

УДК 551.521.32

СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕЗОСФЕРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА CRISTA-1

© 2003 г. В. С. Косцов, Ю. М. Тимофеев

Научно-исследовательский институт физики
Санкт-Петербургского государственного университета
198904 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1
E-mail: vlad@troll.phys.spbu.ru
tim@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 14.02.2002 г., после доработки 28.08.2002 г.

Приведены результаты определения профилей содержания углекислого газа в мезосфере в диапазоне высот 60–90 км, полученные при интерпретации данных измерений уходящего излучения горизонта Земли в 15-мкм полосе CO₂ спутниковым прибором CRISTA в ноябре 1994 г.. Интерпретация спутниковых данных осуществлялась с учетом эффекта нарушения локального термодинамического равновесия комплексным методом – одновременно восстанавливались профили кинетической температуры, давления, содержания углекислого газа и колебательных температур нижних колебательных состояний молекул углекислого газа четырех наиболее распространенных изотопических разновидностей. Анализ вертикальных распределений углекислого газа в мезосфере выполнен на основе обработки порядка трехсот атмосферных сканов (серий измерений спектров излучения для всей совокупности прицельных высот – от наименьшей до наибольшей) в широтном диапазоне от 50°S до 65°N. Показано, что уменьшение значений отношения смеси углекислого газа с высотой в среднем начинается с 70–75 км, что существенно ниже, чем предсказывается в численных моделях верхней атмосферы. Однако этот результат полностью согласуется с данными восстановлений содержания CO₂ на основе интерпретации измерений прибора CRISTA, полученными независимо с помощью принципиально иного подхода, основанного на измерениях излучения в полосе 4.3 мкм и численном моделировании неравновесной населенности колебательных состояний молекул CO₂. Учитывая данное обстоятельство, согласие результатов характеризует их высокую достоверность. При этом, однако, были обнаружены и случаи, когда CO₂ равномерно перемешан до высот порядка 85 км. Средние профили отношения смеси для средних широт обоих полушарий на высоте 90 км отличаются в пределах 40 млн⁻¹. Средние широтные градиенты отношения смеси CO₂ в средней и верхней мезосфере достигают значений 4.8 млн⁻¹ в расчете на 10 градусов широты. При этом наблюдается уменьшение содержания углекислого газа в направлении от южных широт (весна) к северным (осень).

1. ВВЕДЕНИЕ

Углекислый газ – один из важнейших парниковых газов в земной атмосфере. Его роль особенно значительна в энергетическом балансе атмосферы на высотах 30–120 км. ИК радиационное выхолаживание в 15-мкм полосе поглощения CO₂ определяет радиационный баланс в стратосфере, мезосфере и нижней термосфере атмосферы Земли. Тем не менее измерения содержания CO₂ в этих слоях атмосферы немногочисленны, особенно по сравнению с исследованиями у поверхности Земли и в тропосфере. За последние два столетия обнаружен значительный рост содержания CO₂ у поверхности Земли (1800 год – отношение смеси равно 280 млн⁻¹, 1993 год – 356 млн⁻¹). Этот рост приводит к увеличению содержания CO₂ и в стратосфере и в мезосфере, что является

причиной их выхолаживания [1]. В различных исследованиях зарегистрированы тренды температуры стратосферы и мезосферы, достигающие 1 град/год [2]. Увеличение содержания CO₂ в стратосфере может приводить к увеличению содержания озона – по крайней мере по чепменовскому циклу за счет изменения температуры стратосферы. Оценки показали, что удвоение содержания CO₂ в невозмущенной стратосфере может привести к максимальному уменьшению ее температуры на 7–10 К на высоте 40 км и увеличению содержания O₃ на 6% [1]. Современные численные модели не объясняют количественно экспериментально обнаруженные значительные тренды температуры в верхней атмосфере.

Долгое время предполагалось, что CO₂ равномерно перемешан вплоть до высот 90–100 км.

Этот вывод основывался на ранних ракетных масс-спектрометрических наблюдениях плотности углекислого газа [3–6] и результатах теоретического моделирования [7–10]. Ракетные измерения были немногочисленны и давали локальную информацию о плотности CO_2 .

Развитие различных спутниковых методов измерений позволило существенно расширить исследования характеристик газового состава атмосферы [11]. Измерения поглощения солнечного излучения на касательных трассах (затменный метод) с помощью растрового прибора впервые были осуществлены в экспериментах на борту Spacelab 1 [12], а позднее в ряде космических экспериментов с ИК интерферометром “ATMOS” [13]. Именно измерения на Spacelab 1 впервые обнаружили быстрое падение отношения смеси углекислого газа уже с высоты порядка 75 км.

Измерения собственного излучения горизонта Земли в различных ракетных и космических экспериментах позволили существенно расширить пространственный охват наблюдений содержания CO_2 . Сложность извлечения информации о содержании CO_2 при измерениях собственного излучения атмосферы для больших прицельных высот обусловлена нарушением условий локального термодинамического равновесия (ЛТР). Так, например, нарушение ЛТР для 15-мкм полосы CO_2 может наблюдаться уже на высотах 70–90 км, а для полосы 4.3 мкм – уже в стратосфере. Поэтому для определения содержания CO_2 при интерпретации измерений собственного излучения привлекались в качестве дополнительной априорной информации различные кинетические модели заселения возбужденных состояний молекулы CO_2 . Использование кинетических моделей в алгоритмах интерпретации спутниковых измерений уходящего излучения позволяло, с одной стороны, получить однозначные решения, но, с другой стороны, эти решения в существенной степени зависели от адекватности используемых кинетических моделей, точности различных констант процессов возбуждения и дезактивации молекул CO_2 и дополнительной информации о состоянии атмосферы.

В работе [14] на основе ракетных измерений собственного излучения атмосферы был построен средний профиль содержания CO_2 , демонстрирующий постоянное отношение смеси до высот 90 км и медленное его падение на больших высотах.

Наиболее часто для определения содержания CO_2 в верхней атмосфере использовались измерения излучения горизонта Земли в полосе поглощения CO_2 4.3 мкм в дневное время. Это обусловлено как большими значениями уходящего излучения в этой полосе поглощения в дневное время, так и наличием относительно хорошо разработанных кинетических моделей заселения.

Анализ спутниковых измерений излучения в полосе поглощения 4.3 мкм прибором SAMS на спутнике Нимбус-7 с использованием кинетической модели заселения состояний позволил получить отношение смеси CO_2 , начинающее уменьшаться с 70 км [15]. Аналогичные измерения прибором ISAMS на спутнике UARS и их анализ (с использованием кинетической модели) позволили уточнить профиль CO_2 , полученный по данным измерений прибора SAMS [16]. В этой новой модели CO_2 быстрое падение отношения смеси CO_2 начинается с высоты 80 км. Используя эту новую модель и данные измерения ISAMS, авторы [16] пришли к выводу, что широтные и сезонные вариации отношения смеси CO_2 не превышают 10% на высоте 85 км, 14% – на высоте 90 км, 23% – на 95 км и 28% – на 100 км.

