

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

УДК 551.521.32

**ПОГРЕШНОСТИ ПРИБЛИЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИ ОДНОРОДНОЙ  
АТМОСФЕРЫ В ЗАДАЧЕ РАСЧЕТА УХОДЯЩЕГО НЕРАВНОВЕСНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛОСЕ ОЗОНА 9.6 мкм НА КАСАТЕЛЬНЫХ  
ТРАССАХ В МЕЗОСФЕРЕ**

© 2006 г. В. С. Косцов\*, А. В. Ракитин

*Научно-исследовательский институт физики, Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург*

\* Тел.: (812)428-43-47; e-mail: vlad@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 27.03.2006 г.

По данным эксперимента CRISTA построены модели переноса неравновесного излучения в полосе поглощения озона 9.6 мкм с учетом горизонтальных градиентов атмосферных параметров, включая значения неравновесной населенности нижних колебательных состояний молекул озона и состояния 00 011 молекул углекислого газа. Проведены расчеты спектров уходящего неравновесного излучения в полосе 9.6 мкм для находящихся в районе терминатора касательных трасс с прицельными высотами 70–90 км. В относительном выражении максимальные погрешности расчета излучения, обусловленные приближением сферически однородной атмосферы, наблюдаются в центре полосы озона и составляют на прицельных высотах 70, 80 и 90 км соответственно 10%, 20% и 10% от значений интенсивности излучения. Эти погрешности на прицельной высоте 90 км малы по сравнению с полной погрешностью спектральных измерений аппаратурой CRISTA. На прицельных высотах 70 км и 80 км они сопоставимы по величине в центре полосы озона.

**ВВЕДЕНИЕ**

Важным этапом решения задач дистанционного зондирования атмосферы является оценка точности используемой модели переноса излучения. При касательной геометрии спутниковых наблюдений в моделях переноса излучения традиционно используется приближение сферически однородной атмосферы (СОА). Если горизонтальные градиенты оптически активных параметров атмосферы велики, это приближение может характеризоваться существенными погрешностями, например, при определении содержания газов с малым фотохимическим временем жизни (NO, ClO и NO<sub>2</sub> в стратосфере и озона в мезосфере) “затменным” методом (спутниковые измерения прозрачности атмосферы на восходе и заходе Солнца) [1–5]. Содержание NO, ClO и NO<sub>2</sub> в стратосфере и озона выше примерно 55 км испытывает значительные суточные вариации, и, как следствие, распределение содержания этих газов вдоль оптической трассы, находящейся в области терминатора, является несимметричным относительно прицельной точки. Пренебрежение горизонтальными градиентами концентрации двуокиси азота и мезосферного озона может приводить к погрешностям определения их общего содержания вдоль трассы распространения излучения, достигающим в максимуме 20% [5, 6].

Погрешности, обусловленные приближением сферически однородной атмосферы, необходимо

оценивать не только при использовании “затменного” метода, а также и при измерениях собственного инфракрасного (ИК) излучения на касательных трассах в различное время суток [7, 8]. В работе [8] оценивались погрешности расчета уходящего излучения (касательные трассы, диапазон прицельных высот 40–90 км, полосы поглощения CO<sub>2</sub> 15 мкм и O<sub>3</sub> 9.6 мкм), обусловленные приближением СОА. Было проведено сравнение полученных величин с погрешностями измерений для спутниковых приборов среднего и высокого спектрального разрешения (CRISTA и MIPAS). Известно, что в средней атмосфере имеет место эффект нарушения локального термодинамического равновесия (ЛТР) для колебательных состояний молекул различных атмосферных газов (распределение населенности колебательных состояний отличается от больцмановского). Следовательно, при решении задачи переноса неравновесного излучения в сферически неоднородной атмосфере (СНА) необходимо помимо градиентов температуры, давления и газового состава учитывать также и градиенты населенности колебательных состояний. Расчеты излучения в работе [8] проводились в приближении ЛТР, что не позволило проанализировать спектральные области “горячих” переходов озона и “лазерного” перехода CO<sub>2</sub>, где эффект нарушения ЛТР проявляется максимально.

Подробный анализ особенностей формирования уходящего излучения в полосе озона 9.6 мкм в условиях нарушения ЛТР проводился в работе [9], однако в приближении сферической однородности атмосферы.

Цель настоящей работы – расчет и анализ спектров уходящего излучения на касательных трассах в сферически неоднородной атмосфере в спектральной области 9.6 мкм с учетом горизонтальных градиентов населенности колебательных состояний молекул озона и углекислого газа.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВДОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ ТРАСС В УСЛОВИЯХ НАРУШЕНИЯ ЛТР ДЛЯ СФЕРИЧЕСКИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Для расчетов неравновесного уходящего излучения должны быть заданы распределения параметров атмосферы (температура, давление, концентрация газов, оптически активных в рассматриваемом спектральном диапазоне) и значений населенности колебательных состояний молекул, для которых имеет место эффект нарушения ЛТР, вдоль оптических трасс. Для получения максимально точных результатов необходимо, чтобы эти распределения были согласованы между собой и соответствовали выбранному времени года/суток и географическому району. Современные химико-климатические модели, обладая высоким пространственным и временным разрешением, позволяют получать распределения атмосферных параметров в реальной, сферически несимметричной атмосфере. В работе [8] при построении оптических трасс были использованы глобальные поля атмосферных параметров, рассчитанные с помощью трехмерной модели общей циркуляции атмосферы HAMMONIA, разработанной в Институте метеорологии Макса Планка (Гамбург, ФРГ) [10]. Подчеркнем, что верхняя граница диапазона высот в этой модели 250 км. Однако поскольку в моделях такого типа отсутствуют данные о значениях неравновесной населенности колебательных состояний молекул, использование получаемых результатов для расчета спектров неравновесного излучения требует дополнительного привлечения специализированных моделей процессов формирования неравновесной населенности колебательных состояний молекул атмосферных газов. В настоящей работе был использован другой подход. При построении распределений параметров вдоль оптических трасс нами были взяты за основу экспериментальные данные о глобальных полях параметров атмосферы, полученные в результате интерпретации результатов эксперимента CRISTA [11–15].

