025 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$. Это значение на порядок меньше величины шума детектора интерферометра MIPAS.

ВВЕДЕНИЕ

При интерпретации данных спутникового зондирования атмосферы на касательных трассах (затменные эксперименты, измерения собственного излучения горизонта планеты), в большинстве случаев используется приближение сферически однородной атмосферы (СОА) [1, 2]. Это позволяет существенно упростить решаемые обратные задачи, что немаловажно, в частности, при создании быстродействующих алгоритмов оперативной обработки измерений. Тем не менее для каждого конкретного спутникового эксперимента необходимо проводить оценки правомерности использования приближения СОА. В настоящее время, в связи с совершенствованием спутниковой аппаратуры в плане повышения точности данный этап исследований становится все более актуальным. В качестве примеров пространственных областей, где наблюдается наибольшая горизонтальная неоднородность параметров атмосферы, укажем в первую очередь район терминатора, а также границы полярного вихря и внутритропической зоны конвергенции.

Важность исследований влияния сферической неоднородности атмосферы на точность расчетов поля излучения в земной атмосфере и на точность

решения задач дистанционного зондирования стратосферы и мезосферы отмечалась неоднократно. Приближенные оценки влияния горизонтальной неоднородности атмосферы на характер углового распределения интенсивности уходящей ИК радиации представлены в монографии [3] (глава 1, см. также ссылки в данной главе). Эти оценки были выполнены на основе использования среднесезонных и среднеширотных стратификаций атмосферы (зависимость от долготы не принималась во внимание) для направлений север-юг. Отмечалось, что если линия визирования проходит выше земного горизонта, то азимутальная зависимость интенсивности ИК-радиации может быть значительной. Например, на участке спектра 10.55–11.01 мкм погрешности расчета ее интенсивности, обусловленные использованием приближения сферически однородной атмосферы, могут достигать 60% (расчеты для высоты 300 км). В работах [4, 5] обсуждались задачи определения NO, ClO и NO₂ с точки зрения проблемы горизонтальной неоднородности. В работе [6] показано, что при определении содержания NO по измерениям прозрачности на высотах менее 20 км погрешность может достигать 100%, если используется приближение СОА. Проблема учета горизонталь-

ных градиентов параметров атмосферы важна как в экспериментах по измерениям прозрачности, так и в экспериментах по измерениям собственного излучения. В работе [7] оценки погрешностей определения содержания NO_2 , обусловленных приближением COA, выполнены для эксперимента LIMS, и показано, что эти погрешности наиболее существенны ниже высоты, соответствующей давлению 10 мбар. Эффект влияния горизонтальных градиентов параметров атмосферы в терминах соответствующих вариации излучения, регистрируемого в эксперименте со спутниковым прибором MIPAS, исследован в работе [8]. Показано, что эти вариации могут достигать 10%, и заметно понижать точность восстановления параметров “традиционным” методом. Приближение COA, как один из источников погрешностей интерпретации измерений излучения на касательных трассах прибором MIPAS, рассматривается в [9].

В настоящее время активно ведутся исследования, направленные на разработку методов учета горизонтальных градиентов в обратных задачах ДЗ. Обобщенный метод оптимального оценивания (optimal estimation – в русскоязычной литературе “метод статистической регуляризации”) предложен в [10]. В нем вектор неизвестных параметров состояния атмосферы описывает двумерное распределение параметров. Приведены примеры использования предложенного метода для обработки измерений прибора MLS. В работе [8] рассматривается возможность использования априорной информации о горизонтальных градиентах в алгоритме обработки данных; в [11] – методика одновременного анализа всей совокупности измерений на орбите спутника, что позволяет восстанавливать двумерное распределение параметров.

