

УДК 551.521.32

ОЗОН В МЕЗОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА CRISTA-1: 2. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ

© 2005 г. В. С. Косцов, Ю. М. Тимофеев

Научно-исследовательский институт физики, Санкт-Петербургский государственный университет
198904 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1

E-mail: vlad@troll.phys.spbu.ru

tim@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 18.03.2004 г., после доработки 30.07.2004 г.

В результате интерпретации спектров уходящего излучения горизонта в области 10 мкм методом, учитывающим эффект нарушения локального термодинамического равновесия, получены вертикальные профили содержания озона в верхней стратосфере и мезосфере в квазиглобальном масштабе (космический эксперимент CRISTA-1, ноябрь 1994 г.). Представлены и проанализированы результаты дневных, ночных и сумеречных наблюдений. В верхней стратосфере (40–55 км) в исследованном диапазоне широт в течение периода наблюдений значения отношения смеси озона практически одинаковы днем и ночью. Выше 55 км ночные значения содержания озона существенно превышают дневные. На высоте 90 км среднее значение отношения смеси озона составляет 2 млн^{-1} днем и 9.8 млн^{-1} ночью. Относительные вариации отношения смеси озона на высотах 40–70 км малы и составляют 15–20%. Выше 70 км ночью и 75 км днем относительные вариации содержания озона начинают резко расти и достигают максимальных значений 100–120% вблизи высоты 80 км. Сравнение величин отношения средних дневных значений содержания озона к средним ночным с данными эксперимента MLS и результатами моделирования на высотах 55–70 км демонстрирует хорошее согласие. Проведено сравнение средних профилей содержания озона (день, ночь) с рядом модельных профилей: ночью на высотах 85–90 км и днем выше 70 км результаты обработки данных эксперимента CRISTA-1 превышают модельные значения. Широтные вариации наиболее заметно проявляются на высотах более 70 км. Днем наблюдается увеличение содержания озона в экваториальной области – плавное на высотах 50–60 км и резкое – в окрестности 80 км. Ночью на высотах более 80 км содержание озона растет от Южных широт к северным, имея заметный локальный максимум в экваториальной области (на высоте 80 км в области 0° – 20° N). На высотах 60–80 км изменение содержания озона в зависимости от зенитного угла Солнца проявляется на заходе Солнца более резко, чем на восходе.

1. ВВЕДЕНИЕ

Озон играет важную роль в формировании термической структуры и динамики мезосферы [1–3]. Поглощение озоном ультрафиолетовой (УФ) радиации Солнца и участие озона в экзотермических реакциях определяет важную роль этого газа в регулировании солнечного и химического притоков тепла в мезосфере. Относительно простая фотохимия озона в мезосфере, включающая, прежде всего, циклы кислорода и нечетного водорода, позволяет использовать экспериментальные данные о пространственно-временных вариациях озона для проверки и уточнения численных моделей мезосферы, в том числе для уточнения значений скоростей различных реакций. Аналогичные возможности открывает наличие суточных вариаций в содержании мезосферного озона, обусловленных прекращением в ночное время фотолиза озона и рекомбинацией O_2 и O в молекулу озона.

Существенное влияние интенсивности УФ радиации Солнца на содержание озона в мезосфере дает возможность исследовать солнечно-земные взаимодействия, в частности, влияние различных солнечных циклов на мезосферный озон, что обеспечивает дополнительную возможность совершенствования фотохимических моделей атмосферного озона.

Важным обстоятельством в настоящее время является наличие значительных долговременных отрицательных трендов температуры в мезосфере [4, 5]. Физические причины этих трендов неясны. Предполагаемый рост содержания углекислого газа в мезосфере не позволяет количественно объяснить эти тренды. Для их объяснения требуется новая, более полная экспериментальная информация о различных параметрах мезосферы, прежде всего, о ее газовом составе.

Исследования пространственно-временных вариаций содержания озона проводятся уже длительное время и с помощью разнообразных методов. Огромное количество информации о содержании O_3 в стратосфере в последние десятилетия было получено с помощью различных космических методов измерений [6]. Данные о содержании озона в мезосфере и нижней термосфере не так многочисленны. Соответствующие исследования были начаты с помощью масс-спектрометров, установленных на ракетах (см., например, [7]). Из спутниковых экспериментов следует особо отметить ATMOS и CRISTA-1(2), которые позволили зондировать всю мезосферу и часть термосферы (во многих других спутниковых экспериментах “потолок зондирования” был существенно ниже).

Многочисленные спутниковые, наземные и аэростатные эксперименты по исследованию содержания озона в стратосфере позволили сформировать ряды данных, использовавшихся различными авторами для оценки трендов в содержании озона. Однако данные о долговременных трендах озона в верхней стратосфере и нижней мезосфере являются фрагментарными. В работе [8] обнаружено увеличение озона на высотах 55–65 км в период 1985–1989 гг., а измерения спутникового прибора HALOE [9] свидетельствуют об уменьшении содержания озона в области 0.5–5 мб (~37–53 км) в течение 1992–1995 гг.

Два космических эксперимента со спектрометром CRISTA, измерявшим собственное излучение горизонта Земли в значительном диапазоне прицельных высот (10–200 км) и в широкой области ИК спектра при среднем спектральном разрешении были проведены в 1994 г. (3–14 ноября) и 1997 г. (7–19 августа) [10, 11]. Существенно отметить, что, начиная с определенных прицельных высот (разных для разных полос поглощения атмосферных газов и времени суток), собственное излучение имеет характер неравновесного. Как следствие, интерпретация соответствующих спектров должна осуществляться с учетом эффекта нарушения локального термодинамического равновесия (ЛТР). Один из возможных подходов к учету эффекта нарушения ЛТР реализован в методе совместного определения температурного режима, газового состава и неравновесных населенностей колебательных состояний молекул атмосферных газов [12]. С помощью этого метода на основе интерпретации спектров в области 15 мкм, зарегистрированных в эксперименте CRISTA-1, получены вертикальные профили кинетической температуры, давления, содержания углекислого газа и колебательных температур ряда возбужденных состояний молекул CO_2 [13, 14]. Метод был адаптирован для интерпретации спектров в области 10 мкм с целью определения вертикаль-

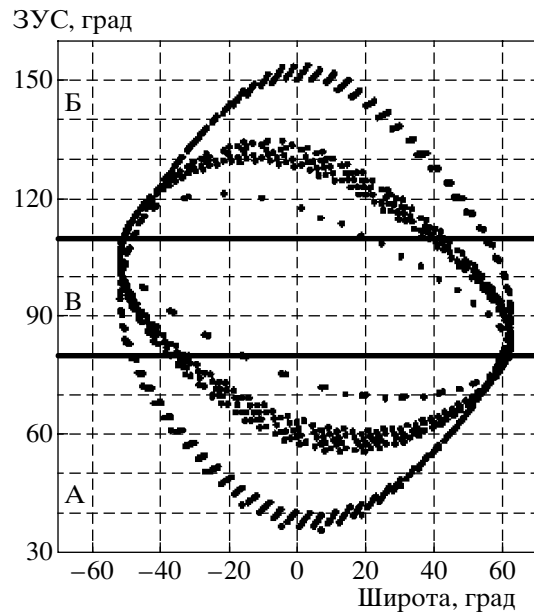


Рис. 1. Распределение точек измерений по широте и по значениям зенитного угла Солнца (ЗУС). Области А, Б и В соответствуют дневным, ночным и сумеречным измерениям.

