

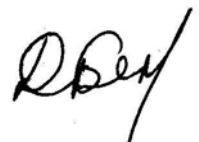
*На правах рукописи*

Беляев Денис Анатольевич

**Исследование планетных атмосфер  
методом солнечного просвечивания  
с применением акустооптической фильтрации**

01.03.04 – планетные исследования

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Москва 2008

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

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

Кораблев Олег Игоревич

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук  
академик

Маров Михаил Яковлевич (ИПМ им. Келдыша)

доктор физ.-мат. наук  
профессор

Курт Владимир Гдалевич (АКЦ ФИАН)

Ведущая организация:

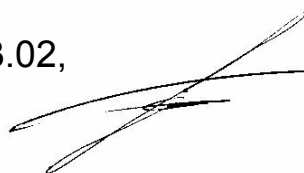
Физический факультет  
Санкт-Петербургского государственного университета

Защита диссертации состоится 29 декабря 2008 г. в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.113.02 в конференц-зале Института космических исследований РАН по адресу:  
Москва, 117997, ул Профсоюзная, 84/32, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 29 ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 002.113.02,  
кандидат физ.-мат. наук



А.Ю. Ткаченко

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Экспериментальные исследования атмосферы планет методом солнечного и звездного просвечивания (также называемого затменным методом) позволяют провести детальный анализ вертикального распределения атмосферных газов и аэрозолей, а также структуры и динамики атмосферных слоев. Орбитальные измерения указанным способом дают возможность наблюдать эволюцию спектра пропускания атмосферы с высотой в реальном масштабе времени, избежав калибровок прибора по абсолютной величине интенсивности регистрируемого сигнала.

Первые орбитальные эксперименты по солнечному просвечиванию были проведены с искусственных спутников Земли (ИСЗ) и направлены в основном на мониторинг содержания озона, водяного пара, других газовых составляющих и аэрозолей в земной атмосфере. При этом использовались спектрометры различных типов ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов. Встречались приборы с очень высоким спектральным разрешением ( $\sim 0,01 \text{ см}^{-1}$ ), однако их громоздкие размеры и масса исключают применение такого оборудования в межпланетных миссиях.

Зондирование вертикальной структуры атмосферы других планет (в диссертационной работе рассматривается только Марс и Венера) имеет большой интерес для понимания эволюции их климата. Спектроскопические измерения затменным методом при достаточном спектральном разрешении ( $\sim 0,2 \text{ см}^{-1}$ ) в ближнем ИК-диапазоне позволяют получать вертикальные профили содержания летучих компонентов и их изотопов, например,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HDO}$ . По этим профилям

можно делать выводы об истории диссипации воды на Марсе и Венере. Анализ профилей для серосодержащих газов ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}$ ) в надоблачном слое Венеры является также индикатором масштабных фотохимических процессов, связанных с сернокислотными облаками, полностью покрывающими планету. Кроме того, вариации содержания  $\text{SO}_2$  над облаками могут быть косвенными доказательствами вулканической активности на Венере, хотя, следует оговориться, вулканы на этой планете явно никогда не наблюдались.

До настоящего времени данные о вертикальном распределении содержания водяного пара в атмосфере Марса были доступны лишь из немногих экспериментов, среди которых самыми информативными (до миссии «Марс-Экспресс») являлись затменные измерения спектрометра «Огюст» с борта орбитального аппарата «Фобос-2» в 1989 году [1]. К сожалению, наблюдения продлились всего два месяца, и исследовать вертикальные профили  $\text{H}_2\text{O}$ , других газов и аэрозолей в полной мере не удалось. Высотное распределение воды в марсианской атмосфере также было получено из микроволновых наблюдений с Земли [2], однако пространственное разрешение в этом случае значительно ниже, чем при просвечивании. В настоящий момент осуществляются попытки восстановления вертикальных профилей водяного пара по наблюдениям прибора TES (Thermal Emission Spectrometer) с борта спутника Mars Global Surveyor [3]. Зондирование вертикального профиля  $\text{H}_2\text{O}$  также входит в число задач эксперимента MCS (Mars Climate Sounder) на Mars Reconnaissance Orbiter, однако его данные еще не опубликованы.

С орбиты Венеры солнечные затмения не наблюдались никогда. Вертикальные профили  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{SO}_2$  были померены спускаемыми аппаратами «Венера-11, 13, 14» и «Вега» в облачном слое и ниже [4, 5]. В то же время средняя атмосфера планеты (60-110 км), в частности

мезосфера, исследовалась с бортов КА «Пионер-Венера» [6, 7] и «Венера-15, 16» [8, 9], а также при наземных микроволновых [10] и миллиметровых [11] наблюдениях. До настоящего момента единственная информация о вертикальном распределении водяного пара в мезосфере Венеры была получена с помощью наблюдений с орбитальных телескопов в миллиметровом и субмиллиметровом спектральном диапазоне, но вертикальное разрешение подобных измерений невелико [12]. Изотопное соотношение D/H на Венере измерялось с борта КА «Пионер-Венера» [13, 14] и при наземных наблюдениях ночной стороны планеты [15], что дало схожие значения под облачным слоем, в ~157 раз превышающие то же соотношение на Земле.

Для лучшего понимания процесса диссипации воды на планете необходимо получить вертикальный профиль изотопного соотношения HDO/H<sub>2</sub>O, по которому оценивается обогащение дейтерия относительно более легкого водорода (D/H) в верхней атмосфере. Это значит, что измерения содержания водяного пара (например, в полосе 2,6 мкм) и HDO (3,7 мкм) должны проходить параллельно в процессе одного сеанса затмения.

Таким образом, прибор для солнечного просвечивания с орбиты должен сочетать следующие качества: компактность, высокое спектральное разрешение, способность регистрировать несколько участков спектра излучения одновременно или быстро переключаться с одного спектрального интервала на другой. Подобными характеристиками обладают спектрометры на основе акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ).

Этот фильтр может работать как самостоятельный диспергирующий элемент спектрометра, а в комбинации со схемой дисперсии высокого разрешения (например, эшелле-решетка) может быть использован для

селекции дифракционных порядков. Гибкость и быстроедействие электронной перестройки АОПФ при отсутствии механических подвижных частей обеспечивают почти моментальный (~10 мкс) доступ к любому участку спектра в широком диапазоне (не менее октавы). Такие преимущества акустооптических фильтров удачно подходят для решения задач солнечного просвечивания в межпланетных орбитальных миссиях, однако до недавнего времени в космических экспедициях АОПФ не применялись.