В ноябре 1994 и в августе 1997 гг. были проведены два спутниковых эксперимента со спектрометром CRISTA, регистрирующим уходящее ИК-излучение атмосферы в широкой спектральной области. В экспериментах использовалась касательная геометрия наблюдений. Сканирование атмосферы осуществлялось в различных режимах, в частности в режиме, позволяющем получать информацию в высотном диапазоне, охватывающем верхнюю стратосферу, мезосферу и нижнюю термосферу (40–140 км). Подробное описание экспериментов дано в работах [12, 13]. Интерпретация спектров, полученных в эксперименте CRISTA, проводилась различными научными коллективами и различными методами. В Санкт-Петербургском государственном университете для обработки спектров в полосах поглощения CO_2 15 мкм и O_3 9.6 мкм использовался метод одновременного восстановления вертикальных профилей температуры, давления, содержания газов и неравновесной населенности колебательных состояний молекул [14–16]. В этом методе использовалось приближение COA. Одной из задач настоящей работы является исследова-

ние правомерности использования этого приближения при интерпретации данных спектрометра CRISTA, соответствующих режиму наблюдения мезосферы.

Прибор CRISTA характеризуется средним спектральным разрешением, его разрешающая способность составляет около 500 в полосе 15 мкм и около 390 в полосе 9.6 мкм. Второй поставленной в настоящей работе задачей является исследование правомерности использования приближения COA при интерпретации спектров излучения мезосферы, полученных приборами высокого разрешения, такими как MIPAS. Фурье-спектрометр MIPAS, работающий в настоящее время на спутнике ENVISAT, характеризуется спектральным разрешением 0.05 см^{-1} (после аподизации), и в его работе предусмотрен режим сканирования мезосферы, хотя основное время отводится исследованиям стратосферы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для расчетов использовались две модели касательных трасс, соответствующие сферически неоднородной атмосфере (СНА) и сферически однородной атмосфере. В качестве трехмерных полей давления, температуры, содержания углекислого газа и озона были использованы данные, полученные с помощью модели общей циркуляции атмосферы HAMMONIA для ноября месяца (что соответствует времени проведения первого эксперимента с прибором CRISTA) [17]. Модель HAMMONIA создана в Метеорологическом институте Макса Планка (Гамбург, ФРГ) и представляет собой модель общей циркуляции с блоком фотохимии, которая позволяет рассчитывать трехмерные распределения параметров атмосферы в глобальном масштабе для заданного периода времени. Нами использовались данные расчетов в высотном диапазоне 18–162 км с шагом по высоте 3 км и с шагом по времени 3 ч. Касательные трассы в приближении COA формировались на основе касательных трасс СНА. При этом распределения параметров атмосферы по высоте предполагались одинаковыми вне зависимости от широты и долготы и равными вертикальным распределениям в районе прицельной точки трассы СНА.

Расчеты спектров уходящего излучения проводились с использованием метода line-by-line (метод “прямого расчета”). Параметры спектральных линий были взяты из базы данных HITRAN-96. Использовались спектральные аппаратные функции спутниковых приборов CRISTA и MIPAS. Угловая разрешающая способность принималась бесконечно большой, рефракция не учитывалась. Расчеты проводились в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР).

Использование приближения ЛТР при расчетах излучения в поставленной задаче требует обоснования. В средней атмосфере наблюдается эффект нарушения ЛТР для колебательных состояний молекул различных атмосферных газов. В силу ряда процессов (столкновительных, радиационных, химических) распределение населенности колебательных состояний отличается от больцмановского. Значения неравновесной населенности колебательных состояний принято описывать в терминах соответствующих “колебательных температур”, отличия которых от кинетической температуры характеризуют величину эффекта нарушения ЛТР. Для состояний молекул CO_2 , которые формируют 15 мкм полосу, эффект нарушения ЛТР проявляется примерно с 70–90 км в зависимости от перехода и изотопа. Для высокоэнергетических состояний молекул озона эффект нарушения ЛТР может быть существенным в дневное время, уже начиная с высот 30–40 км. Спектральная структура неравновесного уходящего излучения в полосах углекислого газа 15 мкм и озона 9.6 мкм подробно анализировалась в работах [18.19]. Необходимо подчеркнуть, что вариации излучения, обусловленные эффектом нарушения ЛТР, могут быть очень большими. Например, в области горячих переходов полосы озона 9.6 мкм они могут составлять несколько порядков величины. Тем не менее в настоящей работе мы можем пренебречь эффектом нарушения ЛТР в силу следующих причин:

