

УДК 551.521.32

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УХОДЯЩЕГО НЕРАВНОВЕСНОГО ИК ИЗЛУЧЕНИЯ В 15 МКМ ПОЛОСЕ CO₂: 2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА CRISTA

© 2001 г. В. С. Косцов*, Ю. М. Тимофеев*, К. Гроссман**, М. Кауфманн**, Й. Оберхайде**

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

***Вунпертальский университет, Германия
Wuppertal, Gauss-strasse 20, 42097 Wuppertal, Germany
E-mail: gross@wpos2.physik.uni-wuppertal.de
jens@wpos2.physik.uni-wuppertal.de*

Поступила в редакцию 23.11.2000 г., после доработки 12.02.2001 г.

Метод комплексного восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров по спутниковым измерениям ИК излучения на касательных трассах, учитывающий эффект нарушения локального термодинамического равновесия (ЛТР), использовался для интерпретации данных эксперимента CRISTA (спектральная область 15 мкм). Получены профили температуры в мезосфере и нижней термосфере. Учет эффекта нарушения ЛТР позволил выполнить восстановление профилей температуры вплоть до высоты 120 км. Продемонстрировано удовлетворительное согласие между профилями температуры, восстановленными дистанционным методом, и профилями температуры, полученными независимо методом падающих сфер, проанализированы причины наблюдающихся расхождений. Показано, что пренебрежение эффектом нарушения ЛТР может приводить, начиная с высот порядка 75 км, к ошибкам в определении температуры, достигающим 30° К. Проведено сравнение восстановленных профилей температуры с климатологическими данными. Показано, что информация о термической структуре мезосферы и нижней термосферы, полученная в спутниковом эксперименте, находится в хорошем согласии с климатологическими данными. Были отмечены следующие характерные особенности термической структуры: низкая и холодная летняя мезопауза, высокая и теплая зимняя мезопауза, мезосферные инверсии большой амплитуды (до 50° К) на различных высотах, наличие волновых структур. В мезопаузы минимальные значения температурных вариаций (9–12° К) наблюдались на высоте 75 и 100 км, максимальные (30° К) – на высоте 87.5 км.

1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные исследования мезосферы и нижней термосферы (МНТ), проводившиеся в последние десятилетия различными методами, дали возможность изучить многие особенности динамики и температурного режима этих слоев земной атмосферы. С помощью ракетных измерений различного типа, релеевских и резонансных лидаров, различных спутниковых измерений была получена информация о пространственных и временных (суточных, месячных и сезонных) вариациях температуры в широком диапазоне высот. Были созданы климатологические модели, которые описывают высоту и температуру мезопаузы, а также широтные и сезонные вариации температурного профиля, например модель CIRA-1986 (COSPAR International Reference Atmosphere) [1–4]. Большое внимание уделялось исследованиям температурных инверсий в мезосфере (впер-

вые описанных в работе [5]) и влиянию волновых процессов на термический режим атмосферы.

В последние годы были созданы различные численные модели МНТ, которые учитывают радиационные, динамические и химические процессы [6–8]. В работе [8] получил объяснение ряд эмпирических фактов, например факт возможного существования двух отдельных уровней мезопаузы и соответствующие особенности температуры и ее широтной зависимости.

В настоящее время, несмотря на наличие большого объема эмпирических данных о термическом режиме и динамике МНТ и определенные успехи теоретического описания МНТ, требуется дальнейшее изучение этой области атмосферы в силу следующих причин.

– Экспериментально обнаружено существенное охлаждение средней атмосферы в течение последних десятилетий [9–13]. Причины этого явления до конца не выяснены.

– Важной задачей является количественное описание механизмов формирования температурных инверсий в мезосфере, которые обладают чрезвычайно изменчивыми пространственными, временными и амплитудными характеристиками. В настоящее время предполагается, что эти инверсии обусловлены совместным действием радиационного, волнового и химического источников тепла. Однако относительные вклады этих источников требуют количественной оценки.

– Эпизодический характер измерений газового и аэрозольного состава мезосферы не позволяет совершенствовать климатологические и численные модели МНТ и достоверно объяснить причины наблюдающихся трендов.

– В средней атмосфере наблюдается эффект нарушения локального термодинамического равновесия для колебательных состояний молекул различных атмосферных газов. Для ряда газов и их полос поглощения (например 15 мкм полосы CO_2) модели процессов формирования неравновесной населенности колебательных состояний хорошо развиты. Однако для большого числа других полос и газов скорости таких процессов известны с недостаточной точностью (например, для полос озона в области 9.6 мкм). Наличие экспериментальной информации о состоянии средней атмосферы имеет важное значение для проверки и совершенствования моделей формирования неравновесной населенности колебательных состояний молекул различных атмосферных газов.

Перечисленные выше причины требуют дальнейших интенсивных и всесторонних исследований МНТ различными методами в глобальном масштабе. Важная роль в этих исследованиях принадлежит спутниковым наблюдениям. К настоящему времени многочисленные спутниковые эксперименты (SME, LIMS, CLAES, ISAMS, HALOE, ATMOS и др.) позволили получить большой объем информации о параметрах МНТ (см. например работы [14–19]).