Диссертационная работа посвящена анализу результатов наблюдений атмосфер Марса и Венеры методом солнечного просвечивания с применением акустооптических приборов для фильтрации излучения в ближнем ИК-диапазоне. Исследования проводились в двух действующих затменных экспериментах: акустооптический спектрометр СПИКАМ и акустооптический эшелле-спектрометр SOIR. Прибор СПИКАМ (СПектроскопия Исследования Компонент Атмосферы Марса) миссии «Марс-Экспресс» Европейского космического агентства (ЕКА) зондирует марсианскую атмосферу с января 2004 года. Спектрометр SOIR (Solar Occultation in the InfraRed) миссии ЕКА «Венера-Экспресс» измеряет вертикальную структуру атмосферы Венеры с июня 2006 года. Основное внимание в работе уделено эксперименту SOIR; подобного рода измерения проводятся на Венере впервые.

Работа включает в себя все стадии космического эксперимента с акустооптическим блоком спектрометра SOIR: калибровки прибора (сначала лабораторные, а затем полетные), обработка и анализ данных измерений, выполненных на орбите Венеры.

### Цель работы

Целью работы является получение вертикальных профилей содержания водяного пара в атмосфере Марса и профилей H<sub>2</sub>O, HDO и SO<sub>2</sub> в атмосфере Венеры. Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- калибровка спектрометра SOIR как в лабораторных условиях, так и в полете;
- обработка данных с акустооптических экспериментов по солнечному просвечиванию на Марсе и Венере;
- интерпретация спектров пропускания атмосферы и восстановление вертикальных профилей указанных газов.

### Научная новизна

1. Впервые в атмосфере Марса проведены одновременные измерения содержания H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и аэрозолей на высотах 10-50 км.
2. В атмосфере Венеры получены спектры пропускания газов CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и HDO с рекордно высоким спектральным разрешением – 0,15 см<sup>-1</sup> ( $\lambda/\Delta\lambda\sim 30000$ ).
3. Впервые над облаками Венеры получены вертикальные профили содержания газов SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и HDO методом солнечного просвечивания. Измерения H<sub>2</sub>O и HDO проведены одновременно в процессе каждого сеанса затмения.

### Научная и практическая ценность

Одновременно измеренные профили содержания H<sub>2</sub>O и аэрозолей в атмосфере Марса важны для понимания климата планеты.

Параллельное детектирование линий поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HDO}$  с высоким спектральным разрешением в мезосфере Венеры позволяет оценить изменение изотопного соотношения D/H с высотой. По этому отношению делаются выводы об истории диссипации воды на планете.

Измерение содержания двуокиси серы в надоблачном слое Венеры открыло новый виток в исследованиях  $\text{SO}_2$  на планете; поставлены новые задачи перед фотохимическими моделями атмосферы планеты. Увеличение содержания  $\text{SO}_2$  может быть связано с вулканической активностью.

В практическом плане в результате проведенных лабораторных и полетных калибровок АОПФ для SOIR был накоплен уникальный опыт применения приборов нового класса в орбитальных космических экспериментах. Акустооптический эшелле-спектрометр на принципе аппаратуры SOIR нашел применение для решения задач экологии в земной атмосфере в рамках подготавливаемого в настоящее время эксперимента по мониторингу парниковых газов «РУСАЛКА» (РУчной Спектральный АнаЛизатор Компонент Атмосферы) на Российском сегменте МКС.

#### Личный вклад автора в полученные результаты

Лабораторные и полетные калибровки АОПФ для спектрометра SOIR и измерения  $\text{SO}_2$  над облаками Венеры полностью выполнены лично автором. Он также внес решающий вклад в обработку данных по измерениям профилей  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HDO}$  в атмосфере Венеры и провел дополнительные калибровки спектрометра СПИКАМ ИК в ходе проекта «Марс-Экспресс».



### Апробация работы

Результаты проведённых исследований были представлены на следующих конференциях: 4-я Украинская конференция по космическим исследованиям (Украина, Крым, сентябрь 2004 г); 2-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Россия, Москва, ноябрь 2004 г); 39-я конференция Американского астрономического сообщества (США, Орландо, октябрь 2007 г.); 4-я и 5-я конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Россия, Москва, апрель 2007 и 2008 гг.); Генеральная ассамблея Европейского геонаучного сообщества 2008 (Австрия, Вена, апрель 2008 г.); 37-я научная ассамблея КОСПАР (Канада, Монреаль, июль 2008 г.).

Кроме того, результаты исследований обсуждались на научных семинарах отдела Физики планет ИКИ РАН, лаборатории Акустооптики Физического факультета МГУ, кафедры Атмосферных исследований Физического факультета СПбГУ, а также на международных совещаниях по проекту «Венера-Экспресс».

По материалам диссертации опубликовано 7 статей в научных журналах, 1 статья в трудах конференций и 8 тезисов докладов.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. В конце приведен список литературы. Объем диссертации – 130 страниц, 25 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 120 ссылок.

## Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, излагаются цели диссертационной работы, приводится краткое содержание работы, отмечается научная новизна и практическая ценность проведённых исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы.

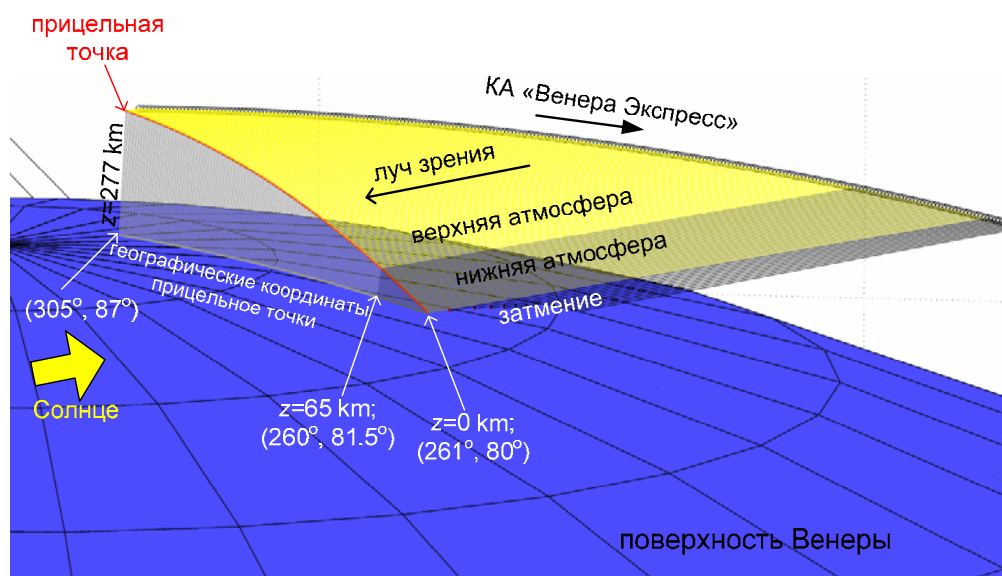
Первая глава содержит необходимые для последующего изложения сведения по методу солнечного просвечивания в атмосферах планет. Приводятся основные теоретические закономерности спектроскопии просвечивания в инфракрасном диапазоне, особенности метода, а также алгоритмы восстановления вертикальных профилей содержания газов. Глава включает также обзор важнейших опубликованных работ, посвященных затменным экспериментам.

