

УДК 551.524.73

МЕЗОСФЕРНЫЕ ИНВЕРСИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА CRISTA-1

© 2005 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
E-mail: tim@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 01.12.2004 г., после доработки 24.03.2005 г.

Проанализированы характеристики мезосферных инверсий температуры (МИТ), зарегистрированных дистанционным методом в спутниковом эксперименте CRISTA-1 (ноябрь 1994 г.). Массив исходных данных составляли около 900 вертикальных профилей температуры в диапазоне высот 40–120 км. МИТ наблюдались в 84% случаев. В основном наблюдались одна или две инверсии – соответственно в 40% и 37% случаев. Профили, содержащие три инверсии, зарегистрированы примерно в 7% случаев. Менее 1% случаев приходится на профили с четырьмя инверсиями. Множественные инверсии зарегистрированы в основном в экваториальной области и в Северном полушарии. Среднее значение амплитуды инверсий, полученное по всему ансамблю данных, составляет 24.3 К, при наиболее вероятном значении амплитуды 7 К. При учете, в случае множественных инверсий, только МИТ с максимальной амплитудой среднее значение амплитуды равно 30.6 К, а максимум частотного распределения амплитуды приходится на диапазон 20–30 К. Наблюдались и инверсии с амплитудой 80–90 К. Максимальное значение амплитуды составляло 104 К. Среднезональные по широтным зонам 5° значения амплитуды имеют максимумы в экваториальной области, а также в средних широтах (30°–40°S и около 50°N). Максимум частотного распределения значений вертикальной протяженности инверсий составляет 5–7.5 км. Значения вертикальной протяженности МИТ, превышающие 15 км, зарегистрированы не были. Среднезональные значения вертикальной протяженности инверсий минимальны южнее 45°S. Среднезональные значения высоты инверсий (высоты максимума температуры) в направлении от южных широт к экватору резко уменьшаются с 87.5 км до 80–82.5 км. В северных широтах значения высот МИТ растут, но незначительно.

1. ВВЕДЕНИЕ

Мезосферные инверсии температуры (МИТ) впервые были обнаружены в ракетных наблюдениях [1]. Позднее эти особенности температурного режима мезосферы изучались с помощью ракетных, наземных лидарных, а также спутниковых методов измерений. Основные особенности МИТ были проанализированы в ряде статей, в том числе и обзорных [2–9]. Отмечены следующие особенности МИТ:

– МИТ наблюдаются в основном в низких и средних широтах в окрестности 70 и 95 км. Именно низкие МИТ были открыты в первых ракетных измерениях [1]. Большинство измерений касается нижних МИТ в ночное время на высотах 60–70 км, что связано с широким использованием для исследований температуры мезосферы релейских радаров (в ночное время), а также метода падающих сфер. Оба эти метода имеют “потолок” зондирования около 80 км.

– Использование натриевых лидаров подняло верхнюю границу измерений до 105 км, что позволило обнаружить второй высокий слой инверсий вблизи 95 км. Ночные МИТ периодически ре-

гистрировались вблизи 95 км [7], что указывало на двойную мезопаузу. При усреднении этих ночных данных с данными дневных измерений эти инверсионные слои едва обнаруживались.

– Две ночные инверсии были часто разделены по высоте расстоянием, приблизительно равным длине волны суточного прилива. Каждый слой МИТ имеет типичную ширину порядка 10 км.

– Амплитуды МИТ относительно “фонового” температурного профиля мезосферы и нижней термосферы (МНТ) обычно составляют 10–25 К. Однако были обнаружены и МИТ существенно большей амплитуды – в несколько десятков градусов.

– Нижние МИТ являются постоянной особенностью температурной структуры МНТ зимой [10]. МИТ с амплитудой более 10 К регистрируются более чем в 80% случаев наблюдений в декабре и январе, а в середине лета – только в 30% случаев. Амплитуды МИТ, превышающие 30 К, зимой наблюдаются более чем в 20% случаев, но редко летом. Среднемесячные амплитуды достигают значений более 20 К зимой и составляют 5–10 К летом [2, 3]. Высоты максимумов температу-

ры нижних МИТ летом составляют около 75 км, а зимой около 65 км [2, 4]. Верхние МИТ имеют обычно амплитуду 10–35 К и представляют собой достаточно постоянную особенность района мезопаузы [11]. При этом наземные 24-часовые наблюдения с помощью натриевого лидара показывают, что в средних суточных профилях температуры МИТ проявляются очень редко, но четко видны в индивидуальных профилях температуры при временном усреднении измерений в несколько минут. Эти особенности свидетельствуют о том, что верхние МИТ связаны с приливами [7, 8].

Многие динамические, химические и радиационные процессы играют существенную роль в формировании термической структуры района МНТ. Несмотря на большое количество исследований, природа МИТ до сих пор до конца не ясна. Рассмотрению возможных механизмов формирования МИТ посвящено большое количество работ (см., например, указанные выше обзоры и работы [9, 12–16]). Предложены различные механизмы образования МИТ – динамический (приливы, взаимодействие приливов, гравитационных и планетарных волн, нагревание за счет турбулентности при разрушении гравитационных волн и т.д.) и химический. Но неясно, например, происходит ли образование нижних и верхних МИТ за счет одних и тех же механизмов. Многие глобальные модели верхней атмосферы, описывающие влияние приливов на образование МИТ, дают существенно меньшие амплитуды МИТ по сравнению с измеренными. Учет взаимодействия атмосферных приливов с гравитационными и планетарными волнами позволяет получить амплитуды МИТ, существенно лучше согласующиеся с экспериментальными данными. Химический механизм образования МИТ [17, 18] может быть ответственным за возникновение верхних МИТ, т.к. скорости химического нагревания на высотах около 90 км могут достигать 5–10 К/день.