1) мы анализируем не сами значения излучения, а его вариации за счет использования приближения СОА;

2) в полосе CO_2 15 мкм колебательные температуры, описывающие неравновесную населенность колебательных состояний, не имеют суточного хода, а их вариации сопоставимы с вариациями кинетической температуры. Поэтому при анализе влияния горизонтальных градиентов кинетической температуры косвенно оценивается и величина влияния градиентов колебательных температур.

3) в полосе озона 9.6 мкм неравновесные населенности колебательных состояний испытывают сильные суточные вариации. Поэтому в случае прохождения оптической трассы через область терминатора, величина эффекта нарушения ЛТР в этой полосе имеет существенные горизонтальные градиенты. Однако, во-первых, мы рассматриваем спектральную область, где излучение формируется в основном за счет фундаментального перехода, для которого эффект нарушения ЛТР незначителен. Во-вторых, играет роль следующее обстоятельство. В ночное время содержание озона в мезосфере в несколько раз превышает дневное. А населенности колебательных состояний, напротив, в ночное время существенно меньше, чем днем. Эти эффекты влияют на уходящее излучение противо-

положным образом. Поэтому, пренебрегая эффектом нарушения ЛТР при расчетах в полосе 9.6 мкм, мы не занижаем относительные оценки влияния горизонтальных градиентов.

Подчеркнем, что при использованном в настоящей работе подходе к оценкам влияния сферической неоднородности эффект нарушения ЛТР безусловно необходимо было бы учитывать, например, для “лазерных” полос CO_2 в области 10 мкм. Населенности верхних состояний лазерных переходов испытывают значительные вариации в зависимости от зенитного угла солнца, и эти вариации не компенсируются вариациями содержания CO_2 в отличие от рассмотренного выше случая нарушения ЛТР в полосе озона 9.6 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчеты в полосе CO_2 15 мкм проводились в спектральном интервале $660\text{--}675\text{ см}^{-1}$ с использованием только спектральной аппаратной функции прибора CRISTA, поскольку измерения MIPAS не включают центр полосы. Рассматривались различные касательные трассы в дневное время в экваториальной области и в средних широтах. Трассы строились в соответствии с параметрами орбиты космической платформы прибора CRISTA (наклонение 57°). Для расчетов было выбрано несколько трасс с наибольшими значениями отличий между распределениями параметров атмосферы, соответствующими моделям США и СОА. В качестве иллюстрации горизонтальных градиентов параметров атмосферы на рис. 1 приведены отличия в распределении температуры для трасс США и СОА в районе экватора при значениях прицельной высоты 40 км и 60 км. (Здесь и ниже мы не указываем точные значения широты, долготы и даты, поскольку в решаемой задаче эта информация не имеет принципиального значения.) Для прицельной высоты 40 км эти отличия малы на участке трассы 600–1400 км (полная длина трассы 2040 км). Для прицельной высоты 60 км отличия малы на участке 750–1050 км при полной длине трассы 1760 км. На начальном и конечном участках трасс отличия резко возрастают и имеют знакопеременный характер. По абсолютной величине разность температур, соответствующих трассам США и СОА, может достигать несколько десятков градусов. Так, в приведенном примере максимальная разность температур составляет более 70 К по абсолютной величине на конечном участке трассы с прицельной высотой 40 км. Распределение отличий в значениях давления и счетной концентрации CO_2 вдоль трасс аналогично распределению для температуры. В рассмотренных нами случаях максимальные абсолютные величины этих отличий составляли: 11–16% для давления и 35–50% для счетной концентрации CO_2 .