Значительное количество новой информации о содержании CO_2 в верхней атмосфере было получено на основе интерпретации измерений собственного излучения горизонта Земли в экспериментах со спектрометром CRISTA в двух полетах корабля Шаттл (ноябрь 1994 г. – CRISTA-1, август 1997 г. – CRISTA-2) [10]. Интерпретация измерений излучения в полосе 4.3 мкм в дневное время (с использованием кинетической модели) позволила изучить глобальные и высотные (60–130 км) распределения плотности CO_2 . Использование восстановленных вертикальных профилей температуры и давления по измерениям в 15-мкм полосе CO_2 (до высот 85 км) и модельные представления выше 85 км позволило авторам работы [10] получить отношения смеси углекислого газа, которые начинают отклоняться от равномерно перемешанных значений на высотах 70–80 км. Анализ глобальных данных по содержанию CO_2 в дневное время обнаружил значительные широтные и долготные вариации в мезосфере и нижней термосфере (см. подробнее [10]). Имеющиеся к настоящему времени данные о содержании CO_2 в мезосфере суммированы в табл. 1.

В настоящей работе приведены и анализируются профили отношения смеси и плотности CO_2 в диапазоне высот 60–90 км, полученные при интерпретации данных эксперимента CRISTA-1 комплексным методом, учитывающим эффект нарушения ЛТР. Было обработано 272 атмосферных скана (скан – серия измерений спектров излучения для всей совокупности прицельных высот – от наименьшей до наибольшей) в широтном диапазоне от 55°S до 65°N. Отметим, что этот метод [17] позволяет одновременно восстанавливать профили температуры, давления и содержания CO_2 по измерениям собственного неравновесного излучения горизонта Земли в 15-мкм полосе, не привлекая в качестве дополнительной априорной информации кинетические модели, описывающие процессы заселения возбужденных состояний молекулы CO_2 , и таким образом свободен от отме-

Таблица 1. Данные о содержании углекислого газа в мезосфере

N	Источник информации	Основные выводы	Литература
1	Численное моделирование газового состава атмосферы	Углекислый газ равномерно перемешан в мезосфере	7, 8, 9, 10
2	Ракетные масс-спектрометрические измерения	Углекислый газ равномерно перемешан до высот порядка 100 км	3, 4, 5, 6
3	Ракетные измерения собственного излучения горизонта Земли	Углекислый газ равномерно перемешан до высот 90 км, и затем отношение смеси медленно убывает	14
4	Спутниковые измерения поглощения солнечного излучения	Измерения во время восходов и заходов Солнца за горизонт планеты	
	Растровый спектрометр, Spacelab 1	Отношение смеси CO ₂ начинает быстро падать, начиная с высоты 75 км	12
5	Интерферометр ATMOS, Spacelab 3	Отношение смеси CO ₂ постоянно в слое 70–90 км и быстро падает на высотах 90–100 км	13
	Спутниковые измерения собственного излучения горизонта Земли (4.3 мкм) SAMS	Все измерения в дневное время	
		Отношение смеси CO ₂ начинает быстро падать с высоты 70 км	15
	ISAMS	Отношение смеси CO ₂ начинает быстро падать с высоты 80 км. Не обнаружены сезонные и широтные вариации отношения смеси, превышающие погрешности измерений	16
	CRISTA-1 и CRISTA-2	Отношение смеси CO ₂ начинает быстро падать в диапазоне высот 70–80 км. Обнаружены значимые широтные и долготные вариации плотности CO ₂	10

ченных выше недостатков методов, использовавшихся в работах [14–16, 10]. Вместо этого в алгоритме решения обратной задачи используется достаточно общая априорная информация, в том числе и основанная на результатах анализа расчетов по кинетическим моделям заселения возбужденных состояний. Такой подход, как показано в работе [18], позволяет в максимальной степени учесть результаты измерений собственного излучения горизонта Земли, определяемые мгновенным состоянием атмосферы, при построении решения обратной задачи. Существенно, что разработанный метод [17], в отличие от методов [14–16, 10], применим как для дневных, так и для ночных условий наблюдения.

2. ПОГРЕШНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕЗОСФЕРЕ

Прежде чем перейти к анализу результатов восстановления содержания CO₂, необходимо дать краткое описание особенностей методики интерпретации измерений уходящего излучения в 15-мкм полосе и провести анализ погрешности дистанционных измерений содержания CO₂.

Интенсивность излучения на частоте ν и целевой высоте z_t в условиях нарушения ЛТР по колебательным состояниям молекул атмосфер-

ных газов может быть представлена как функционал от вертикальных распределений ряда атмосферных параметров:

$$I(\nu, z_t) = A[T_k(z), p(z), n_g(z), T_v^{gs}(z)],$$

где A обозначает нелинейный оператор “прямой задачи”, z – вертикальная координата, p – давление, g – индекс, обозначающий газ и s – индекс, обозначающий колебательное состояние, T_k – кинетическая температура, n – концентрация газа, T_v – колебательная температура. В рассматриваемом случае (15-мкм полоса CO₂, спектральная область 640–685 см⁻¹) неизвестными параметрами являлись кинетическая температура, давление, концентрация CO₂ и колебательные температуры различных состояний молекул CO₂ четырех наиболее распространенных изотопических разновидностей. Соответственно решается задача восстановления их вертикальных распределений по результатам спектрально-высотных измерений излучения $I(\nu, z_t)$. Подробное описание метода интерпретации спутниковых измерений уходящего ИК излучения на касательных трассах с учетом эффекта нарушения локального термодинамического равновесия дано в работе [17]. В работе [19] анализируются результаты определения профилей кинетической температуры в средней атмосфере, полученные с помощью интерпретации

Таблица 2. Погрешностей восстановления значений отношения смеси CO₂

Высота	Случайная компонента		Систематическая компонента	
	млн. ⁻¹	%	млн. ⁻¹	%
60	6	2	6	2
65	8	2	12	3
70	11	3	1	1
75	9	3	2	1
80	10	4	21	7
85	13	5	43	17
90	17	8	53	25

данных эксперимента CRISTA-1 рассматриваемым методом.

Анализ спектров и полученных ранее результатов [19] позволил усовершенствовать метод в плане учета измерительных погрешностей и уточнения априорной информации. В связи с этим при массовой обработке данных, результаты которой представлены в настоящем исследовании, в отличие от работ [17, 19], в частности, профиль CO₂ до высоты 60 км полагался известным. Численные эксперименты показали, что при использовании такой априорной информации повышается точность определения всех параметров. Это является следствием того факта, что при решении комплексной обратной задачи в диапазоне высот 40–60 км неизвестны лишь два параметра – кинетическая температура и давление. Отметим также, что указанное уточнение априорной информации позволило несколько ослабить априорные ограничения на гладкость профиля отношения смеси и использовать значение радиуса корреляции 20 км в модельной корреляционной матрице (25 км в более ранних версиях [17]).

Перечислим основные погрешности, определяющие точность решения обратной задачи: случайный шум (детектор и электроника), погрешность спектральной калибровки, нелинейность абсолютной калибровки, погрешность в определении прицельной высоты, сдвиг шкалы частот за счет механических явлений в приборе, эффект “релаксации детектора”, неопределенность спектральной аппаратной функции прибора, неопределенность угловой аппаратной функции прибора, приближения используемой модели переноса излучения, погрешности численной реализации алгоритма.