В ноябре 1994 г. и августе 1997 г. были успешно проведены два этапа космического эксперимента с прибором CRISTA (Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere), в результате которых в квазиглобальном масштабе (широтный диапазон 60°S – 60°N .) получено большое количество информации о температуре и газовом составе стратосферы и мезосферы [20, 21]. В работе [22] описан новый метод интерпретации измерений уходящего ИК излучения на касательных трассах, который явно учитывает эффект нарушения ЛТР и позволяет с точностью 1 – 9°K (в зависимости от высоты) определять вертикальные профили в диапазоне высот 40–120 км. В настоящей работе приведены примеры использования этого метода для интерпретации измерений излучения в 15 мкм полосе CO_2 прибором CRISTA и

проанализированы результаты определения профилей температуры.

2. ИЗМЕРЕНИЯ В 15 МКМ ПОЛОСЕ ПРИБОРОМ CRISTA И ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Прибор CRISTA, схема проведения эксперимента и процесс предварительной обработки данных детально описаны в работах [20, 21]. Алгоритм комплексного восстановления параметров атмосферы с учетом эффекта нарушения ЛТР, использовавшийся для интерпретации данных измерений в 15 мкм полосе, описан в первой части работы [22]. Для интерпретации были выбраны спектры уходящего излучения, в спектральных диапазонах 642 – 685 см^{-1} (эксперимент CRISTA1) и 661 – 690 см^{-1} (эксперимент CRISTA2) для области прицельных высот 40–150 км. Алгоритм решения обратной задачи основывался на методе статистической регуляризации с использованием модельных ковариационных матриц и включал следующий набор неизвестных параметров: кинетическую температуру, давление, колебательные температуры состояний молекул CO_2 и отношение смеси CO_2 .

В силу недостаточного спектрального разрешения измерений (около 1.2 см^{-1}) существует проблема разделения переменных обратной задачи. Поэтому обратная задача была сформулирована относительно четырех “эффективных” колебательных температур, которые могут быть представлены в виде линейной комбинации колебательных температур состояний 01101, 02201 и 03301 молекул четырех наиболее распространенных изотопов CO_2 (подробности см. в работе [22]). Ниже в большинстве случаев мы будем опускать определение “эффективные”.

Были обработаны измерения, сделанные во время нескольких атмосферных сканов (термином “атмосферный скан” будем обозначать серию измерений спектров излучения для всей области прицельных высот от наименьшей до наибольшей). Параметры сканов приведены в табл. 1 (номер скана, дата, среднее время по Гринвичу, координаты и зенитный угол солнца, который характеризует местное время). Как видно из таблицы, сканы охватывают область от 51.4°S до 59.7°N , что позволяет проанализировать широтные особенности поля температуры в МНТ. Большинство сканов относятся к 5.11.1994 г. (дневное время). Два скана 9.11, были использованы для сравнения профилей температуры, полученных по спутниковым данным, с профилями, полученными независимым методом. Все вышеупомянутые измерения проводились во время первого эксперимента. Сканы 14.08.1997 г. относятся ко второму эксперименту. Он выбран по

Таблица 1. Характеристики сканов спутниковых измерений, использованных в работе

№ скана	Дата	Среднее время по Гринвичу	Широта, град	Долгота, град	Зенитный угол Солнца, град
Эксперимент CRISTA-1 (1994)					
01201	5.11.1994 г.	13:49	-171.7533	-51.3726	104.4757
01213		14:00	-111.4522	-43.0782	70.1037
01221		14:07	-88.7997	-23.2978	50.1021
01229		14:14	-73.9173	-0.4228	38.8332
01237		14:21	-60.0704	22.9389	43.5847
01245		14:28	-40.7477	44.7577	60.4848
01253		14:35	-2.9990	59.7026	82.0814
01309		15:25	-164.8781	-52.3639	88.9262
01345		15:56	-71.1459	38.0760	54.3170
10799	9.11.1994 г.	14:55	-80.8740	35.0798	60.6828
Эксперимент CRISTA-2 (1997)					
11339	14.08.1997 г.	00:41	-146.142	66.4354	55.9893

причине наблюдения в нем мезосферных облаков и используется для косвенной проверки качества предложенной методики интерпретации измерений с учетом эффекта нарушения ЛТР [22].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1. Валидация дистанционных измерений. Для объективной оценки точности дистанционных измерений, как правило, проводятся специальные сопоставления с результатами независимых измерений. В исследованиях МНТ в рамках проекта CRISTA программа сопоставлений включала запуски ракет и использование метода падающих сфер (МПС) для измерений профиля температуры. Обычно измерения методом падающих сфер дают информацию о температуре лишь до высоты порядка 90 км, и, таким образом, невозможно провести сравнение профилей в нижней термосфере. В качестве примера сопоставления данных, получаемых из измерений с помощью прибора CRISTA, с результатами независимых измерений приведен рис. 1. На этом рисунке представлено сравнение профилей температуры, полученных спутниковым методом, с результатами определения профилей на станции Wallops Island (37.9°N, 75.5°W) 5 и 9.11.1994 г. Расхождение по времени между спутниковыми измерениями и измерениями МПС 5.11 было мало и составляло несколько минут. 9.11 расхождение было существенно больше и составляло 40 мин. Пространственное рассогласование было существенным для обоих случаев, при этом отметим, что достичь малого расхождения практически невозможно. Измерения МПС являются локальными, а спутниковые изме-

