

На правах рукописи

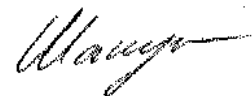
Шакун Алексей Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА O₂ И
ГИДРОКСИЛА OH НА НОЧНОЙ СТОРОНЕ ВЕНЕРЫ ПО ДАННЫМ
ЭКСПЕРИМЕНТА VIRTIS МИССИИ ВЕНЕРА-ЭКСПРЕСС**

Специальность 01.03.04 Планетные исследования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Москва

2011

Работа выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы
Института космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Засова Людмила Вениаминовна
(Институт космических исследований РАН)

Официальные оппоненты:

академик РАН Маров Михаил Яковлевич (Институт геохимии и аналитической
химии им. В.И.Вернадского РАН)

доктор физико-математических наук Шематович Валерий Иванович (Институт
астрономии РАН)

Ведущая организация:

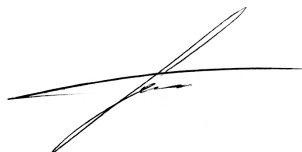
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Защита состоится 19 мая 2011 года в 13:00 на заседании диссертационного совета
Д 002.113.02 при Институте космических исследований Российской академии наук по
адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д.84/32, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан «18» апреля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Ткаченко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы

Целью настоящей работы является изучение ночных свечений молекулярного кислорода и гидроксила в ближней инфракрасной области спектра, с использованием данных, полученных картирующим спектрометром VIRTIS (миссия ЕКА «Венера–Экспресс») в надирной и лимбовой модах наблюдения; разработка метода восстановления яркости свечения кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) из надирных спектров ночной стороны Венеры, полученных с умеренным разрешением ($\sim 0,016$ мкм); исследование вертикального и горизонтального распределений эмиссий кислорода O_2 (1,27 мкм) и гидроксила OH (2,60...3,14 мкм) на ночной стороне Венеры, нахождение основных характеристик и зависимостей.

Актуальность темы диссертации

Об актуальности темы диссертации свидетельствует активное проведение космических исследований Венеры, осуществляемое в настоящее время, и подготовка новых проектов в ближайшем будущем (проект «Венера-Д», Россия), которые требуют развития методов обработки и интерпретации получаемых спектральных данных. Изучение свечений на ночной стороне Венеры позволяет характеризовать динамику атмосферы на высоте их возникновения, исследовать фотохимические процессы. В случае эмиссий кислорода и гидроксила это высота около 100 км (мезопауза), область, не доступная для исследования динамики другими дистанционными методами. Для исследования свечений на ночной стороне Венеры необходим систематический мониторинг, который может быть осуществлен только при наблюдении с орбиты.

Научная новизна работы

Благодаря работе изображающего спектрометра VIRTIS были впервые проведены систематические наблюдения эмиссии кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры и открыто свечение гидроксила (полосы Мейнеля).

При спектральном разрешении VIRTIS (~0,016 мкм) пик свечения кислорода (1,269 мкм) и пик теплового излучения нижней атмосферы (1,277 мкм) совпадают. Разработан метод восстановления яркости эмиссии кислорода из надирных спектров ночной стороны Венеры. В результате построена карта распределения усредненной яркости эмиссии для южного полушария ночной стороны Венеры (по данным за 2 года наблюдений).

Впервые были получены вертикальные профили свечения кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) и гидроксила OH ($\Delta v = 1$) для ночной стороны Венеры. Найдена зависимость яркости свечения кислорода от широты. Обнаружена корреляция основных характеристик эмиссий кислорода и гидроксила.

Анализ результатов обработки лимбовых и надирных спектральных изображений VIRTIS показал, что циркуляция в интервале высот 95...105 км имеет сложный характер. В экваториальных широтах значительное влияние на общую картину динамики оказывает циркуляция от подсолнечной к антисолнечной точке (SS-AS). Возможны сильные нисходящие потоки практически на любых широтах ночной стороны Венеры. Наблюдаемые профили эмиссии кислорода с двумя максимумами говорят о возможной модуляции плотности атмосферы гравитационными волнами. Корреляция эмиссий кислорода и гидроксила, вероятно, свидетельствует о связанных процессах образования этих молекул.

Личный вклад автора

- Разработка метода, позволяющего восстановить яркость свечения молекулярного кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) из надирных спектров ночной стороны Южного полушария Венеры, полученных с умеренным разрешением (~0,016 мкм); получение карт распределения яркости эмиссии кислорода для 718 орбит; построение карты распределения усредненной яркости эмиссии для Южного полушария ночной стороны Венеры; нахождение среднего значения яркости свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) по надирным измерениям гиперспектрометра VIRTIS.

- Восстановление вертикальных профилей эмиссий кислорода и гидроксила на ночной стороне Северного полушария Венеры по лимбовым данным

изображающего спектрометра VIRTIS; расчет основных характеристик вертикального распределения ночных свечений O_2 и OH; нахождение статистических зависимостей и коэффициентов корреляции; определение средних значений яркости свечений O_2 и OH по лимбовым данным эксперимента VIRTIS.

- Проведение анализа динамики верхней атмосферы Венеры и возможных механизмов образования кислорода и гидроксила с использованием обработанных данных спектрометра VIRTIS.