ных профилей содержания озона в верхней стратосфере и мезосфере, а также колебательных температур нижних колебательных состояний молекул озона. Описание этого метода, оценки точности определения параметров, примеры обработки отдельных спектров и сопоставления полученных профилей содержания озона с результатами независимых измерений даны в работе [15]. В настоящей работе мы приводим анализ всего массива профилей содержания озона, полученного с помощью данного метода. Одним из существенных отличий настоящей работы от работы [16], где также анализируются результаты определения профилей содержания озона (полученные по данным спектральных измерений аппаратурой CRISTA независимо и с помощью принципиально иного подхода), является анализ результатов, соответствующих нестационарным условиям (заходы и восходы Солнца).

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В настоящей работе анализируются вертикальные профили содержания озона, восстановленные из спектров уходящего излучения горизонта, измеренных в области 10 мкм аппаратурой CRISTA в период 4–13 ноября 1994 г.

На рис. 1 охарактеризованы точки измерения уходящего излучения (и восстановленные профили) как функции высоты Солнца и широты. Поскольку содержание озона в мезосфере имеет ярко выраженный суточный ход, для проведения

Таблица 1. Общие характеристики анализируемых ансамблей измеренных значений содержания озона

| Характеристика | Все данные | Ночь | День | Сумерки | |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | Заход | Восход |
| Зенитный угол Солнца | 35°–154° | 110°–154° | 35°–80° | 80°–110° | 80°–110° |
| Широта | 51.8° S–62.3° N | 50.7° S–54.3° N | 48.5° S–61.5° N | 24.6° N–62.3° N | 51.8° S–16.2° S |
| Число профилей | 882 | 301 | 358 | 116 | 107 |

анализа полный массив данных был разбит на несколько ансамблей. Общие характеристики ансамблей даны в табл. 1. Полный массив состоит из 882 профилей, полученных в широтном диапазоне 51.8°S – 62.3°N. Как и в [16], в качестве дневных и ночных измерений рассматривались измерения в диапазоне зенитных углов Солнца менее 80° и более 110° соответственно. Измерения в условиях существенной нестационарности содержания озона (в сумерках) были разделены на две группы – на заходе и на восходе Солнца. Измерения на заходе Солнца выполнены в Северном полушарии (24.6°N – 62.3°N), измерения на восходе Солнца – в Южном полушарии (51.8°S – 16.2°S). Как видно из таблицы, все ансамбли являются достаточно представительными и сопоставимы по количеству измерений.

Погрешности восстановления профилей озона и их подробный анализ даны в работе [15].

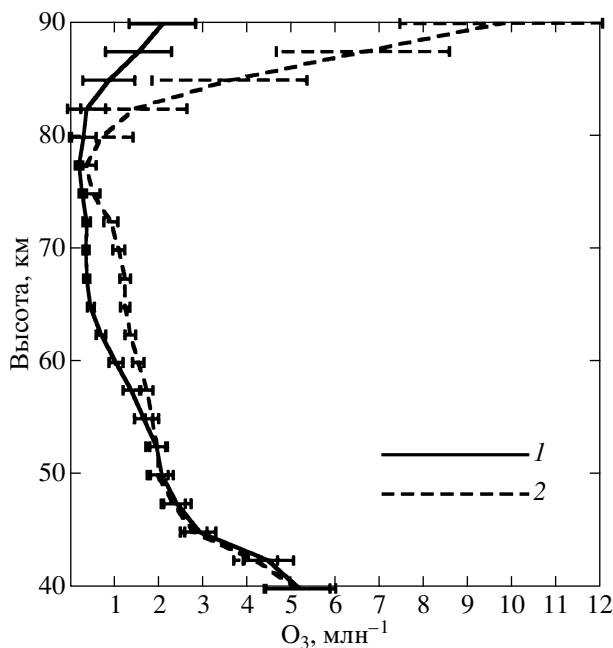


Рис. 2. Средние профили содержания озона в дневное (1) и ночное (2) время, рассчитанные по данным измерений CRISTA. Отрезками показаны среднеквадратические отклонения.

3. ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗОНА И ЕГО ВАРИАЦИИ

На рис. 2 приведены средние профили содержания озона, полученные по результатам измерений в дневное и ночное время. В диапазоне высот 40–52.5 км профили практически совпадают. Эта особенность, очевидно, связана с известной суточной стабильностью содержания озона ниже стратосферы. Существенные суточные вариации наблюдаются выше 55 км [17]. Как видно из рисунка, на высотах 55 км и более отношение смеси озона ночью существенно выше, чем днем. В диапазонах высот 55–75 км и 85–90 км различия превышают сумму значений среднеквадратических отклонений. На высоте 90 км среднее значение отношения смеси озона составляет 2 млн⁻¹ днем и 9.8 млн⁻¹ ночью.

Приведем сопоставление полученных среднего дневного профиля и среднего ночного профиля содержания озона с климатологическими данными. Для сопоставления мы использовали три ночных и два дневных модельных профиля из работы [18]. Эти профили были скомпилированы на основе ряда эмпирических моделей, результатов измерений и теоретических оценок (подробное описание и соответствующие ссылки см. в [18]). Сравнение среднего ночного профиля, полученного по результатам эксперимента CRISTA-1, с модельными профилями показывает следующее (см. рис. 3):

- в диапазонах высот 40–55 км и 75–85 км наблюдается хорошее согласие значений содержания озона, а именно, полученный нами средний профиль находится в “коридоре изменчивости”, образованном модельными профилями;

- в диапазоне высот 55–75 км обработка результатов эксперимента CRISTA-1 дает значения содержания озона, существенно превышающие модельные (в особенности это относится к модели 2);

- на высотах 85–90 км обработка результатов эксперимента CRISTA-1 дает значения содержания озона, которые на порядок выше, чем значения, соответствующие моделям 1 и 3, и в два раза выше по отношению к модели 2.