рения имеют низкое горизонтальное разрешение, обусловленное геометрией наблюдений, движением спутника и конечным временем регистрации спектра. На рис. 1а для сравнений представлены также профили температуры, восстановленные по спутниковым измерениям без учета нарушения ЛТР. Как можно видеть из рисунка, профиль кинетической температуры, полученный по данным CRISTA с учетом нарушения ЛТР, и профиль, полученный МПС, хорошо согласуются в диапазоне высот 40–75 км. И те и другие измерения зарегистрировали температурную инверсию в мезосфере на высоте 57.5–60 км. Инверсия по спутниковым данным более слабая, поскольку профиль, полученный спутниковым методом, как мы уже отметили, является сглаженным. Наиболее интересно для сравнения область высот выше 75 км, где начинает проявляться эффект нарушения ЛТР. В окрестности 77.5 км наблюдается очень хорошее согласие между профилем, восстановленным с учетом нарушения ЛТР, и профилем, полученным МПС. С другой стороны, профиль, полученный по данным CRISTA, но без учета нарушения ЛТР, начинает сильно отличаться от измерений по МПС уже с высот 75 км. Существенно отметить, что восстановление без учета нарушения ЛТР практически не обнаруживает температурной инверсии. В области высот 80–85 км профиль, восстановленный с учетом нарушения ЛТР, также более близок к результатам МПС. Однако при рассмотрении области выше 80 км важно иметь в виду, что погрешности МПС в верхних слоях могут резко возрастать. Это возрастание обусловлено особенностями метода – значение температуры в высшей точке не определяется из измерений, а задается из климатологических данных. Как следствие, погрешности метода падаю-

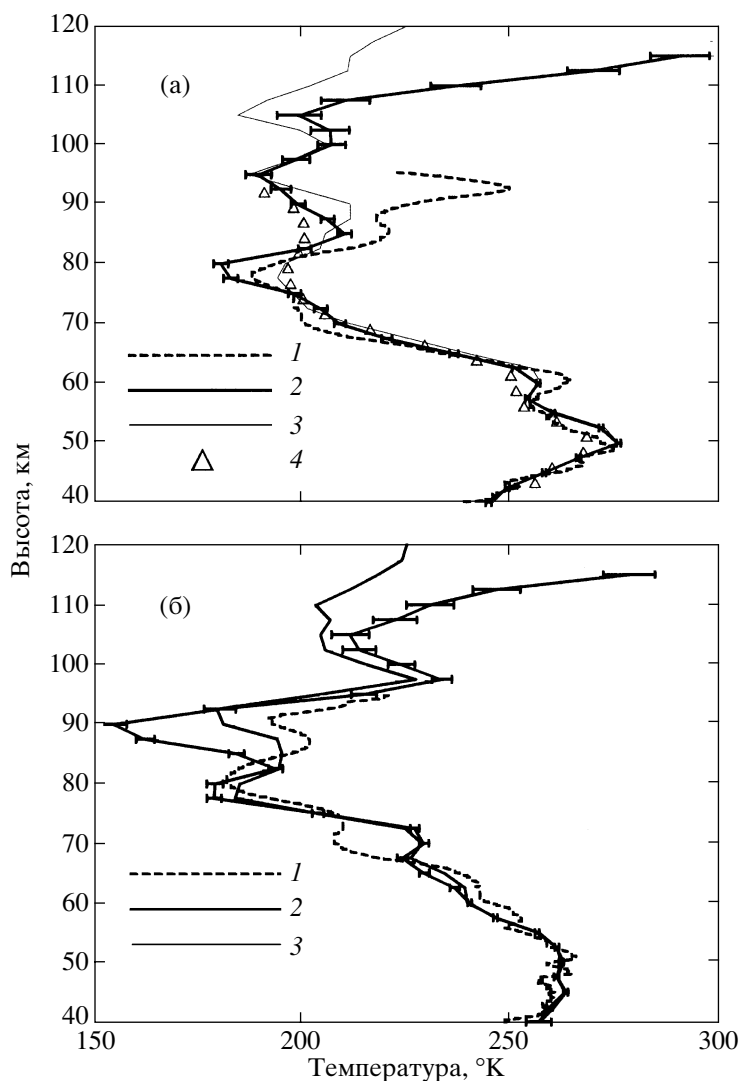


Рис. 1. Профили кинетической температуры над станцией Уоллоис-Айленд по измерениям методом падающих сфер (1), кинетической температуры (2), колебательной температуры изотопа CO_2 626 (3) и кинетической температуры без учета эффекта нарушения ЛТР (4), восстановленные по данным измерений с помощью прибора CRISTA 5 ноября (а) и 9 ноября (б) 194 г. Спутниковые данные соответствуют скану 1345 (а), скану 10799 (б).

щих сфер в верхних слоях могут быть весьма велики, но они уменьшаются с уменьшением высоты [23]. Как видно из рис. 1, расхождения между спутниковыми данными и данными МПС в области 85–95 км очень велики и возрастают с высотой, достигая 35°K . Эти расхождения можно приписать погрешностям МПС из-за отличия реального профиля температуры от среднего профиля, использованного в МПС.