Сложности понимания природы МИТ в значительной степени связаны с определенной фрагментарностью наблюдений МИТ, причиной чего является использование разных экспериментальных методов исследования температурного режима района МНТ. Эти методы отличаются высотными диапазонами измерений, погрешностями, временем суток измерений, пространственным (вертикальным и горизонтальным) и временным разрешением. Суточное усреднение данных о температуре МНТ существенно затрудняет анализ приливных механизмов образования МИТ.

В связи с этим для анализа МИТ важны измерения вертикальных профилей температуры, выполненные в широком диапазоне высот и с высоким временным разрешением, что достигается с помощью дистанционных спутниковых методов. Спутниковые измерения позволяют изучать про-

странственное распределение МИТ в глобальном масштабе. При этом из-за малого времени сканирования горизонта планеты (секунды и минуты) при регистрации уходящего излучения, получаемые данные можно считать “мгновенными”. Последующее усреднение спутниковых данных позволяет изучать климатологию МИТ.

Спутниковые исследования температуры мезосферы были начаты в экспериментах на спутнике SME в 1982–1986 гг. [19, 20]. Анализ измерений с помощью спутникового прибора ISAMS [21] показал, что нижние МИТ имеют разное время жизни и разные пространственные размеры. Большинство из нижних МИТ имеет спорадический характер, но некоторые из них сохраняются в течение нескольких дней и охватывают по горизонтали большие районы (миллионы кв. км). В спутниковых измерениях ISAMS и HALOE [3, 21] обнаружены значительные широтные и долготные вариации амплитуды нижних МИТ. Анализ данных прибора ISAMS в декабре 1991 г. в Северном полушарии позволил авторам [21] сделать следующие выводы:

- в пределах полушария слои МИТ отмечаются почти каждый день (преимущественно в среднеширотном поясе);
- амплитуда инверсий может превышать 20 К;
- горизонтальные размеры районов МИТ меняются от 10^5 до 10^6 км².

Исследования [3] подтвердили наличие среднеширотного пояса сильных инверсий (с локальной амплитудой до 40 К и с амплитудой около 10 К для нижних МИТ на высотах 70–75 км зимой при месячном усреднении), а также наличие низкоширотного пояса сильных инверсий той же амплитуды на высотах 80–85 км через несколько недель после периодов равноденствий. Были обнаружены также годовые вариации инверсионных слоев в средних широтах и полугодовые вариации инверсий вблизи экватора.

Инверсионные слои, обусловленные различными волновыми процессами, изучались в ряде работ, посвященных анализу данных спутниковых экспериментов CRISTA [22–26].

Недостатком спутниковых методов измерений является относительно низкое пространственное разрешение измерений. Если вертикальное разрешение таких измерений еще можно считать приемлемым (2–4 км), то горизонтальное усреднение (как за счет особенностей формирования собственного излучения атмосферы или поглощения на касательных трассах, так и за счет движения спутника во время выполнения одного скана) составляет 200–400 км и более в зависимости от вертикального разрешения прибора. Например, горизонтальное разрешение восстановленных профилей в экспериментах с аппаратурой CRISTA оценивается в 200 км × 650 км [22]. Сгла-

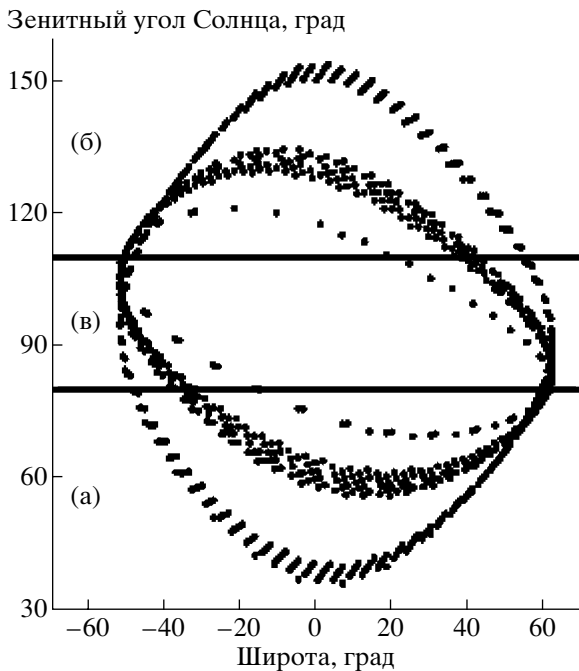


Рис. 1. Распределение точек измерений по широте и по значениям зенитного угла Солнца. Выделены области, соответствующие дневным (А) и ночным (Б) измерениям, а также измерениям в период сумерек (В).

живающее действие спутниковых измерений проявляется, в частности, в занижении амплитуд МИТ. В работе [21] указывается, что амплитуды инверсий по спутниковым измерениям могут быть в 2–3 раза меньше, чем регистрируемые с помощью наземных лидарных методов. Тем не менее новые спутниковые измерения вертикальных профилей температуры в области МНТ дают возможность получить важную информацию о пространственно-временных вариациях МИТ и тем самым способствовать разработке адекватных моделей МИТ.

В настоящей работе анализируются вертикальные профили температуры в районе МНТ, восстановленные по данным измерений уходящего излучения горизонта планеты в 15 мкм полосе углекислого газа прибором CRISTA в ноябре 1994 г. [27, 28].