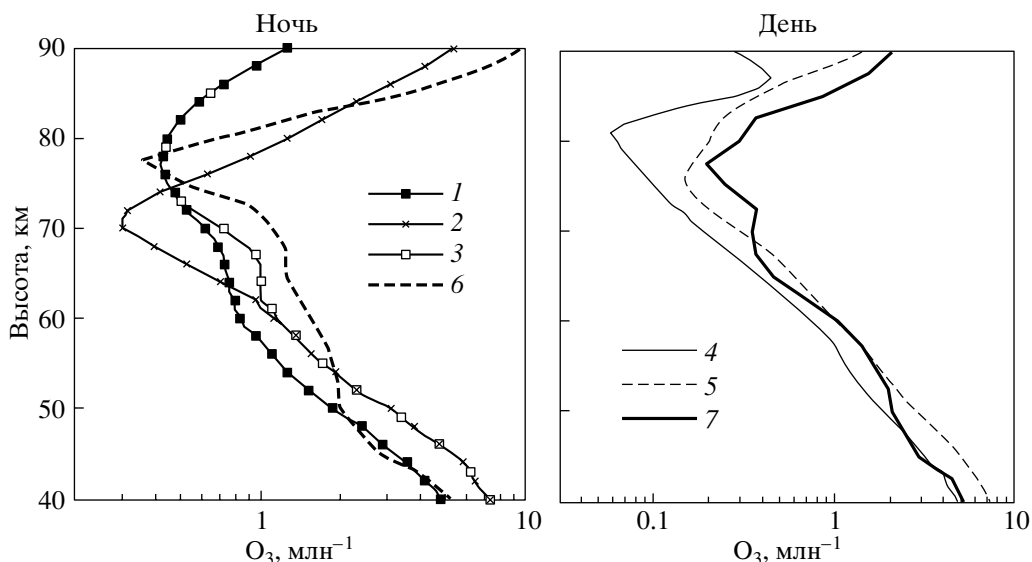


Рис. 3. Сравнение средних профилей содержания озона, полученных из ночных (6) и дневных (7) данных эксперимента CRISTA, с модельными профилями (1–5), использованными в работе [18] (см. текст).

Сравнение среднего дневного профиля, полученного по результатам эксперимента CRISTA-1, с модельными профилями показывает, что:

- профили очень хорошо согласуются в диапазоне высот 40–70 км;
- для высот более 70 км содержания озона, рассчитанные по данным эксперимента CRISTA, превышают модельные содержания озона (в особенности это относится к модельному профилю 4).

Как для ночных, так и для дневных данных эксперимента CRISTA характерен острый минимум содержания озона на высоте 77.5 км. Модельные профили (кроме 2 и 4) дают плавное изменение содержания озона в области минимума.

Изменчивость содержания озона в абсолютных и относительных единицах для рассмотренных ансамблей дневных и ночных профилей приведена на рис. 4. Отметим, что полученные вариации лишь частично обусловлены естественными (реальными) пространственно-временными вариациями озона, так как содержат случайную компоненту погрешностей измерений.

В дневное и ночное время поведение относительных и поведение абсолютных вариаций сходно. Относительные вариации отношения смеси озона на высотах 40–70 км малы и составляют 15–20%. Отметим, что случайные погрешности единичных измерений в этой области высот составляют 3–15%. Выше 70 км ночью и выше 75 км днем относительные вариации содержания озона начинают резко расти, достигая максимальных значений 100–120% вблизи высоты 80 км, где наблюдается минимум абсолютных значений отношения сме-

си. На этой высоте случайные погрешности восстановления содержания озона составляют 30% (день) и 18% (ночь), что свидетельствует о реальности рассчитанных вариаций содержания озона в этой области высот. На высоте 90 км относительные вариации содержания озона составляют

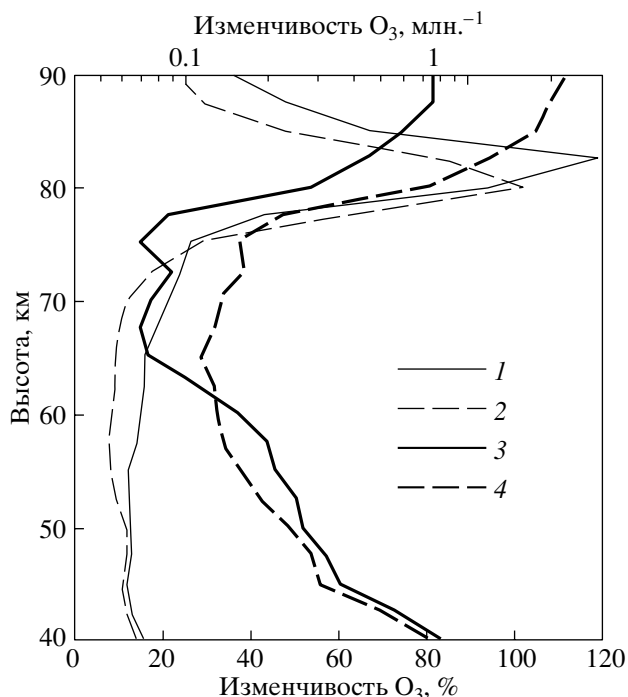


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение (изменчивость) дневного (1, 3) и ночного (2, 4) содержания озона (млн⁻¹ и %), рассчитанное по измерениям CRISTA.