Перейдем к рассмотрению результатов, полученных 9.11 (рис. 1б). Для данного случая в диапазоне высот 40–85 км наблюдается неудовлетворительное согласие результатов спутниковых измерений и результатов измерений МПС, что обусловлено, вероятно, большим пространственно-временным рассогласованием экспериментов. Наибольшие рас-

хождения наблюдаются на высотах 85–92.5 км. С другой стороны, на высотах больше 90 км (наиболее интересных с точки зрения зондирования неравновесной атмосферы) результаты CRISTA хорошо согласуются с результатам МПС. Таким образом, наиболее вероятными причинами расхождений являются пространственно-временное рассогласование измерений и значительная временная изменчивость состояния атмосферы в области мезопаузы. Аргументом в пользу такого вывода служит одинаковое качественное поведение профилей и тот факт, что локальные особенности профиля, полученного МПС, сдвинуты вверх примерно на 2.5 км по сравнению с профилем, полученным по данным CRISTA. Отметим, что в рассматриваемом случае эффект нарушения ЛТР проявляется с высоты 77.5 км и весьма существен

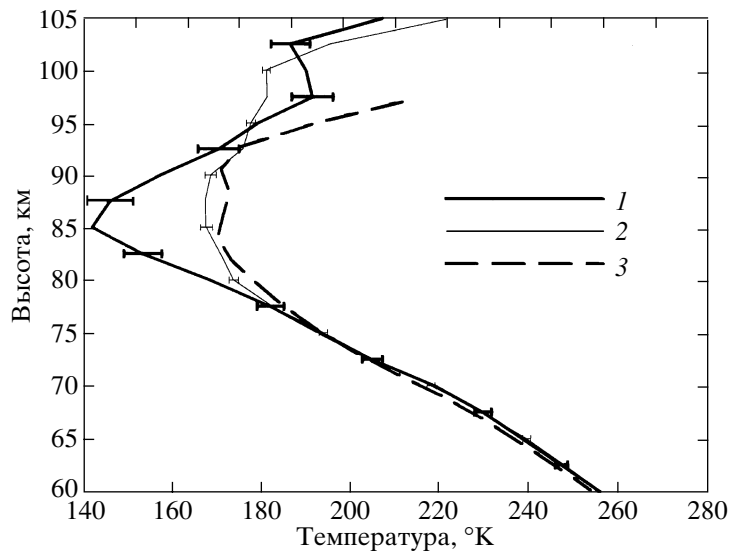


Рис. 2. Восстановленные по данным эксперимента CRISTA-2 с учетом эффекта нарушения ЛТР профили кинетической температуры (1), и колебательной температуры T_{v626} (2) и профиль кинетической температуры, восстановленный без учета нарушения ЛТР и вариаций содержания CO_2 (3).

в районе мезопаузы, которая характеризуется низкой температурой и находится на высоте 90 км. В терминах отклонений колебательной температуры основного изотопа (626) от кинетической температуры эффект нарушения ЛТР достигает 30°K на высотах 87.5–90 км.

Анализ качества восстановления кинетической температуры для неравновесной атмосферы с помощью метода [22] был осуществлен нами также на основе интерпретации одного из измерений во время эксперимента CRISTA-2 (скан 11339, 66.55°N , 146.41°W , 14.08.1997 года) – см. рис. 2. Во время указанного скана на высоте 85 км наблюдались мезосферные облака. Хорошо известно, что формирование мезосферных облаков возможно только при низких температурах. Кинетическая температура, восстановленная без учета нарушения ЛТР, характеризовалась значениями $170\text{--}175^\circ\text{K}$ в окрестности 85 км (рис. 2). Эти значения слишком высоки для того, чтобы объяснить и промоделировать наличие мезосферных облаков. Комплексный метод восстановления, учитывающий нарушение ЛТР, дал значение температуры около 145°K (на 30°K меньше) в этой высотной области. Это значение полностью согласуется с кинетикой формирования мезосферных облаков. Как видно из рисунка, эффект нарушения ЛТР в области мезопаузы очень существен и достигает 30°K в терминах отклонений колебательной температуры основного изотопа CO_2 от кинетической температуры. Отметим, что профиль кинетической температуры, полученный без учета нарушения ЛТР, практически совпадает с профилем колебательной температуры для основного изотопа CO_2 до высоты

92.5 км. Таким образом, приведенный пример наглядно демонстрирует, к каким погрешностям может приводить пренебрежение эффектом нарушения ЛТР уже на высотах порядка 80 км при традиционном подходе к решению задачи термического зондирования.

3.2. Анализ особенностей температурного режима района МНТ. Перейдем к детальному рассмотрению основных особенностей профилей кинетической температуры, восстановленных по данным CRISTA. При этом следует иметь в виду, что восстановленные профили отражают практически “мгновенное” состояние атмосферы (время одного скана составляет менее минуты) при горизонтальном усреднении порядка 200–400 км. На рис. 3а показаны два профиля кинетической температуры (сканы 01201 и 01309), характеризующиеся холодной и низкой мезопаузой. Значения высоты мезопаузы в этих случаях (87.5 км) хорошо согласуются с данными работы [3] для рассматриваемого географического района и сезона. Оба профиля имеют особенности – локальные минимумы температуры на высоте 100 км. Кроме того, профиль, соответствующий скану 01309, характеризуется мезосферной инверсией на высоте 75 км (толщина инверсионного слоя 5 км). Температурные профили, соответствующие сканам 01229 и 01253 (рис. 3б), дают пример высокой мезопаузы, которая характерна для экваториальных районов и для полярных районов зимой [3]. Мезопауза находится на высоте 105 км и имеет температуру $170\text{--}195^\circ\text{K}$. На этих профилях видны множественные инверсии. Отметим также значительную температурную изменчивость, достигающую 50°K в области 65–70 км.