2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТА CRISTA-1

В работах [27, 28] подробно описаны исходные данные, оригинальная методика интерпретации измерений неравновесного уходящего излучения прибора CRISTA-1 в 15 мкм полосе CO_2 , а также приведены примеры анализа термического режима области МНТ. На основе анализа ограниченного объема результатов интерпретации измерений прибора CRISTA в работе [28] приведены данные о температурных инверсиях в мезосфере

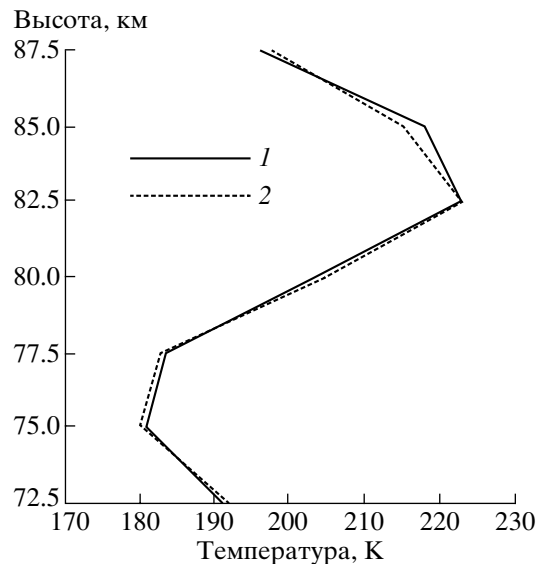


Рис. 2. Восстановление мезосферной инверсии температуры в численном эксперименте. 1 – восстановленный профиль, 2 – модельный профиль.

– их высотах, толщинах и амплитудах. Отмечается, что были зарегистрированы многочисленные температурные инверсии в мезосфере, достигающие 50 К. В настоящей работе наличие и характеристики мезосферных инверсий изучены для всего массива данных измерений прибора CRISTA-1.

Данные, анализируемые в настоящей работе, были получены 4–5 и 8–12 ноября 1994 г. Общее число профилей температуры составляло 881. При этом на 5 и 9 ноября приходилась основная часть измерений (около 650 профилей). Широтный диапазон измерений составлял 51.8°S – 62.3°N . Широту и зенитный угол солнца для всего массива данных характеризует рис. 1. Как видно из рисунка, измерения в средних широтах осуществлялись в основном на закате и восходе солнца, а в экваториальной области – в дневное и ночное время.

На рис. 2 показаны результаты восстановления мезосферной инверсии температуры в численном эксперименте. Модельный профиль характеризовался инверсией с вертикальной протяженностью 7.5 км и амплитудой 42.8 К. Восстановленное значение амплитуды составило 42.0 К. Как показывает приведенный пример, сглаживающее действие оператора решения обратной задачи пренебрежимо мало. Заметное сглаживание температурных возмущений наблюдалось в численных экспериментах на высотах более 100 км.

В настоящей работе идентификация МИТ в температурных данных осуществлялась по следующим критериям: высота начала инверсии находится в пределах мезосферы; амплитуда инверсии превышает 5 К.

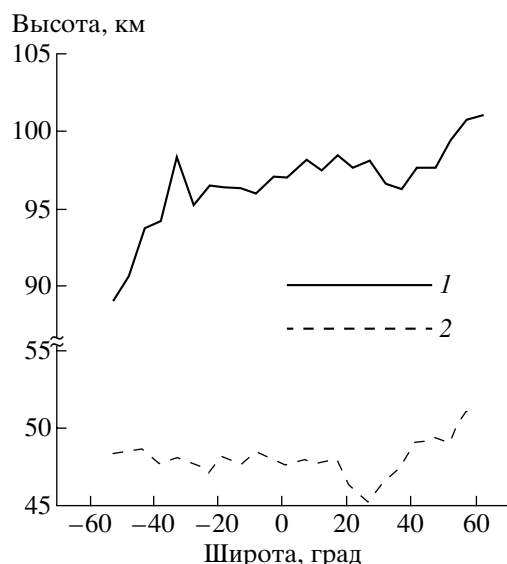


Рис. 3. Высота мезопаузы (1) и стратопаузы (2) по данным эксперимента CRISTA.

Высоты стратопаузы и мезопаузы определялись по абсолютным максимуму и минимуму температуры, в соответствующих диапазонах высот. Среднезональные значения высот стратопаузы и мезопаузы показаны на рис. 3. Высота стратопаузы постоянна и составляет около 48 км в широтном поясе 50°S–20°N. В средних широтах северного полушария высота стратопаузы возрастает с широтой, достигая 52 км к 60°N. Высота мезопаузы растет от южных широт к северным (от 88 км до 102 км), что соответствует низкой холодной мезопаузе летом и высокой теплой мезопаузе зимой. При анализе инверсий предполагалось, что нижняя граница мезосферы находится на 10 км выше стратопаузы, чтобы исключить из рассмотрения возможные случаи с двойной стратопаузой. Таким образом, фактический диапазон рассматриваемых высот составлял от 58–62 км до 90–100 км.

3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МИТ

В данной работе представлены и обсуждаются следующие основные характеристики МИТ: амплитуда инверсий (разность температур в начале и конце инверсии), вертикальная протяженность (разность между высотами, соответствующими максимуму и минимуму температуры), высоты уровней минимума и максимума температуры, значения минимума и максимума температуры.

В массиве анализируемых данных присутствует большое число профилей температуры с множественными инверсиями. На рис. 4 показана относительная частота регистрации различного числа инверсий на температурном профиле. 16% от общего числа профилей не имеют инверсий. В основном

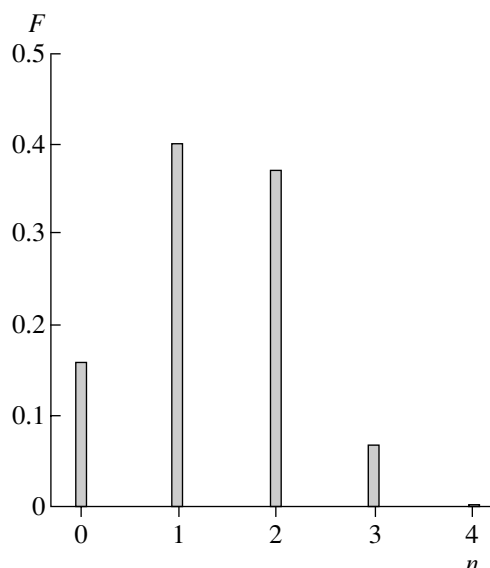


Рис. 4. Относительная частота регистрации F различного числа инверсий n на температурном профиле.