В ноябре 1994 г. и в августе 1997 г. были проведены два этапа космического эксперимента с

прибором CRISTA, в ходе которых регистрировались спектры ИК-излучения атмосферы на касательных трассах в широком диапазоне прицельных высот (вплоть до нижней термосферы) [16]. Интерпретация спектров проводилась научными коллективами Вуппертальского университета (ФРГ) [17] и Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) [11–15], которые использовали независимые и принципиально различные методы определения атмосферных параметров. Метод СПбГУ применялся для обработки измерений уходящего неравновесного излучения атмосферы на касательных трассах в спектральных областях около 10 и 15 мкм, и по данным эксперимента CRISTA-1 были получены в квазиглобальном масштабе (широтный охват 55° S–65° N) вертикальные профили температуры (40–120 км), давления (40–120 км), содержания углекислого газа (65–90 км) и содержания озона (40–90 км) [11–15]. Наряду с указанными параметрами были получены вертикальные профили колебательных температур состояния 01101 молекул углекислого газа четырех изотопических разновидностей: 626, 636, 628 и 627 (до высот 120, 110, 105 и 95 км соответственно), профили колебательных температур нижних колебательных состояний молекул озона (до 90 км), а также профили колебательной температуры состояния 00011 молекул углекислого газа (до 90 км) [18]. Эти результаты использовались в настоящей работе для моделирования оптических трасс в сферически несимметричной атмосфере.

Как и в работе [8], для расчетов использовались модели касательных трасс, соответствующие США и СОА. Трассы строились в соответствии с параметрами орбиты космической платформы прибора CRISTA и в соответствии с ориентацией оптической системы. Распределения параметров для трасс США получены путем интерполяции значений этих параметров, соответствующих трем последовательным измерительным сканам (в дальнейшем будем использовать для них обозначения “центральный” и два “боковых”). Центральный скан соответствует географической точке в области терминатора, для которой производится расчет. Для трасс СОА распределения параметров были основаны, естественно, только на результатах, соответствующих “центральному” скану (другими словами, высотные распределения параметров для боковых сканов предполагались равными распределениям для центрального).

Экспериментальные данные, по которым строились распределения параметров вдоль оптических трасс, содержат погрешности, в том числе и обусловленные использованием приближения СОА. Важным этапом исследований было сопоставление распределений, построенных по экспериментальным данным, с аналогичными распре-

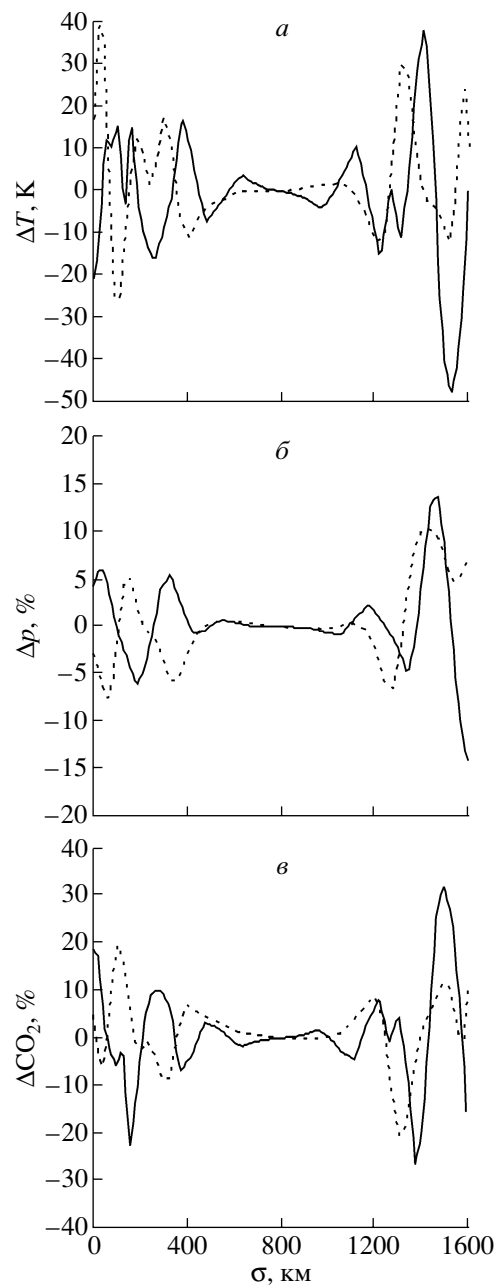
делениями, рассчитанными по модельным данным (модель HAMMONIA, расчеты для ноября месяца, что соответствует сезону проведения эксперимента CRISTA-1). Подчеркнем, что модель дает типичные для рассматриваемого сезона реализации параметров атмосферы, а не конкретные, имевшие место при проведении эксперимента, поэтому для трасс, построенных по данным CRISTA и по модели HAMMONIA, сравнивались разности между распределениями параметров атмосферы, соответствующими случаям COA и CHA:

$$\Delta x(s) = x_{\text{CHA}}(s) - x_{\text{COA}}(s),$$

где  $x$  – рассматриваемый параметр;  $s$  – координата вдоль трассы.

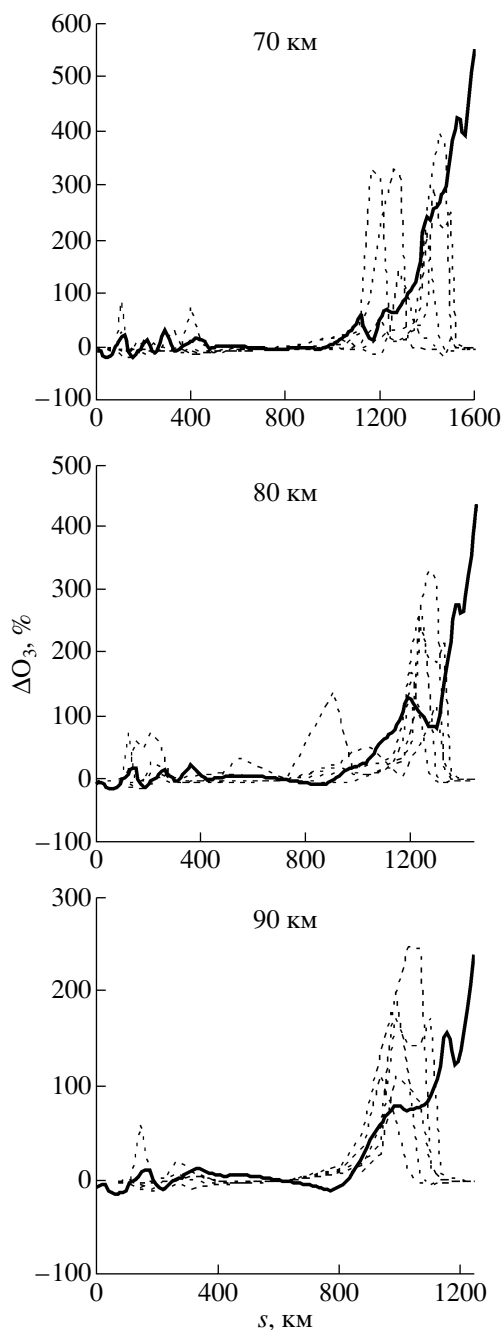
Рисунок 1 демонстрирует результаты сравнения для трех параметров: температуры, давления и концентрации углекислого газа. Характер поведения  $\Delta x(s)$  одинаков для трасс, построенных по экспериментальным и модельным данным: в прицельной точке значения  $\Delta x(s)$  малы, на начальном и конечном участках трасс значения резко возрастают и имеют знакопеременный характер. Абсолютные значения  $\Delta x(s)$  для соответствующих параметров и координат по трассе практически одинаковы. В максимуме  $\Delta T$  достигает 40 К (CRISTA) и 50 К (HAMMONIA).  $\Delta p$  соответственно 10% и 13%,  $\Delta \text{CO}_2$  – 20% и 30%.

