

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Диссертационная работа посвящена дистанционному зондированию атмосфер Венеры и Марса с космических аппаратов в инфракрасной области спектра.

### **Основные направления и актуальность исследований**

Венера и Марс - планеты земной группы, наиболее близкие к Земле по своим свойствам. Изучение свойств их атмосфер и климатических условий на различных широтах дает возможность лучше понять не только наблюдаемые особенности этих планет, но и проблемы климата Земли и его эволюции, включая изменения, обусловленные человеческой деятельностью.

Дистанционное зондирование является одним из ведущих методов изучения атмосфер Земли и планет. Этот метод особенно эффективен в тепловой ИК-области спектра, где присутствуют сильные полосы поглощения газов и аэрозоля. Для Венеры и Марса он позволяет восстанавливать вертикальные температурные профили, исследовать пылевые и конденсационные облака (на Марсе) и сернокислотные облака (на Венере), содержание и профили газовых составляющих.

Восстановление параметров атмосферы из спектра является обратной задачей теории переноса излучения. В случае земной атмосферы накоплен огромный статистический априорный материал по температурным профилям, и задача может сводиться к решению системы линейных уравнений для  $\Delta T$  по отношению к семейству априорных температурных профилей (Кондратьев и Тимофеев, 1970; Rodgers 2000; Васильев и Мельникова, 2002). Качество решения сильно зависит от качества априорной информации. Этот метод успешно использовался для Земли. В случае Марса и Венеры такая климатологическая информация практически отсутствует.

С другой стороны, в настоящее время получили большое развитие модели общей циркуляции атмосферы Марса, которые позволяют сформировать априорную базу температурных профилей. Прежде всего, это Европейская модель EMGCM (Forget et al., 1999; Lewis et al., 1999). Примером ее использования являются работы Grassi et al. (2005a, b). К недостаткам такого подхода можно отнести зависимость получаемых результатов от модели. В случае Венеры модели общей циркуляции вообще находятся в зачаточном состоянии. В отличие от этого подхода, в методе, представленном в диссертации, априорная информация берется непосредственно из измеренного спектра.

В атмосферах Марса и Венеры всегда присутствует аэрозоль, оказывающий существенное влияние на профиль полосы CO<sub>2</sub> 15 мкм, а следовательно, и на восстанавливаемый температурный профиль. Полосы поглощения аэрозоля, в свою очередь, зависят от температурного градиента. Отсюда следует необходимость одновременного самосогласованного восстановления профилей температуры и аэрозоля.

С начала космической эры планета Венера была предметом активных исследований, проводившихся при помощи как космических аппаратов, включая посадочные, орбитальные и пролетные, так и наземных наблюдений (Мороз и др., 2002; Huntress et al., 2003). В 60 - 80-е годы были впервые получены фундаментальные сведения о поверхности Венеры и ее атмосфере, породившие в то же время множество вопросов о строении, составе, физико-химических процессах и динамике атмосферы и причинах ее отличия от земной. В 2006 году, после затянувшегося перерыва в исследованиях Венеры, аппарат Европейского Космического Агентства *Венера-Экспресс* открыл новый этап ее исследования.

Особую роль играет изучение средней атмосферы Венеры (мезосферы) на высотах 55 – 100 км. На этот слой приходится около 70% всей энергии солнечного излучения, поглощенного Венерой. Большая часть этой энергии поглощается в верхнем облачном слое, 58–68 км, в спектральной области 0.32–0.5 мкм так называемым «неизвестным УФ-поглотителем» (Pollack et al., 1980; Zasova et al., 1981; Esposito et al., 1997; Krasnopolsky et al., 1989, 2006). Такое необычное распределение поглощенной энергии в сравнительно узком слое приводит к генерации солнечных термических приливов, играющих важную роль в поддержании суперротации (Schubert et al., 1983; Gierasch et al., 1997) - важнейшей особенности глобальной атмосферной динамики и одной из загадок Венеры. Исследование термической структуры атмосферы играет ключевую роль для понимания феномена суперротации.