наблюдались одна и две инверсии – соответственно в 40% и 37% случаев. Профили, содержащие три инверсии, зарегистрированы примерно в 7% случаев. Менее 1% случаев приходится на профили с четырьмя инверсиями.

В связи с присутствием в массиве данных профилей с различным числом инверсий, анализ проводился для следующих трех групп данных: с учетом всех инверсий (А); с учетом только инверсий с максимальной амплитудой в случае нескольких инверсий на одном профиле (Б); с учетом только профилей с одиночными инверсиями (В).

На рис. 5 показана относительная частота регистрации инверсий различной амплитуды для трех указанных выше групп данных. В группе А наиболее часты инверсии со значением амплитуды 7 К. С увеличением амплитуды относительная частота уменьшается. Наблюдаются инверсии с амплитудами, достигающими 80–90 К. Зарегистрирован один профиль с инверсией, имеющей амплитуду 104 К. Среднее значение амплитуды составляет 24.3 К.

Для группы Б распределение амплитуд существенно другое. С наибольшей частотой регистрируются инверсии с амплитудами 20–30 К. Среднее значение амплитуды составляет при таком выборе данных 30.6 К.

Распределение относительной частоты регистрации инверсий различной амплитуды для группы В, представленное на рис. 5 внизу, имеет два выраженных максимума. Узкий максимум соответствует амплитудам в диапазоне 6–8 К. Широкий максимум охватывает диапазон значений амплитуд 20–32 К. Среднее значение амплитуд инверсий для третьей группы данных составляет 28.9 К.

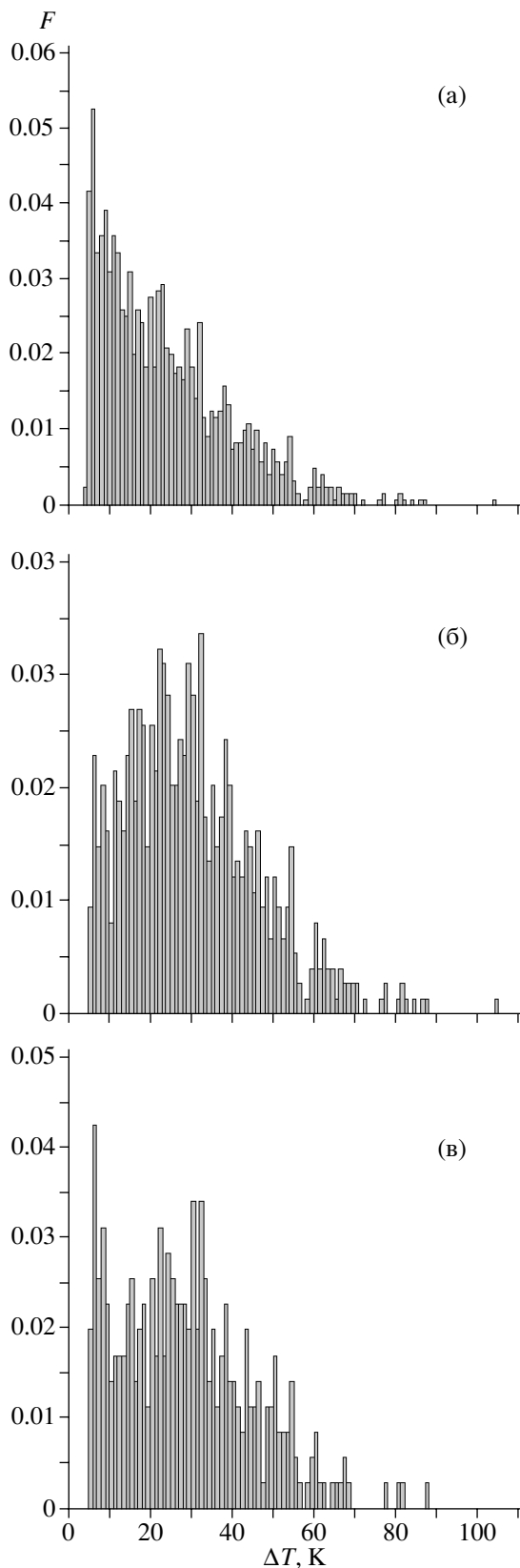


Рис. 5. Относительная частота регистрации F инверсий различной амплитуды ΔT для групп данных А, Б и В.

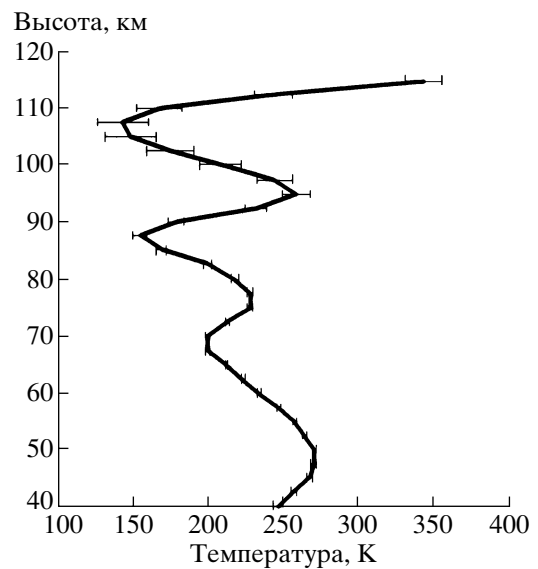


Рис. 6. Температурный профиль с максимальной зарегистрированной амплитудой инверсии. Скан 10 172, 4.7°S , 52°W , солнечный зенитный угол 60° .