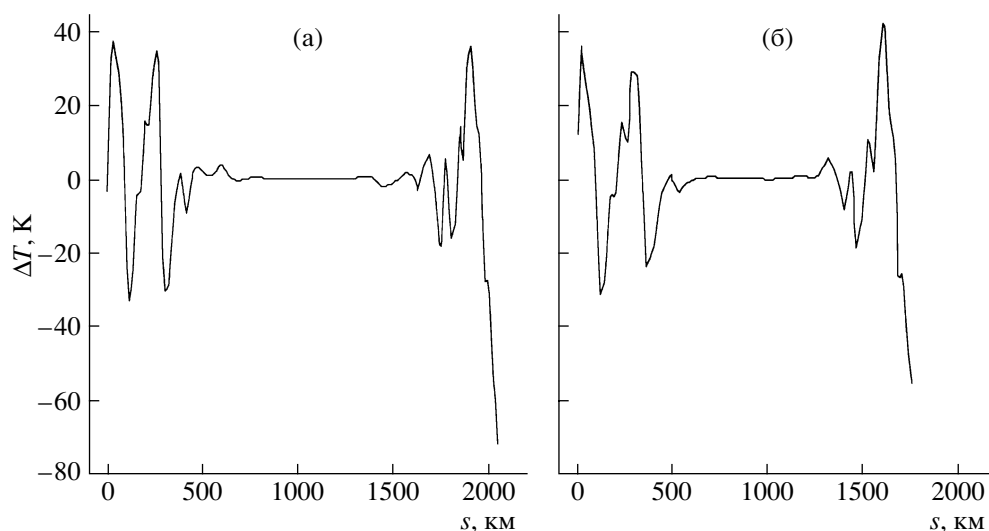


Рис. 1. Отличия в распределении температуры (ΔT) для трасс, соответствующих моделям США и СОА, в районе экватора при значениях прицельной высоты 40 км – а и 60 км – б; S – координата вдоль трассы.

На рис. 2 показаны относительные погрешности расчета уходящего излучения в спектральном интервале $660\text{--}675\text{ см}^{-1}$ (разрешение прибора CRISTA), обусловленные использованием приближения СОА, для случая трассы в районе экватора.

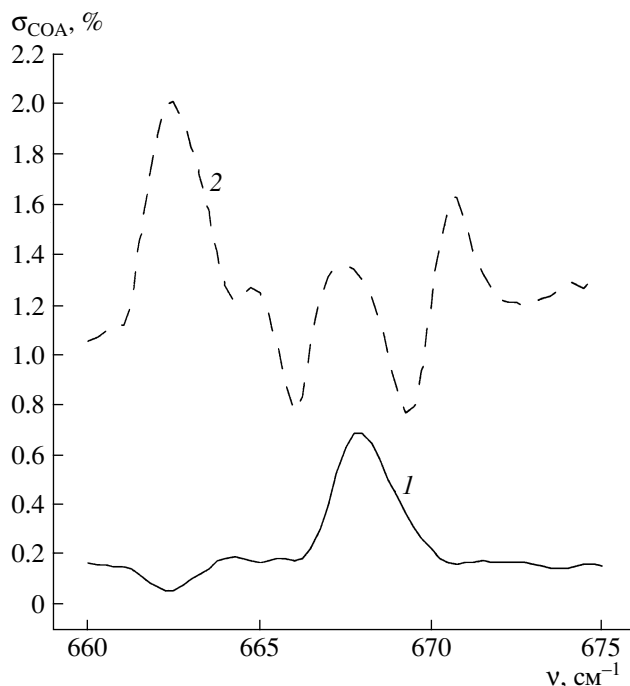


Рис. 2. Относительные погрешности (σ_{COA}) расчета уходящего излучения в спектральном интервале $660\text{--}675\text{ см}^{-1}$ (разрешение прибора CRISTA), обусловленные использованием приближения СОА, для случая трассы в районе экватора. Прицельные высоты 40 км – 1 и 60 км – 2.