На рис. 2 приведены результаты сравнения распределений содержания озона на трассах с прицельными высотами 70, 80 и 90 км, расположенных в районе терминатора в средних широтах ( $50^\circ$ – $60^\circ$  с.ш.). Для каждой прицельной высоты показаны результаты для пяти трасс, построенных по экспериментальным данным, и для одной трассы, построенной по модельным данным. На “дневном” (левом) участке трасс  $\Delta \text{O}_3$  малы (меньше 100%). На “ночном” (правом) участке трасс  $\Delta \text{O}_3$  существенно больше (сотни процентов). Координаты  $s$ , при которых начинается увеличение  $\Delta \text{O}_3$ , одинаковы для экспериментальных и модельных данных. Однако экспериментальные значения  $\Delta \text{O}_3$  заметно (в 2 и более раз) превышают модельные в области, близкой к середине ночного участка ( $s \approx 1200, 1250$  и  $1000$  км на прицельных высотах 70, 80 и 90 км соответственно). Принципиальные расхождения между экспериментальными и модельными данными имеют место на конечных отрезках трасс (в ночной области). Значения  $\Delta \text{O}_3$ , соответствующие экспериментальным данным стремятся к нулю, в то время как модель HAMMONIA демонстрирует увеличение значений  $\Delta \text{O}_3$ , которые в конечной точке трассы максимальны. Описанный факт имеет простое объяснение. В эксперименте CRISTA восстановление содержания озона с приемлемой точностью осуществляется до высоты 90 км, а в вышележащих слоях восстановленные профи-



**Рис. 1.** Разность  $\Delta x$  между распределениями атмосферных параметров, соответствующими моделям CHA и COA: температура (а), давление (б), концентрация углекислого газа (в);  $s$  – координата вдоль оптической трассы. Прицельная высота 70 км, географический район – экваториальная область. Сплошные линии – данные модели HAMMONIA, пунктир – данные эксперимента CRISTA.

ли стремятся к априорно заданным. На высоте 120 км, соответствующей начальной и конечной точке трассы, значения содержания озона близки к априорным во всех случаях. Этим объясняется стремление значений  $\Delta \text{O}_3$  к нулю на начальном и конечном участках трасс. Тем не менее вслед-



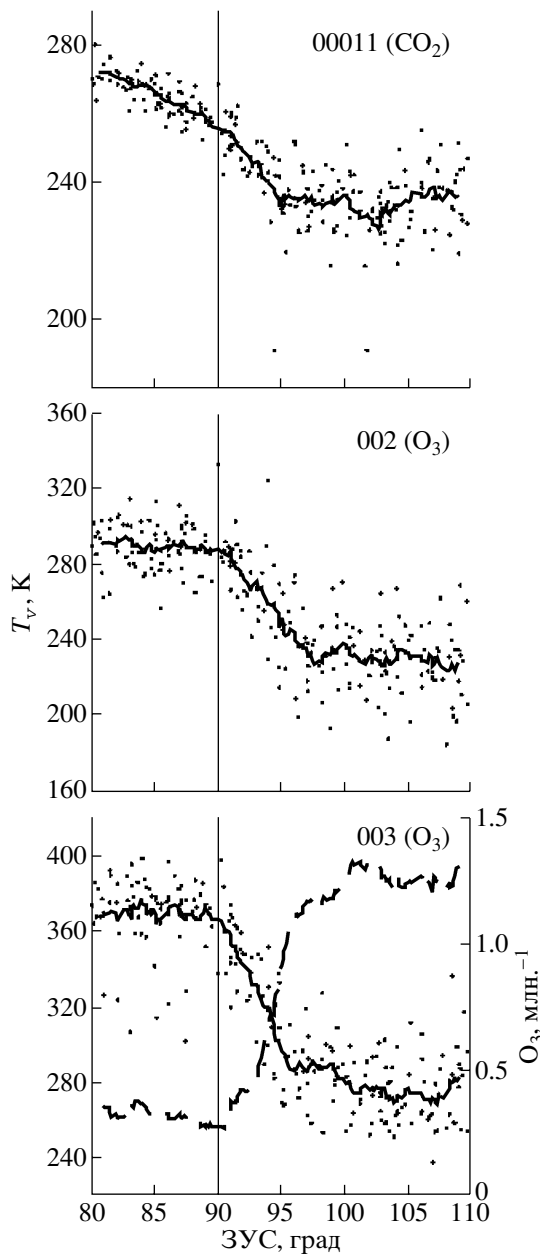
**Рис. 2.** Разность между распределениями отношения смеси озона, соответствующими моделям CHA и COA для прицельных высот 70, 80 и 90 км.  $s$  – координата вдоль оптической трассы. Район терминатора ( $50^\circ$ – $60^\circ$  с.ш.). Начало трасс ( $s = 0$ ) находится в “дневной” области. Сплошные линии – данные модели HAMMONIA, пунктир – данные эксперимента CRISTA.

ствие малого содержания озона на высотах более 100 км, указанная особенность экспериментальных данных не приводит к значимым погрешностям расчета излучения для трасс с прицельными высотами 90 км и менее.

Таким образом, приведенные результаты сравнения для температуры, давления и содержа-