Все выносимые на защиту результаты получены автором лично или при его значительном участии.

Апробация работы

Результаты, изложенные в данной работе, были неоднократно представлены в докладах на семинарах Отдела физики планет и малых тел Солнечной системы ИКИ РАН, на конференциях молодых ученых ИКИ РАН (2007 – 2011 гг.), на рабочих совещаниях по прибору VIRTIS (2006 – 2010 гг.), на Генеральной ассамблее Европейского геофизического общества (2007 г.), на конференции Отделения планетных наук Американского астрономического общества (2007 г.), на Европейской конференции по планетным исследованиям (2010 г.), на 37-й и 38-й сессиях КОСПАР (2008 и 2010 гг.).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработан метод, позволивший восстановить яркость эмиссии кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) по спектрам, полученным гиперспектрометром VIRTIS (миссия ЕКА Венера–Экспресс) при надирных наблюдениях ночной стороны Венеры с умеренным разрешением ($\sim 0,016$ мкм).

2. Получены карты горизонтального распределения яркости ночного свечения молекулярного кислорода для 718 сеансов надирной моды наблюдений, с использованием разработанного метода. Обнаружена сильная переменность излучения в пределах от 0 до 6 МРл. Построена карта распределения усредненной

яркости ночного свечения молекулярного кислорода на Венере в зависимости от широты и местного времени.

3. Показано, что в экваториальных широтах на уровне мезопаузы (около 100 км) преобладающей модой атмосферной циркуляции является SS-AS (подъем атмосферных масс в подсолнечной точке и движение через терминаторы к антисолнечной точке). Влияние ретроградной зональной суперротации на динамику атмосферы на высоте эмиссии отсутствует. На широтах $> 20^\circ$ ю.ш. характер циркуляции более сложный, чем SS-AS или зональная суперротация.

4. Впервые по лимбовым измерениям восстановлены вертикальные профили распределения эмиссии кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$). Получены лимбовые профили эмиссии кислорода с двумя максимумами (аналогичные профилям ночного свечения O_2 в земной атмосфере). Такая форма профилей, вероятно, связана с модуляцией плотности атмосферы на высоте эмиссии гравитационными волнами.

5. Впервые получены вертикальные профили объемной яркости эмиссии гидроксила OH ($\Delta v = 1$) по лимбовым измерениям спектрометра VIRTIS. Обнаружена корреляция между характеристиками вертикальных профилей эмиссий OH и O_2 .

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения и четырех глав, содержит 105 страниц текста, включая 44 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 85 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели исследования, описываемого в последующих главах, и основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приведен обзор результатов исследования эмиссии кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры по данным с наземных телескопов [Crisp *et al.*, 1996; Ohtsuki *et al.*, 2005; Bailey *et al.*, 2008]. Рассмотрен механизм образования

свечения кислорода $a^1\Delta_g$ в верхней мезосфере Венеры [Connes et al., 1979; Mills, Allen, 2007; Yung, Demore., 1982; Krasnopolsky, 2010]. Эмиссия на длине волны 1,269 мкм возникает в результате рекомбинации атомов кислорода, которые образуются на дневной стороне Венеры при фотолизе CO_2 и заносятся циркуляцией на ночную сторону. Описаны современные представления о динамике атмосферы Венеры в интервале высот от 65 до 150 км [Alexander, 1992; Bougher et al., 2006; Limaye, 2007].

Приведен обзор исследований эмиссий кислорода и гидроксила в атмосфере Земли. Рассмотрены механизмы образования этих свечений на дневной и ночной стороне нашей планеты. Представлены вертикальные профили свечения кислорода $a^1\Delta_g$ в атмосфере Земли, полученные другими авторами [Thomas Young, 1981; Greer et al., 1986; Evans et al., 1972].

Дано описание изображающего спектрометра VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer), его основных характеристик [Drossart et al., 2007]. Прибор предназначен для изучения состава, свойств атмосферы и облачного покрова, динамических процессов и термического картирования поверхности планеты. Рассмотрены режимы работы прибора, структура получаемых спектральных изображений, параметры орбиты АМС «Венера–Экспресс», приведены данные о пространственном покрытии Венеры сканами VIRTIS при его работе в лимбовом и надирном режимах.

При анализе калиброванных данных спектрометра VIRTIS был выявлен ряд неточностей калибровки. Проведена оценка критичности влияния ошибок калибровки на результат исследования. Описаны проведенные автором дополнительные калибровочные процедуры, позволяющие устранить недостатки, существенно искажающие результат.

Глава 2 посвящена обработке данных инфракрасного канала спектрометра VIRTIS с умеренным спектральным разрешением (VIRTIS-M), полученных в надирной моде наблюдений.