Случайный шум учитывался непосредственно в алгоритме обращения радиационных данных. Коррекция эффекта релаксации детектора, уточнение спектральной аппаратной функции и коррекция нелинейности абсолютной калибровки осуществлялись на этапе предварительной обработки измере-

ний. Влияние неопределенности угловой аппаратной функции, по сравнению с другими источниками ошибок, является пренебрежимо малым. Коррекция погрешностей спектральной калибровки и сдвига шкалы осуществлялась в процессе решения обратной задачи. Погрешность определения прицельной высоты учитывалась в виде дополнительного “эффективного” случайного шума в измерениях. Как показали результаты сравнения компьютерного кода, используемого для расчета неравновесного излучения, с зарубежными аналогами [20], влияние погрешности численной реализации алгоритма на результат решения обратной задачи пренебрежимо мало.

По результатам всех проведенных коррекций оценивались остаточные неопределенности, которые также учитывались в виде дополнительного “эффективного” случайного шума в измерениях. Исключение составляет только нелинейность абсолютной калибровки и приближения используемой модели переноса излучения, влияние которых носит ярко выраженный систематический характер и оценивалось отдельно. Такой подход позволил оценить случайную компоненту погрешности восстановления, обусловленную суммарным “эффективным шумом”, и систематическую компоненту, которая обусловлена остаточной неопределенностью после коррекции нелинейности абсолютной калибровки и приближениями используемой модели переноса излучения. В данном случае под “приближениями” имеется ввиду пренебрежение эффектом нарушения ЛТР для верхних колебательных состояний молекул CO₂ и для всех состояний молекул O₃.

Подчеркнем, что в алгоритме решения обратной задачи восстанавливаемым параметром, который характеризует содержание CO₂, являлась счетная концентрация (плотность); значения отношения смеси и их погрешности рассчитывались на основе получаемых значений температуры, давления, концентрации и соответствующих погрешностей. Оценки систематической и случайной компонент погрешности определения профиля отношения смеси CO₂, округленные до целых значений, представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, случайная компонента не превышает 11–13 млн⁻¹ до высоты 85 км, возрастая до 17 млн⁻¹ на высоте 90 км. Систематическая компонента сравнима со случайной ниже 80 км, выше наблюдается ее существенный рост вплоть до значений порядка 50 млн⁻¹ на высоте 90 км. В относительном выражении случайная компонента не превышает 5% до высот порядка 85 км, а на высоте 90 км составляет 8%, систематическая достигает значения 25% на высоте 90 км. Подчеркнем, что в работе [17] была приведена оценка погрешности определения отношения смеси CO₂ (порядка 10% в мезосфере) без учета нелинейности абсолютной калибровки измерений.

Поскольку значения отношения смеси CO_2 определяются на основе восстановленных профилей температуры, давления и счетной концентрации CO_2 возможностью усовершенствованного комплексного метода интерпретации данных прибора CRISTA для определения профилей отношения смеси углекислого газа нагляднее всего демонстрируют численные эксперименты. На рис. 1 представлены примеры результатов численных экспериментов. В качестве “истинных” профилей отношения смеси CO_2 были взяты профили с различными значениями высоты, до которой величина отношения смеси постоянна, и с различными значениями градиента. Как видно из рис. 1, в рассмотренных случаях в широком диапазоне высот восстановленные профили совпадают с “истинными” в пределах значений погрешности (в численных экспериментах рассматривалась только случайная составляющая погрешности восстановления). В окрестности перегиба восстановленные и “истинные” профили согласуются в пределах удвоенных значений погрешности. Отметим, что несмотря на существенные априорные ограничения по гладкости профиля (для профиля отношения смеси использовалась модельная корреляционная матрица со значением радиуса корреляции 20 км), высота начала убывания значений отношения смеси определяется в численных экспериментах с погрешностью 2.5 км, равной шагу высотной сетки. Подчеркнем, что счетная концентрация CO_2 (следовательно и отношение смеси) является наименее информационно обеспеченным параметром в рассматриваемой обратной задаче в силу, прежде всего, физических причин – на рассматриваемых высотах малы значения поглощения. Именно поэтому мы не ставили цель определения мелкомасштабных вариаций профиля отношения смеси CO_2 и поиск решения ограничивали классом гладких функций за счет введения соответствующей априорной информации. В заключение отметим также, что поскольку систематическая составляющая погрешности сравнима со случайной до высот порядка 80 км, то при обработке реальных данных оценка погрешности определения уровня начала падения значений отношения смеси составляет 5 км до высоты 80 км.

Качество полученных результатов можно оценить по величине спектральной невязки, т.е. по величине рассогласования измеренных значений интенсивности излучения и значений, рассчитанных по восстановленным профилям атмосферных параметров. В качестве примера приведен рис. 2, где показаны соответствующие результаты для одного из сканов для прицельной высоты 86.7 км. Как видно из рисунка, расчетный спектр с высокой точностью воспроизводит измеренные значения. На данной прицельной высоте суммарная погрешность измерений составляет примерно $0.007 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1})$. Представленные данные

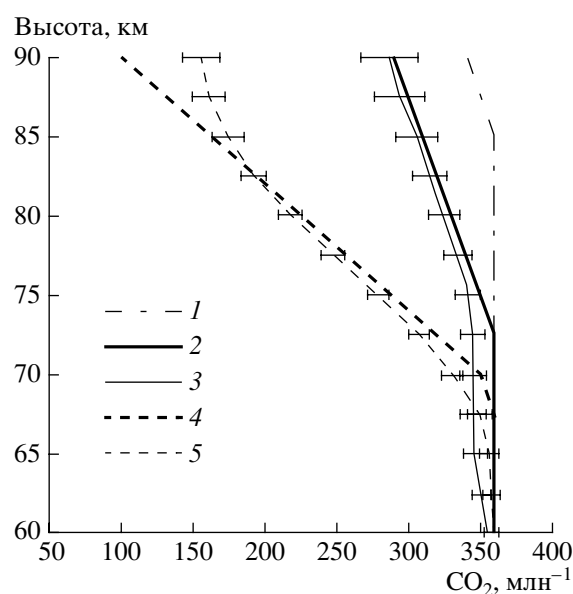


Рис. 1. Восстановление профилей отношения смеси CO_2 в численных экспериментах. 1 – априорный профиль; 2, 4 – “истинные” профили; 3, 5 – восстановленные профили (отрезками показана случайная компонента погрешности восстановления).

показывают, что невязка находится в “коридоре погрешности” практически во всем спектральном диапазоне.