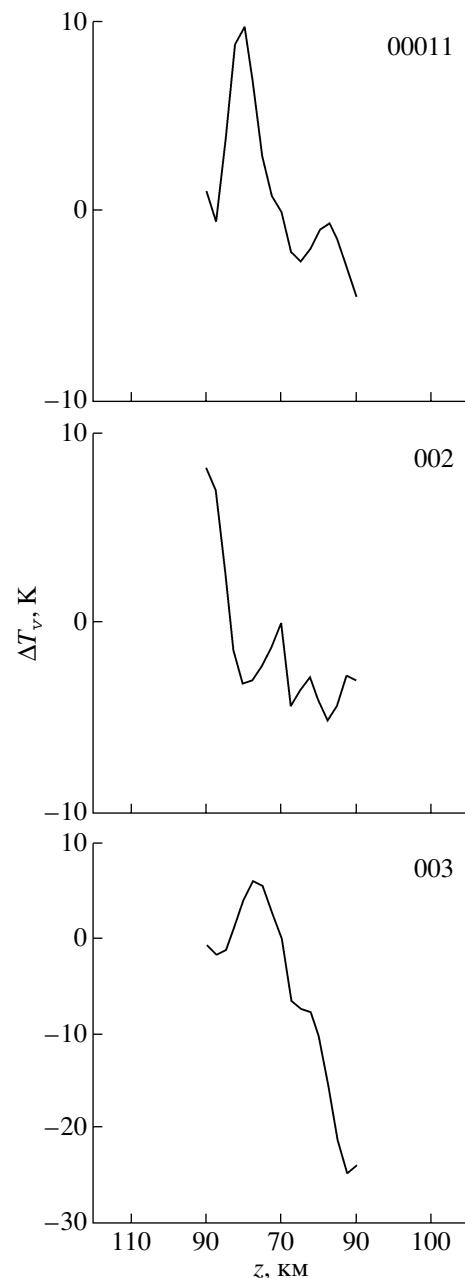
ния углекислого газа свидетельствуют о хорошем качественном и количественном согласии “экспериментальных” и “модельных” распределений параметров. Хорошее качественное согласие имеет место и для распределений озона. В количественном плане экспериментальные данные, по сравнению с модельными, указывают на более существенные горизонтальные градиенты содержания озона.

Перейдем к рассмотрению особенностей в распределениях населенности колебательных состояний молекул в горизонтально неоднородной атмосфере. В анализируемой в настоящей работе спектральной области  $980$ – $1100$   $\text{см}^{-1}$  и в рассматриваемом высотном диапазоне (мезосфера) главную роль играют колебательно-вращательные полосы озона и углекислого газа. Для углекислого газа основной вклад в излучение дают так называемые “лазерные” переходы между состоянием  $00\ 011$  и состояниями  $10\ 001$  и  $10\ 002$  (обозначения базы данных HITRAN). Для озона учитывались переходы в системе из 17 колебательных состояний, среди которых состояния  $010$ ,  $020$  и 15 состояний, объединенных в шесть групп:  $(001, 100)$ ,  $(011, 110)$ ,  $(002, 101, 200)$ ,  $(021, 120)$ ,  $(012, 111, 210)$ ,  $(003, 102, 201)$ . Энергии состояний в каждой группе близки по значению, внутри групп выполняется приближение так называемого “внутреннего” ЛТР (для населенности состояний внутри группы выполняется больцмановское распределение). Подробное описание процессов формирования неравновесных населенностей колебательных состояний молекул озона и углекислого газа представлено в большом количестве работ, среди которых укажем на [19–21]. Неравновесную населенность колебательных состояний принято описывать в терминах так называемых “колебательных температур”. Отличия колебательной температуры от кинетической на различных высотах в атмосфере характеризуют степень отклонения от условий ЛТР. Колебательные температуры (населенности) колебательного состояния  $00\ 011$  молекул  $\text{CO}_2$  и верхних состояний молекул  $\text{O}_3$  испытывают существенные суточные вариации. На рис. 3 представлены зависимости колебательной температуры  $T_v$  от зенитного угла Солнца для состояния  $00011$  молекул  $\text{CO}_2$  и для состояний  $002$ ,  $003$  молекул  $\text{O}_3$ , полученные по данным эксперимента CRISTA-1 для высоты 70 км. Среднее значение  $T_v(00011)$  плавно уменьшается от 270 К до 230 К при изменении зенитного угла Солнца от  $80^\circ$  до  $95^\circ$ . Значения  $T_v(002)$  резко уменьшаются (на 60 К) при изменении зенитного угла от  $90^\circ$  до  $97^\circ$ . В диапазоне значений зенитного угла  $80^\circ$ – $90^\circ$  и  $97^\circ$ – $110^\circ$  величины  $T_v(002)$  практически постоянны и составляют около 290 К и 230 К соответственно. Поведение колебательной температуры  $T_v(003)$  аналогично поведению температуры  $T_v(002)$ , но разница между “дневными”



**Рис. 3.** Зависимость колебательной температуры  $T_v$  от зенитного угла Солнца (ЗУС) для состояния 00011 молекул  $\text{CO}_2$  и состояний 002, 003 молекул  $\text{O}_3$  по данным эксперимента CRISTA-1 (сплошная линия – скользящее среднее). Высота 70 км, данные для восходов и для заходов Солнца представлены совместно. На нижнем графике пунктиром показана зависимость отношения смеси озона от ЗУС на высоте 70 км.

и “ночными” значениями заметно больше и составляет почти 100 К. Для сравнения, на графике, демонстрирующем зависимость  $T_v(003)$ , показана и зависимость отношения смеси озона от зенитного угла Солнца на высоте 70 км (по данным [15]). Видно, что процесс уменьшения значений колебательной температуры происходит синхронно с



**Рис. 4.** Разность между распределениями колебательных температур состояний 00011 ( $\text{CO}_2$ ), 002 и 003 ( $\text{O}_3$ ), соответствующими моделям CHA и COA, для трассы с прицельной высоты 70 км. По горизонтальной оси – высота ( $Z$ ) точек на касательной трассе.

ростом значений отношения смеси озона. Представленные иллюстрации дают наглядное представление о горизонтальной неоднородности населенности колебательных состояний молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_3$  в области терминатора. В дополнение к ним приведем рис. 4, на котором показан пример расчета разности между распределениями колебательных температур, соответствующими моделям CHA и COA  $\Delta T_v(s) = \Delta T_{v\text{CHA}}(s) - \Delta T_{v\text{COA}}(s)$ ,

**Таблица 1.** Характеристика оптических трасс

Характеристика	Группа T1 (5 трасс)	Группа T2 (5 трасс)
Широтный диапазон	58°–63° с.ш.	46°–52° ю.ш.
Условия	заход Солнца	восход Солнца
Среднее значение зенитного угла Солнца в прицельной точке	91.7°	90.3°
Средний диапазон значений зенитного угла Солнца в области трасс	82.3°–101.3°	80.0°–100.8°

**Таблица 2.** Сценарии расчетов

Сценарий	Описание
A	Общий случай СНА. Учтены горизонтальные градиенты всех параметров.
B	Общий случай СОА. Сферическая однородность для всех параметров.
C	Частный случай СНА. Учтены горизонтальные градиенты только для кинетической и колебательных температур. Для всех остальных параметров – сферическая однородность.