По причине умеренного спектрального разрешения VIRTIS-M ночное свечение кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) (максимум на длине волны 1,269 мкм) и тепловое излучение нижней атмосферы Венеры с максимумом на длине волны 1,277 мкм (проходящее в окне прозрачности между полосами поглощения CO_2) не разрешаются в спектрах, измеренных прибором. Для исключения вклада тепловой эмиссии в пик 1,27 мкм используется излучение, прошедшее через соседнее окно прозрачности (1,18 мкм) и

складывающееся из теплового излучения нижней атмосферы, излучения поверхности и полос поглощения водяного пара. Для анализа зависимости отношения яркостей пиков 1,27 и 1,18 мкм от параметров атмосферы и температуры подстилающей поверхности использовалось моделирование спектров теплового излучения ночной стороны Венеры в интервале длин волн от 1 до 1,4 мкм.

Температура поверхности Венеры [Seiff et al., 1985], в свою очередь, зависит от ее высоты. В расчетах использовались данные альтиметрии, полученные в результате работы радара Magellan на орбите Венеры [Pettengill et al., 1991].

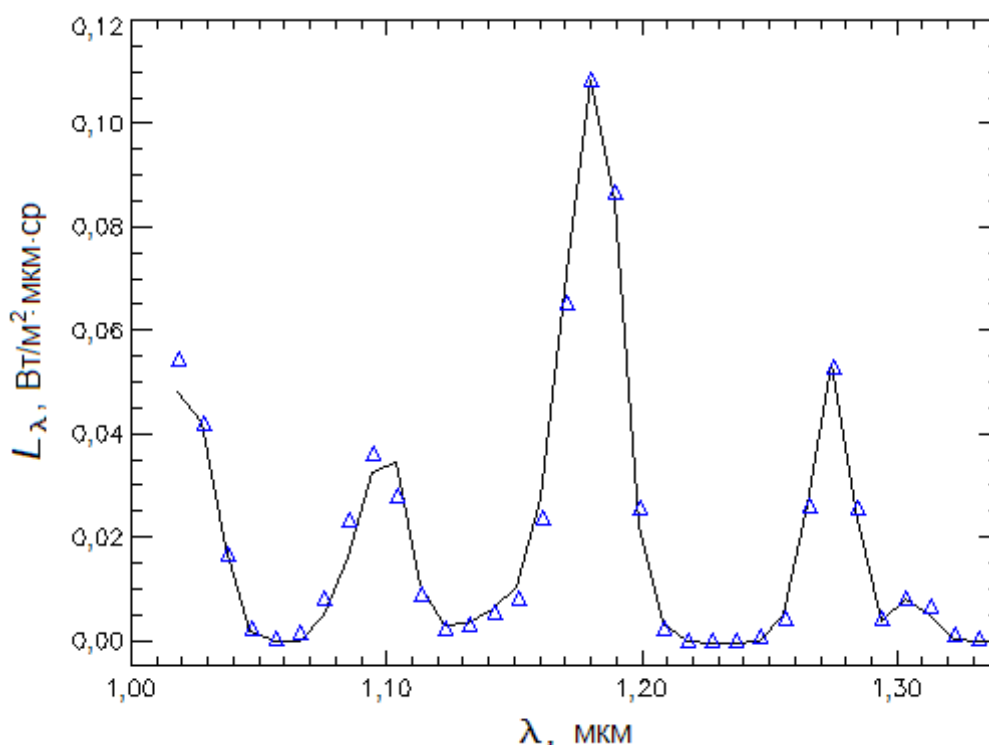


Рис. 1. Сравнение спектра, полученного спектрометром VIRTIS-M во время сеанса 320_02 (сплошная линия), и синтетического спектра (треугольники)

Для расчета синтетического спектра решалось уравнение переноса излучения методом дискретных ординат, с учетом многократного рассеяния в оптически толстом, рассеивающем практически консервативно, облачном слое ($\tau=20...40$). Использовалась четырехмодовая модель аэрозоля, состоящего из капель серной кислоты с концентрацией 80 %. Газовое поглощение рассчитывалось полинейно, с использованием спектроскопических баз данных High-T и HITRAN. Для корректного сравнения модельных и экспериментальных спектров производилась свертка

монохроматических спектров теплового излучения Венеры с аппаратной функцией прибора VIRTIS.

На надирных изображениях были выбраны участки, свободные от эмиссии кислорода. Для этих участков были рассчитаны синтетические спектры, которые подгонялись к экспериментальным спектрам посредством варьирования значений свободных параметров модели (оптической толщины облаков и содержания водяного пара). В результате были выбраны средние значения оптической толщины облаков ($\tau = 28$) и содержания водяного пара ($f_{\text{H}_2\text{O}} = 35 \cdot 10^{-6}$). Пример сравнения измеренного и синтетического спектров приведен на рис.1.

На основе рассчитанных спектров было найдено отношение яркости излучения, прошедшего в двух соседних окнах прозрачности (1,27 и 1,18 мкм), – $k(h, \tau_{cl}, n_{\text{H}_2\text{O}})$ и построены кривые зависимости данного коэффициента от параметров атмосферы и рельефа поверхности планеты.