На рис. 6 приведен пример восстановленного температурного профиля с максимальной обнаруженной нами амплитудой инверсии в 104 К (скан 10 172; дата; 09.11.1994; координаты пункта измерений: 4.7°S , 52°W ; зенитный угол Солнца равен 60°). Профиль, изображенный на рис. 6, характеризуется наличием двух мезосферных инверсий. Нижняя инверсия имеет амплитуду 30 К.

Относительная частота регистрации инверсий различной вертикальной протяженности показана на рис. 7 для трех анализируемых групп данных. Для всех групп наиболее вероятны инверсии со значением вертикальной протяженности 5–7.5 км. Заметим, что шаг высотной сетки при восстановлении профилей температуры составлял 2.5 км. Инверсии со значениями вертикальной протяженности более 15 км зарегистрированы не были.

Поскольку вертикальная протяженность инверсий варьирует, высоты инверсий оценивались по значению высоты максимума температуры. На рис. 8 показано частотное распределение высот инверсий для анализируемых групп данных. Для группы А широкий максимум частоты регистрации соответствует диапазону высот 75–95 км. Ниже 75 км относительная частота регистрации инверсий незначительна. При учете только инверсий с максимальной амплитудой в случае множественных инверсий (группа Б) частотное распределение высот близко к симметричному с максимумом для высот 82.5–87.5 км. Для ансамбля единичных инверсий (группа В) частотное распределение более узкое. Ниже 75 км и выше 95 км единичные инверсии практически не наблюдались.

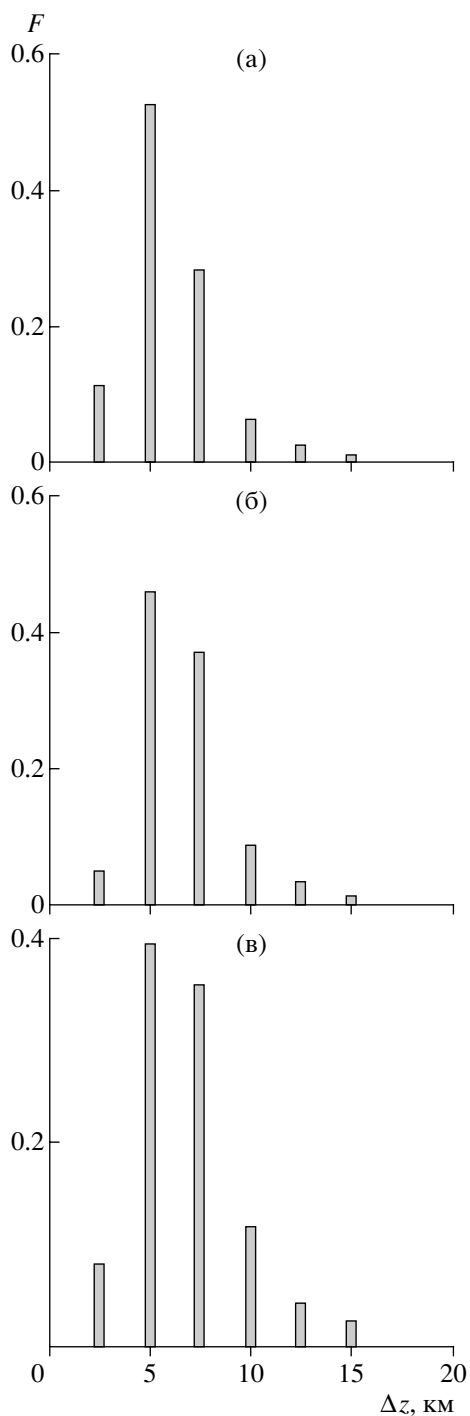


Рис. 7. Относительная частота регистрации F инверсий различной вертикальной протяженности Δz для групп данных А, Б и В.

Расчеты среднезональных значений характеристик МИТ проводились для широтных зон 5° . В таблице представлено количество инверсий по широтным зонам в анализируемых группах данных. Там же для сравнения дано количество измеренных температурных профилей (количество данных в

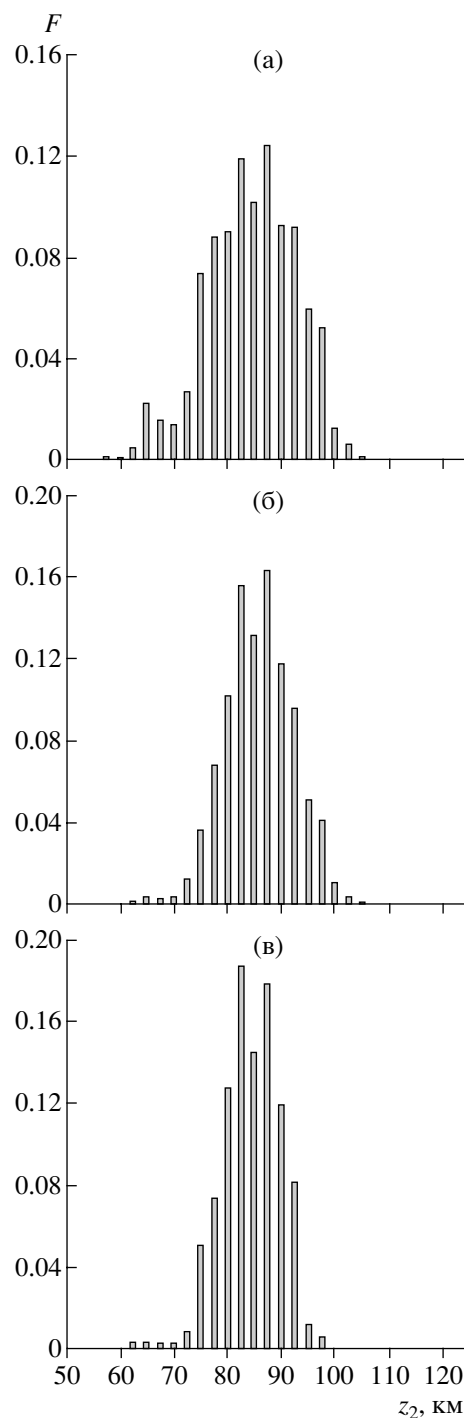


Рис. 8. Относительная частота регистрации F инверсий с различной высотой максимума температуры z_2 для групп данных А, Б и В.