Солнечное просвечивание наблюдается на заходе или восходе Солнца относительно лимба планеты при движении космического аппарата по орбите. За один сеанс затмения прибор регистрирует как солнечный спектр вне атмосферы, так и спектры прошедшего через нее солнечного излучения по мере погружения луча зрения в атмосферу до полного затмения планетой (случай захода). Отношение спектров излучения, прошедшего через атмосферу, к усредненному спектру вне атмосферы дает спектр атмосферного пропускания для каждой высоты прицельной точки  $z$ . Функция пропускания атмосферы описывается законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$T(\nu, z) = \exp[-\sum \sigma_i(\nu) N_i(z)], \quad (1)$$

где  $\nu$  – волновое число;  $N_i(z)$  – полное число молекул газовой компоненты  $i$  (или частиц аэрозоля) вдоль луча зрения на прицельной высоте  $z$ ;  $\sigma_i(\nu)$  – сечение экстинкции. В случае молекулярного поглощения сечение выражает вероятность поглощения фотона определенной частоты  $\nu_0$  молекулой газа  $i$  при заданных температуре и давлении. Синтетический спектр вычисляется методом полинейного расчета («line-by-line») с учетом параметров каждой линии поглощения, доступных в спектроскопических банках данных (в нашем случае – HITRAN 2004 [16]).

Восстановление вертикального профиля газовой концентрации осуществляется путем сопоставления каждого измеренного спектра с синтетическим, рассчитанным при наиболее подходящем содержании газа  $N_i(z)$ . Пересчет полного числа молекул на луче зрения в объемную концентрацию выполняется методом «очистки луковицы». Высотное разрешение при построении вертикальных профилей в процессе затмения зависит не только от быстродействия измерений прибора, но и от траектории луча зрения относительно лимба (горизонта) планеты. Чем больше тангенциальная составляющая траектории прицельной точки, тем медленнее протекает затмение и, значит, тем более подробно сканируется вертикальный столб атмосферы. Правда, при этом возникает большее смещение географических координат прицельной точки. На рис. 1 представлен пример одного сеанса затмения эксперимента SOIR с борта КА «Венера-Экспресс» (орбита 251). Координаты прицельной точки рассчитаны в соответствии с движением аппарата по указанной орбите и направлением луча зрения на Солнце. Разрешение по высоте в данном случае составляет 1,5 км, если измерения проводятся каждую секунду.

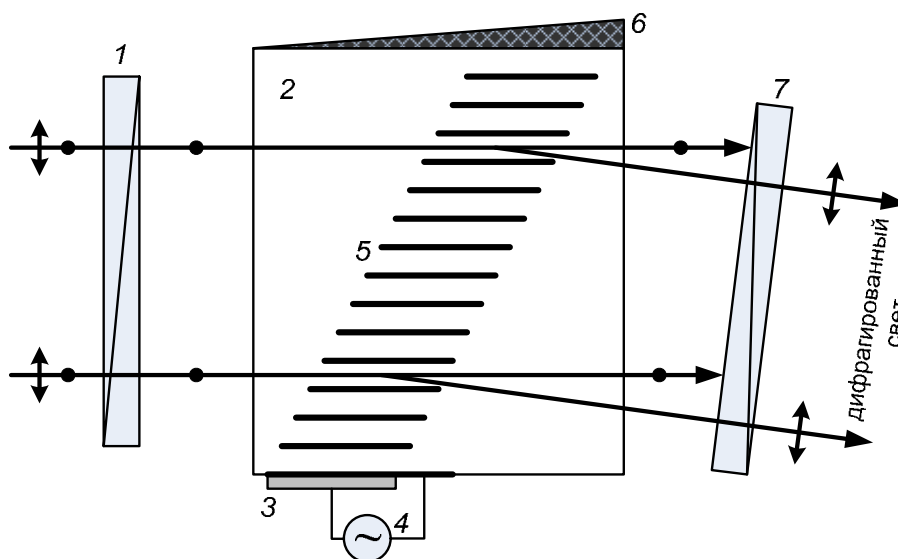


**Рис. 1.** Пример одного сеанса затмения на Венере в эксперименте SOIR.

Вторая глава посвящена применению акустооптики в космических исследованиях. Приводятся теоретические основы акустооптического (АО) взаимодействия, объясняется принцип работы АОПФ. Перечисляются особенности применения акустооптических устройств в космических полетах. В главе также дан обзор известных на сегодняшний день фактов использования АО-фильтров в космических экспериментах.

В настоящее время большой интерес представляют акустооптические методы управления оптическим излучением для решения задач спектроскопии и обработки изображений. Сущность АО-эффекта заключается в явлении дифракции света на фазовой решётке, создаваемой в среде акустической волной. В качестве среды взаимодействия обычно берется одноосный двулучепреломляющий кристалл, к одной из граней которого приваривается возбудитель ультразвука – пьезоэлектрический преобразователь. Такая конструкция составляет основу всех АО-устройств, в том числе и акустооптического

перестраиваемого фильтра (АОПФ) [17], классическая схема которого представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Принципиальная схема стандартного АОПФ: 1 – поляризатор, 2 – кристалл, 3 – пьезопреобразователь, 4 – генератор высокочастотных колебаний, 5 – акустическая волна, 6 – акустический поглотитель, 7 – анализатор.

В результате акустооптической дифракции в таком фильтре образуется лишь один дифракционный максимум в силу селективности угла Брэгга. В кристаллах с двулучепреломлением дифрагированный пучок можно отделить от прошедшего с помощью поляризатора-анализатора, либо просто пространственным образом. При этом угол между направлениями распространения этих пучков пропорционален разности показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной оптических волн в кристалле  $|n_o - n_e|$ . Таким образом, на выход АОПФ проходит только спектрально отфильтрованное дифрагированное излучение. Соотношение между центральной длиной волны фильтрации  $\lambda_0$ , частотой управления фильтра (акустической частотой)  $f_a$  и углом дифракции Брэгга  $\theta$  имеет вид:

$$\lambda_0 = (v_a/f_a) \cdot F(\theta, \theta_a, n_o, n_e), \quad (2)$$

где  $v_a$  – скорость распространения акустической волны в кристалле под углом  $\theta_a$  к общепринятому в акустооптике кристаллографическому направлению — [110];  $F(\theta, \theta_a, n_o, n_e)$  – функция, описывающая геометрическую связь между указанными ее аргументами.