для состояний 00 011 (CO<sub>2</sub>), 002 и 003 (O<sub>3</sub>) на трассе с прицельной высотой 70 км. Подчеркнем, что на данном рисунке, в отличие от предыдущих, распределения даны не как функция координаты вдоль трассы, а как функция от высоты точек на трассе (при этом шкала высоты – линейна). Представление результатов ограничено высотой 90 км, поскольку выше восстановленные профили колебательных температур стремятся к априорно заданным, аналогично профилям содержания озона. Как видно из рисунка, для колебательной температуры состояния 00011 на “дневной” части трассы (слева)  $\Delta T_v(s)$  достигают 10 К на высоте около 80 км. На “ночной” части трассы (справа)  $\Delta T_v(s)$  составляют по абсолютной величине около 4 К. Для колебательной температуры состояния 002 видна аналогичная зависимость  $\Delta T_v(s)$ . Горизонтальная неоднородность наиболее ярко выражена в распределении колебательной температуры состояния 003. В “дневной” области  $\Delta T_v(s)$  малы (несколько градусов), в то время как в “ночной” области они достигают по абсолютной величине 25 К на высоте около 90 км.

В заключение данного раздела укажем, что при выборе трасс для расчета использовался дополнительный критерий, который заключался в максимальном соответствии вариаций содержания озона вдоль трассы по экспериментальным и модельным (HAMMONIA) данным. Использование этого критерия необходимо для того, чтобы минимизировать влияние погрешностей экспери-

ментальных данных на проводимые оценки. В результате было выбрано две группы трасс, их характеристики сведены в табл. 1. Сопоставление диапазона значений зенитного угла в области трасс с зависимостями колебательных температур и содержания озона от зенитного угла (рис. 3) показывает, что выбранные трассы включают всю область изменений как колебательных температур, так и содержания озона вблизи терминатора. Подчеркнем, что атмосферные условия для этих групп трасс различны: конец весны в Южном полушарии и конец осени в Северном. Кроме этого, трассы в Южном полушарии соответствуют восходам Солнца, а в Северном – заходам.

## РАСЧЕТ НЕРАВНОВЕСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

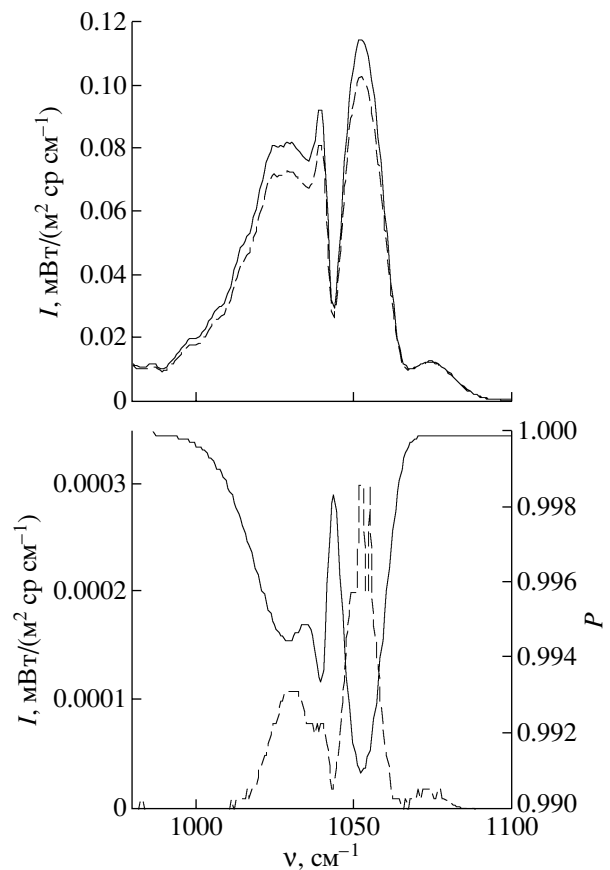
Расчеты уходящего неравновесного излучения проводились с помощью разработанного в Санкт-Петербургском государственном университете компьютерного кода SPIRT-NLC (Simulation Program for Infrared Radiative Transfer – Non-Lte Code), точность которого оценивалась в ходе международного сравнения компьютерных программ расчета неравновесного излучения [22]. Расчеты проводились в спектральной области 980–1100 см<sup>-1</sup>. Использовалась спектральная аппаратная функция спутникового прибора CRISTA (разрешающая способность  $\lambda/\Delta\lambda = 390$  в полосе озона 9.6 мкм). Угловая разрешающая способность принималась бесконечно большой. В рассматриваемом диапазоне прицельных высот рефракция является пренебрежимо малой. Расчеты осуществлялись как для оптических трасс в области терминатора (см. предыдущий раздел), так и для нескольких трасс, полностью находящихся в дневной или ночной области. Сценарии расчетов даны в табл. 2. При анализе результатов расчетов спектров интенсивности неравновесного излучения  $I(\nu)$ , где  $\nu$  – частота, рассматривались величины  $I_A - I_B$  и  $I_C - I_B$  (A, B, C – обозначения сценариев). Эти величины сравнивались между собой, что позволило оценить “вклад неравновесности” при расчете излучения в горизонтально неоднородной атмосфере. Значение  $I_A - I_B$ , которое, по сути, является оценкой погрешности, обусловленной приближением СОА, сопоставлялось также с погрешностями измерений в эксперименте CRISTA.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим рис. 5, на котором представлен характерный пример результатов расчетов. Для одной из точек в Южном полушарии для прицельной высоты 70 км (зенитный угол Солнца 91.3°) рассчитаны спектры интенсивности излучения для модели СНА () и для модели СОА ( $I_B$ ). В спектрах присутствует локальный максимум излуче-

ния в области 1070–1080  $\text{см}^{-1}$ , соответствующий “лазерной” полосе углекислого газа. Различия между значениями интенсивности излучения, рассчитанными для моделей СНА и СОА, хорошо заметны. Интенсивность излучения для модели СНА в полосе озона превышает интенсивность излучения, соответствующую модели СОА. Различия достигают в максимуме 0.01  $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$ . Заметим, что эта величина в два раза превышает “инструментальный шум” аппаратуры CRISTA, величина которого оценивается как 0.005  $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$ . Функция пропускания атмосферы в полосе озона 9.6  $\mu\text{м}$  на касательных трассах с прицельными высотами 70 км и более близка к единице (см. рис. 5 внизу). Вследствие малого поглощения разность значений интенсивности излучения, рассчитанных для случаев нахождения прибора на “дневной” и “ночной” сторонах трассы, мала. Величина этой разности для анализируемой трассы представлена на рис. 5 внизу (левая шкала). Наблюдаются два основных максимума в полосе озона и третий максимум в области “лазерного” перехода  $\text{CO}_2$ . По величине значения разности не превышают 0.0003  $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$  и, соответственно, являются пренебрежимо малыми по сравнению со значениями интенсивности излучения.