Для прицельной высоты 40 км погрешности имеют выраженный максимум 0.7% около 668 см^{-1} , на других частотах они составляют $0\text{--}0.2\%$. Для прицельной высоты 60 км характерно наличие нескольких локальных максимумов, где относительная погрешность достигает $1.5\text{--}2\%$. Для трасс в умеренных широтах характерны меньшие значения погрешностей, обусловленные приближением СОА. Это объясняется, в частности, тем, что вследствие наклона орбиты космической платформы, на которой работал спектрометр CRISTA, диапазон изменения широты вдоль касательных трасс максимален в экваториальной области, а геофизические параметры меняются с изменением широты сильнее, чем с изменением долготы.

Сравнение абсолютных погрешностей расчета излучения, обусловленных использованием приближения СОА, с погрешностями спектральных измерений в эксперименте CRISTA показывает следующее. Случайный шум детектора характеризовался величиной $0.005\text{ мВт}/(\text{м}^2\text{ ср см}^{-1})$, которая существенно меньше, чем погрешности, обусловленные приближением СОА: от 0.01 до $0.5\text{ мВт}/(\text{м}^2\text{ ср см}^{-1})$ на прицельной высоте 40 км и от 0.1 до $0.25\text{ мВт}/(\text{м}^2\text{ ср см}^{-1})$ на прицельной высоте 60 км. Однако согласно оценкам, сделанным при интерпретации измерений CRISTA [14–16], средняя по спектру полная погрешность измерений (которая учитывает многие факторы) составляет $0.4\text{ мВт}/(\text{м}^2\text{ ср см}^{-1})$ на высоте 40 км и $0.15\text{ мВт}/(\text{м}^2\text{ ср см}^{-1})$ на высоте 60 км. Эти величины больше, чем усредненная по спектру погрешность за счет приближения СОА. Таким образом, можно утверждать, что приближение СОА при обработке спектров CRISTA в полосе 15 мкм является вполне обоснованным.

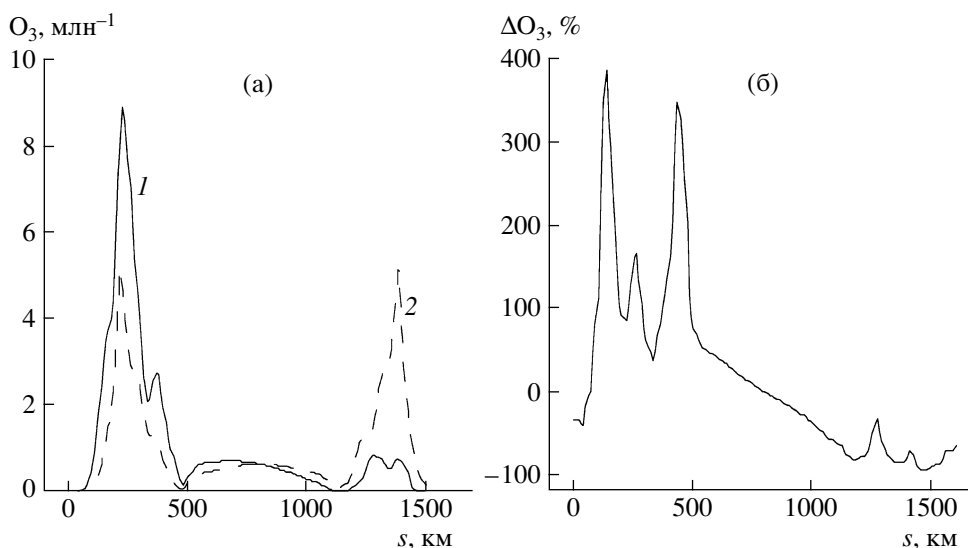


Рис. 3. Распределение отношения смеси O_3 по касательной трассе в районе терминатора с прицельной высотой 70 км для моделей CHA (1) и COA (2) – а, соответствующие относительные отличия ΔO_3 – б; s – координата вдоль трассы.