Косвенным подтверждением качества представленной в нашей работе информации о содержании CO_2 в мезосфере является рис. 3, где изображены средние профили отношения смеси CO_2 , полученные в работе [10] и в настоящем исследовании. При этом надо учесть то, что профиль работы [10] получен для полного массива данных CRISTA-1 и только для дневных условий измерений уходящего излучения, а профиль, полученный нами, – по ограниченной выборке (272 скана) и для дневных и для ночных условий измерений. Как следует из рис. 3, оба профиля совпадают в пределах погрешностей измерений. Учитывая тот факт, что информация о содержании CO_2 в обеих работах была извлечена из измерений излучения в разных полосах поглощения CO_2 ([10] – 4.3 мкм, данная работа – 15 мкм), и физические принципы косвенных измерений содержания CO_2 были совершенно разные, можно считать сравнение, проведенное на рис. 3, как валидацию двух независимых измерений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА CRISTA-1

Рис. 3, где приведено сравнение средних профилей отношения смеси CO_2 по нашим данным и результатам работы [10] (ниже будем обозначать их как профили 1 и 2 соответственно), кроме хо-

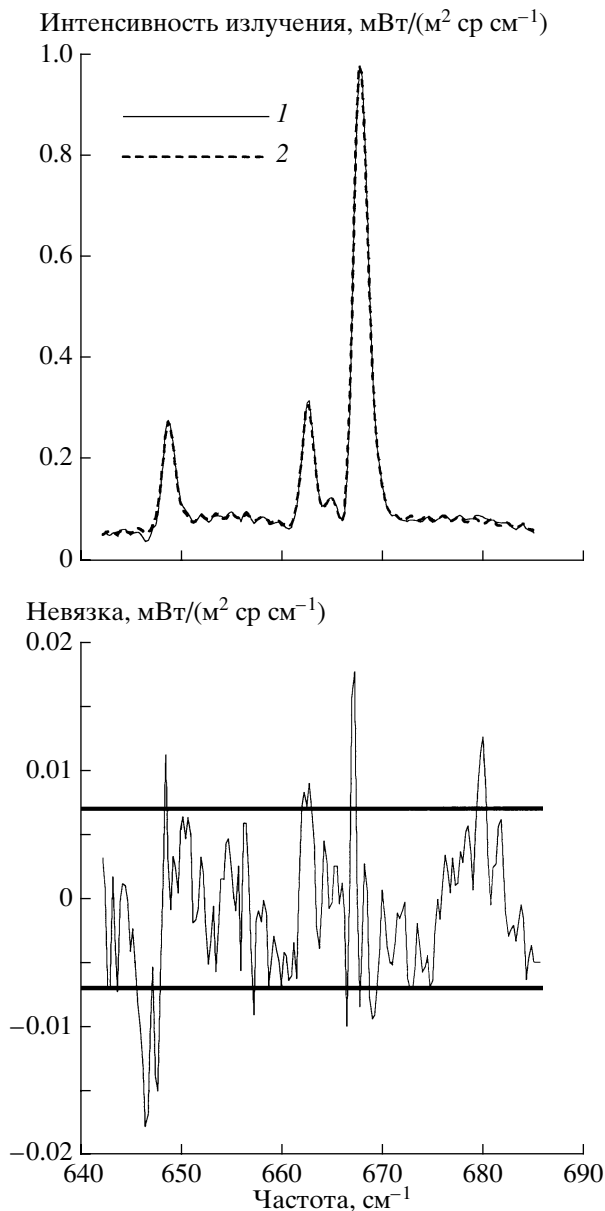


Рис. 2. Вверху: пример сопоставления измеренных значений излучения (1) со значениями, рассчитанными с использованием восстановленных профилей атмосферных параметров (2). Внизу: соответствующая спектральная невязка (разность измеренных и рассчитанных значений), прямыми линиями показан "коридор" погрешностей измерений. Прицельная высота 86.7 км, скан 1301.

рошего согласия двух независимых измерений, демонстрирует следующие особенности:

1. падение отношения смеси CO_2 для обоих средних профилей начинается приблизительно с одинаковых высот в районе 70 км;

2. скорость падения отношения смеси CO_2 с высотой для двух профилей на высотах 70–80 км существенно разная. Высотный градиент для профиля 1 заметно больше, чем для профиля 2;

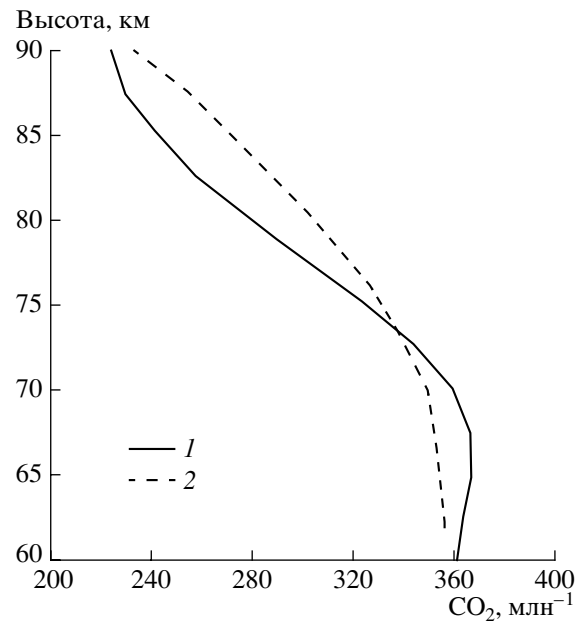


Рис. 3. Сравнение среднего профиля отношения смеси CO_2 , полученного в настоящей работе (1) со средним профилем, полученным независимым методом по данным эксперимента CRISTA-1 (2).

3. на высотах 60–70 км профиль 1 демонстрирует большие значения отношения смеси по сравнению с профилем 2. Максимум отличий достигает 18 млн^{-1} , т.е. порядка 5%. Выше 74 км профиль 1 дает меньшие значения отношения смеси, чем профиль 2. Отличия достигают 22 млн^{-1} , что составляет примерно 10%. На высоте 90 км значения отношения смеси по двум независимым измерениям практически совпадают.

На рис. 4 представлен профиль отношения смеси CO_2 , использованный в качестве априорного при решении обратной задачи (профиль из работы [21]), средний профиль по данным наших измерений и две кривые, огибающие максимальные и минимальные значения отношения смеси, полученные в результате интерпретации всех 272 сканов. Разброс значений отношения смеси значителен и включает в себя как ошибки измерений, так и естественные вариации содержания CO_2 . На высотах 60–75 км нами были получены в различных восстановлениях значения отношения смеси CO_2 , заметно превышающие модельное значение в 360 млн^{-1} . Отличия от этого модельного значения достигают 60 млн^{-1} . Если предположить, что на указанных выше высотах CO_2 равномерно перемешан и отклонения от модельного профиля обусловлены случайными и систематическими ошибками измерений (хотя нельзя полностью исключить естественные вариации отношения смеси на этих высотах), то этот разброс позволяет получить косвенно оценку погрешностей наших измерений на этих высотах. Приравнявая 60 млн^{-1}

¹ “трем сигма”, имеем, что среднеквадратические погрешности измерений отношения смеси на этих высотах составляют 20 млн^{-1} , т.е. 5.5%. Отметим, что эта косвенная оценка погрешностей восстановления очень хорошо согласуется с приведенными нами в разделе 2 независимыми оценками погрешностей.