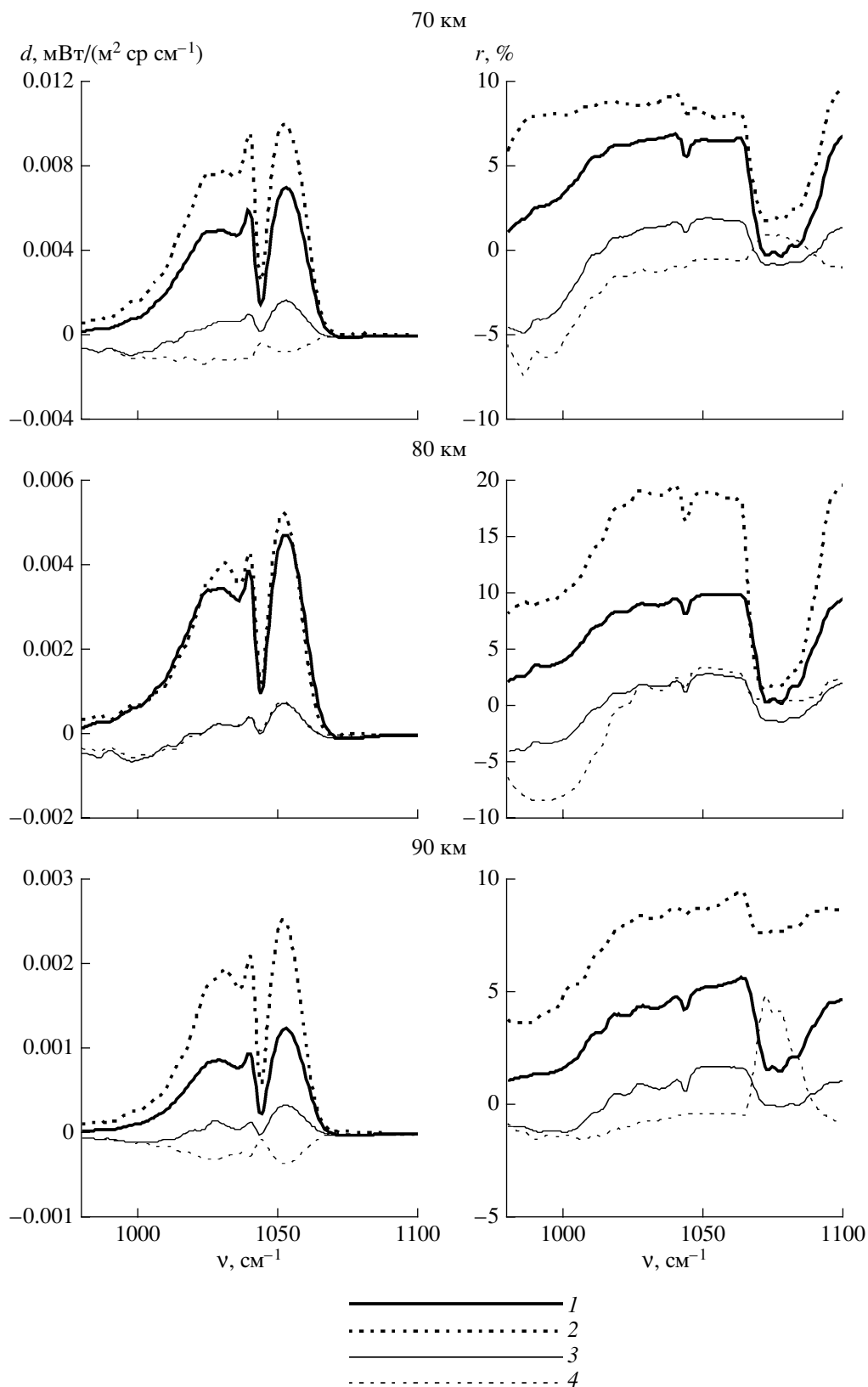
На рис. 6 для трех прицельных высот (70, 80 и 90 км) показаны в абсолютном ( $d$ ) и относительном ( $r$ ) выражении средние значения величин разностей между значениями интенсивности излучения  $I_A$  и  $I_B$ , а также между  $I_C$  и  $I_B$ . Результаты представлены для двух групп трасс (Т1 и Т2). Напомним, что разность  $I_A - I_B$  характеризует погрешность расчетов, обусловленную использованием приближения СОА. Разность  $I_C - I_B$  характеризует “долю” горизонтальных градиентов населенности колебательных состояний в этой погрешности. Во-первых, обратим внимание на то, что для группы трасс Т2 разности  $I_A - I_B$  заметно больше, чем для группы трасс Т1. Причину этого однозначно определить, по-видимому, невозможно из-за различия географических районов и сезонов для рассмотренных групп трасс. Для прицельной высоты 70 км, как видно из рис. 6, погрешности, обусловленные приближением СОА, составляют в максимуме 0.006–0.010  $\text{мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1})$ , что превышает “инструментальный” шум прибора CRISTA. В относительном выражении обсуждаемые погрешности составляют от 1 до 10%. Как в абсолютном, так и в относительном выражении, разность  $I_A - I_B$  максимальна в центре полосы озона и уменьшается в области горячих переходов озона 980–1020  $\text{см}^{-1}$  и в области “лазерного” перехода  $\text{CO}_2$  1070–1080  $\text{см}^{-1}$ . Величина разности  $I_C - I_B$  существенно меньше, чем величина  $I_A - I_B$  в центре полосы и сравнима с ней в области горячих переходов озона. Необходимо отметить, что, в отличие от  $I_A - I_B$ , величина  $I_C - I_B$  знако-



**Рис. 5.** Пример расчетов: прицельная высота 70 км, зенитный угол Солнца 91.3°, координаты 51.5° ю.ш., 35.4° в.д.; вверху – спектры интенсивности излучения  $I_A$  (сплошная линия) и  $I_B$  (пунктир), внизу – соответствующий спектр функции пропускания  $P_A$  (сплошная линия) и разность между значениями интенсивности излучения, рассчитанными для одной и той же трассы, но для двух случаев: прибор на “дневной” стороне и прибор на “ночной” стороне (пунктир).

переменна и в области горячих переходов принимает отрицательные значения. Для объяснения такого поведения необходимо вернуться к рассмотрению рис. 3. Зенитный угол Солнца в прицельной точке близок к 90°. На “дневной” части трасс как значения содержания озона, так и значения колебательных температур возбужденных состояний молекул озона практически не меняются с изменением зенитного угла. На “ночной” части трасс значения содержания озона растут при увеличении зенитного угла, а значения колебательных температур убывают. Как следствие, горизонтальная неоднородность содержания озона приводит к увеличению интенсивности излучения, а неоднородность колебательной температуры – к уменьшению интенсивности излучения.