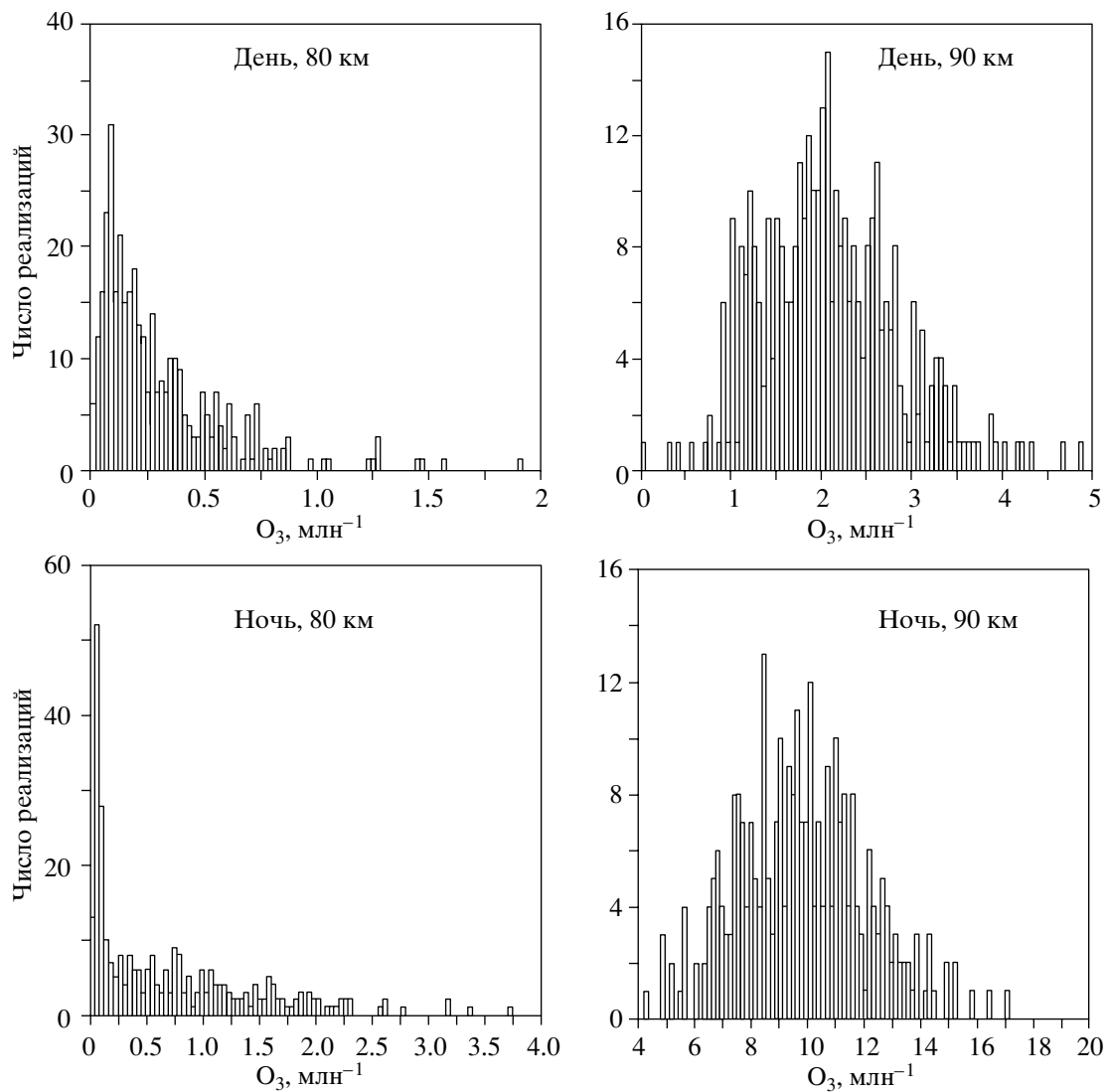


Рис. 5. Распределения восстановленных значений содержания озона на высотах 80 км и 90 км.

36% днем и 24% ночью, что сравнимо со случайными погрешностями восстановления. Для высот меньше, чем 60 км, абсолютные значения среднеквадратической изменчивости ночью несколько меньше, чем днем. Выше 62.5 км абсолютные значения изменчивости ночью существенно больше, чем днем, и проходят через максимум (2.3 млн^{-1}) на высоте 90 км. Днем на высоте 90 км вариации составляют 0.76 млн^{-1} .

Изменчивость содержания озона проиллюстрируем с помощью рис. 5, на котором представлены распределения значений содержания озона на высотах 80 км и 90 км для массива дневных и ночных наблюдений. Показаны два типичных распределения. Распределение на высоте 80 км характерно для области минимума мезосферного озона. Вид распределения, соответствующего высоте 90 км,

типичен для всех высот, кроме области минимума. Как видно из рисунка, распределение на высоте 80 км является сильно асимметричным. Дневной и ночной максимумы распределения отвечают значениям отношения смеси $0.08\text{--}0.10 \text{ млн}^{-1}$ и $0.04\text{--}0.08 \text{ млн}^{-1}$ соответственно. Как видно из рисунка, в единичных случаях на высоте 80 км днем были зарегистрированы значения, превышающие 1 млн^{-1} . Распределение ночных значений отношения смеси на высоте 80 км характеризуется острым пиком в области наиболее часто наблюдающихся значений и плавным спадом в области $0.2\text{--}2.0 \text{ млн}^{-1}$. В единичных случаях зарегистрированы значения в диапазоне $2\text{--}4 \text{ млн}^{-1}$. Дневные и ночные распределения на высоте 90 км почти симметричны. Отметим, что днем наблюдались как низкие, так и довольно высокие концентрации, такие как $4\text{--}5 \text{ млн}^{-1}$. Ночью значения, меньше чем 4 млн^{-1} не

наблюдались. Максимальные ночные значения отношения смеси равны $16\text{--}17 \text{ млн}^{-1}$.

Суточные вариации содержания озона в верхней стратосфере и мезосфере исследовались с помощью численных моделей, наземных и спутниковых наблюдений (см., например, [7, 19]). Поведение озона в различные периоды суток в общем хорошо согласуется с фотохимической теорией мезосферного озона. Как известно, в мезосфере ночью прекращается процесс фотолиза озона и его содержание возрастает из-за превращения атомарного кислорода в озон по известной реакции рекомбинации [2]. В качестве характеристики суточных вариаций рассмотрим отношение средних значений содержания озона для ансамбля дневных и ночных данных $R = q_{\text{день}}/q_{\text{ночь}}$. Это отношение для разных высот представлено в табл. 2. Для сравнения даны соответствующие значения, рассчитанные из измерений микроволновым радиометром MLS и на основании фотохимических моделей [19]. Результаты интерпретации эксперимента CRISTA-1 показывают, что, начиная с высоты 55 км, отношение R начинает уменьшаться. На высоте 70 км $R = 0.32$, а в области высот 75–80 км наблюдается локальный максимум со значениями R 0.42–0.50. На высотах 85–90 км это отношение достигает минимальных значений 0.21–0.24. В области локального максимума, на высоте 75–80 км, содержание озона минимально и погрешности его определения значительны. Как следствие, на этих высотах возможны существенные погрешности в определении значений R . Сравнение полученных нами значений отношения R с данными MLS и с результатами моделирования демонстрирует полное согласие значений, рассчитанных для высот 55–65 км. На высоте 70 км значение R , полученное из эксперимента CRISTA-1, несущественно превышает верхнюю границу диапазона изменчивости R , соответствующую данным MLS и результатам моделирования. Подчеркнем, что и на высотах 55–65 км полученные нами значения R находятся ближе к верхней, чем к нижней границе диапазона изменчивости R , соответствующего данным MLS и результатам моделирования.