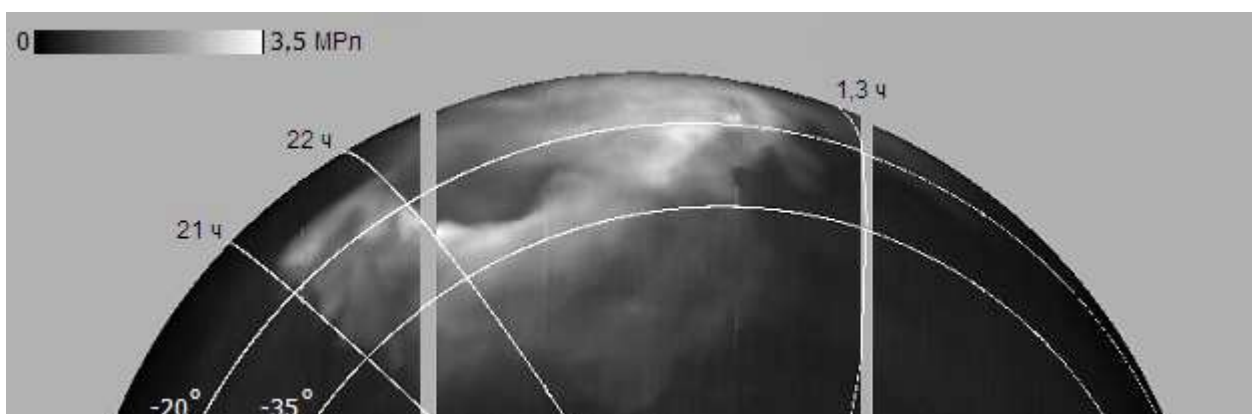


Рис. 2. Пример распределения яркости эмиссии кислорода на ночной стороне Венеры (орбита 93). На рисунке нанесены значения широт и местного времени.

Для каждого спектра VIRTIS-M, снятого в надирной моде наблюдений, из яркости излучения пика 1,27 мкм вычиталась яркость излучения пика 1,18 мкм, помноженная на соответствующий коэффициент. Полученная яркость свечения кислорода корректировалась с учетом его отражения от верхней границы облаков и угла наблюдения и переводилась в Рэли (Рл). Пример восстановленного распределения яркости ночного свечения кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) на Венере для орбиты 93 приведен на рис.2.