Перейдем к обсуждению величин  $I_A - I_B$  и  $I_C - I_B$ , полученных для прицельных высот 80 и 90 км. Для прицельной высоты 80 км значения  $I_A - I_B$  для трасс



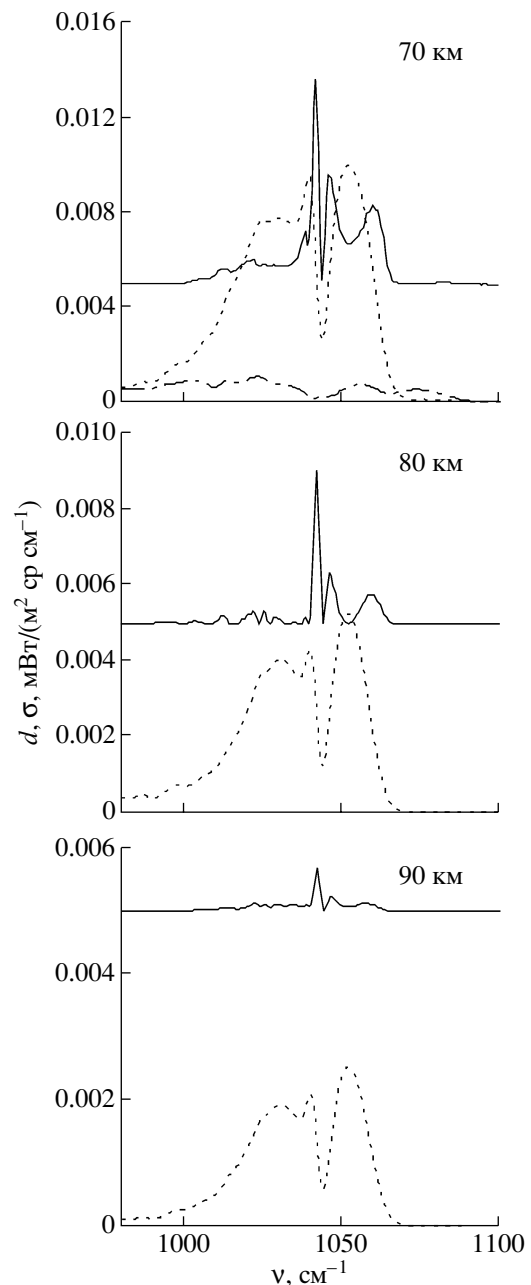
**Рис. 6.** Средние значения величин абсолютных разностей ( $d$ ) и относительных разностей ( $r$ ) между значениями интенсивности излучения  $I_A$  и  $I_B$  (жирные линии), а также между  $I_C$  и  $I_B$  (тонкие линии). Сплошные линии соответствуют группе трасс Т1, пунктир – группе трасс Т2.



обеих групп в абсолютном выражении одинаковы и составляют в максимуме около  $0.005 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$ , что соответствует уровню “инструментального” шума прибора CRISTA. В относительном выражении для трасс группы T2  $I_A-I_B$  достигают 20%, в два раза превышая значения для группы трасс T1. В области “лазерного” перехода  $\text{CO}_2$  интенсивности излучения, соответствующие случаям США и СОА, практически равны, эффект влияния горизонтальной неоднородности не проявляется. Величины  $I_C-I_B$  существенны и сравнимы с величинами  $I_A-I_B$  только в области горячих переходов молекул озона. Для прицельной высоты 90 км погрешности, обусловленные приближением СОА (другими словами, величины  $I_A-I_B$ ) составляют в максимуме  $0.001-0.003 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$  и находятся ниже “уровня шума” прибора. В относительном выражении они составляют от 1 до 10% от значений интенсивности излучения. Вклад горизонтальных градиентов населенности, как и на других прицельных высотах, мал, за исключением трасс группы T2 и области “лазерного” перехода  $\text{CO}_2$ .

Как было показано, рассчитанные величины  $I_A-I_B$  на прицельных высотах 70–80 км сопоставимы с “уровнем шума” прибора CRISTA. При интерпретации результатов измерений учитываются, кроме шума, другие источники погрешностей, среди которых неточность спектральной калибровки, высотной привязки, неопределенность в значениях спектральной и угловой аппаратной функции, влияние эффекта “релаксации детектора” и другие. В результате полная погрешность измерений для определенных прицельных высот может значительно превышать инструментальный шум. Поэтому нами были проведено сравнение значения полной погрешности спектральных измерений, которое использовалось при интерпретации данных эксперимента CRISTA в работе [14] и средней погрешности, обусловленной приближением СОА для прицельных высот 70, 80 и 90 км (см. рис. 7). Сложная спектральная структура полной погрешности обусловлена в конкретном рассматриваемом случае (интерпретация измерений CRISTA), в основном, остаточной неопределенностью спектральной привязки. Подчеркнем, что для рассмотренных прицельных высот полная погрешность заметно превышает шум прибора в центре полосы озона. Средняя погрешность, обусловленная приближением СОА, незначительно превышает полную погрешность измерений лишь на прицельной высоте 70 км в спектральных областях  $1020-1040 \text{ см}^{-1}$  и  $1050-1060 \text{ см}^{-1}$ . На прицельной высоте 80 км в указанных спектральных областях погрешности сравнимы по величине. На прицельной высоте 90 км полная погрешность измерений существенно больше.

В заключение укажем, что расчеты неравновесного излучения для трасс вне зоны терминато-



**Рис. 7.** Среднеквадратическое значение полной погрешности спектральных измерений в эксперименте CRISTA ( $\sigma$ , сплошные линии) и средняя погрешность в области терминатора, обусловленная приближением СОА ( $d$ , пунктир) для прицельных высот 70, 80 и 90 км. Для прицельной высоты 70 км штрихпунктирной линией дан пример погрешности, обусловленной приближением СОА, вне зоны терминатора.

ра показали пренебрежимо малое влияние горизонтальных градиентов на результаты. В качестве примера на рис. 7 для прицельной высоты 70 км дан пример погрешности, обусловленной приближением СОА, вне зоны терминатора. Указанная погрешность почти на порядок меньше полной погрешности спектральных измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построены модели переноса неравновесного излучения в полосе поглощения озона 9.6 мкм с учетом горизонтальных градиентов атмосферных параметров, включая значения неравновесной населенности нижних колебательных состояний молекул озона и состояния 00011 молекул углекислого газа. При расчете распределений параметров вдоль оптических трасс были взяты за основу экспериментальные данные о глобальных полях параметров атмосферы, полученные в результате интерпретации результатов эксперимента CRISTA. Рассматривались трассы, расположенные в области терминатора.

Проведено сопоставление полученных по данным CRISTA распределений параметров атмосферы вдоль трасс с распределениями, рассчитанными по модельным данным (модель HAMMONIA, расчеты для ноября месяца, что соответствует сезону проведения эксперимента CRISTA-1). Распределения температуры, давления и содержания углекислого газа согласуются как качественно, так и количественно. Горизонтальные градиенты содержания озона более существенны на трассах, построенных по данным CRISTA.