4. ВЫСОТНО-ШИРОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

На рис. 6а, 6б показаны высотно-широтные распределения содержания озона, построенные для дневных и ночных измерений. Усреднение по широте проводилось по интервалам 5° . Как видно из рисунка, широтные вариации наиболее заметно проявляются выше 70 км. Днем содержание озона в экваториальной области увеличивается плавно на высотах 50–60 км и резко на высоте около 80 км. На высоте 90 км наблюдаются два

Таблица 2. Отношения средних дневных значений содержания озона к средним ночным значениям по данным различных экспериментов и по результатам моделирования

| Высота, км | CRISTA, данная работа | Результаты MLS и расчет по модели |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 90 | 0.21 | |
| 85 | 0.24 | |
| 80 | 0.42 | |
| 75 | 0.50 | |
| 70 | 0.32 | 0.00–0.30 |
| 65 | 0.37 | 0.30–0.40 |
| 60 | 0.66 | 0.55–0.70 |
| 55 | 0.89 | 0.85–0.90 |
| 50 | 1.04 | |
| 45 | 1.05 | |
| 40 | 1.01 | |

максимума в средних широтах обоих полушарий и локальный минимум в экваториальной области. На высоте 50 км ночная концентрация озона в Северном полушарии выше, чем в Южном. На высотах более 80 км содержание озона растет от Южных широт к северным и проходит через локальный максимум в экваториальной области (на высоте 80 км в области $0^\circ\text{--}20^\circ\text{N}$). Отмеченные особенности были получены и при обработке данных эксперимента CRISTA с помощью независимого метода интерпретации [16].

Для сравнения на рис. 6 (с) дано среднее высотно-широтное распределение содержания озона в ноябре по данным модели CIRA [20]. Необходимо учесть, что для представления модельных данных использовалась иная, чем на рис. 6а, 6б шкала в области малых значений отношения смеси, поскольку вариации по модели существенно меньше, чем вариации, обнаруженные экспериментально. Согласно представленным модельным данным, на высоте 75 км содержание озона минимально. На этой высоте наблюдается незначительное увеличение содержания озона в Северном полушарии. На высоте 80 км максимум наблюдается в экваториальной области и к северу от нее. На высотах 55–70 км содержание озона монотонно уменьшается по направлению от Южных широт к северным. Для большей наглядности на рис. 7 представлен широтный ход содержания озона на разных высотах, по данным эксперимента CRISTA и по данным модели CIRA. Как было отмечено, на высоте 80 км модельные данные, в отличие от экспериментальных, не дают резкого максимума

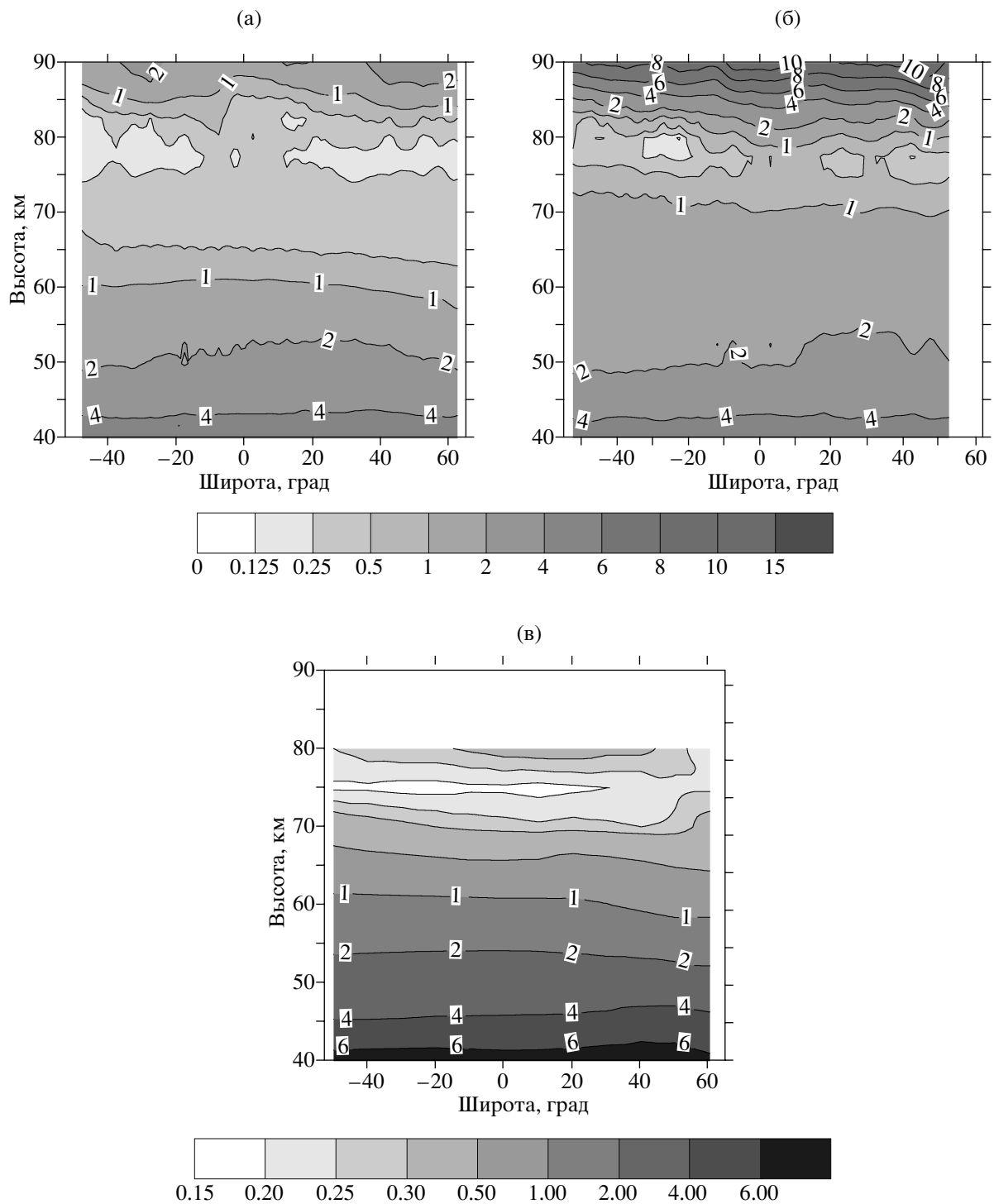


Рис. 6. Высотно-широтные зависимости дневных (а) и ночных (б) значений содержания озона, полученные из эксперимента CRISTA и соответствующие модели CIRA (в).