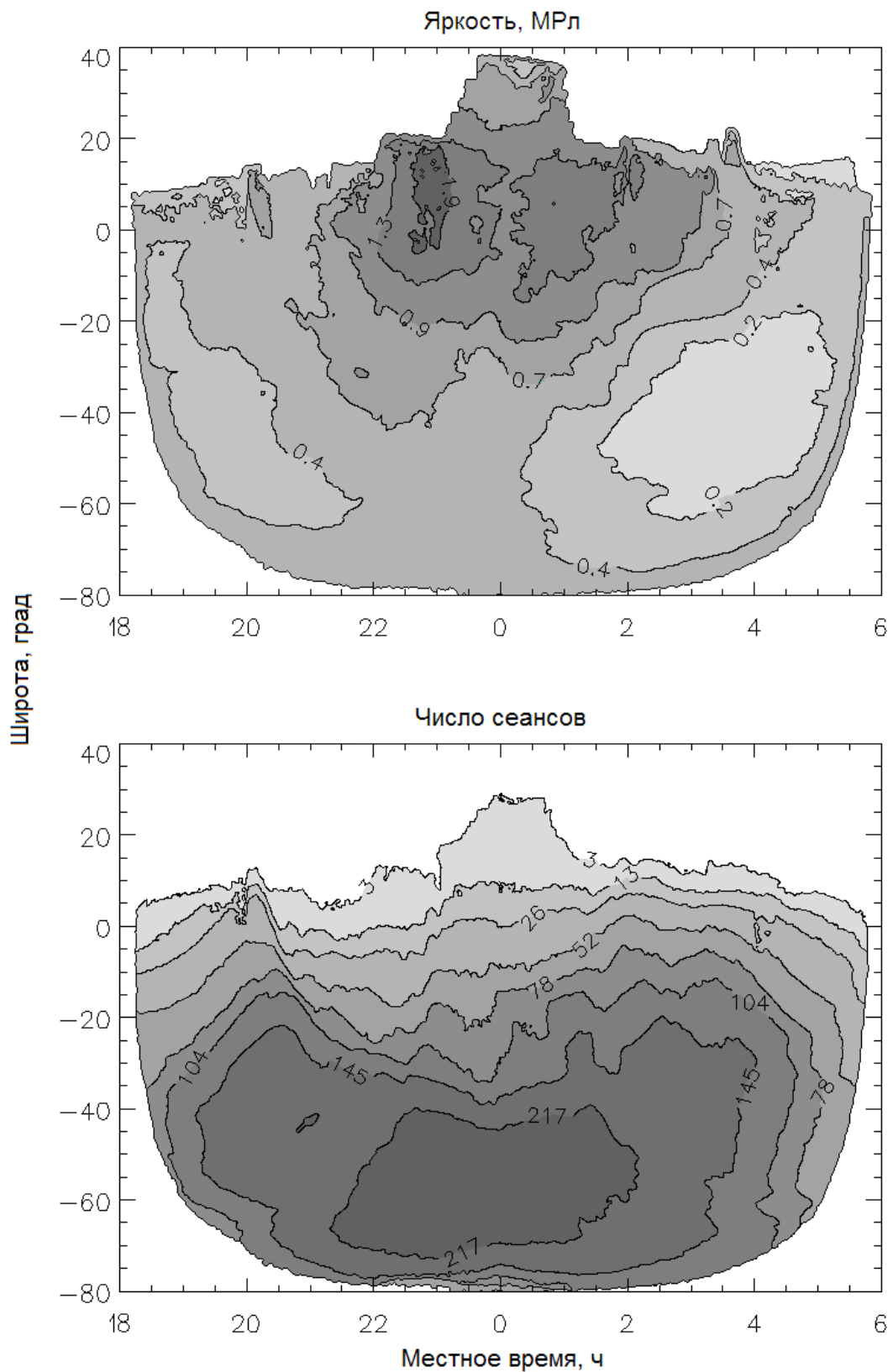


Рис. 3. Распределение усредненной яркости эмиссии кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) по ночной стороне Венеры (сверху) и соответствующее число сеансов наблюдений VIRTIS-M (снизу)

Описанный выше метод был применен к 718 надирным спектральным изображениям VIRTIS-M с экспозицией не менее 3 с, полученным в период с июля 2006 г. по август 2008 г. В результате было восстановлено распределение усредненной яркости эмиссии кислорода на ночной стороне Венеры (рис 3). Среднее значение яркости эмиссии кислорода на ночной стороне Венеры по надирным данным спектрометра VIRTIS-M равно 0,35 МРл. Как видно из приведенного ниже распределения (см. рис. 3), в экваториальной области было проведено небольшое количество наблюдений, диапазон широт от -20 до -80° покрыт достаточно хорошо. Точность метода по абсолютной величине составляет 0,3 МРл.

В **главе 3** описана процедура обработки лимбовых данных инфракрасного спектрометра VIRTIS. В ее основе лежит метод регуляризации Тихонова для решения некорректной задачи с приближенной правой частью.

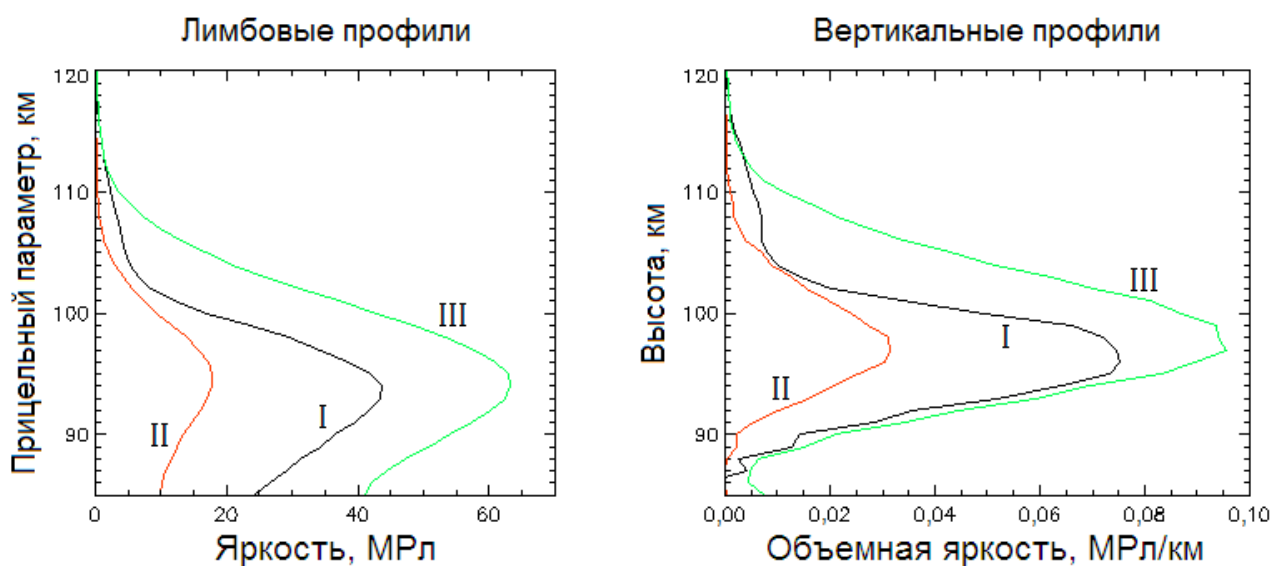


Рис. 4. Примеры лимбовых (слева) профилей свечения кислорода, измеренных спектрометром VIRTIS, и соответствующих им восстановленных вертикальных профилей (справа): I – 20° с.ш., 23,3 ч.; II – $42,8^\circ$ с.ш., 23,7 ч.; III – $8,6^\circ$ с.ш., 1,8 ч.

Было обработано 75 изображений ночной стороны Венеры, полученных спектрометром VIRTIS-M в лимбовой моде наблюдений. Лимбовые профили пространственно распределялись по координатной сетке широта – местное время, шаг сетки был выбран $0,1^\circ$ по широте на 0,4 мин по местному времени. Для каждого лимбового профиля свечения кислорода O_2 ($1,27 \mu\text{м}$) (рис. 4) и гидроксила

ОН (2,60...3,14 мкм) были восстановлены вертикальные профили. Точность восстановления объемной яркости оценивается в $\pm 10\%$.