группе А превышает количество измеренных профилей в большинстве зон из-за наличия множественных инверсий). Как видно из таблицы, в широтном поясе $45^\circ\text{S} - 55^\circ\text{S}$ инверсии преимущественно одиночные. В Северном полушарии множественные инверсии составляют большинство.

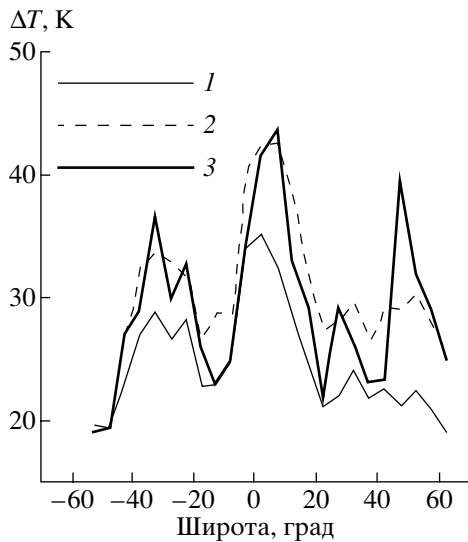


Рис. 9. Среднезональные значения амплитуд инверсий ΔT для групп данных А (1), Б (2) и В (3).

Для всех групп данных количество инверсий в широтных зонах достаточно для расчета среднезональных характеристик МИТ.

Среднезональные значения амплитуд инверсий показаны на рис. 9. Для всего ансамбля данных (группа А), а также для ансамбля, содержащего только максимальные инверсии при наличии множественных МИТ (группа Б), характерно наличие двух максимумов – в поясе 20° – 40° S и в экваториальной области. Если рассматривать только одиночные инверсии (группа В), то дополнительно появляется третий максимум около 50° N. В максимумах среднезональные значения амплитуд достигают 35–45 К.

Среднезональные значения вертикальной протяженности инверсий показаны на рис. 10. Отметим, что наименьшие значения наблюдаются южнее 45° S. Максимумы вертикальной протяженности соответствуют максимумам среднезональных значений амплитуд.

Среднезональные значения высоты максимума и минимума температуры представлены на рис. 11. В Южном полушарии наблюдается резкое уменьшение с широтой высоты максимума температуры инверсий с 87.5 км до 80–82.5 км. В Северном полушарии значения высоты максимума инверсий растут, но незначительно. Для всех рассмотренных групп данных широтный ход высоты максимума температуры практически одинаков. В целом, широтная зависимость высоты минимума температуры аналогична широтной зависимости высоты максимума. Однако для группы В (одиночные инверсии) в экваториальной области характерны меньшие значения высоты температурного минимума, чем для других групп данных.

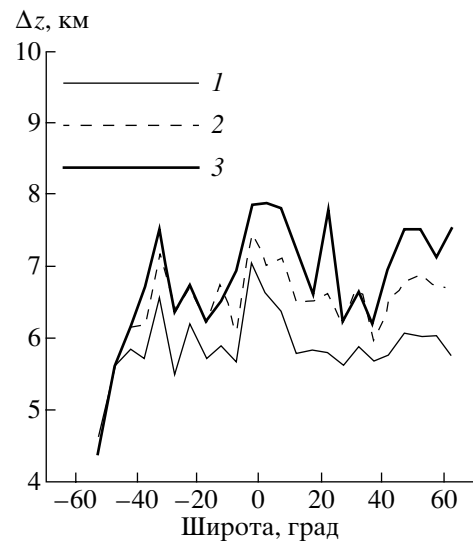


Рис. 10. Среднезональные значения вертикальной протяженности инверсий Δz для групп данных А (1), Б (2) и В (3).

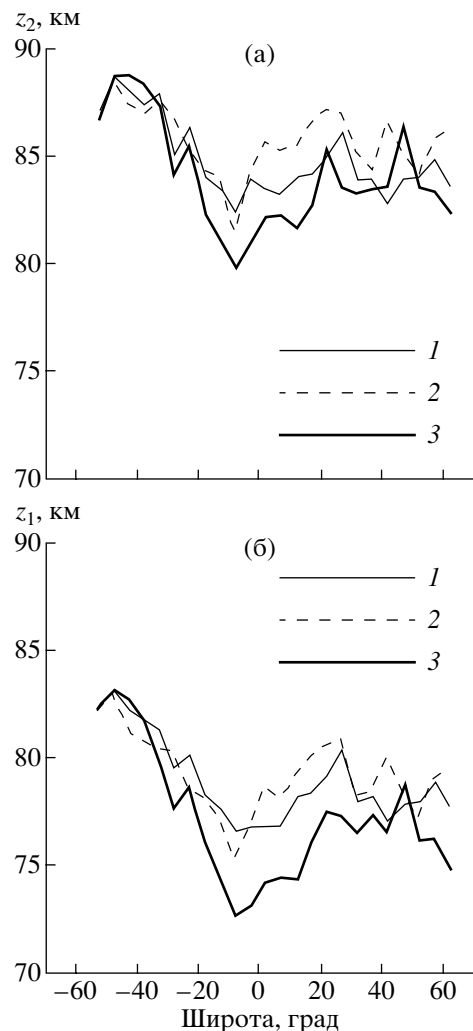


Рис. 11. Среднезональные значения высоты максимума (а) и минимума (б) температуры инверсий для групп данных А (1), Б (2) и В (3).