Спектральная функция пропускания АОПФ имеет «sinc<sup>2</sup>»-подобный профиль с наличием боковых максимумов, искажающих выходной спектр излучения. Наличие таких боковых «лепестков» является одним из главных недостатков АО-фильтров, и этот факт необходимо учитывать при обработке сигналов и отождествлении линий поглощения газов. Полоса пропускания АОПФ зависит от степени расходимости взаимодействующих пучков в кристалле (оптического и акустического); она пропорциональна квадрату длины волны:  $\Delta\lambda \sim \lambda^2$ . Поэтому спектральное разрешение АО-устройств удобнее записывать через волновое число, которое слабо зависит от диапазона перестройки:  $\Delta\nu = \Delta\lambda/\lambda^2 \approx const [cm^{-1}]$ .

Наиболее часто используются АО-фильтры на основе кристалла парателлурита  $TeO_2$ , который обладает высокой эффективностью АО-взаимодействия и прозрачен в диапазоне 0,4-5,2 мкм.

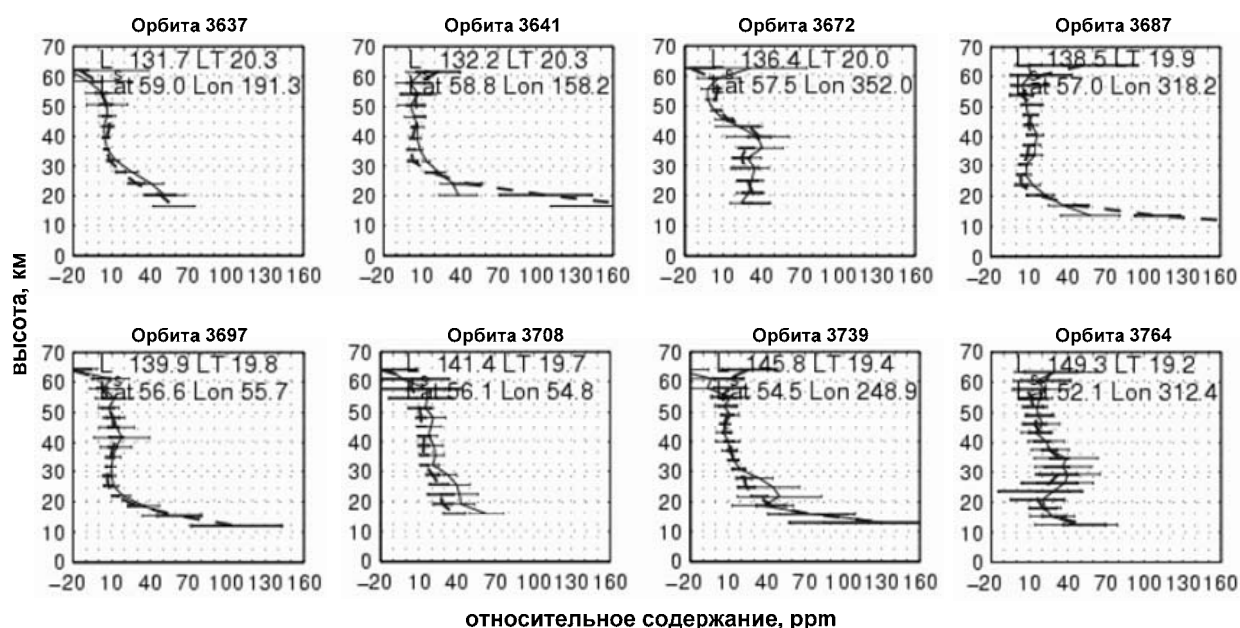
В третьей главе описывается эксперимент СПИКАМ на искусственном спутнике Марса «Марс-Экспресс». Перечисляются научные задачи солнечного просвечивания на Марсе, приводится описание акустооптического спектрометра СПИКАМ. Представляются и обсуждаются результаты затменных измерений водяного пара.

Космический аппарат «Марс-Экспресс» оснащен приборами для исследований атмосферы, поверхности, а также окружающего Марс пространства. Аппаратура эксперимента СПИКАМ состоит из двух независимых спектрометров, ультрафиолетового (118-320 нм,

$\Delta\lambda \sim 0,51$  нм) и инфракрасного (1-1,7 мкм,  $\Delta\lambda < 1$  нм), объединенных в единый оптический блок. Основной задачей ИК-спектрометра СПИКАМ является измерение содержания водяного пара в атмосфере Марса в отраженном солнечном свете по полосе поглощения 1,38 мкм [18]. В режиме солнечного просвечивания прибор измеряет вертикальное распределение водяного пара (в той же полосе 1,38 мкм), аэрозольных частиц и атмосферной плотности (по полосам поглощения  $\text{CO}_2$  1,4-1,65 мкм).

В основе ИК-канала СПИКАМ лежит акустооптический перестраиваемый фильтр, позволивший существенно снизить массу аппаратуры до 700 г при спектральном разрешении  $3,5 \text{ см}^{-1}$  [19]. Управление фильтром осуществляется с помощью цифрового синтезатора частоты в диапазоне 87-140 МГц. Благодаря гибкости перестройки АОПФ в процессе измерения может быть выбран произвольный участок спектра практически в любой комбинации. Так, за сеанс затмения спектрометр одновременно измеряет поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  в полосе 1,38 мкм,  $\text{CO}_2$  (1,43, 1,57 и 1,6 мкм) и аэрозоля. В силу такой возможности при восстановлении вертикальных профилей водяного пара используются текущие значения плотности атмосферы (полученные на основе данных о поглощении в полосе  $\text{CO}_2$ ) и аэрозольного континуума.

Наблюдения водяного пара проводились летом в северном полушарии Марса ( $L_S = 130-160^\circ$ , марсианский год MY 28) в диапазоне широт  $41-59^\circ \text{ N}$  на заходе Солнца. При обработке данных на разных высотах в диапазоне спектра 1,35-1,42 мкм были получены вертикальные распределения объемной концентрации  $\text{H}_2\text{O}$ . Ниже 10-15 км в атмосфере планеты солнечный сигнал пропадает из-за поглощения аэрозолями. Толщина слоя осажденной воды в атмосферном столбе выше 15 км не превышает 1 мкм.



**Рис. 3.** Вертикальные профили относительного содержания водяного пара в атмосфере Марса.

Относительное содержание водяного пара в частях на миллион (ppm) получено как отношение содержания  $H_2O$  к  $CO_2$ ; поглощение углекислого газа измеряется в том же сеансе затмения. Вертикальное распределение относительного содержания  $H_2O$ , измеренного в нескольких сеансах, показано на рис. 3. На высотах 25-50 км поглощение воды неизменно и составляет 5-10 ppm. Ниже 25-30 км по некоторым профилям видно резкое увеличение содержания. Выше 50 км точность измерений значительно падает в силу уменьшения поглощения водяного пара. По сравнению с моделью общей циркуляции атмосферы Марса (EMCD – European Mars Climate Database [20]) измеренное поглощение  $H_2O$  выше 35 км в несколько раз больше. Такой избыток содержания воды относительно модели может указывать на более теплые условия в данной области высот.