в экваториальной области. На высоте 75 км в северных широтах экспериментальные данные и модель дают незначительное уменьшение и незначительное увеличение содержания озона соответственно. На высотах 65 и 70 км как экспери-

мент, так и модель дают одинаковое уменьшение содержания озона от Южных широт к северным. Таким образом, учитывая малую величину широтных вариаций в высотной области 75 км, можно сделать заключение, что в целом на всех высо-

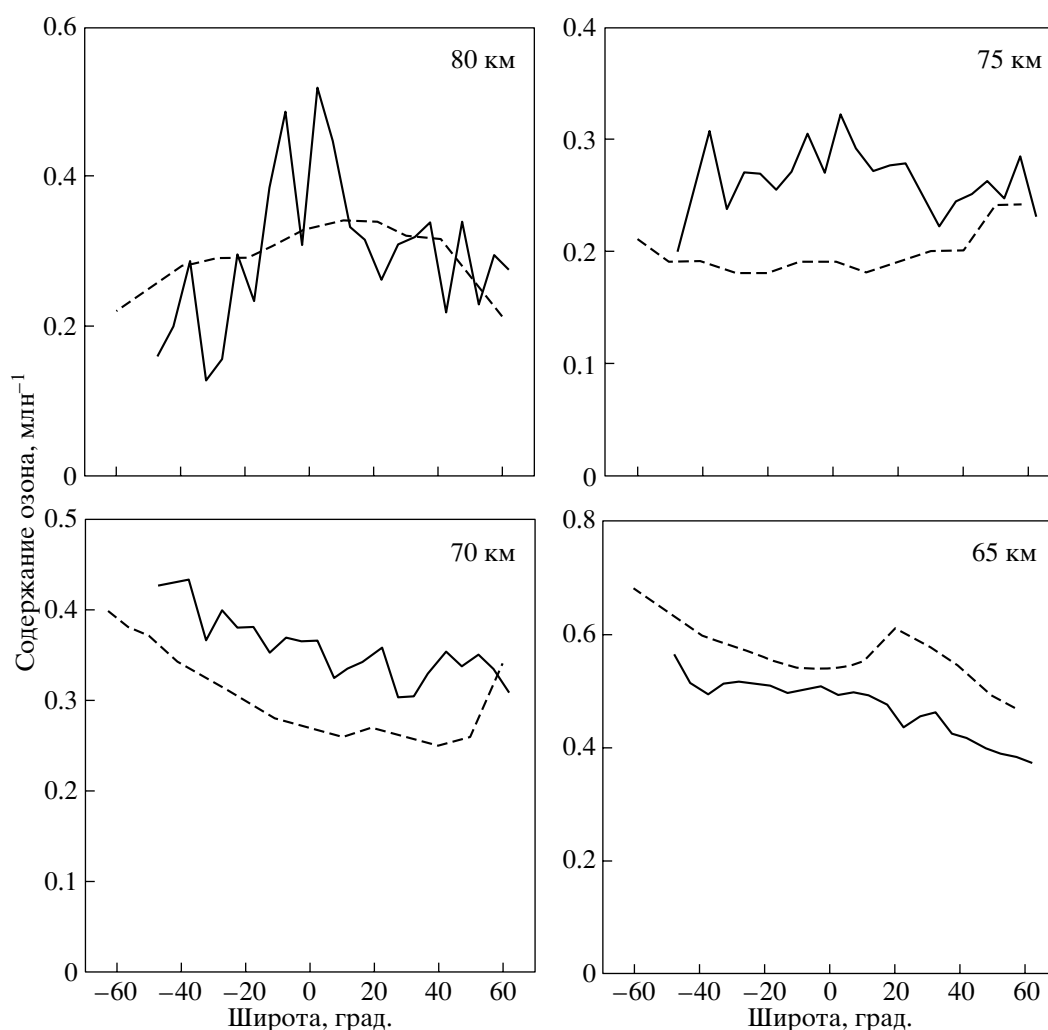


Рис. 7. Зависимость содержания озона от широты на высотах 65, 70, 75 и 80 км по данным CRISTA (сплошные линии) и по данным модели CIRA (пунктир).

тах наблюдается хорошее согласие экспериментальных и модельных данных.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОЗОНА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

На рис. 8 и 9 представлены результаты измерений содержания озона на высотах 60, 70, 80 и 90 км на заходе и восходе Солнца в диапазоне значений зенитного угла Солнца 80–110°. Проведем анализ полученных данных на основе построенных кривых “скользящего среднего”. На высоте 60 км на заходе Солнца содержание озона резко возрастает при изменении зенитного угла от 88° до 92°. При больших зенитных углах содержание озона практически постоянно и составляет около 1.6 млн^{-1} . На восходе содержание озона плавно уменьшается в диапазоне зенитных углов 100°–80°. На высоте 70 км на заходе Солнца резкое увеличение содержа-

ния озона наблюдается в диапазоне зенитных углов 92°–96°. На восходе на высоте 70 км, в отличие от ситуации, наблюдающейся на высоте 60 км, содержание озона резко падает при изменении зенитного угла Солнца от 100° до 89°. Как видно из рисунка, на высоте 70 км увеличение содержания озона на заходе и уменьшение на восходе равны по амплитуде.

На высоте 80 км резкое увеличение содержания озона на заходе Солнца наблюдается в диапазоне изменения зенитного угла 95°–97°. Уменьшение содержания озона происходит не столь резко и наблюдается на восходе в диапазоне изменения зенитного угла 101°–109°. Отметим, что при уменьшении зенитного угла с 90° до 80° на восходе Солнца содержание озона несколько возрастает на высоте 80 км. Также отметим, что при зенитных углах 100°–110° среднее содержание озона на высоте 80 км на заходе (0.5 млн^{-1}) выше, чем на