До полета *Венеры-15* информация о термической структуре мезосферы базировалась в основном на акселерометрических экспериментах на *Венерах- 8, 11-14* (Авдеевский и др. 1983; Avduevsky et al., 1983; Черемухина и др., 1974) и экспериментах по радиопросвечиванию на КА *Пионер-Венера* (Kliore and Patel, 1982; Kliore 1985), *Венерах-9, 10, 15, 16* (Yakovlev et al., 1987a,b, 1991) и *Магеллане* (Jenkins, 1994; Hinson&Jenkins, 1995). Кроме того, по наблюдениям с ИК-картирующим радиометром на КА *Пионер-Венера* (Taylor et al., 1980, 1983; Schofield et al., 1982, 1983), имевшем 6 каналов в полосе 15 мкм, были получены температурные профили, охватывающие достаточно большой интервал широт, но имеющие весьма низкое вертикальное разрешение. На основе перечисленной выше информации в рамках Международной Референтной Модели Атмосферы Венеры VIRA (Kliore et al., 1985; Seiff et al, 1980, 1983, 1985) была построена температурная модель средней атмосферы для пяти широтных зон.

Инфракрасная спектрометрия в тепловой области представляет собой важнейший, и, как будет показано в работе, весьма результативный метод исследования средней атмосферы Венеры и верхнего облачного слоя, поскольку излучение в спектральной области 5 – 50 мкм формируется в основном как раз в интервале высот 55–100 км. Впервые для Венеры этот метод был реализован в эксперименте «Фурье-спектрометр» на *Венере-15* (ФС В15). (Moroz et al., 1986; Эртель и др., 1984, 1985; Oertel et al., 1987).

В табл. 1 приведены параметры фурье-спектрометров, исследовавших Венеру и Марс с орбиты. Первым интерферометром, с помощью которого исследовался Марс, был прибор IRIS на КА *Маринер-9* в 1971 году. Аппарат приблизился к Марсу во время глобальной пылевой бури. Много работ было посвящено обработке и интерпретации результатов этого эксперимента (Conrath et al. 1973, 1975; Hanel et al., 1972; Toon et al. 1977; Clancy et al., 1995, 1996; Fenton et al., 1997; Christensen, 1998), однако при этом изучалась либо температура атмосферы (без учета или с грубым учетом некоторого «модельного» аэрозоля, причем, как правило, после осаждения пыли), либо атмосферная пыль, но для некоторого заданного модельного температурного профиля. Пыль и конденсационные облака из водяного льда и углекислоты оказывают существенное влияние на климат Марса. Благодаря радиационным эффектам облака (аэрозоли) могут приводить как к выхолаживанию атмосферы за счет излучения, так и к нагреву в результате поглощения солнечного излучения и перехвата инфракрасного излучения нижележащих слоев атмосферы и поверхности. Особую роль в исследовании климата Марса имеет изучение полярных районов, здесь в зимний сезон конденсируется до 1/3 марсианской атмосферы.

В последние годы несколько американских космических аппаратов исследовали или продолжают исследовать Марс: *MGS*, *Mars Odyssey*, роверы *Spirit* и *Opportunity*, *MRO*. Основная задача этих миссий (за исключением *MRO*) заключается в исследовании поверхности и в отождествлении областей, перспективных с точки зрения поиска существования современной или палеожизни. На изучение атмосферы Марса нацелен ряд экспериментов на борту космического аппарата ЕКА *Марс-Экспресс*. Один из них – Планетный фурье-спектрометр (ПФС). Несмотря на огромный объем информации, полученной американскими аппаратами об атмосфере, температуре, облаках, пыли (Smith et al. 1999, 2000, 2002, 2003, 2004; Pearl et al. 1999; McCleese et al., 2007; Zurek et al. 2007 и др.), измерения ПФС занимают особую нишу: ПФС дает уникальную возможность получать с полярной орбиты меридиональный разрез поля температуры в координатах широта - высота и аэрозольную оптическую толщину вдоль трассы. Температурный профиль и аэрозольная оптическая толщина восстанавливаются из одного и того же спектра, и, таким образом, климатические условия на Марсе изучаются локально.