Четвертая глава (ключевая) посвящена затменному эксперименту SOIR с борта орбитального аппарата «Венера-Экспресс». Перечисляются научные задачи солнечного просвечивания на Венере с



высоким спектральным разрешением, приводится описание акустооптического эшелле-спектрометра SOIR с краткими выкладками из теории эшелле-спектроскопии. Описывается экспериментальная установка для лабораторных калибровок АОПФ. Представляются результаты как лабораторных, так и полетных акустооптических калибровок. И, наконец, приводятся результаты затменных измерений  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HDO}$  и  $\text{SO}_2$  с соответствующими выводами по физике атмосферы Венеры.

Космический орбитальный зонд «Венера-Экспресс» оснащен приборами для детального исследования атмосферы Венеры. Целью миссии являются исследования общей циркуляции атмосферы, ее состава и эволюции, процессов в облачном слое, химического и физического взаимодействия атмосферы и поверхности, а также зондирование околопланетной плазмы [21]. Новым прибором в составе научной аппаратуры является акустооптический эшелле-спектрометр SOIR, предназначенный для измерений вертикальной структуры атмосферы над облаками методом солнечного просвечивания в ближнем ИК-диапазоне с высоким спектральным разрешением. Идея создания такого спектрометра для планетных миссий была предложена в ИКИ РАН [22], а сам прибор изготовлен в бельгийском Институте космической аэронавтики (BIRA/IASB) [23].

Атмосфера Венеры, самая плотная из всех планетных атмосфер Солнечной системы, по газовому содержанию в основном состоит из углекислого газа (95,6%). Толстый облачный слой на высотах 40-65 км, полностью покрывающий планету, преимущественно образован из капель серной кислоты. Ниже и в пределах облаков, где горизонтальная оптическая толщина атмосферы  $\tau > 10$ , чувствительности измерений в режиме солнечного просвечивания не хватает для регистрации сигнала. Поэтому на Венере затменные эксперименты охватывают высотный

диапазон мезосферы: от 65 до 120 км. Одной из главных задач солнечного просвечивания на Венере с высоким спектральным и пространственным разрешением является исследование вертикальных профилей содержания  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HDO}$  в атмосфере. По изотопному соотношению D/H можно судить об особенностях диссипации воды на планете. Не менее интересен анализ остальных газовых составляющих в мезосфере ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ), содержание которых было исследовано до сих пор лишь по надирным и астрономическим измерениям. Подобные газы, несмотря на их малое содержание ( $<0,1\%$ ), играют существенную роль в фотохимии надоблачного слоя (60-70 км) при образовании сернокислотного аэрозоля.

В основе схемы прибора SOIR, предназначенного для решения указанных выше научных задач, лежит комбинация акустооптического перестраиваемого фильтра с эшелле-спектрометром. АОПФ служит для селекции дифракционных порядков эшелле. Такая система обеспечивает спектральное разрешение  $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$  на длинах волн 2,2-4,3 мкм ( $2300\text{-}4500 \text{ см}^{-1}$ ) при общей массе всего 5 кг и отсутствии механических подвижных частей. Полоса пропускания АО-фильтра подобрана равной области свободной дисперсии эшелле-решетки, что достигается с учетом квадратичной зависимости этих параметров от длины волны. Угловое поле зрения формируется прямоугольной щелью спектрометра и составляет  $2'$  в плоскости спектральной развертки и  $30'$  – в плоскости, параллельной лимбу. Спектр регистрируется матрицей детектора ( $320 \times 256$ ): 320 пикселей – по спектру и 256 пикселей – по высоте щели. При измерении атмосферного пропускания сигнал записывается в виде двух спектров – от верхней и нижней половин щели.

Спектр высокого разрешения на выходе эшелле-решетки зависит, в частности, от характеристик АОПФ: спектральная функция пропускания, дисперсионная кривая  $\lambda_0(f_a)$  (см. формулу (2)), зависимость

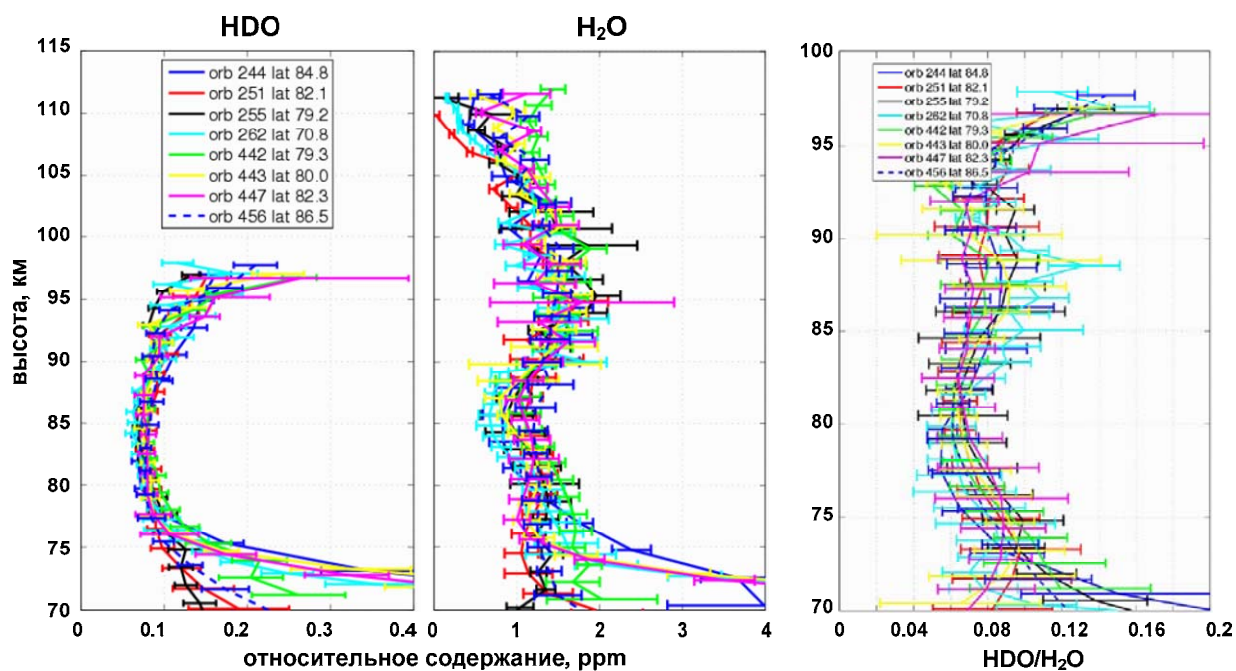
эффективности АО-дифракции от мощности акустического сигнала, распределение звукового поля по апертуре фильтра. Для исследования подобных характеристик в лабораторных условиях автором была создана экспериментальная установка, позволяющая измерять пропускание фильтра в зависимости от различных параметров системы. В связи с недостатком времени при подготовке космического эксперимента предполетные калибровки не были выполнены в полном объеме. Дополнительный, более детальный анализ работы АОПФ был проведен уже при обработке летных данных, когда прибор регистрировал линии Солнца с борта космического аппарата. Ниже перечислены основные результаты полетных акустооптических калибровок:

1. По нескольким сильным солнечным линиям (2467,75; 2943,69; 3766,93; 4190,08 см<sup>-1</sup>) построена дисперсионная кривая фильтра – зависимость частоты управления от длины волны излучения.