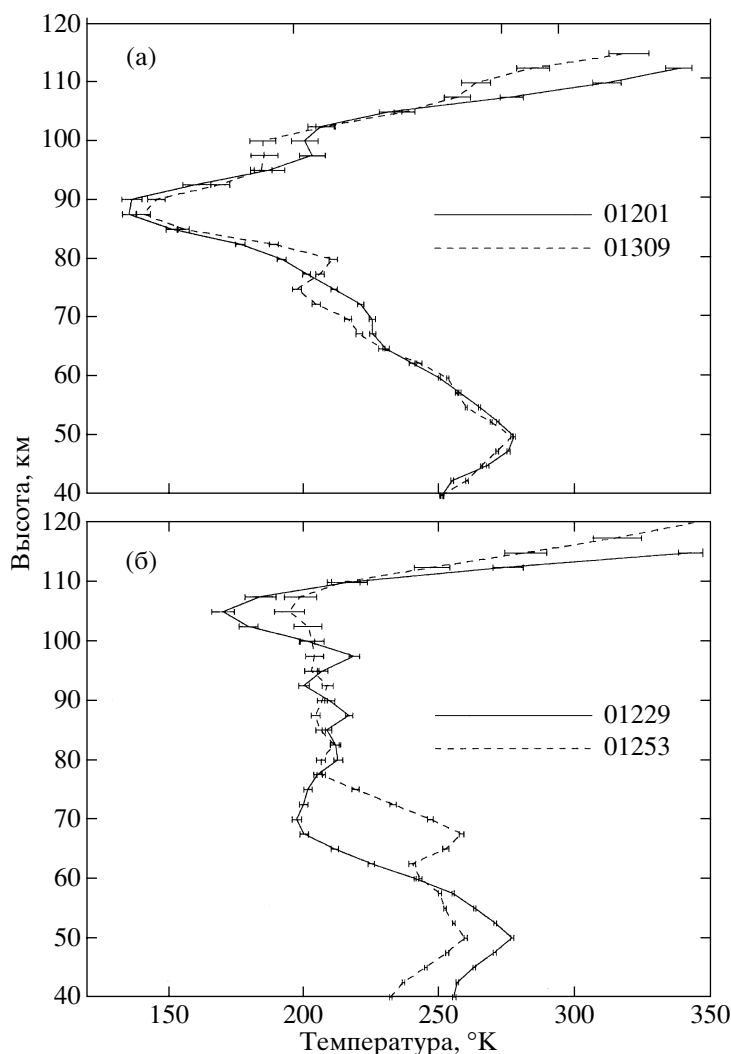


Рис. 3. Профили кинетической температуры, характеризующиеся низкой холодной мезопаузой, по данным сканов 01201, 01309 (а), и высокой теплой мезопаузой, по данным сканов 01229, 01253 (б). На рисунках четко видны мезосферные инверсии температуры.

Температурные инверсии в мезосфере (слой с положительным градиентом температуры) следует проанализировать подробно. Согласно современному климатологическим данным, эти инверсии наблюдаются наиболее часто в экваториальных районах, а также в других районах в зимний период, т.е. в случаях высокой мезопаузы. Параметры инверсионных слоев в мезосфере, полученные нами по данным CRISTA, представлены в табл. 2. Как следует из таблицы, многие восстановленные профили имеют инверсионные слои. Высот инверсий варьируют от 57.5 до 92.5 км, значения вертикальной протяженности лежат в диапазоне 2.5–10 км, а величина инверсии достигает 53°K. Следует отметить, что истинные значения вертикальной протяженности могут быть меньше, а величина инверсии – больше, так как дистанционный метод имеет конечное вертикальное

разрешение, что приводит к сглаживанию восстановленных профилей. Так, в работе [15] указано, что величины инверсий, полученные по данным спутниковых измерений ISAMS, были в 2–3 раза меньше ожидаемых. Похожая ситуация может иметь место в случае измерений CRISTA, поскольку ISAMS и CRISTA имеют примерно одинаковое вертикальное разрешение. Как следствие, величины температурных инверсий для сканов 01221 и 01237 (44°K и 53°K) на самом деле могут достигать 80–100°K. Подобные мощные инверсии наблюдались ранее, см., например, работу [24].

Множественные инверсии видны на профилях, соответствующих сканам 01229 и 01253 (рис. 3б). Согласие с климатологическими данными подтверждается тем, что в зимний период ранее отмечалось существование так называемого “пояса

мощных инверсий” в средних широтах [18]. Этому поясу соответствуют сканы 01245, 01253, 01309, 01345 и 10799. Температурные профили для сканов 01221, 01229 и 01237 соответствуют экваториальному поясу мощных инверсий. В работе [20] отмечалось, что эксперимент CRISTA-1 проводился в период динамических возмущений, характеризовавшийся относительно большой волновой активностью и связанным с ней перемешиванием тропического воздуха.