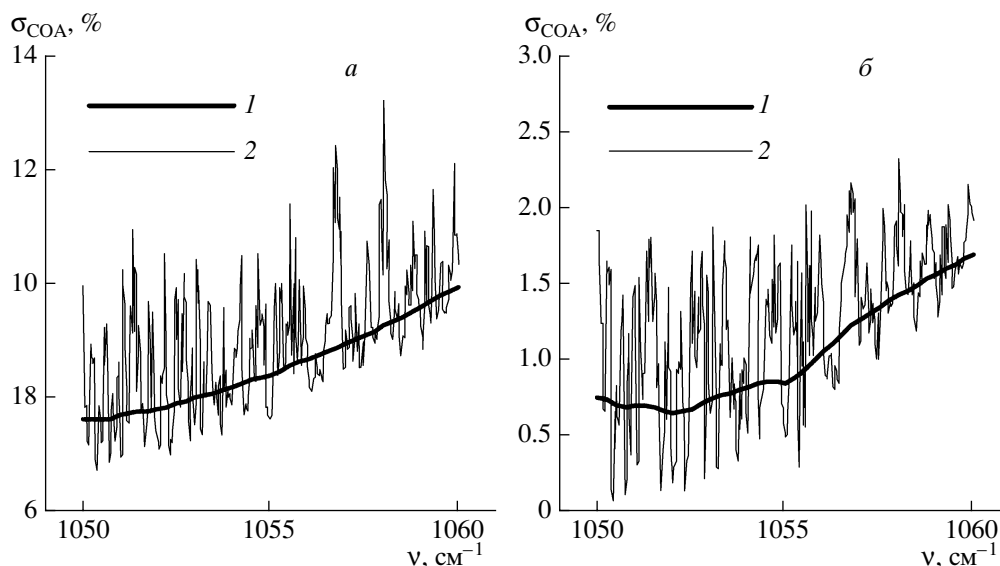


Рис. 4. Относительные погрешности (σ_{COA}) расчета уходящего излучения в интервале $1050\text{--}1060\text{ см}^{-1}$ (спектральное разрешение: CRISTA – 1 и MIPAS – 2, обусловленные использованием приближения COA, для трассы в области терминатора на экваторе. Прицельные высоты: а – 70 км; б – 90 км.

Учитывая значительные суточные вариации содержания озона, для получения максимальных оценок влияния горизонтальных градиентов была выбрана трасса в экваториальной области в районе терминатора. Расчеты производились для прицельных высот 70 км и 90 км. На начальном и конечном участках трасс отличия распределений температуры и давления, соответствующих случаям COA и CHA, достигали 50 К и 11% соответственно. Область малых различий в распределениях температуры и давления составляет ± 200 км от прицельной высоты 70 км (при полной длине

трассы 1600 км) и отсутствует для прицельной высоты 90 км. Распределения содержания озона, соответствующие моделям CHA и COA, отличаются по всей длине как трассы с прицельной высотой 70 км, так и трассы с прицельной высотой 90 км. Эти отличия, а также сами значения содержания озона в точках трассы, соответствующие моделям CHA и COA, представлены на рис. 3 (прицельная высота 70 км). Симметричное распределение значений содержания озона по трассе в приближении COA соответствует вертикальному профилю в области прицельной точки. Мо-

Погрешности ($\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$) расчета излучения в приближении СОА (σ_1) и погрешности спектральных измерений (σ_2 – шум детектора, σ_3 – полная) в экспериментах CRISTA и MIPAS в спектральной области 9.6 мкм

Прицельная высота, км	CRISTA			MIPAS	
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2
70	0.005	0.005	0.006	0.025	0.24
90	10^{-4}		0.006	3×10^{-4}	

дель США отражает зависимость содержания озона от зенитного угла Солнца, и соответствующее распределение является резко несимметричным (начальный участок трассы находится на ночной стороне, конечный – на дневной). Как следствие, на отдельных участках трасс приближение СОА дает погрешности в значениях содержания озона, которые превышают 300%.