2. Исследована вариация функции пропускания АОПФ с длиной волны по всему рабочему диапазону. Сам профиль пропускания аппроксимирован суперпозицией функций sinc<sup>2</sup>.

3. Полоса пропускания данного фильтра (~25 см<sup>-1</sup>) превышает область свободной дисперсии эшелле-спектрометра (~22 см<sup>-1</sup>); уровень некоторых боковых максимумов функции пропускания достигает 10%. В результате ослабленные соседние порядки дифракции накладываются на центральный (рабочий) порядок. Такой эффект вызывает искажение глубин поглощения газовых линий в измеренном атмосферном спектре.

4. Обнаружено, что спектральные характеристики данного АОПФ меняются по апертуре, поэтому они различны для двух половин щели спектрометра, которая отображает вертикальный срез дифрагированного акустооптикой поля. Это различие происходит из-за неоднородности акустического поля в кристалле.

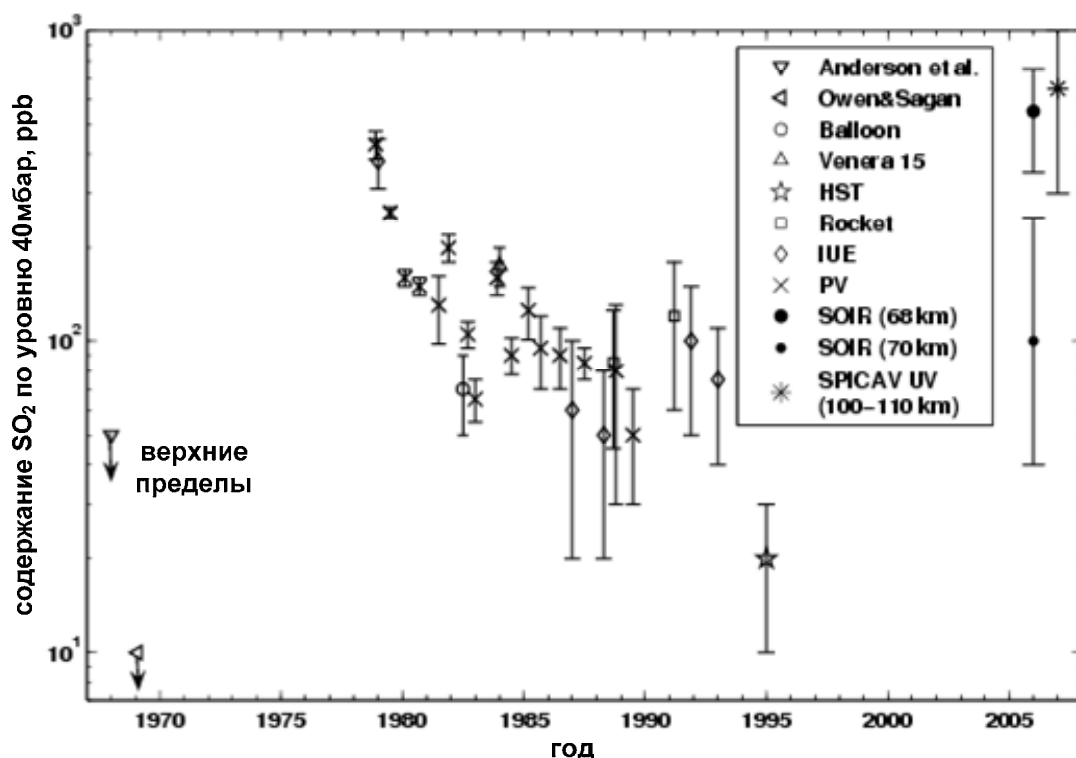


**Рис. 4.** Вертикальные профили содержания  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HDO}$  и их изотопного соотношения в мезосфере Венеры по данным солнечного просвечивания SOIR.

Для исследования изотопного соотношения D/H в водяном паре необходимы одновременные измерения концентраций  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HDO}$ . В спектральном диапазоне SOIR наиболее подходящими полосами поглощения для таких наблюдений являются  $\sim 2,7$  мкм ( $3704 \text{ см}^{-1}$ ) для водяного пара и  $\sim 3,67$  мкм ( $2723 \text{ см}^{-1}$ ) для  $\text{HDO}$ . Эти спектральные линии расположены в эшелле-порядках 171 и 121 соответственно. Поскольку за один сеанс затмения регистрируются спектры всего в четырех интервалах (порядках), в качестве третьего был выбран порядок 149 ( $3330\text{-}3357 \text{ см}^{-1}$ ), где наблюдался  $\text{CO}_2$ . Четвертый порядок для наших задач не использовался. Параллельные измерения углекислого газа позволяли получать профили относительного содержания  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HDO}$  без использования моделей плотности атмосферы Венеры. Тем не менее, модель VIRA (Venus International Reference Atmosphere [24]) использовалась для информации о профилях температуры и давления при вычислении спектров пропускания (см. формулу (1)).

На рис. 4 представлены вертикальные профили относительного содержания водяного пара, HDO и их соотношения HDO/H<sub>2</sub>O, полученные на высоких широтах северного полушария. В среднем содержание воды составляет  $1,1 \pm 0,2$  ppm, а ее изотопа HDO –  $0,09 \pm 0,02$  ppm. Вариация относительного содержания на высотах 90-110 км связана с уменьшением плотности CO<sub>2</sub> в этой области. Отношение HDO/H<sub>2</sub>O превышает в  $240 \pm 25$  раз ту же величину в земной атмосфере и в  $\sim 1,5$  раза больше результата под облаками Венеры, что согласуется с предположением о более медленном процессе диссипации атомов дейтерия относительно атомов водорода.