Анализ индивидуальных восстановлений показал, что среди всего массива полученных профилей отношения смеси CO_2 встречаются два типа профилей. На рис. 5 приведены профили, демонстрирующие как быстрое падение отношения смеси CO_2 , начиная с высоты 70 км, так и профили, демонстрирующие практически постоянное отношение смеси до высот приблизительно 85 км. Наличие таких существенно разных профилей (их отличия существенно больше, чем погрешности восстановления индивидуальных профилей), свидетельствует о наличии значительных вариаций отношения смеси на высотах выше 75 км. Кроме того, рис. 5 частично может объяснять противоречие в данных различных независимых измерений (осуществленных в разное время и в разных географических пунктах) относительно высот начала падения отношения смеси CO_2 , которые мы кратко проанализировали во введении. Отметим, что по данным рис. 5 отличия в отношениях смеси для двух типов профилей достигают 160 млн^{-1} . Подчеркнем, что из всех 272 восстановленных нами реализаций профилей отношения смеси CO_2 лишь 6 реализаций демонстрируют примерное постоянство до высот 85 км (отношение смеси превышает 300 млн^{-1} на высоте 85 км).

Заметим, что в силу значительной систематической компоненты погрешности (20–30% на высотах 85–90 км) наш метод восстановления не позволяет обнаружить статистически значимые естественные вариации CO_2 в мезосфере. Этот вывод подтверждается результатами работы [16], где указано, что широтные и сезонные вариации отношения смеси CO_2 не превышают 10% на высоте 85 км и 14% на высоте 90 км. Подчеркнем, однако, что индивидуальные восстановления (рис. 5) тем не менее свидетельствуют о значительных вариациях содержания CO_2 в верхней мезосфере (на высотах 80–90 км).

На рис. 6 приведены средние профили отношения смеси CO_2 для дневных и ночных условий наблюдений. Для этих профилей (за счет усреднения) компонента случайной погрешности восстановления существенно меньше и составляет по нашим оценкам менее 1%. Отличия дневных и ночных средних профилей незначительны и достигают $10\text{--}12 \text{ млн}^{-1}$. В нижней мезосфере (высоты 60–75 км) дневные значения отношения смеси больше ночных, а на высотах 80–90 км наблюдается обратная картина. Отметим, что теоретическое моделирование газового состава атмосферы

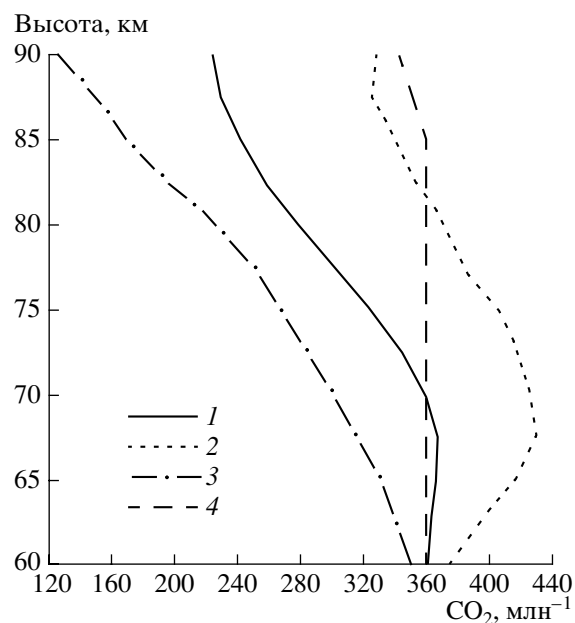


Рис. 4. 1 – средний профиль отношения смеси CO_2 , полученный на основе всех обработанных сканов; 2, 3 – границы области значений всего массива восстановлений; 4 – профиль, использованный в качестве априорного при решении обратной задачи.

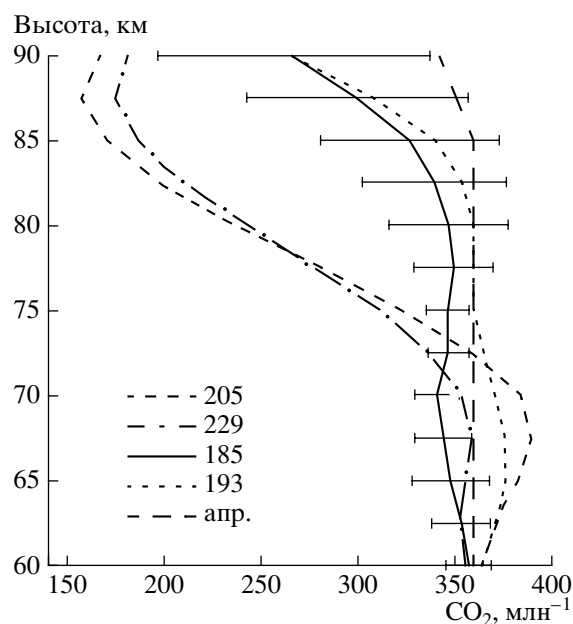


Рис. 5. Профили отношения смеси CO_2 , для которых характерны минимальные и максимальные значения CO_2 на высоте 85 км. Номера соответствующих сканов указаны в легенде, профиль, использованный в качестве априорного при решении обратной задачи, обозначен “апр.”. Погрешности восстановления показаны для одного из профилей.

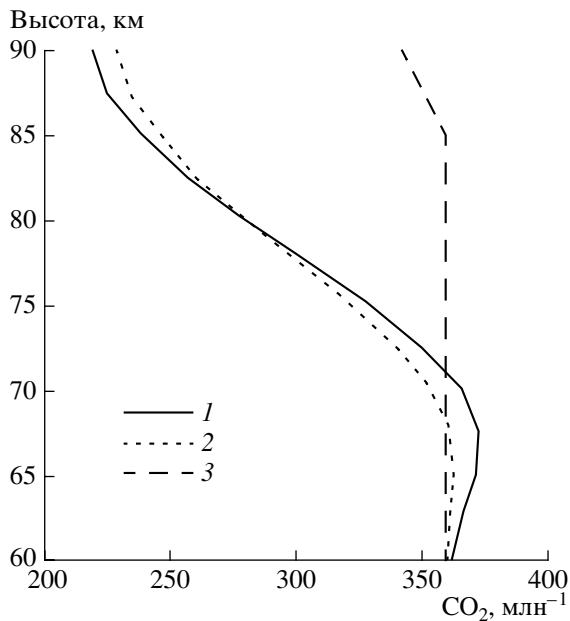


Рис. 6. Средние профили отношения смеси CO_2 , рассчитанные по дневным (1) и ночным (2) измерениям; 3 – профиль, использованный в качестве априорного при решении обратной задачи.

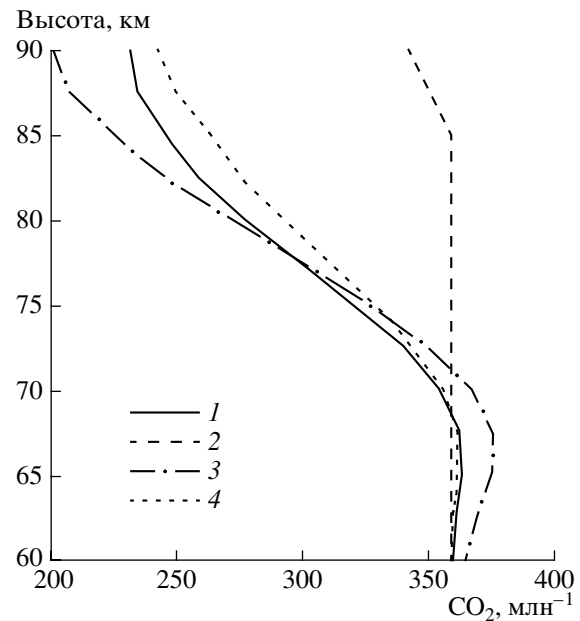


Рис. 7. Средние профили отношения смеси CO_2 , рассчитанные для широтных поясов: 30°S – 30°N (1), южнее 30°S (2), севернее 30°N (3). Кривая 4 – профиль, использованный в качестве априорного при решении обратной задачи.