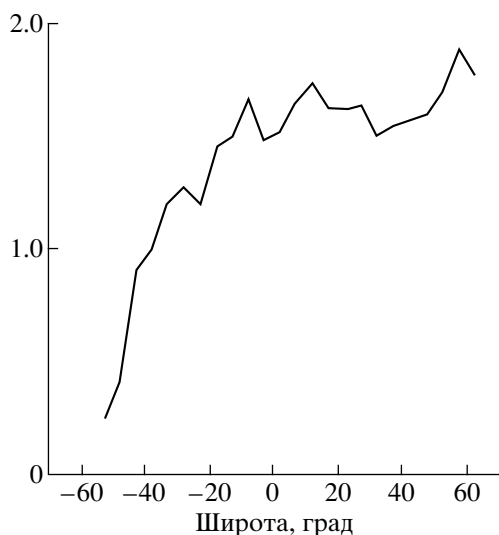


Рис. 12. Среднезональное значение количества наблюдаемых инверсий n на температурном профиле.

В заключение приведем среднезональные значения количества инверсий n на температурном профиле (рис. 12). Из рисунка следует, что южнее 40°S имеет место большое количество профилей

Количество инверсий по широтным зонам в анализируемых группах данных (см. текст)

Широтная зона	Общее количество температурных профилей	Количество инверсий в группах данных		
		А	Б	В
$55^\circ\text{S}-50^\circ\text{S}$	58	15	14	13
$50^\circ\text{S}-45^\circ\text{S}$	61	26	26	26
$45^\circ\text{S}-40^\circ\text{S}$	42	38	30	22
$40^\circ\text{S}-35^\circ\text{S}$	35	35	25	15
$35^\circ\text{S}-30^\circ\text{S}$	34	41	31	21
$30^\circ\text{S}-25^\circ\text{S}$	29	37	24	13
$25^\circ\text{S}-20^\circ\text{S}$	31	37	28	20
$20^\circ\text{S}-15^\circ\text{S}$	29	42	29	18
$15^\circ\text{S}-10^\circ\text{S}$	30	45	28	13
$10^\circ\text{S}-5^\circ\text{S}$	27	45	27	9
$5^\circ\text{S}-0^\circ$	31	46	30	15
$0^\circ-5^\circ\text{N}$	27	41	27	13
$5^\circ\text{N}-10^\circ\text{N}$	34	56	34	16
$10^\circ\text{N}-15^\circ\text{N}$	31	54	30	11
$15^\circ\text{N}-20^\circ\text{N}$	32	52	31	14
$20^\circ\text{N}-25^\circ\text{N}$	29	47	26	9
$25^\circ\text{N}-30^\circ\text{N}$	30	49	26	8
$30^\circ\text{N}-35^\circ\text{N}$	32	48	31	18
$35^\circ\text{N}-40^\circ\text{N}$	33	51	31	13
$40^\circ\text{N}-45^\circ\text{N}$	35	55	32	10
$45^\circ\text{N}-50^\circ\text{N}$	35	56	32	10
$50^\circ\text{N}-55^\circ\text{N}$	40	68	38	12
$55^\circ\text{N}-60^\circ\text{N}$	54	102	52	13
$60^\circ\text{N}-65^\circ\text{N}$	62	110	60	21

без инверсий ($n < 1$). Число инверсий возрастает монотонно по направлению из Южного полушария к Северному. Максимальное значение n составляет 1.9, что свидетельствует о наличии преимущественно множественных инверсий в районе 60°N .

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Проведем сравнение характеристик МИТ с результатами наблюдений, выполненных с помощью лидаров на станциях Observatoire de Haute-Provence (OHP, 44°N , 5°E) и Centre d'Essais des Landes (CEL, 44°N , 1°W), а также с результатами, полученными в спутниковых экспериментах ISAMS и HALOE [3]. Указанные лидарные и спутниковые наблюдения являются долговременными и дают информацию о сезонной зависимости параметров МИТ. Кратковременность эксперимента CRISTA-1 не позволяет исследовать временные характеристики МИТ. Время измерений (ноябрь 1994 г.) можно отнести к началу зимнего периода в Северном полушарии и к началу летнего периода в Южном. При сопоставлении результатов также необходимо учитывать, что “потолок” указанных лидарных и спутниковых измерений составлял, как указано в работе [3], 85–90 км, и на этой высоте погрешности измерений температуры лидарами оценивались в 2%, а спутниковой аппаратурой ISAMS и HALOE – около 15 К. При этом наблюдалось существенное сглаживание температурных профилей в спутниковых измерениях. В эксперименте CRISTA-1 температура определялась до высоты 120 км. Таким образом, МИТ регистрировались вплоть до высот, соответствующих мезопаузе (100 км в средних широтах). Полная погрешность на высоте 90 км составляла 5.5 К (случайная компонента 3.7 К, систематическая – 4.0 К). Как было показано выше, сглаживающий эффект при обработке измерений CRISTA-1 пренебрежимо мал. Приведенные различия в периодах измерений, высотных диапазонах, значениях погрешностей необходимо иметь в виду при сопоставлении результатов.

В результате анализа лидарных наблюдений и спутниковых измерений (ISAMS, HALOE) авторами работы [3] было сделано два основных вывода: 1) о существовании пояса сильных МИТ с локальными амплитудами 40 К и среднемесячными амплитудами 10 К в средних широтах зимой на высотах 70–75 км и 2) о существовании низкоширотного пояса сильных инверсий с такими же амплитудами на высотах 80–85 км через несколько недель после равноденствий. Результаты обработки измерений CRISTA-1 хорошо согласуются с этими выводами: оба пояса МИТ были зарегистрированы. Однако высоты инверсий (высоты минимума температуры), полученные нами, несколько отличаются – около 77.5 км в средних широтах и

около 75 км в экваториальном поясе. Данные эксперимента CRISTA-1 свидетельствуют также о наличии сильных МИТ в средних широтах Южно-го полушария на высоте около 82.5 км.