Двуокись серы считается одним из ключевых газов в фотохимии Венеры. Наиболее подходящей полосой поглощения SO<sub>2</sub> в спектральном диапазоне SOIR является полоса 4 мкм ( $2480-2520 \text{ см}^{-1}$ ). К сожалению, в этой области присутствуют полосы обильного поглощения углекислого газа, точнее его изотопа <sup>16</sup>O<sup>12</sup>C<sup>18</sup>O. Поэтому при расчетах синтетических спектров пропускания пришлось строить комбинированную модель (SO<sub>2</sub>·CO<sub>2</sub>) и при сопоставлении с экспериментом варьировать два параметра: плотность CO<sub>2</sub> и относительное содержание SO<sub>2</sub>. В силу фотодиссоциации двуокиси серы под действием солнечного излучения детектировать SO<sub>2</sub> на Венере методом солнечного просвечивания можно лишь в надоблачном слое, где горизонтальная оптическая толщина атмосферы лежит в пределах  $\tau=1-7$ . По результатам измерений относительное содержание SO<sub>2</sub> составило  $\sim 0,1$  ppm со шкалой высот  $H=1 \pm 0,4$  км (наблюдения на восходе) в северной полярной области и  $\sim 1$  ppm со шкалой высот  $H=3 \pm 1$  км в низких широтах (наблюдения на заходе) на высоте 70 км. На высотах около 75 км содержание газа не превышает 0,05 ppm.



**Рис. 5.** История наблюдений SO<sub>2</sub> над облаками Венеры (~69 км), сравнение результатов SOIR с предыдущими данными (информация обо всех наблюдениях представлена в работе автора: [13], Belyaev et al., 2008).

На рис. 5 представлена история измерений двуокиси серы над облаками Венеры начиная с 1969 года. Результаты эксперимента SOIR указаны для двух высот – 68 и 70 км, где наблюдается резкий перепад в относительном содержании газа. Видно, что данные затмений SOIR и SPICAV UV (звездное просвечивание с КА «Венера-Экспресс» на высотах около 100 км) значительно превышают результаты предыдущих измерений, в основном, ультрафиолетовых. Такой скачок в поглощении SO<sub>2</sub>, равно как и подобный, случившийся в конце 70х годов, может указывать на всплеск вулканической активности на планете в эти годы [25]. С другой стороны, время распада атома двуокиси серы под действием солнечного излучения составляет всего пару часов, значит, содержание газа меняется в зависимости от времени суток, следовательно, вечерние и утренние сеансы затмений должны давать разные результаты. Для более корректных выводов о поведении SO<sub>2</sub>

необходим большой объем измерений как затменных (SOIR, SPICAV UV), так и в надир (SPICAV UV), что даст широтную зависимость содержания газа.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы: получены вертикальные профили содержания водяного пара в атмосфере Марса; разработана методика калибровок эшелле-спектрометра высокого разрешения с акустооптической селекцией дифракционных порядков; определено вертикальное распределение содержания  $H_2O$ , HDO и  $SO_2$  в мезосфере Венеры.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Вертикальный профиль  $H_2O$  в атмосфере Марса. Количество осажденной воды в атмосферном столбе Марса составляет  $\leq 1$  мкм на уровне выше 15 км. Выше 30 км имеет место резкое уменьшение поглощения  $H_2O$  до 5-10 ppm, что в 5-10 раз превышает значения, прогнозируемые моделями климата Марса. Такое количество водяного пара на высотах 25-50 км, если исключить сильное перенасыщение, может говорить о более высоких температурах (в среднем на 5-10 K), чем предсказывают модели циркуляции на этих высотах.
2. Методика калибровок эшелле-спектрометра высокого разрешения с акустооптической селекцией дифракционных порядков. Спектральные характеристики акустооптического фильтра исследовались по измерениям солнечных линий. Обнаруженное наложение соседних порядков эшелле на центральный (рабочий) порядок учитывалось при интерпретации полос газового поглощения.

3. Одновременно измеренные профили H<sub>2</sub>O и HDO в мезосфере Венеры. На высотах 70-110 км содержание водяного пара в северной полярной области в среднем составляет 1,1±0,2 ppm, а его изотопа HDO – 0,09±0,02 ppm. Отношение HDO/H<sub>2</sub>O превышает в 240±25 раз ту же величину в земной атмосфере и в ~1,5 раза больше результата под облаками Венеры, что предполагает более медленную диссипацию атомов дейтерия относительно атомов водорода.
3. Измерения SO<sub>2</sub> в надоблачном слое Венеры. В полярной области относительное содержание SO<sub>2</sub> составляет ~0,1 ppm со шкалой высот H=1±0,4 км (наблюдения на восходе) и ~1 ppm со шкалой высот H=3±1 км в низких широтах (наблюдения на заходе) на высоте 70 км. На высотах около 75 км содержание газа не превышает 0,05 ppm. Полученные значения в несколько раз больше содержания двуокиси серы над облаками, измеренного в предыдущих миссиях.

### **Список основных публикаций по теме диссертации**

1. **Беляев Д. А.** и др. Малогабаритный эшелле-спектрометр высокого разрешения с использованием акустооптической фильтрации для атмосферных исследований. // *Проблемы управления и информатики*. 2005. № 1. С. 153-155.
2. Ангаров В. Н., ... , **Беляев Д. А.** и др. Компактный эшелле-спектрометр высокого разрешения с акустооптической фильтрацией порядков для спутниковых исследований земной атмосферы. // *Космическое приборостроение. Сборник трудов по результатам выездного семинара, 7-9 июня 2006 г., Россия, Таруса*. М.: ИКИ РАН, 2006. С. 176-192.
3. Fedorova A. A., ..., **Belyaev D.** et al. Solar infrared occultation by the SPICAM experiment on Mars-Express: results of first Martian year on the orbit. // *36th COSPAR Scientific Assembly, 16-23 July 2006, Beijing, China, 2006*. Abstract A-01355.
4. **Беляев Д. А.**, Кораблев О. И. Акустооптический эшелле-спектрометр SOIR на КА «Венера-Экспресс»: исследования атмосферы Венеры методом солнечного просвечивания. // *Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 12 апреля 2007 г., Москва, Россия. Тезисы докладов*. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 20.