Как было отмечено, многие особенности восстановленных профилей температуры согласуются с климатологическими данными. Однако имеют место также и существенные расхождения (сканы 01345 и 10799, см. рис. 1). Эти два скана относятся к 5 и 9.11.1994 г. и к географическому району 34.4–35.9°N, 71.1–80.9°W. Профили кинетической температуры для этих сканов имеют низкую холодную мезопаузу. Подчеркнем, что в самом определении мезопаузы существует неопределенность: с одной стороны, в работе [3] мезопауза определяется как “трехмерная поверхность, на которой мезосфера с отрицательным вертикальным градиентом температуры переходит в термосферу с положительным вертикальным градиентом температуры”. С другой стороны, в той же работе указано, что “поскольку переход от отрицательного к положительному градиенту происходит при локальном минимуме температуры, мезопаузой можно также считать высоту температурного минимума, который разделяет мезосферу и термосферу”. Как видно из рис. 3, температурный градиент меняется от отрицательного к положительному на разных высотах (от 80 до 105 км) из-за наличия инверсионных слоев. В то же время, локальные минимумы температуры наблюдаются на высотах 80 км (скан 01345) и 90 км (скан 10799). Следовательно, согласно первому определению, для каждого профиля существуют несколько “мезопауз”, а согласно второму определению, каждый профиль характеризуется единственной мезопаузой, которая, однако, слишком низка, если проводить сравнение с климатологическими данными. Согласно этим данным, зимняя мезопауза должна находиться на высоте около 100 км. Также отметим, что в работе [8] представлены результаты влияния приливов на суточные вариации температуры в мезосфере и показано, что амплитуды термических приливов особенно велики в экваториальных широтах между 40°S и 40°N. Приливы достаточно сильны, чтобы вызывать образование инверсионных слоев с величинами, превышающими 15° K, а высота мезопаузы варьирует в течение суток в диапазоне от 84 до 100 км.

Проанализируем изменчивость восстановленных профилей температуры (рис. 4 и 5). Несмотря на тот факт, что количество обработанных данных сравнительно невелико (алгоритм реше-

Таблица 2. Основные параметры зарегистрированных температурных инверсий

Скан	Высота, км	Толщина инверсионного слоя, км	Величина инверсии, °K
01221	77.5	5	44
01229	70	10	15
	85	2.5	8
	92.5	5	19
01237	80	5	53
01245	72.5	2.5	1
	80	7.5	9
01253	62.5	5	18
	80.0	2.5	5
	87.5	5	4
01309	75	5	13
01345	57.2	2.5	3
10799	67.5	2.5	5
	80.0	2.5	15

ния обратной задачи [22] требует больших затрат компьютерного времени), рисунки дают представление о пространственных и временных вариациях температуры в мезосфере и нижней термосфере (восстановленные профили относятся к двум сезонам в широтном поясе 51°S–66°N). Можно видеть, что изменчивость температурного профиля растет с высотой (кривая 3 на рис. 5). В нижней мезосфере она не превышает 10°K в терминах стандартного отклонения для совокупности проанализированных профилей. В нижней термосфере она достигает 40°K. В районе мезопаузы минимальные вариации наблюдаются на высотах 75 и 100 км и составляют соответственно 9 и 12° K. Максимальная изменчивость в районе мезопаузы достигает 30° K и наблюдается на высоте 87.5 км. Высоты, на которых наблюдаются минимальные и максимальные вариации (95–100 и 86 км соответственно) хорошо согласуются с результатами работы [3]. Кроме того, средние температуры этих слоев близки к климатологическим данным. Как видно из рис. 5, средний профиль температуры, рассчитанный по результатам восстановления, находится в хорошем согласии с профилем из модели MSIS-90, который использовался в качестве априорного среднего в алгоритме восстановления. Профили практически совпадают в диапазоне высот 50–80 км. Отличия возрастают в области стратопauses, мезопаузы и в окрестности 110 км. Выше 110 км расхождения уменьшаются.

Подводя итог анализу результатов восстановления профилей кинетической температуры по данным CRISTA, можно отметить, что получен-

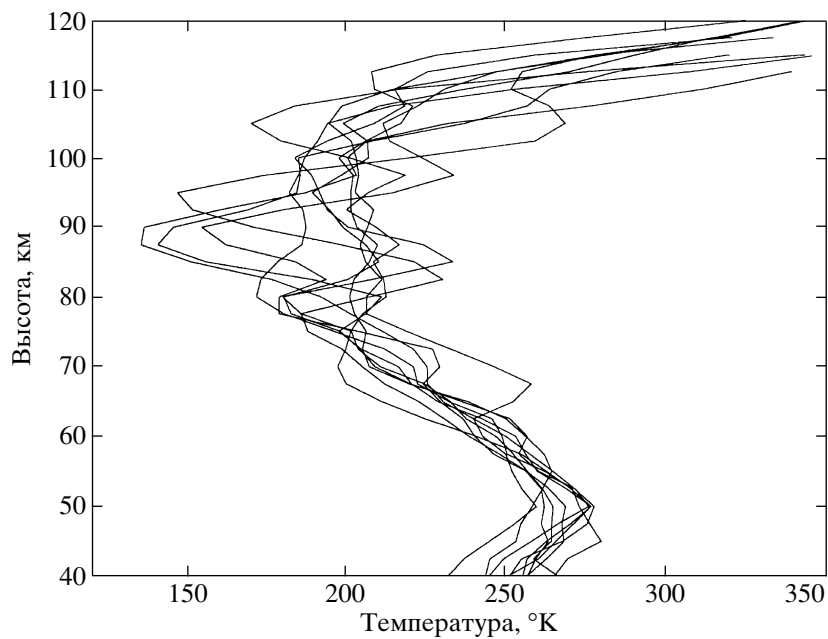


Рис. 4. Профили кинетической температуры, восстановленные по данным эксперимента CRISTA-1. Информация о соответствующих сканах дана в табл. 1.