Впервые эмиссии кислорода на ночной стороне в атмосфере Венеры были открыты при измерениях на *Венерах-9, 10* в видимой области спектра, система полос Герцберг II (Краснопольский и др. 1976; Krasnopolsky, 1983). Интенсивное и сильно переменное инфракрасное свечение  $O_2$  ( $^1\Delta \rightarrow ^3\Sigma$ ) на 1.27 мкм наблюдается в атмосфере Венеры с 1975 года (Connes et al., 1979, Crisp et al., 1996, Mills, 2007). На ночной стороне оно возникает в результате рекомбинации атомов кислорода, которые образуются на дневной стороне при фотолизе  $CO_2$  и  $CO$ . Большая часть образовавшихся атомов кислорода заносится на ночную сторону глобальной циркуляцией в верхней мезосфере и нижней термосфере Венеры. Изучение ночного свечения кислорода важно для

понимания фотохимии, а также является эффективным методом исследования циркуляции верхней мезосферы на высотах около 100 км, характер которой до сих пор слабо изучен (Bougher&Borucki, 1994; Bougher et al., 2007).

**Целью работы** является исследование физических свойств атмосфер Венеры и Марса на основе данных ИК-спектрометрии, полученных на космических аппаратах. Работа включает создание нового направления в интерпретации данных ИК-спектрометрии в тепловой области -- самосогласованного восстановления температурного и аэрозольного профилей из единичного спектра (т.е. локально и без привлечения модельной информации), реализацию предложенного метода для атмосферы Венеры (на основе измерений ФС на *Венере-15*) и Марса (на основе данных экспериментов IRIS на *Маринере-9* и ПФС на *Марс-Экспресс*), а также исследование нетепловых эмиссий в ИК-спектре Венеры по данным картирующего спектрометра VIRTIS на КА *Венера-Экспресс*.

### **Новизна работы**

- Создано новое направление в интерпретации данных ИК-спектрометрии планет -- методика самосогласованного восстановления температурного и аэрозольного профилей с использованием всего ИК-спектра в наблюдаемом спектральном интервале, включающем как полосы поглощения CO<sub>2</sub>, так и аэрозольные полосы поглощения (концентрированной серной кислоты в атмосфере Венеры и водяного льда и пыли в атмосфере Марса). Возможность применения методики обусловлена успешным решением проблемы расчета функций пропускания CO<sub>2</sub> с помощью быстрого алгоритма, позволяющего

практически с точностью полинейных расчетов (line-by-line) производить интерполяцию свернутых с инструментальным контуром функций пропускания  $\text{CO}_2$ , а также с применением быстрых итерационных методов решения уравнения переноса и с использованием всего спектра в измеренной спектральной области в процессе восстановления.

- Методика применена к данным ИК - спектрометрии на *Венере-15*. В результате впервые построена модель мезосферы Венеры (58 - 100 км), параметры которой зависят не только от широты, но и от местного времени; впервые восстановлены вертикальные аэрозольные профили (в терминах эквивалентных частиц) в верхнем облачном слое в зависимости от широты и времени суток; впервые получено широтное распределение содержания  $\text{SO}_2$  – газа, являющегося фотохимическим предшественником серной кислоты.
- Методика применена к ИК спектрам Марса, полученным интерферометром IRIS на *Маринере-9*. Впервые показана возможность самосогласованного восстановления аэрозольной оптической толщи и температурных профилей, имеющих сложную форму (с инверсией). Это относится в первую очередь к спектрам полярных областей. Впервые продемонстрировано, что температурные профили и аэрозольная оптическая толщина могут быть самосогласованно восстановлены и для условий пылевой бури. Было показано, что по характеру полос поглощения водяного льда может быть оценен размер частиц в облаках.
- С помощью предложенной методики с использованием данных мониторинга ПФС на КА *Марс-Экспресс*, который работает на полярной орбите с 2004 года, были получены температурные профили и оценена аэрозольная оптическая толщина вдоль каждой орбиты и определены локальные условия в зависимости от местного времени и сезона:

локальные пылевые бури, вечерние туманы, утренние дымки, облака и др.