(см., например, работу [6]) показало наличие выше 100 км суточных вариаций плотности углекислого газа. Ночью плотность CO_2 выше, и диффузионное равновесие должно наступать на меньших высотах, что мы и видим из рис. 6.

Пространственные вариации отношения смеси CO_2 можно проследить по данным рис. 7, на котором приведены средние профили для экваториального района (30°S – 30°N) и средних широт (30° – 60°) Северного и Южного полушарий. На высотах 85–90 км отличия между разными широтами, достигающие 40 млн^{-1} , можно считать статистически значимыми, так как компонента случайной погрешности восстановления в средних величинах существенно “подавлена”. На этих высотах минимальные отношения смеси наблюдаются в средних широтах Северного полушария (осень), а максимальные – в средних широтах Южного полушария (весна).

Анализ широтных зависимостей отношения смеси и плотности CO_2 можно продолжить с помощью рис. 8 и 9. На рис. 8 даны результаты восстановления отношения смеси CO_2 как функции широты на различных высотах в мезосфере и прямые линейной аппроксимации этой зависимости по методу наименьших квадратов. Хотя разброс данных отдельных восстановлений значителен, можно отметить следующие особенности. Как видно из рис. 8, широтные вариации отношения смеси на высоте 75 км отсутствуют. С другой стороны, на высотах 80, 85 и 90 км наблюдается

тенденция уменьшения отношения смеси CO_2 с юга (весна) на север (осень). Средний градиент падения отношения смеси составляет на высотах 80, 85 и 90 км соответственно 2.1 млн^{-1} , 4.2 млн^{-1} и 4.8 млн^{-1} в расчете на 10 градусов широты. Средние отличия в отношениях смеси между 50 градусами южной широты и 50 градусами северной широты на высотах 80 км, 85 км и 90 км составляют соответственно 21, 42 и 48 млн^{-1} .

Рис. 9 демонстрирует аналогичные широтные вариации плотности CO_2 на разных высотах в мезосфере. На высотах от 75 до 90 км проявляется тенденция (в разной степени для разных высот) уменьшения концентрации углекислого газа с юга на север. Средние широтные градиенты концентрации составляют на высотах 75 км, 80 км, 85 км и 90 км соответственно 5.0×10^8 , 2.1×10^8 , 9.0×10^7 и $2.5 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ на 10 градусов широты.

Ранее мы сопоставили результаты восстановления отношения смеси CO_2 по данным эксперимента CRISTA-1 двумя группами – Вуппертальского университета [10] и Санкт-Петербургского государственного университета (настоящая работа). Это сопоставление продемонстрировало очень хорошее общее согласие двух независимых подходов к определению содержания CO_2 в мезосфере. Основное отличие состоит в разных высотных градиентах падения отношения смеси. На многих рисунках результаты наших восстановлений сопоставлялись с модельным профилем из работы [21], который использовался нами как априори заданный про-

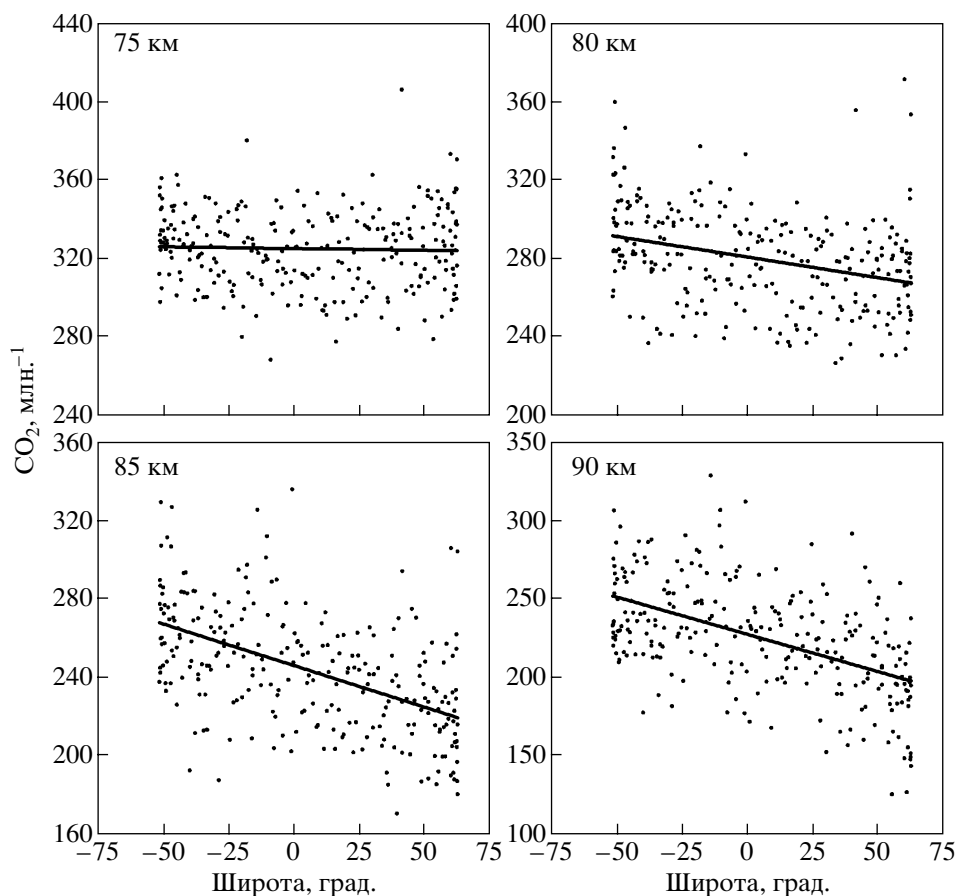


Рис. 8. Широтные распределения значений отношения смеси углекислого газа для высот 75, 80, 85 и 90 км. Сплошной линией показана аппроксимация широтной зависимости линейной функцией.

филь при решении обратной задачи. Приведем сводный рис. 10, где даны средний профиль отношения смеси CO_2 по данным наших исследований и различные профили, предложенные в разных работах.