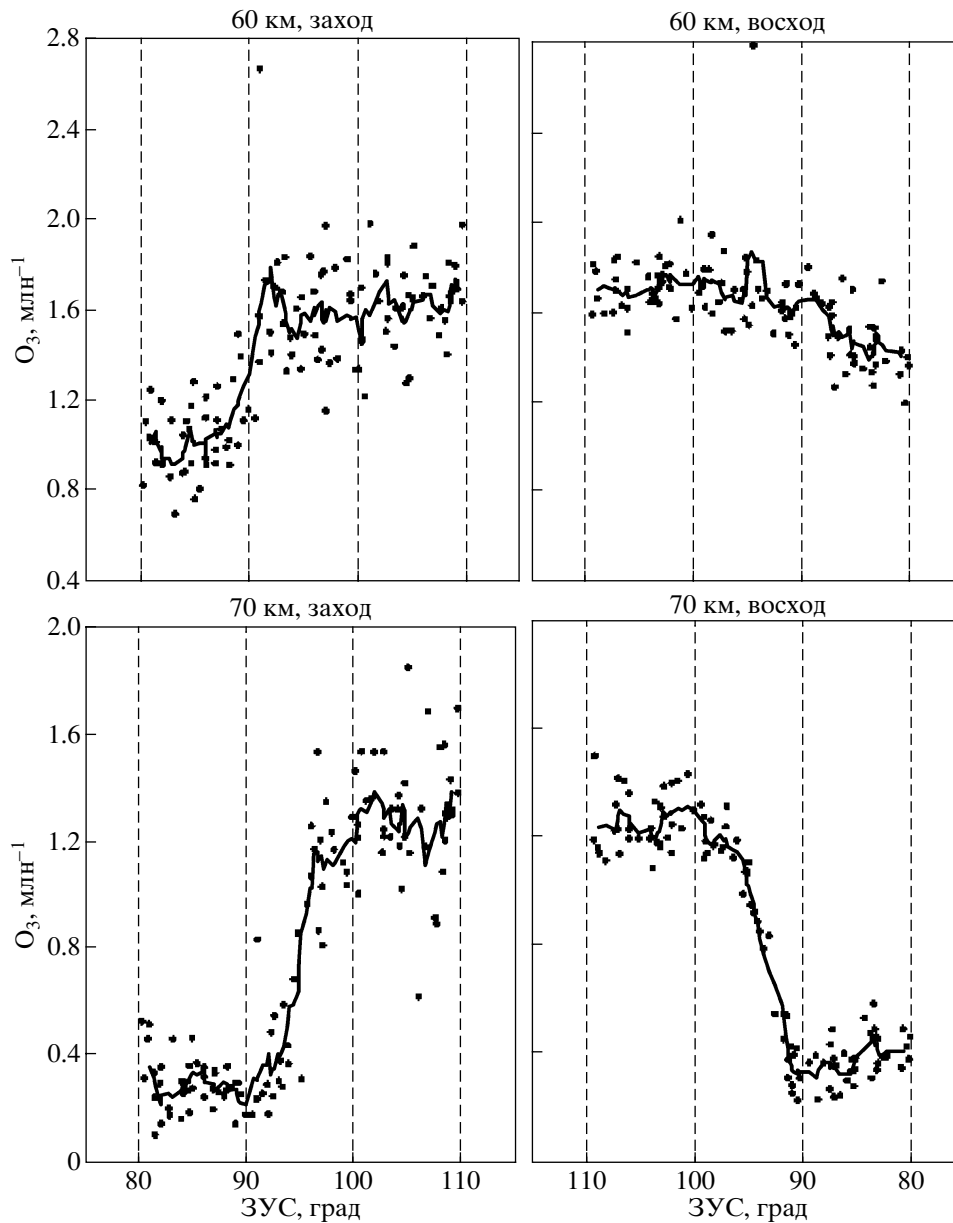


Рис. 8. Зависимость содержания озона от зенитного угла Солнца (ЗУС) на высотах 60 км и 70 км (на заходе и на восходе).

восходе (0.4 млн^{-1}). Это различие, по всей вероятности, обусловлено продемонстрированной выше широтной зависимостью содержания озона, а не изменением его концентрации в течение ночи. Напомним, что измерения на восходе Солнца осуществлялись только в средних широтах Южного полушария, а на заходе Солнца – в средних широтах Северного полушария (см. табл. 1).

На высоте 90 км наблюдается увеличение содержания озона на заходе в диапазоне зенитных углов 94° – 110° ; скорость увеличения максимальна при значениях зенитного угла 97° – 100° . На

восходе содержание озона уменьшается при изменении зенитного угла от 100° до 108° . Отметим, что при изменении зенитного угла в диапазоне 80° – 90° на заходе и на восходе Солнца наблюдается незначительное падение и рост содержания озона соответственно. Более высокие (в среднем) значения содержания озона на заходе Солнца, по видимому, объясняются, как и на высоте 80 км, существенной широтной зависимостью этого параметра. Измерения на заходе и на восходе выполнены в существенно различных широтных зонах. Поэтому полученные данные не дают воз-