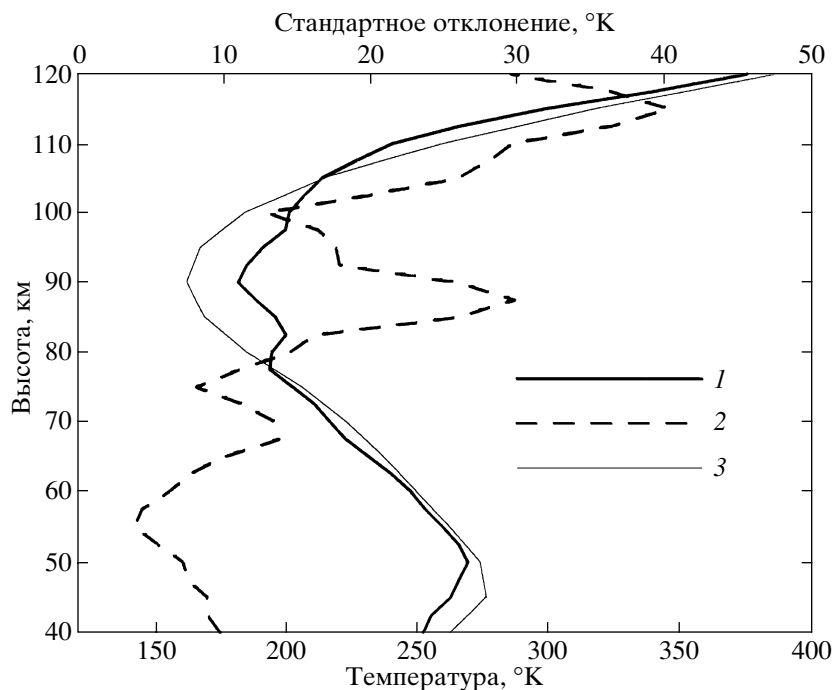


Рис. 5. Средний профиль температуры (кривая 1) и профиль стандартного отклонения (кривая 2) рассчитанные на основе результатов интерпретации десяти сканов (см. табл. 1). Для сравнения показан также профиль температуры (модель VSIS-90), использованный в качестве априорного среднего в алгоритме восстановления (кривая 3).

ная термическая структура МНТ находится в хорошем согласии с климатологическими данными, поскольку отмечаются следующие характерные особенности: низкая и холодная “летняя” мезопауза; высокая и теплая “зимняя” мезопауза; мощные

мезосферные инверсии температуры на различных высотах; минимальные значения температурных вариаций ($9\text{--}12^\circ\text{K}$) на высотах 75 и 100 км, максимальные (30°K) – на высоте 87.5 км (для района мезопаузы); наличие волновых структур.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе приведены примеры использования комплексного метода восстановления атмосферных параметров, учитывающего эффект нарушения ЛТР, для интерпретации измерений ИК излучения атмосферы на касательных трассах спектрометром CRISTA (область 15 мкм). Получены профили кинетической температуры в диапазоне высот 40–120 км.

2. Валидация дистанционных спутниковых измерений проводилась на основе сопоставления полученных результатов с результатами определения температуры методом падающих сфер. Наблюдалось удовлетворительное согласие между профилями кинетической температуры, полученными по данным CRISTA с учетом нарушения ЛТР, и профилями, полученными МПС в диапазоне высот 40–75 км. В более высоких слоях имеют место расхождения, обусловленные рядом факторов, среди которых увеличение погрешностей МПС, увеличение влияния пространственно-временного рассогласования спутниковых и подспутниковых измерений из-за возрастания температурной изменчивости с высотой.

3. Анализ качества восстановления кинетической температуры для неравновесной атмосферы и анализ влияния эффекта нарушения ЛТР на результаты восстановления был осуществлен также на основе интерпретации одного из измерений во время эксперимента CRISTA-2, когда на высоте 85 км наблюдались мезосферные облака. Кинетическая температура, восстановленная без учета нарушения ЛТР, характеризовалась значениями 170–175°K в окрестности 85 км. Эти значения слишком высоки для того, чтобы объяснить и промоделировать наличие мезосферных облаков. Комплексный метод восстановления, учитывающий нарушение ЛТР, дал значение температуры около 145°K (на 30°K меньше) в этой высотной области. Это значение полностью согласуется с кинетикой формирования мезосферных облаков. Таким образом, пренебрежение эффектом нарушения ЛТР при традиционном подходе к решению задачи термического зондирования может приводить к погрешностям определения температуры, достигающим 30°K уже на высотах порядка 80 км.