На рис. 4 показаны относительные погрешности расчета излучения, обусловленные приближением СОА, в диапазоне 1050–1060 см^{-1} . Расчеты производились при среднем (CRISTA) и высоком (MIPAS) спектральном разрешении для трасс с прицельными высотами 70 км и 90 км. Для спектрометра CRISTA погрешности составляют 8–10% и 0.6–1.6% соответственно для этих двух трасс. При высоком спектральном разрешении в центрах линий погрешности могут достигать 13% (прицельная высота 70 км) и 2.2% (прицельная высота 90 км). Сравнение абсолютных значений погрешности, обусловленной приближением СОА, с величинами погрешностей спектральных измерений в экспериментах CRISTA и MIPAS дано в табл. 1. Прежде всего отметим, что для интерферометра MIPAS величина шума детектора составляет 0.24 $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$ [20] и на порядок превышает погрешность расчета излучения, обусловленную приближением СОА. Для спектрометра CRISTA погрешности спектральных измерений и погрешности за счет приближения СОА близки по величине и составляют 0.006 и 0.005 $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$ соответственно. На прицельной высоте 90 км погрешности за счет приближения СОА составляют около 10^{-4} $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$, что на несколько порядков меньше величины погрешностей спектральных измерений как прибора CRISTA, так и прибора MIPAS.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Выполнены оценки погрешностей расчета уходящего излучения (касательные трассы, диапазон прицельных высот 40–90 км), обусловленных приближением сферически однородной атмосферы. Проведено сравнение полученных величин с погрешностями спектральных измерений спутниковых приборов CRISTA и MIPAS. При расчете рас-

пределений параметров вдоль касательных трасс с учетом горизонтальных градиентов использовались данные трехмерного численного моделирования. В 15 мкм полосе CO_2 погрешности расчета излучения, обусловленные приближением СОА, меньше погрешности спектральных измерений прибора CRISTA. В 9.6 мкм полосе озона оценка погрешностей за счет приближения СОА сравнима по величине со значениями погрешности спектральных измерений, однако не превышает ее. Для прибора MIPAS в полосе 9.6 мкм погрешности спектральных измерений на порядок больше, чем погрешности, обусловленные использованием приближения СОА. Таким образом, приближение СОА является правомерным при интерпретации данных экспериментов CRISTA в 15 мкм полосе CO_2 и MIPAS в 9.6 мкм полосе O_3 . В центре полосы 9.6 мкм погрешности, обусловленные приближением СОА, сравнимы с величиной погрешностей спектральных измерений в эксперименте CRISTA.

Результаты работы получены в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). На повестке дня стоит задача исследования влияния горизонтальных градиентов неравновесных населенностей состояний “лазерных” переходов на величину уходящего излучения, в частности, в спектральных областях “горячих” переходов полосы озона 9.6 мкм и лазерных переходов молекул CO_2 10 мкм, для которых эффект нарушения ЛТР существенен, и соответствующие населенности колебательных состояний испытывают значительные суточные вариации.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 03-05-64830 и при поддержке Министерства образования России в рамках гранта ур.01.01.044 научной программы “Университеты России”. Авторы выражают благодарность Хауке Шмидту (Hauke Schmidt) за предоставленные результаты численного моделирования глобальных полей атмосферных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978, 280 с.
2. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1983, 192 с.
3. Кондратьев К.Я., Авасте О.А., Федорова М.П., Якушевская К.Е. Поле излучения Земли как планеты. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 314 с.
4. Boughner R., Larsen J.C., Natarajan M. The influence on NO and ClO variations at twilight on the interpretation of solar occultation measurements // Geophys. Res. Lett., 1980. V. 7. P. 231.