Сравнение наших результатов восстановления с модельными профилями (кривые 3, 4, 7) показывает, что наблюдаются существенные отличия между высотами начала падения отношения смеси CO_2 . Однако наблюдается удовлетворительное согласие наших результатов с результатами, полученными в эксперименте ATMOS до высоты 85 км. Не только ранние работы, но и результаты работы [10], полученные с помощью современной численной модели TIME-GCM, демонстрируют, что теоретические модели предсказывают начало падения отношения смеси на заметно большей высоте, чем наблюдалось в большинстве экспериментов. Это противоречие в значительной степени снимается, если принять во внимание обнаруженное нами разнообразие высотного хода отношения смеси во всем ансамбле восстановленных нами профилей (рис. 4). При этом, однако, в большинстве случаев восстановления, как и для средних данных

(рис. 3), экспериментальные результаты свидетельствуют о неадекватности численных моделей атмосферы в описании высоты, ниже которой углекислый газ равномерно перемешан.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведен анализ современного состояния проблемы изучения содержания углекислого газа в мезосфере. Показано, что современные экспериментальные данные, а также результаты численного моделирования демонстрируют, прежде всего, различные значения высотного уровня начала падения отношения смеси CO_2 , т.е. уровня, ниже которого углекислый газ равномерно перемешан. Этот уровень по различным данным варьируется от 70 до 100 км. Различны высотные градиенты падения отношения смеси в слое 70–100 км.

Описан алгоритм восстановления содержания CO_2 (концентрации и отношения смеси) по данным измерений интенсивности уходящего излучения горизонта Земли в 15-мкм полосе CO_2 с помощью спектрометра CRISTA. Приведен анализ погрешностей восстановления.

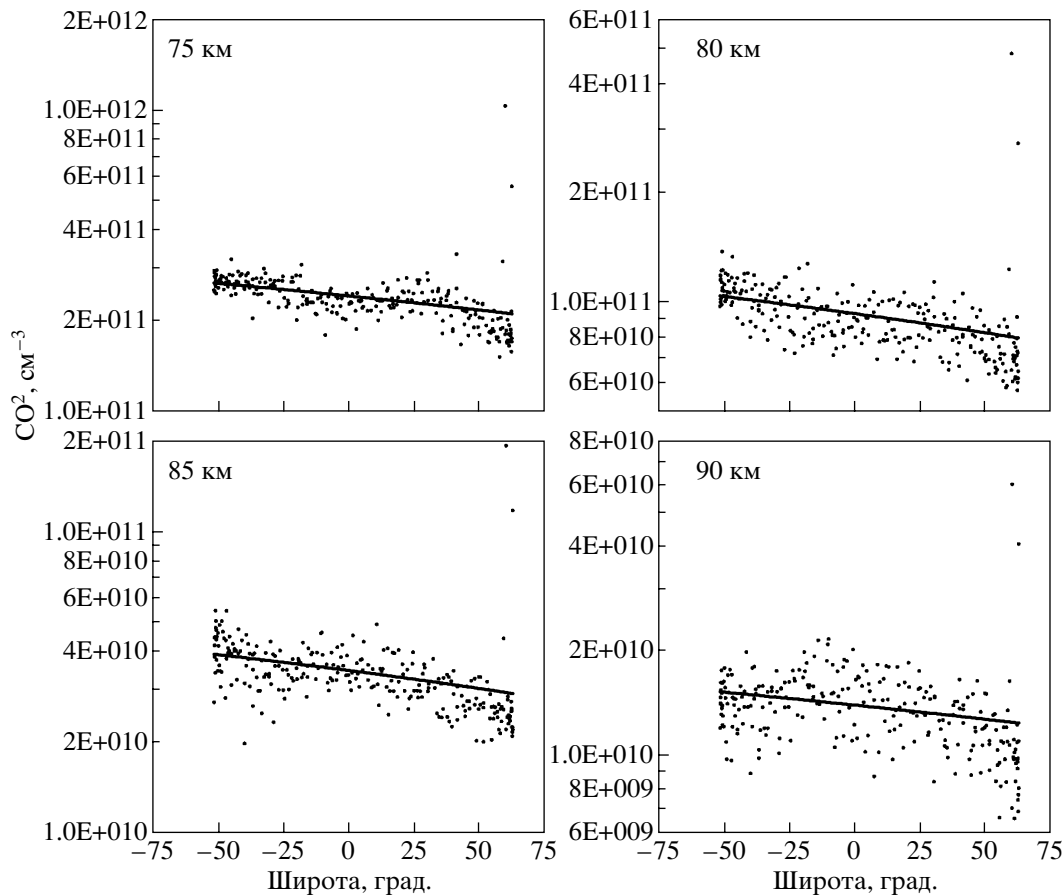


Рис. 9. Широтные распределения концентрации углекислого газа для высот 75, 80, 85 и 90 км. Сплошной линией показана аппроксимация широтной зависимости линейной функцией.

Представлены результаты определения профилей содержания углекислого газа в мезосфере в диапазоне высот 60–90 км, полученные при интерпретации данных измерений уходящего излучения горизонта Земли (272 скана) в 15-мкм полосе CO₂ спутниковым прибором CRISTA в ноябре 1994 г. в широтном диапазоне от 55°S до 65°N, и выполнен их анализ.

Сформулируем кратко основные выводы настоящей работы:

1. Погрешности восстановления отдельных профилей отношения смеси составляют менее 10% до высот порядка 80 км, 20 и 30% на высотах 85 и 90 км.

2. Сравнения независимых восстановлений содержания CO₂ по данным эксперимента CRISTA-1, выполненных в Санкт-Петербургском государственном университете и Вуппертальском университете [10], демонстрируют очень хорошее общее согласие средних профилей. Падение отношения смеси CO₂ с высотой в независимых восстановлениях (использующих разные полосы поглощения CO₂ и разные физические принципы дистанционных измерений) в большинстве случаев начинается

с 70–75 км. Это согласие является косвенной валидацией качества данных, полученных разными методами. При этом, однако, скорость падения отношения смеси CO₂ с высотой для сравниваемых средних профилей на высотах 70–80 км существенно различная.

3. Разброс восстановленных значений отношения смеси CO₂ значителен и включает в себя как ошибки измерений, так и естественные вариации содержания CO₂. Разделение этих компонент вариаций в настоящее время затруднительно. Однако полученные нами данные несомненно свидетельствуют, что среди всего массива восстановленных профилей отношения смеси CO₂ встречаются два типа профилей – профили, демонстрирующие быстрое падение отношения смеси CO₂, начиная с высоты 70 км, и профили, демонстрирующие практически постоянное отношение смеси до высот приблизительно 85 км (профилей этого типа существенно меньше). Эти данные частично объясняют противоречия в данных различных независимых измерений (осуществленных в разное время и в разных географических пунктах) относительно высот начала падения отношения смеси CO₂. Они также свиде-

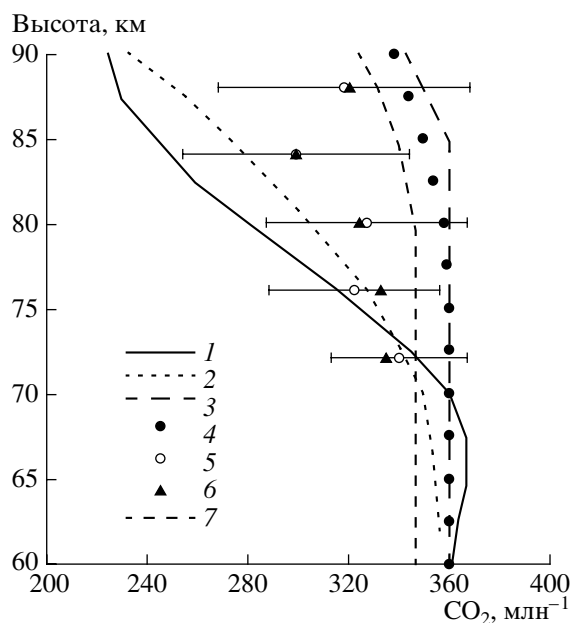


Рис. 10. Сравнение среднего профиля отношения смеси CO_2 , полученного в настоящей работе (1) с другими измерениями и моделями: 2 – средний профиль, полученный независимым методом по данным эксперимента CRISTA-1 (рис. 13 в работе [10]); 3 – модельный профиль, использованный в [21]; 4 – профиль модели AFGL-86, масштабированный к значению 360 млн^{-1} в области полного перемешивания; 5, 6 – результаты эксперимента ATMOS [13]; 7 – модельный профиль, использованный в [22].