4. Проведено сопоставление полученных результатов с климатологическими данными. Показано, что профили кинетической температуры, восстановленные по данным CRISTA, хорошо согласуются с климатологическими данными для соответствующих географических районов и сезонов. Были зарегистрированы многочисленные температурные инверсии в мезосфере, достигающие по величине 50°K. Высоты, величины инверсий и значения толщин инверсионных слоев находятся в хорошем соответствии с результатами, опубликованными в литературе. Были отмечены

следующие характерные особенности, соответствующие климатологическим данным: низкая и холодная летняя мезопауза, высокая и теплая зимняя мезопауза, наличие волновых структур. В районе мезопаузы минимальные значения температурных вариаций (9–12°K) наблюдались на высотах 75 и 100 км, максимальные (30°K) – на высоте 87.5 км.

Настоящая работа была выполнена в рамках рабочей группы “Mesosphere / Thermosphere NLTE emissions” проекта CRISTA-MAHRSI. Российские участники были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (грант 00-05-65223) и Министерством образования Российской Федерации в рамках программы “Университеты России” (грант 992799).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Senft D.C., Papen G.C., Gardner C.S., Yu J.R., Krueger D.A., She C.Y.* Seasonal variations of the thermal structure of the mesopause region at Urbana, IL (40° N, 88° W) and Ft. Collins, CO (41° N, 105° W) // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. № 9. P. 821–824.
2. *Hedin A.E.* Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № D5. P. 1159–1172.
3. *She C.Y., van Zahn U.* Concept of a two-level mesopause: Support through new lidar observations // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D5. P. 5855–5863.
4. *Williams B.P., She C.Y., Roble R.G.* Seasonal climatology of nighttime tidal perturbation of temperature in the midlatitude mesopause region // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 17. P. 3301–3304.
5. *Schmidlin F.J.* Temperature inversions near 75 km // *Geophys. Res. Lett.* 1976. V. 3. № 3. P. 173–176.
6. *Hauchecorne A., Maillard A.* A 2-D dynamical model of mesospheric temperature inversion in winter // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. № 11. P. 2197–2200.
7. *Hagan M.E., Forbes J.M., Vial F.* On modeling migrating solar tides // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. № 4. P. 893–896.
8. *Berger U., van Zahn U.* The two-level structure of the mesopause: a model study // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D18. P. 22083–22093.
9. *Angell J.K.* Rocketsonde evidence for a stratospheric temperature decrease in the Western hemisphere during 1973–1985 // *Mon. Wea. Rev.* 1987. V. 115. № 11. P. 2569–2577.
10. *Hauchecorne A., Chanin M.L., Keckhut P.* Climatology and trends of the middle atmospheric temperature (33–87 km) as seen by Rayleigh lidar over the south of France // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № D8. P. 15297–15309.
11. *Гвишивили Г.В., Леценко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Сергеев Н.П., Фишкова Л.М., Шефов Н.Н.* Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1996. Т. 32. № 3. С. 329–339.

12. Golitsin G.S., Semenov A.I., Shefov N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P.. Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere. // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 14. P. 1741–1744.
13. *Dunkerton T.J., Delisi D.P., Baldwin M.P.* Middle atmospheric cooling trend in historical rocketsonde data // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 17. P. 3371–3374.
14. Dudhia A., Smith S.E., Wood A.R., Taylor F.W. Diurnal and semi-diurnal temperature variability of the middle atmosphere, as observed by ISAMS // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. № 12. P. 1251–1254.
15. *Leblanc T., Hauchecorne A., Chanin M.L., Rodgers C., Taylor F., Livesey N.* Mesospheric temperature inversion as seen by ISAMS in December 1991 // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. № 12. P. 1485–1488.
16. *Shepherd M.G., Dudhia A., Lopez-Puertas M., Evans W.F.J.* Upper mesosphere temperatures in summer: WINDII observations and comparisons // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. № 4. P. 357–360.
17. *Ortland D.A., Hays P.B., Skinner W.R., Yee J.-H.* Remote sensing of mesospheric temperature and O₂(¹Σ) band volume emission rates with the high-resolution Doppler imager // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D2. P. 1821–1835.
18. *Leblanc T., McDermid I.S., Ortland D.A.* Lidar observations of the middle atmospheric thermal tides and comparison with the high resolution doppler imager and global-scales wave model, 1. Methodology and winter observations at Table Mountain (34.4° N) // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D10. P. 11917–11929.
19. *Ward W.E., Oberheide J., Riese M., Preusse P., Offermann D.* Tidal signatures in temperature data from CRISTA I mission // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D13. P. 16391–16403.
20. Riese M., Spang R., Preusse P., Ern M., Jarisch M., Offermann D., 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.
21. *Offermann D., Grossmann K.U., Barthol P., Knieling P., Riese M., 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.
22. *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. Наст. вып.
23. *Lubken F.-J., van Zahn U.V.* Thermal structure of the mesopause region at polar latitudes // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № D11. P. 20841–20857.
24. *Meriwether J.W., Gao X., Wickwar V.B., Wilkerson T., Beissner K., Collins S., Hagan M.E.* Observed coupling of the mesosphere inversion layer to the thermal tidal structure // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 9. P. 1479–1482.