5. Kerr J.B., Evans W.F.J. and McConnell J.C. The effects of NO₂ changes at twilight on tangent ray NO₂ measurements // *Geophys. Res. Lett.* 1977. V. 4. P. 577.
6. Roscoe H.K. and Pyle J.A. Measurements of Solar Occultation: the Error in a Naive Retrieval if the Constituent's Concentration Changes // *J. of Atm. Chem.* 1987. № 5. P. 323–341.
7. Solomon S., Russell J.M. III, Gordley L.L. Observations of the Diurnal Variation of Nitrogen Dioxide in the Stratosphere // *J. Geophys. Res.*, 1986. V. 91. № D5. P. 5455–5464.
8. Kemnitzer H., Hilgers S., Schwarz G. Trace gas retrieval including horizontal gradients // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29. № 11. P. 1631–1636.
9. Stiller G.P., von Clarmann T., Funke B., Glatthor N., Hase F., Hopfner M., Linden A. Sensitivity of trace gas abundances retrievals from infrared limb emission spectra to simplifying approximations in radiative transfer modelling // *J. Quant. Spectr. & Rad. Trans.* 2001. № 72. P. 249–280.
10. Livesey N.J. and Read W.G., Direct Retrieval of Line-of-Sight Atmospheric Structure from Limb Sounding Observations // *Geophys. Res. Lett.*, 2000, V. 27, № 6. P. 891–894.
11. Carlotti M., Dinelli B.M., Raspollini P. and Ridolfi M. Geo-fit approach to the analysis of limb-scanning satellite measurements // *Applied Optics*, 2001, V. 40. № 12. P. 1872–1885.
12. Offermann D., Grossmann K.U., Barthol P., Knieling P., Riese M. and Trant R. The Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere (CRISTA) experiment and middle atmosphere variability // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D13. P. 16311–16325.
13. Riese M., Spang R., Preusse P., Ern M., Jarisch M., Offermann D. and Grossmann K. Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere (CRISTA) data processing and atmospheric temperature and trace gas retrieval // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D13. P. 16349–16367.
14. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO₂: 1. Описание метода и анализ точности // *Физика атмосферы и океана*. 2001. Т. 37. № 6. С. 789–800.
15. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М., Гроссманн К., Кауфманн М., Оберхайде Й. Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO₂: 2. Примеры обработки данных эксперимента CRISTA // *Физика атмосферы и океана*, 2001. Т. 37. № 6. С. 801–810.
16. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Содержание углекислого газа в мезосфере по результатам интерпретации данных эксперимента CRISTA-1 // *Физика атмосферы и океана*, Т. 39. № 3. 2003. С. 359–370.
17. Schmidt H. Private communication. 2004.
18. Косцов В.С., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. и др. Спектральная структура неравновесного уходящего излучения горизонта в полосе поглощения CO₂ 15 мкм // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. № 3. С. 283–293.
19. Косцов В.С., Мануйлова Р.О. Спектральная структура неравновесного излучения лимба Земли в полосе озона 9.6 мкм // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 33. № 4. С. 339–347. 1997.
20. Von Clarmann T., Glatthor N., Grabowski N. et al Retrieval of temperature and tangent altitude pointing from limb emission spectra recorded from space by the MIPAS // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D23. P. 9-1–9-15.

Assumption of the Spherically Homogeneous Atmosphere in the Problem of the Satellite IR Remote Sensing of the Mesosphere Using Limb Geometry

A. V. Rakitin, V. S. Kostsov

Research Institute of Physics, St. Petersburg State University

Limb infrared medium- and high-resolution spectra in the CO₂ 15 μm and O₃ 9.6 μm bands have been calculated for tangent altitudes 40–90 km accounting for horizontal gradients of atmospheric parameters and also under the assumption of the spherically homogeneous atmosphere (SHA). In the 15 μm region for tangent altitude 60 km, the errors, stipulated by the SHA assumption, are about 1.5%. In the 9.6 μm region for tangent altitude 70 km and optical path crossing the terminator, the errors reach 10–14%. The absolute values of the errors, caused by the SHA assumption, have been compared to the errors of spectral measurements by modern satellite instruments. In the center of the 15 μm band, the obtained error values exceed the detector noise of the CRISTA instrument, but are considerably lower than the total measurement error value. In the center of the 9.6 μm band for medium spectral resolution, the errors, caused by the SHA assumption, constitute about 0.005 mW/(m² sr cm⁻¹) which is comparable to the total error of the CRISTA spectral measurements. For high spectral resolution calculations in the 9.6 μm region, the errors reach 0.025 mW/(m² sr cm⁻¹) in the line centers. This value is one order of magnitude less than the detector noise of the MIPAS instrument.