тельствуют об изменчивости процессов перемешивания и диффузионного равновесия в земной атмосфере на высотах 70–90 км.

4. Анализ средних профилей отношения смеси CO_2 для дневных и ночных условий наблюдений не обнаружил значимых суточных вариаций CO_2 . Однако, учитывая, что случайные ошибки восстановления существенно уменьшаются при усреднении данных, можно отметить, что отличия дневных и ночных средних профилей достигают $10\text{--}12 \text{ млн}^{-1}$. В нижней мезосфере (высоты 60–75 км) дневные значения отношения смеси больше ночных, а на высотах 80–90 км наблюдается обратная картина.

5. Получены широтные зависимости отношения смеси и концентрации CO_2 . Обе эти характеристики демонстрируют уменьшение содержания углекислого газа с юга на север. Отметим, что в работе [10] для плотности CO_2 на высоте 85 км обнаружена противоположная широтная зависимость – плотность CO_2 возрастает к северным полярным широтам. Однако в работе [10] эта зависимость была получена для другого эксперимента – CRISTA-2. Напомним, что эксперимент CRISTA-2 был проведен 8–16 августа 1997 г., а представленные в настоящей работе результаты

относятся к 4–12 ноября 1994 г. (эксперимент CRISTA-1). Возможно, что обнаруженные отличия демонстрируют сезонные или межгодовые вариации в содержании CO_2 на этих высотах.

6. Сравнение полученных результатов восстановления с модельными профилями показывает, что наблюдаются существенные отличия между высотами начала падения отношения смеси CO_2 . В большинстве случаев восстановления, как и для средних данных, экспериментальные результаты свидетельствуют о неадекватности численных моделей атмосферы в описании высоты равномерного перемешивания углекислого газа.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 00-05-65223 и при поддержке Министерства образования Российской Федерации в рамках гранта 015.01.01.085 по программе “Фундаментальные исследования высшей школы в области естественных и гуманитарных наук. Университеты России”. Авторы выражают благодарность коллегам из Вуппертальского университета за предоставленные данные эксперимента CRISTA-1 и за дискуссии по теме работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric chemistry and physics // From air pollution to climate change. Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc., 1998. P. 1326.
2. *Golitsin G.S. et al.* Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere // *Geoph. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 14. P. 1741–1744.
3. *Offermann D., Grossmann K.U.* Thermospheric density and composition as determined by a mass spectrometer with cryo ion source // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. № D5. P. 8296–8304.
4. *Philbrick C.R., Faucher G.A., Trzcinski E.* Rocket measurements of mesospheric and lower thermospheric composition // *Space Research, Akademie Berlin.* 1973. V. 13. P. 255–260.
5. *Offermann D. et al.* Neutral gas composition measurements between 80–120 km // *Planet. Space Sci.* 1981. V. 29. № 4. P. 747–764.
6. *Trinks H., Fricke K.H.* Carbon dioxide concentration in the lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. № D12. P. 3883–3886.
7. *Hays P.B., Oliver J.J.* Carbon dioxide and monoxide above the troposphere // *Planet. Space Sci.* 1970. V. 18. № 10. P. 1729–1733.
8. *Wofsy S.C., McConnell J.C., McElroy M.B.* Atmospheric CH_4 , CO , and CO_2 // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. № D8. P. 4477–4493.
9. *Rodrigo R. et al.* Neutral atmospheric composition between 60 and 220 km: A theoretical model for mid-latitudes // *Planet. Space Sci.* 1986. V. 34. № 4. P. 723–743.
10. *Kaufmann M. et al.* The vertical and horizontal distribution of CO_2 densities in the upper mesosphere and lower

- thermosphere as measured by CRISTA // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D23.
11. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы (обзор) // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1989. Т. 26. № 5. С. 451–472.
 12. Girard A. et al. Global results of GRILLE spectrometer experiment on board Spacelab 1 // *Planet. Space Sci.* 1988. V. 36. № 2. P. 291–300.
 13. Rinsland C. et al. Middle and upper atmosphere pressure-temperature profiles and the abundance of CO₂ and CO in the upper atmosphere from ATMOS/Spacelab 3 observations // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № D18. P. 20 479–20 295.
 14. Wintersteiner P.P. et al. Line-by-line radiative excitation model for the nonequilibrium atmosphere: Application to CO₂ 15 μm emission // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № D16. P. 18 083–18 117.
 15. Lopez-Puertas M., Taylor F.W. Carbon dioxide 4.3-μm emission in the Earth's atmosphere: a comparison between Nimbus 7 SAMS measurements and non-local thermodynamic equilibrium radiative transfer calculations // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № D10. P. 13045–13068.
 16. Zaragoza G., Lopez-Puertas M., Lopez-Valverde M.A., Taylor F.W. Global distribution of CO₂ in the upper mesosphere as derived from UARS/ISAMS measurements // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № D15. P. 19 829–19 839.
 17. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO₂: 1. Описание метода и анализ точности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 6. С. 789–800.
 18. Timofeyev Yu.M. Satellite IR sounding of the non-LTE middle atmosphere // *IRS-2000: Current Problems in Atmospheric Radiation. Proc. International Radiation Symposium, St. Petersburg, Russia, 24–29 July 2000 / Eds: Smith W. and Timofeyev Yu. Deepak Publishing, 2001. P. 757–760.*
 19. 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 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 6. С. 801–810.
 20. Clarmann T.V., Linden A., Funke B., Dudhia A., Edwards D.P., Lopez-Puertas M., Kerridge B., Kostsov V., Timofeyev Yu. Intercomparison of non-LTE radiative transfer codes // *IRS-2000: Current Problems in Atmospheric Radiation. Proc. International Radiation Symposium, St. Petersburg, Russia, 24–29 July 2000 / Eds: Smith W. and Timofeyev Yu. Deepak Publishing, 2001. P. 765–768.*
 21. Shved G.M., Kutepov A.A., Ogibalov V.P. Non-local thermodynamic equilibrium in CO₂ in the middle atmosphere. I. Input data and populations of the ν₃ mode manifold states // *J. Atmosph. and Solar-Terrestrial Phys.* 1998. V. 60. № 3. P. 289–314.
 22. Stiller G.P. et al., Stratospheric and mesospheric pressure-temperature profiles from rotational analysis of CO₂ lines in atmospheric trace molecule spectroscopy/ATLAS 1 infrared solar occultation spectra // *J. Geophys. Res.* 1995. V.100. № D2. P. 3107–3117.