Для описания восстановленных вертикальных профилей были введены такие характеристики как ширина профиля на половине максимума эмиссии, высота максимума, яркость свечения. Эти характеристики были рассчитаны для каждого из восстановленных вертикальных профилей эмиссий.

Получено среднее значение для яркости эмиссии O_2 ($a^1\Delta_g$), равное $0,45 \pm 0,36$ МРл, средняя высота максимума эмиссии принимает значения 97 ± 3 км, а средняя ширина профиля на половине максимума свечения – значения 8 ± 3 км. Был выявлен линейный рост яркости эмиссии кислорода от северного полюса к экватору.

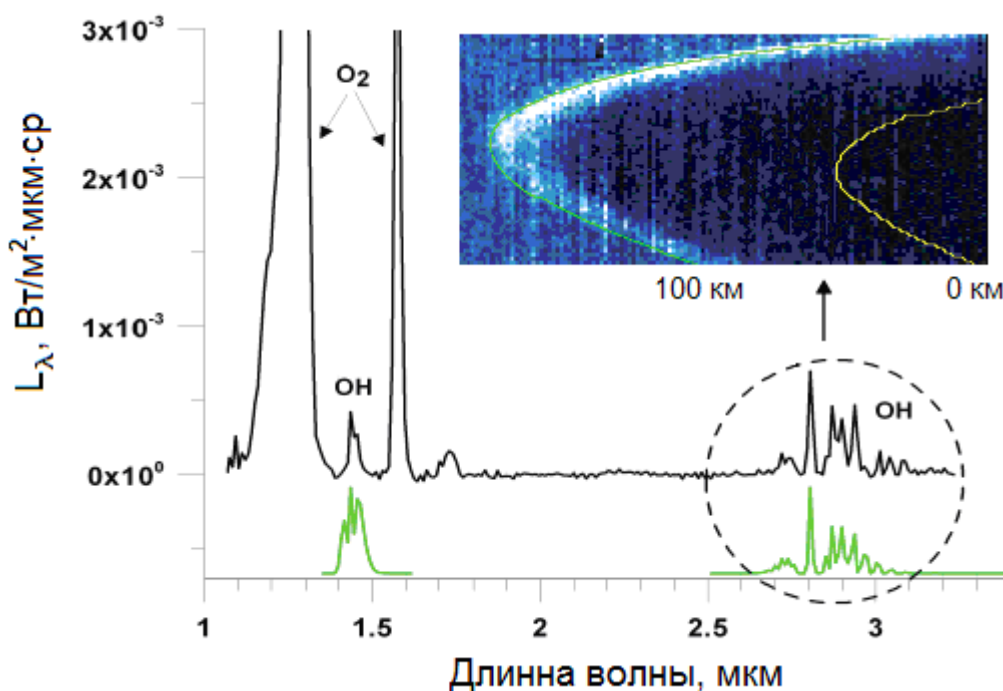


Рис. 5. Сравнение полос гидроксила ОН ($\Delta v = 1$) и ($\Delta v = 2$), измеренных спектрометром VIRTIS (сверху), с синтетическим спектром гидроксила (снизу). В правом верхнем углу показано изображение лимба ночной стороны Венеры (орбита 317_06), полученное спектрометром (изображение соответствует спектральному каналу 2,8 мкм). Наблюдается яркое свечение на лимбе при значении прицельного параметра около 100 км

Некоторые лимбовые профили, построенные по изображениям спектрометра VIRTIS-M, содержат два максимума эмиссии. Первый максимум наблюдается в интервале 96...98 км, а второй – в интервале 103...105 км. Статистика по таким

профилям невелика, поэтому трудно говорить о каких-либо зависимостях. Следует отметить, что лимбовые профили ночного свечения O_2 с двумя максимумами (на высоте ~ 88 и ~ 97 км) наблюдались и в земной атмосфере, такая форма профилей была объяснена действием гравитационных волн [Tarasick, Evans, 1993].

Благодаря работе спектрометра VIRTIS отождествлено присутствие молекулы гидроксила в атмосфере Венеры (впервые в атмосфере другой планеты). Впервые эта эмиссия наблюдалась в 1948 году в спектрах земной атмосферы [Meinel et al., 1950]. Свечение гидроксила заметно слабее, чем эмиссия O_2 ($a^1\Delta_g$), и наблюдалось только в лимбовой моде, когда геометрический фактор составляет ~ 50 по сравнению с надирными наблюдениями. На рис. 5 приведен пример сравнения наблюдаемых спектральных деталей эмиссии гидроксила для орбиты 317_06 и синтетических спектров OH.

Были получены средние значения яркости эмиссии OH ($\Delta v = 1$) в вертикальном направлении, -16 ± 8 кРл; ширины профиля на половине максимума, -9 ± 2 км; высоты максимума эмиссии, -98 ± 2 км.

Из-за отсутствия достаточного количества данных не удалось выявить каких-либо статистических зависимостей для характеристик вертикальных профилей свечения гидроксила OH ($\Delta v = 1$). Однако для тех областей ночной стороны северного полушария Венеры, для которых одновременно удалось восстановить вертикальные профили кислорода и гидроксила, были рассчитаны коэффициенты корреляции (по формуле Пирсона) для основных характеристик вертикальных профилей. Были получены следующие значения коэффициентов корреляции: для интенсивности свечения в вертикальном направлении – 0,67, для ширины профиля на половине максимума – 0,64, для высоты максимума эмиссии – 0,76.