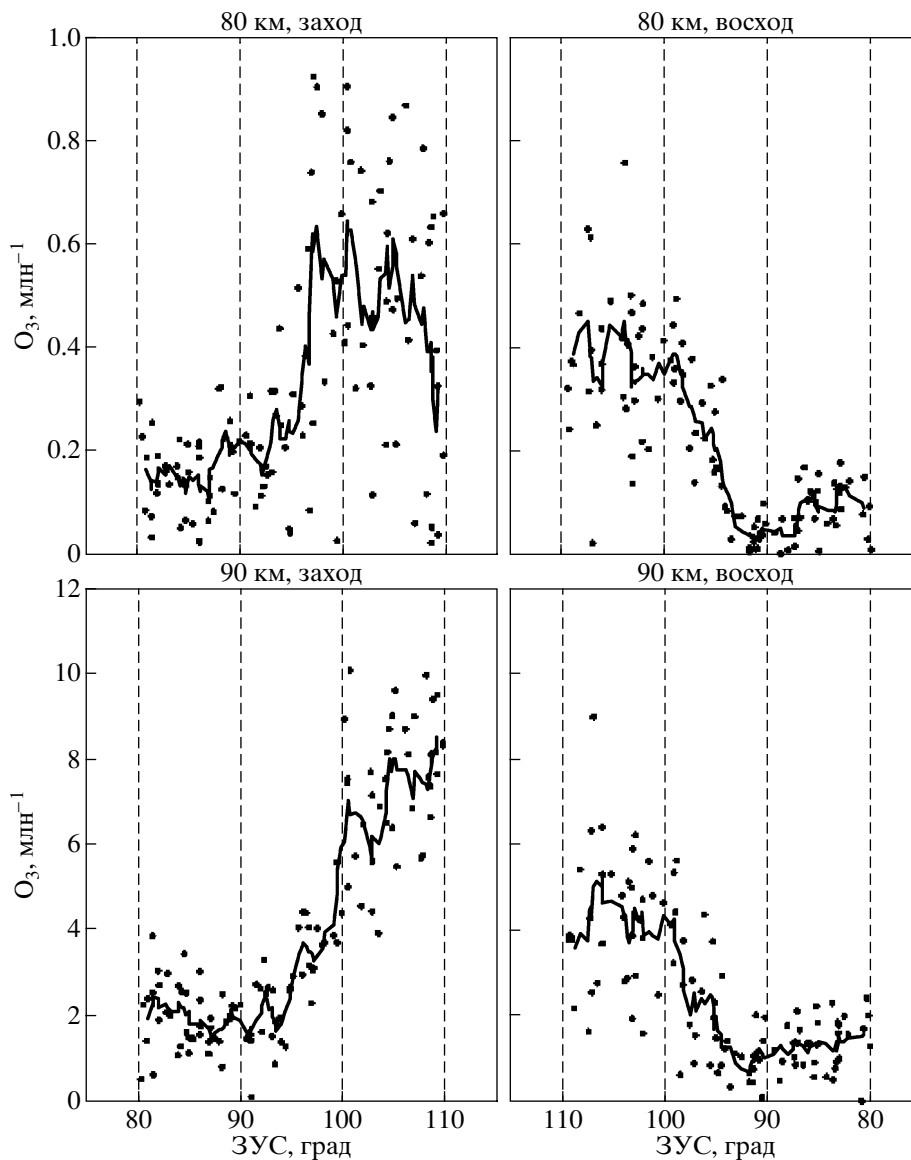


Рис. 9. Зависимость содержания озона от зенитного угла Солнца (ЗУС) на высотах 80 км и 90 км (на заходе и на восходе).

возможности делать определенные выводы об изменении содержания озона в течение ночи.

6. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате интерпретации спектров уходящего излучения горизонта в области 10 мкм методом, учитывающим эффект нарушения локального термодинамического равновесия, получены вертикальные профили содержания озона в верхней стратосфере и мезосфере в квазиглобальном масштабе (космический эксперимент CRISTA-1, ноябрь 1994 г.).

Проанализированы результаты дневных, ночных и сумеречных наблюдений.

В течение периода наблюдений в исследованном диапазоне широт значения содержания озона в верхней стратосфере (40–55 км) днем и ночью были почти одинаковыми. Выше 55 км ночные значения содержания озона существенно превышают дневные. В диапазонах высот 55–75 км и 85–90 км различия между дневными и ночными значениями превышают суммарные значения среднеквадратической изменчивости. На высоте 90 км среднее значение отношения смеси озона составляет 2 млн^{-1} днем и 9.8 млн^{-1} ночью.

Относительные вариации отношения смеси озона на высотах 40–70 км малы и составляют 15–20%. Выше 70 км ночью и 75 км днем относительные вариации содержания озона начинают резко

расти и достигают максимально 100–120% вблизи высоты 80 км (в области максимальных вариаций распределение значений содержания озона является асимметричным). На высоте 90 км относительные вариации содержания озона составляют 36% днем и 24% ночью, что сравнимо со случайными погрешностями восстановления.

Сравнение величин отношения средних дневных значений содержания озона к средним ночным с данными MLS и результатами моделирования демонстрирует полное согласие на высотах 55–65 км. На высоте 70 км значение указанного отношения, полученное по данным эксперимента CRISTA-1, несущественно превышает верхнюю границу диапазона изменчивости содержания озона, полученную по данным MLS и по результатам моделирования.

Проведено сравнение средних профилей содержания озона (день, ночь) с рядом модельных профилей. Ночные значения отношения смеси, измеренные на высотах 85–90 км, и дневные значения отношения смеси, измеренные выше 70 км, превышают модельные значения.

Широтные вариации наиболее заметно проявляются на высотах более 70 км. Днем наблюдается увеличение содержания озона в экваториальной области – плавное на высотах 50–60 км и резкое – в окрестности 80 км. Ночью на высоте 50 км содержание озона в Северном полушарии выше, чем в Южном. На высотах более 80 км содержание озона растет от Южных широт к северным и проходит через локальный максимум в экваториальной области (на высоте 80 км – в области 0°–20°N).

На высотах 60–80 км изменение содержания озона в зависимости от зенитного угла Солнца проявляется более резко на заходе, чем на восходе Солнца. Измерения на заходе и на восходе были выполнены в существенно различных широтных зонах. Поэтому полученные данные не дают возможности сделать определенные выводы об изменении содержания озона в течение ночи.

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. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л., Гидрометеиздат, 1983. 192 с.
2. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 413 с.
3. Mlynczak M.G. Energetics of the middle atmosphere: Theory and observation requirements // *Adv. Space Res.* 1996. V. 11. № 1. P. 117–126.
4. Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В. и др. Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1996. Т. 32. № 3. С. 329–339.
5. 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.
6. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.
7. Allen M., Lunine J.I., Yung Y.L. The vertical distribution of ozone in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. № D3. P. 4841–4872.
8. Aikin A.C. et al. Intercomparison of UV spectrometer and polarimeter on SMM and Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II ozone profile and trends in the lower mesosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № D4. P. 9023–9029.
9. Siskind D.E. et al. Implication of upper stratospheric trace constituent change observed by HALOE for O₃ and ClO from 1992 to 1995 // *Geoph. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 18. P. 3513–3516.
10. Offermann D., Grossmann K.U., Barthol P. et al. The Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere (CRISTA) experiment and middle atmosphere variability // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D13. P. 16311–16325.
11. Riese M., Spang R., Preusse P. et al. 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.
12. 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.
13. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М., Гроссманн К. и др. 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.
14. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Содержание углекислого газа в мезосфере по результатам интерпретации данных эксперимента CRISTA-1 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2003. Т. 39. № 3. С. 359–370.
15. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Озон в мезосфере по данным спутникового эксперимента CRISTA-1: 1. Метод определения вертикальных профилей и анализ его точности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2005. Наст. вып.
16. Kaufmann M., Gusev O.A., Grossmann K.U. et al. Satellite observations of daytime and nighttime ozone in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D9. doi: 0.1029/2002JD002800.
17. Solomon S., Kiehl J.T., Kerridge B.J. et al. Evidence for nonlocal thermodynamic equilibrium in the ν₃ mode of

- mesospheric ozone // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № D9 P. 9865–9876.
18. *Manuilova R.O., Shved G.M.* The 4.8 and 9.6 μm O_3 band emissions in the middle atmosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. V. 54. № 9. P. 1149–1168.
19. *Ricaud P. et al.* Diurnal variability of mesospheric ozone as measured by UARS Microwave Limb Sounder instrument: Theoretical and ground-based validations // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № D6. P. 10077–10090.
20. *Keating G.M., Pitts M.C., Young D.F.* Ozone reference models for the middle atmosphere (New CIRA) // *Middle Atmosphere Program. Handbook for MAP.* 1989. V. 31. P. 1–36.