- По инфракрасным спектрам, полученным с помощью картирующего спектрометра VIRTIS на *Венере-Экспресс*, впервые в спектре другой планеты отождествлены ОН полосы Мейнеля (2-0) 1.44 и (1-0) 2.8 мкм и эмиссия O<sub>2</sub> (0-1) 1.58 мкм в верхней мезосфере Венеры. Молекула гидроксила в атмосфере Венеры обнаружена впервые.

### **Апробация работы и публикации**

Всего по теме диссертации опубликовано более 60 работ. Список 46 наиболее важных из них приведен в конце автореферата.

Результаты докладывались на семинарах по Физике планет в ИКИ, а также на большом количестве международных конференций: Генеральных Ассамблеях COSPAR (на каждой, начиная с 1992г.), сессиях Европейского Геофизического Союза (EGU), Департамента Планетных Наук Американского Астрономического общества (DPS AAS), Европейских Планетных Конгрессах (Europlanet), конференциях ESA, посвященных *Марс-Экспресс*, конференции ESA «*Венера-Экспресс* и наземные наблюдения Венеры», Совещаниях рабочей группы «Атмосфера Марса - моделирование и наблюдения»; Конференциях LPI (USA), на многих других совещаниях.

За последние 5 лет (2003-2007) сделано более 30 докладов на конференциях, включая доклады с соавторами.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Создана методика самосогласованного восстановления температурных и аэрозольных профилей в атмосферах планет по



данным ИК-спектрометрии на основе использования быстрого интерполяционного алгоритма расчета газовых функций пропускания и быстрого итерационного метода решения уравнения переноса. Методика представляет собой новое направление в интерпретации данных ИК-спектрометрии планет .

2. В результате применения разработанной методики по данным ФС на *Венере-15* создан банк температурных и аэрозольных профилей для мезосферы Венеры. Эти данные не потеряли своей актуальности до настоящего времени. Усовершенствована Международная Референтная Модель Атмосферы Венеры – VIRA: построена модель средней атмосферы, зависящая от местного времени – VIRA-2, которая используется как референтная для *Венеры-Экспресс*.

3. Обработка данных ИК-спектрометрии атмосферы Венеры на борту *Венеры-15* привела к следующим наиболее важным выводам:

а) впервые показано, что основные температурные вариации в атмосфере Венеры имеют характер термического прилива, а также получено широтное и высотное распределение гармоник приливных волн - от суточной до 1/4 суточной в пределах 58 - 95 км высоты;

б) впервые получены вертикальные профили облаков на высоких широтах Венеры и показано, что суточные вариации положения верхней границы облачного слоя в большом интервале широт носят солнечно-связанный, приливный характер. Впервые показано, что концентрированная серная кислота является основным компонентом облачного слоя Венеры на всех широтах -- от экватора до северного полюса. По данным *Венеры-Экспресс* показано, что и на южном полюсе Венеры основной компонент облачного слоя - также серная кислота;

в) обнаружены полосы SO<sub>2</sub> в ИК-спектре и впервые получены вертикальные профили SO<sub>2</sub> в области высот 60-70 км в зависимости от широты.

4. С использованием разработанной методики по данным эксперимента IRIS на *Маринер-9* решена задача самосогласованного восстановления температурных профилей и аэрозольной оптической толщи в атмосфере Марса. В частности:

а) получены температурные профили над вулканами и показано развитие температурной инверсии на склоне вулкана вблизи вечернего терминатора;

б) получены температурные профили в низменности Hellas при изменении содержания пыли в атмосфере во время затухания пылевой бури;

в) впервые восстановлены ночные температурные профили в северной полярной области в зимний сезон.

5. Применение разработанной методики к данным ПФС на *Марс-Экспресс* позволило получать для каждой орбиты меридиональный разрез температурного поля в координатах широта-высота. При этом были получены следующие результаты:

а) впервые обнаружена температурная инверсия на высоте 10 – 20 км в полярном воротнике (северном и южном) в зимний сезон, она связана с нисходящей ветвью ячейки Хэдли и коррелирует с присутствием облаков из водяного льда;

б) восстановление температурных профилей в ночной атмосфере над полюсом позволило выделить области возможной конденсации CO<sub>2</sub>. С этими областями коррелируют волновые структуры на одновременно полученных изображениях ОМЕГА *Марс-Экспресс*, которые связаны с неустойчивостью процесса конденсации и испарения льдов CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O к вариациям температуры;

в) впервые получены сезонные и суточные вариации температуры и аэрозоля в Valles Marineris, Hellas, на вулканах, в полярных областях.