В **главе 4** проводится анализ и интерпретация результатов, полученных в предыдущих главах, формулируются выводы.

Изображающий спектрометр VIRTIS (VEX) позволил провести регулярные наблюдения свечения кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры. Впервые были проведены наблюдения эмиссии гидроксила OH (полосы Мейнеля) в венерианской атмосфере. Спектральные изображения, полученные прибором за 2 года работы на орбите Венеры, дали возможность анализа динамических и фотохимических процессов в верхней атмосфере планеты.

Выводы

1. Разработан метод, позволивший при надирной геометрии наблюдений разделить тепловое излучение нижней атмосферы и эмиссию кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) в спектрах ночной стороны Венеры, полученных с разрешением 0,016 мкм (VIRTIS-M).

2. Построены карты распределения свечения O_2 ($a^1\Delta_g$), позволяющие делать выводы о динамике атмосферы на высоте ~ 100 км: в экваториальной области значительный вклад в наблюдаемую картину вносит циркуляция от подсолнечной к антисолнечной точке (SS-AS), влияния ретроградной суперротации не обнаружено. Возможны сильные нисходящие потоки на высоте эмиссии O_2 практически на любых широтах ночной стороны Венеры.

3. Получены следующие средние значения характеристик излучающего слоя O_2 ($a^1\Delta_g$): яркость эмиссии $0,35 \pm 0,30$ МРл (по надирным данным) и $0,45 \pm 0,36$ МРл (по лимбовым данным); высота максимума эмиссии 97 ± 3 км; ширина вертикального профиля на половине максимума эмиссии 8 ± 3 км.

4. По данным лимбовых наблюдений для Северного полушария Венеры виден практически линейный рост яркости свечения от полюса к экватору, что подтверждает существенную роль циркуляции SS-AS в экваториальных широтах на высоте эмиссии.

5. Возможной причиной возникновения вертикальных профилей эмиссии O_2 с двумя максимумами могут быть гравитационные волны, модулирующие плотность атмосферы (как и в случае атмосферы Земли).

6. Среднее значение яркости эмиссии OH ($\Delta v = 1$) в вертикальном направлении 16 ± 8 кРл, ширины профиля на половине максимума 9 ± 2 км; высота максимума эмиссии равна 98 ± 2 км.

7. Обнаруженная корреляция между характеристиками эмиссий OH и O₂, скорее всего, обусловлена связанным механизмом образования кислорода и гидроксила в возбужденных состояниях.

Цитируемая литература

Alexander M.J. A mechanism for the Venus thermospheric superrotation // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19 P. 2207 – 2210.

Bailey J., Meadows V.S., Chamberlain S., Crisp D. The temperature of the Venus mesosphere from O₂(a¹Δ_g) airglow observations // *Icarus*. 2008. V. 197. P. 247 – 259.

Bougher S.W., Rafkin S., Drossart P. Dynamics of the Venus upper atmosphere: Outstanding problems and new constraints expected from Venus Express // *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54. P. 1371 – 1380.

Connes P., Noxon J.F., Traub W.A., Carleton N. O₂ (a¹Δ_g) emission in the day and night airglow of Venus // *Astrophys. J.* 1979. V. 233. P. L29 – L32.

Crisp D., Meadows V.S., Bezard B., de Bergh C., Maillard J.-P., Mills F.P. Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: 1.27 μm O₂(a¹Δ_g) airglow from the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 4577 – 4593.

Drossart P., Piccioni G., Gérard J.C., Lopez-Valverde M.A., Sanchez-Lavega A., Zasova L., Hueso R., Taylor F.W., Bézard B., Adriani A. and 94 coauthors. A dynamic upper atmosphere of Venus as revealed by VIRTIS on Venus Express // *Nature*. 2007. V. 450. P. 641 – 645.

Evans W.F.J., Llewellyn E.J., Vallance J.A. Altitude distribution of the O₂ (¹Δ) nightglow emission // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. P. 4899 – 4901.

Greer R.G.H., Murtagh D.P., McDade I.C., Dickinson P.H.G., Thomas L., Jenkins D.B., Stegman J., Llewellyn E.J., Witt G., Mackinnon D.J., Williams E.R. ETON 1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow // *Planet. Space Sci.* 1986. V. 34. P. 771 – 788.

Krasnopolsky V.A. Venus night airglow: Ground-based detection of OH, observations of O₂ emissions, and photochemical model // *Icarus*. 2010. V. 207. P. 17 – 27.

Limaye S.S. Venus atmospheric circulation: Known and unknown // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. E04S09, doi:10.1029/2006JE002814.

Meinel I.A.B. OH emission bands in the spectrum of the night sky // *ApJ*. 1950. V. 111. P. 555.

Mills F.P., Allen M. A review of selected issues concerning the chemistry in Venus' middle atmosphere // *Planet. Space Sci.* 2007. V. 55. P. 1729 – 1740.