Среднемесячное значение амплитуды МИТ в ноябре по данным лидарных измерений (44°N) составляет около 20 К. Полученные нами средние значения амплитуды для трех проанализированных групп данных (А, Б, В) составляют соответственно около 20, 29 и 40 К. Подчеркнем, что амплитуды инверсий по данным экспериментов ISAMS и HALOE в силу существенного сглаживания профилей заметно меньше, чем по данным CRISTA-1.

По данным лидарных измерений среднее значение температурного градиента в МИТ не зависит от сезона и составляет 3–5 К/км. Соответствующие значения, полученные нами для различных групп данных, составляют 4.1 К (А), 4.7 К (Б) и 4.3 К (В).

Таким образом, результаты, полученные в настоящей работе, находятся в хорошем количественном согласии с результатами лидарных наблюдений. Корректные сопоставления с результатами спутниковых экспериментов ISAMS и HALOE затруднены, в первую очередь, существенным сглаживанием профилей температуры в этих экспериментах и различиями исследуемых высотных диапазонов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 03-05-64830 и Министерства образования России в рамках гранта ур.01.01.044 научной программы “Университеты России”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmidlin F.J. Temperature inversions near 75 km // *Geophys. Res. Lett.* 1976. V. 3. № 3. P. 173–176.
2. 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. 15 297–15 309.
3. Leblanc T., Hauchecorne A. Recent observations of mesospheric temperature inversions // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D16. P. 19 471–19 482.
4. Whiteway J.A., Carswell A.I., Ward W.E. Mesospheric temperature inversions with overlaying nearly adiabatic lapse rate: An indication of well-mixed turbulent layer // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. № 10. P. 1201–1204.
5. Yu J.R., She C.Y. Climatology of a midlatitude mesopause region observed by a lidar at Fort Collins, Colorado // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № D4. P. 7441–7452.
6. Meriwether J.W., Gao X., Wickwar V.B. et al. Observed coupling of the mesospheric inversion layer to the thermal tidal structure // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 9. P. 1479–1482.
7. States R.J., Gardner C.S. Thermal structure of the mesopause region (80–105 km) at 40°N latitude. I. Seasonal variation // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. № 1. P. 66–77.
8. States R.J., Gardner C.S. Thermal structure of the mesopause region (80–105 km) at 40°N latitude. II. Diurnal variation // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. № 1. P. 78–92.
9. Meriwether J.W., Gardner C.S. A review of the mesosphere inversion layer phenomena // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № D10. P. 12 405–12 416.
10. Hauchecorne A., Chanin M.L., Wilson R. Mesospheric temperature inversion and gravity wave dynamics // *Geophys. Res. Lett.* 1987. V. 14. № 10. P. 935–939.
11. She C.Y., Yu J.R., Chen H. Observed thermal structure of a midlatitude mesopause // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. № 7. P. 567–570.
12. Walterscheid R.L., Schubert G. Nonlinear evolution of an upward propagation gravity wave: Overtuning, convection, transience and turbulence // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47. № 1. P. 101–125.
13. Sica R.J., Thorsley M.D. Measurements of superadiabatic lapse rates in middle atmosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 20. P. 2797–2800.
14. Thomas L., Marsh A.K.P., Wareing D.P., Astin I., Chandra H. VHF echoes from the midlatitude mesosphere and the thermal structure observed by lidar // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № 8. P. 12 867–12 877.
15. Liu H.-L., Hagan M.E. Local heating / cooling of the mesosphere due to gravity wave and tidal coupling // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 15. P. 2941–2944.
16. Liu H.-L., Hagan M.E., Roble R.G. Local mean state changes due to gravity wave breaking and impacts on turbulence and mean state // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. P. 2152–2177.
17. Mlynczak M.G., Solomon S. A detailed evaluation of the heating efficiency in the middle atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № D6. P. 10 517–10 541.
18. Meriwether J.W., Mlynczak M.G. Is chemical heating a major cause of the mesosphere inversion layer? // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № D1. P. 1379–1388.
19. Clancy R.T., Rush D.W. Climatology and trends of mesospheric (58–90 km) temperature based upon 1982–1986 SME limb scattering profiles // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № D3. P. 3377–3393.
20. Clancy R.T., Rush D.W., Callan M.T. Temperature minima in the average thermal structure of the middle atmosphere (70–80 km) from analysis of 40- to 92-km SME global temperature profiles // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № D9. P. 19 001–19 020.
21. Leblanc T., Hauchecorne A., Chanin M.L. et al. Mesospheric temperature inversions as seen by ISAMS (UARS) // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. № 12. P. 1485–1488.
22. Offermann D., Grossmann K.-U., Barthol P. et al. Cryogenic infrared spectrometer and telescopes for the atmosphere (CRISTA) experiment and middle atmosphere variability // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D13. P. 16 311–16 325.
23. Riese M., Spang R., Preusse P. et al. Cryogenic infrared spectrometer and telescopes for the atmosphere (CRISTA) data processing and atmospheric temperature and trace gas retrieval // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D13. P. 16 349–16 367.

24. Ward W.E., Oberheide J., Riese M. et al. Tidal signature in temperature data from CRISTA 1 mission // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D13. P. 16 391–16 403.
25. Preusse P., Schaeler B., Bacmeister J.T., Offermann D. Evidence for gravity waves in CRISTA temperatures // *Adv. Space Res.* 1999. V. 24. № 11. P. 1601–1604.
26. Preusse P., Eckermann S.D., Oberheide J. et al. Modulation of gravity waves by tides as seen in CRISTA temperatures // *Adv. Space Res.* 2001. V. 27. № 10. P. 1773–1778.
27. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO₂: 1. Описание метода и анализ его точности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 6. С. 789–800.
28. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO₂: 2. Обработка данных эксперимента CRISTA // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 6. С. 801–810.