Расчеты интенсивности излучения выполнялись для случаев сферически неоднородной атмосферы (СНА) и сферически однородной атмосферы (СОА) для трасс с прицельными высотами 70–90 км в спектральной области 980–1100 см<sup>-1</sup> со спектральным разрешением, соответствующим аппаратуре CRISTA.

Значения интенсивности излучения в случаях, когда прибор находится на “дневной” или на “ночной” стороне трассы практически одинаковы, в силу малого поглощения для трасс с прицельными высотами более 70 км.

Согласно проведенным расчетам, в относительном выражении максимальные погрешности расчета излучения, обусловленные приближением СОА, имеют место в центре полосы озона и составляют на прицельных высотах 70, 80 и 90 км соответственно 10%, 20% и 10% от значений интенсивности излучения. Погрешности, обусловленные использованием приближения СОА, на прицельной высоте 90 км пренебрежимо малы по сравнению с полной погрешностью спектральных измерений аппаратурой CRISTA. На прицельных высотах 70 км и 80 км в центре полосы они сравнимы с полной погрешностью. Это обстоятельство, а также систематический (по спектру и прицельным высотам) характер погрешностей, обусловленных приближением СОА, указывают на необходимость учета горизонтальной неоднородности атмосферы при определении профилей озона в области терминатора дистанционным методом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 03-05-64830, 06-05-64987) и Министерства образования и науки Российской Федерации (гранты РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Kerr J.B., Evans W.F.J., McConnell J.C.* The effects of NO<sub>2</sub> changes at twilight on tangent ray NO<sub>2</sub> measurements // *Geophys. Res. Lett.* 1977. V. 4. P. 577.
3. *Roscoe H.K., 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.
4. *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.
5. *Natarajan M., Deaver L.E., Thompson E., Magill B.* Impact of twilight gradients on the retrieval of mesospheric ozone from HALOE // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D13305, doi:10.1029/2004JD005719.
6. *Newchurch M.J., Allen M., Gunson M.R. et al.* Stratospheric NO and NO<sub>2</sub> abundances from ATMOS solar-occultation measurements // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 17. P. 2373–2376.
7. *Kemnitzer H., Hilgers S., Schwarz G et al.* Trace gas retrieval including horizontal gradients // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29. № 11. P. 1631–1636.
8. *Ракитин А.В., Косцов В.С.* Границы применимости приближения сферически однородной атмосферы в задаче спутникового дистанционного ИК-зондирования мезосферы на касательных трассах // *Исслед. Земли из космоса.* 2005. № 5. С. 10–17.
9. *Косцов В.С., Мануйлова П.О.* Спектральная структура неравновесного излучения лимба Земли в полосе озона 9.6 мкм // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1997. Т. 33. № 4. С. 339–347.
10. *Schmidt H.* private communication. 2004.
11. *Косцов В.С., Тимофеев Ю.М.* Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO<sub>2</sub>: 1. Описание метода и анализ точности // *Изв.РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 6. С. 789–800.
12. *Косцов В.С., Тимофеев Ю.М., Гроссманн К. и др.* Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO<sub>2</sub>: 2. Примеры обработки данных эксперимента CRISTA // *Изв.РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 6. С. 801–810.
13. *Косцов В.С., Тимофеев Ю.М.* Содержание углекислого газа в мезосфере по результатам интерпретации данных эксперимента CRISTA-1 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2003. Т. 39. № 3. С. 359–370.

14. *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. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 201–214.
15. *Косцов В.С., Тимофеев Ю.М.* Озон в мезосфере по данным спутникового эксперимента CRISTA-1: 2. Пространственные распределения и суточные вариации // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 215–226.
16. *Offermann D., Grossmann K.U., Barthol P. et al.* 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.
17. *Grossmann K.U., Gusev O., Kaufmann M. et al.* A review of the scientific results from the CRISTA missions // *Adv. Space Res.* 2004. № 34. P. 1715–1721.
18. *Kostsov V.S., Timofeyev Yu.M., Manuilova R.O.* Global distributions of temperature, carbon dioxide, ozone, and non-LTE parameters in mesosphere and lower thermosphere CRISTA-1 experiment) // *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII* / Ed. Klaus P. Schaefer, Adolfo Comeron, Michel R. Carleer, Richard H. Picard. Proc. of SPIE. 2004. V. 5235. P. 208–219. doi: 10.1117/12.512269.
19. *Manuilova R.O., Shved G.M.* The 4.8 and 9.6  $\mu\text{m}$   $\text{O}_3$  band emissions in the middle atmosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. V. 54. № 9. P. 1149–1168.
20. *Shved G.M., Kutepov A.A., Ogibalov V.P.* Non-local thermodynamic equilibrium in  $\text{CO}_2$  in the middle atmosphere. I. Input data and populations of the  $\nu_3$  mode manifold states // *J. Atmosph. and Solar-Terrestrial Phys.* 1998. V. 60. № 3. P. 289–314.
21. *Ogibalov V.P., Kutepov A.A., Shved G.M.* Non-local thermodynamic equilibrium in  $\text{CO}_2$  in the middle atmosphere. II. Populations in the  $\nu_1\nu_2$  mode manifold states // *J. Atmosph. and Solar-Terrestrial Phys.* 1998. V. 60. № 3. P. 315–329.
22. *Clarmann T.V., Dudhia A., Edwards D.P. et al.* Inter-comparison of radiative transfer codes under non-local thermodynamic equilibrium conditions // *J. Geophys. Res.* 2002. № 107(D22). P. 4631. doi: 10.1029/2001JD001551.

## Inaccuracy of the Assumption of Spherically Homogeneous Atmosphere in the Problem of Limb Nonequilibrium Radiation Calculations in the 9.6 $\mu\text{m}$ Ozone Band in the Mesosphere

**V. S. Kostsov, A. V. Rakitin**

*Research Institute of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg*

Based on the CRISTA experimental data, the nonequilibrium radiative transfer models for the 9.6  $\mu\text{m}$  ozone band have been developed accounting for horizontal gradients of atmospheric parameters, including nonequilibrium population of lower vibrational states of ozone molecules and the 00011 state of carbon dioxide molecules. Limb nonequilibrium radiance spectra have been calculated in the 9.6  $\mu\text{m}$  band for optical paths with tangent altitudes 70–90 km located at terminator. Maximal errors of radiance calculations, stipulated by the assumption of spherically homogeneous atmosphere, were detected in the center of ozone band and constitute, with respect to radiance values, at tangent altitudes 70, 80 and 90 km 10%, 20% and 10% correspondingly. These errors are much lower than total error of spectral measurements by the CRISTA instrument at 90 km tangent altitude, but are comparable to the total measurement error at 70 km and 80 km tangent altitudes in the center of ozone band.