Ohtsuki S.N., Iwagami N., Sagawa H., Kasaba H., Ueno Y., Imamura M. Ground-based observations of Venus 1.27- μm O₂ airglow // *Adv. Space Res.* 2005. V. 36. P. 2038 – 2042.

Pettengill G.H., Ford P.G., Johnson W.T.K., Raney R.K., Soderblom L.A. Magellan: Radar performance and data products // *Science*. 1991. V. 252. P. 260 – 265.

Seiff A., Schofield J.T., Kliore A.J., Taylor F.W., Limaye S.S., Revercomb H.E., Sromovsky L.A., Kerzhanovich V.V., Moroz V.I., Marov M.Ya. Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5. P. 3 – 58.

Tarasick D.W., Evans W.F.J. A review of the O₂ ($a^1\Delta_g$) and O₂ ($b^1\Sigma_g^+$) airglow emissions // *Adv. Space Res.* 1993. V. 13. № 1. P. 145 – 148.

Thomas R.J., Young R.A. Measurements of atomic oxygen and related airglows in the lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* 1981. V.86. P. 7389-7393.

Yung Y.L., Demore W.B. Photochemistry of the stratosphere of Venus: implications for atmospheric evolution // *Icarus*. 1982. V. 51. P. 199 – 247.

Публикации по теме диссертации

1. Piccioni G., Drossart P., Zasova L., Migliorini A., Gérard J.-C., Mills F.P., **Shakun A.**, García Muñoz A., Ignatiev N., Grassi D., Cottini V., Taylor F.W., Erard S. The *Virtis-Venus Express Technical Team* First detection of hydroxyl in the atmosphere of Venus // *Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 483, Issue 3. P. L29-L33.
2. Piccioni G., Zasova L., Migliorini A., Drossart P., **Shakun A.**, García Muñoz A., Mills F.P., Cardesin-Moinelo A. Oxygen nightglow vertical distribution from the VIRTIS Near IR observations in the Venus upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research*. 2009. V. 114. CitelID E00B38.
3. **Шакун А.В.**, Засова Л.В., Пиччиони Дж., Дроссар П., Миглиорини А. Исследование свечения кислорода O₂($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры по надирным данным эксперимента VIRTIS-M миссии “Венера-Экспресс” // *Космические исследования*. 2010. Т. 48. № 3. С. 232-239.

4. **Шакун А.В.**, Засова Л.В., Дроссар П., Пиччиони Дж. и техническая команда VIRTIS. Свечение кислорода на ночной стороне Венеры: первые результаты эксперимента VIRTIS-M на борту VENUS-EXPRESS // Тезисы докладов IV Конференции молодых ученых ИКИ РАН, 2007. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 27.
5. *Zasova L., Piccioni G., Migliorini A., Drossart P., **Shakun A.** VIRTIS/Venus-Express Team* Vertical Distribution of the 1.27 μm O₂ Airglow from the Limb VIRTIS-M VEX Observations // Bulletin of the American Astronomical Society. 2007. V. 39. P. 503.
6. **Шакун А.В.**, Засова Л.В., Пиччиони Дж., Дроссар П. Исследование эмиссии кислорода на ночной стороне Венеры по данным эксперимента VIRTIS-M (VENUS-EXPRESS) // Тезисы докладов V Конференции молодых ученых ИКИ РАН, 2008. М.: ИКИ РАН, 2008. С. 51 – 52.
7. *Zasova L., Migliorini A., Piccioni G., Drossart P., Khatuntsev I., **Shakun A.**, Ignatiev N.* Night airglows in Venus atmosphere from VIRTIS-M Venus Express data // Pros. of the 37th COSPAR Scientific Assembly. 2008. P. 3593.
8. **Шакун А.В.**, Засова Л.В., Пиччиони Дж., Дроссар П. и техническая команда VIRTIS. Исследование ИК-эмиссии кислорода на ночной стороне Венеры по данным эксперимента VIRTIS-M (VENUS-EXPRESS) // Тезисы докладов VI Конференция молодых ученых ИКИ РАН, 2009. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 49.
9. *Zasova L., **Shakun A.**, Migliorini A., Ignatiev N., Piccioni G., Drossart P.* Hydroxyl in the VENUS atmosphere from VIRTIS VEX data // Pros. of the 38th COSPAR Scientific Assembly. 2010. P. 169.
10. *Zasova L., Khatuntsev I., **Shakun A.**, Piccioni G., Drossart P.* Distribution of the O₂ emission on the night side of VENUS and circulation at around 100 km altitude // Pros. of the 38th COSPAR Scientific Assembly. 2010. P.104.
11. **Шакун А.В.**, Засова Л.В., Пиччиони Дж., Дроссар П. и техническая команда VIRTIS. Эмиссии кислорода и гидроксила на ночной стороне Венеры по надирным и лимбовым данным эксперимента VIRTIS-M (VENUS-EXPRESS) // Тезисы докладов VIII Конференция молодых ученых ИКИ РАН, 2011. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 53.

055(02)2

Ротап rint ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная 84/32

Подписано к печати 01.04.11

Заказ 2239

Формат 70×108 1/32 Тираж 100

0,9 уч.-изд.л.