5. Fedorova A. ... , **Belyaev D.** et al. The Venus upper haze from SPICAV/SOIR infrared experiments on Venus-Express. // *Geophysical Research Abstracts*. 2007. V. 9. A-09742.
6. Fedorova A., ... , **Belyaev D.** et al. Solar infrared occultations by the SPICAM experiment on Mars-Express: Simultaneous observations of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and aerosol vertical distribution. // *American Astronomical Society, 39<sup>th</sup> DPS meeting*, October 2007, Orlando, USA, 2007. Abstract № 31.03.
7. Bertaux J.-L., ... , **Belyaev D.** et al. Temperature inversion detected near the mesopause of Venus and isotopic composition measurements with SPICAV/SOIR results. // *American Astronomical Society, 39<sup>th</sup> DPS meeting*, October 2007, Orlando, USA, 2007. Abstract № 45.02.
8. Bertaux J.-L., ... , **Belyaev D.** et al. A warm layer in Venus' cryosphere and high altitude measurements of HF, HCl, H<sub>2</sub>O and HDO. // *Nature*. 2007. V. 450. P. 646–649.
9. **Belyaev D. A.** et al. First observations of SO<sub>2</sub> above Venus' clouds by means of solar occultation in the infrared. // *Geophysical Research Abstracts*. 2008. V. 10. A-01079.
10. Mahieux A., ... , **Belyaev D.** et al. In-flight performance and calibration of SPICAV/SOIR on-board Venus-Express. // *Applied Optics*. 2008. V. 47, № 13. P. 2252-2265.
11. **Belyaev D.** et al. Sulfur dioxide observations above Venus' clouds by means of solar occultation in the infrared. // *37<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly*, 13-20 July 2008, Montreal, Canada, 2008. Abstract C33-0016-08.
12. Bertaux J.-L., ... , **Belyaev D.** et al. SPICAV/SOIR on-board Venus-Express: an overview of two years of observations. // *37<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly*, 13-20 July 2008, Montreal, Canada, 2008. Abstract C33-0014-08.
13. **Belyaev D.** et al. First observations of SO<sub>2</sub> above Venus' clouds by means of solar occultation in the infrared. // *J. Geophys. Research*. 2008. Doi:10.1029/2008JE003143.
14. Fedorova A. ... , **Belyaev D.** et al. HDO and H<sub>2</sub>O vertical distributions and isotopic ratio in the Venus mesosphere by SOIR spectrometer on-board Venus-Express. // *J. Geophys. Research*. 2008. Doi:10.1029/2008JE003146.
15. Vandaele A. C., ... , **Belyaev D.** et al. Composition of the Venus mesosphere measured by SOIR on-board Venus-Express. // *J. Geophys. Research*. 2008. Doi:10.1029/2008JE003140.
16. Fedorova A. A., ... , **Belyaev D. A.** et al. Solar infrared occultations by SPICAM experiment on Mars-Express: simultaneous observations of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and aerosol vertical distribution. // *Icarus*. 2008. I10335.

## Список цитируемой литературы

1. Rodin A. V., Korablev O. I., and Moroz V. I. Vertical distribution of water in the near-equatorial troposphere of Mars: water vapor and clouds. // *Icarus*. 1997. V. 125. P. 212-229.
2. Clancy R. T. et al. Water vapor saturation at low altitudes around Mars aphelion: A key to Mars climate?. // *Icarus*. 1996. V. 122. P. 36-62.
3. McConnochie T. H., and Smith M. D. Limb sounding of aerosols with the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer (TES). // *7<sup>th</sup> International Conference on Mars*, July 9-13, 2007. Pasadena, California. LPI Contribution, 2007. Abstract № 1353, P. 3345.
4. Ignatiev N. I. et al. Water vapor in the lower atmosphere of Venus: a new analysis of optical spectra measured by entry probes. // *Planet. Space Sci.* 1997. V. 45. P. 427-438.
5. Bertaux J.-L. et al. Vega-1 and Vega-2 entry probes: an investigation of local UV absorption (220-400 nm) in the atmosphere of Venus (SO<sub>2</sub>, aerosols, cloud structure). // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 12709-12745.
6. Schofield J. T., Taylor F. W., and McCleese D. J. The global distribution of water vapor in the middle atmosphere of Venus. // *Icarus*. 1982. V. 52. P. 263-278.
7. Esposito L. W. et al. Sulfur dioxide at the Venus cloud tops, 1978-1986. // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 5267-5276.
8. Ignatiev N. I. et al. Water vapor in the middle atmosphere of Venus: an improved treatment of the Venera 15 IR spectra. // *Planet. Space Sci.* 1999. V. 47. P. 1061-1075.
9. Zasova L. V. et al. SO<sub>2</sub> in the middle atmosphere of Venus: IR measurements from Venera-15 and comparison to UV data. // *Icarus*. 1993. V. 105. № 1. P. 92-109.
10. Sandor B. J., and Clancy R. T. Water vapor variations in the Venus mesosphere from microwave spectra. // *Icarus*. 2005. V. 177. P. 129-143.
11. Encrenaz T. et al. First detection of HDO in the atmosphere of Venus at radio wavelengths: an estimate of the H<sub>2</sub>O vertical distribution. // *Astron. Astrophys.* 1991. V. 246. L63-L66.
12. Gurwell M. A. et al. SWAS observations of water vapor in the Venus mesosphere. // *Icarus*. 2007. V. 188. № 2. P. 288-304.
13. Donahue T. M. et al. Venus was wet - A measurement of the ratio of deuterium to hydrogen. // *Science*. 1982. V. 216. P. 630-633.
14. Donahue T. M. et al. Ion/neutral escape of hydrogen and deuterium: evolution of water. // In: *Venus II: Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment*. Ed. by: Bougher S. W. et al. University of Arizona Press, Tucson. 1997. P. 385-414.
15. De Bergh C. et al. Deuterium on Venus - Observations from Earth. // *Science*. 1991. V. 251. P. 547-549.
16. Rothman L. S. et al. The HITRAN 2004 Molecular Spectroscopic Database. // *Journal of Quant. Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2005. V. 96. № 2. P. 139-204.
17. Магдич Л. Н. Акустооптические перестраиваемые фильтры. // *Изв. АН СССР, Сер. физ.* 1980. Т. 44. № 8. С. 1638-1642.

18. Fedorova A. et al. Mars water vapor abundance from SPICAM IR spectrometer: Seasonal and geographic distributions. // *J. of Geophys. Res.* 2006. V. 111. № E9. E09S08.
19. Korablev O. et al. An AOTF-based spectrometer for the studies of Mars atmosphere for Mars Express ESA mission. // *Adv. in Space Res.* 2002. V. 29. № 2. P. 143-150.
20. Forget F. (1999). Improved General Circulation Models of the Martian Atmosphere from the surface to above 80 km. // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № E10. P. 24155-24176.
21. Титов Д. В. и др. Венера-Экспресс: научные задачи, аппаратура и сценарий миссии. // *Космические исследования.* 2006. Т. 44. № 4. С. 349-364.
22. Korablev O., and Baratux J.-L. SOIR experiment for Venus-Express: scientific objectives for solar occultations. // *EGS XXVII General Assembly, 21-26 April 2002, Nice, 2002.* Abstract № 3506.
23. Nevejans D. et al. Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3  $\mu\text{m}$ . // *Applied Optics.* 2006. V. 45. № 21. P. 5191-5206.
24. Moroz V. I., and Zasova L. V. VIRA-2: A review of inputs for updating the Venus International Reference Atmosphere. // *Advances in Space Research.* 1997. V. 19. № 8. P. 1191-1201.
25. Esposito L. W. Sulfur dioxide: Episodic injection shows evidence for active Venus volcanism. // *Science.* 1984. V. 223. P. 1072–1074.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН

117997, Москва, Профсоюзная 84/32

---

Подписано к печати 12.11.2008

---

Заказ 2161

Формат 70x108 1/32

Тираж 100

1,2 уч.-зд.-л.