6. На основе данных VIRTIS (КА *Венера-Экспресс*) впервые в атмосфере другой планеты отождествлены полосы свечения гидроксила OH (ИК-полосы Мейнеля). Обнаружена молекула гидроксила в атмосфере Венеры, которая может играть важную роль в стабильности ее атмосферы, состоящей из CO<sub>2</sub>. Также впервые в спектре другой планеты отождествлена эмиссия O<sub>2</sub> (0-1) на 1.58 мкм. По отношению интенсивности эмиссий O<sub>2</sub> 1.27/1.58 оценено отношение вероятностей переходов  $A_{00}/A_{01} = 64$  с точностью 10%. (В земной атмосфере эти эмиссии никогда не наблюдались одновременно). Обе эмиссии и O<sub>2</sub> (0-1) и OH по интенсивности и вертикальному профилю строго коррелируют с O<sub>2</sub> (0-0) 1.27 мкм.

### **Научная и практическая ценность работы**

Работа представляет собой заверченный этап исследования свойств атмосфер двух планет с использованием имеющихся результатов зондирования атмосфер с помощью ИК-спектрометров. Созданная методика позволяет получать параметры атмосферы - температурный и аэрозольный профили - локально из одного и того же спектра, без привлечения модельных данных, и использовать полученную информацию для восстановления вертикального профиля или оценки содержания малых составляющих атмосферы. Банк температурных и аэрозольных профилей, восстановленных нами по данным ФС *Венеры-15*, остается уникальным до настоящего времени и применяется как референтный для *Венеры-Экспресс* и для моделирования термических приливов и суперротации атмосферы (совместно с Университетом Колорадо, США).

Методика, разработанная автором, используется в настоящее время для интерпретации ИК-спектрометрии ПФС на КА *Марс-Экспресс* и VIRTIS на КА *Венера-Экспресс*. Она данные позволяют исследовать

условия в атмосфере Марса локально, в разное время суток, над различными областями планеты - от вершин вулканов до впадин и полюсов.

Разработанный автором метод может быть использован и в будущем, для изучения атмосфер планет и других тел, обладающих газовой оболочкой. Прежде всего, планируется его использование для интерпретации данных миниатюрного фурье-спектрометра АОСТ, картирующего фурье-спектрометра TIMM в рамках проекта *Фобос-Грунт*, 2009г., миниатюрного фурье-спектрометр MIMA на марсоходе миссии ЕКА *Экзо-Марс*, 2013г. (автор является соруководителем экспериментов MIMA и TIMM).

Открытие существования молекулы ОН в атмосфере Венеры, имеет большое значение для изучения фотохимических процессов в атмосферах Венеры и Марса и для понимания механизмов восстановления атмосфер, состоящих из CO<sub>2</sub>, активно разрушающихся под воздействием солнечного УФ излучения.

**Личный вклад** автора состоит в постановке задач и разработке нового направления в обработке и интерпретации данных ИК-спектрометрии планет в тепловой области спектра, отождествлении новых нетепловых эмиссий O<sub>2</sub> 1.58 мкм и открытии молекулы гидроксила в атмосфере Венеры. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором или при определяющем вкладе автора.

### **Содержание работы**

Работа состоит из введения, двух частей, четырех глав, 20 параграфов и заключения, списка цитируемой литературы из 320 наименований. Полный объем диссертации 290 страниц. Ниже приведено краткое содержание разделов.

**Введение.** Во Введении дается общий обзор рассматриваемых в диссертации задач и проблем, связанных с изучением атмосфер Венеры и Марса, и формулируются цели исследований, описываемых в последующих главах. Подчеркивается сложность задач и важность их решения для понимания различных путей эволюции планетных атмосфер.

**Часть I** работы посвящена исследованию Венеры.

**В Главе 1** обсуждаются результаты инфракрасной спектromетрии Венеры в тепловой области спектра на основе данных эксперимента «Фурье-спектрометр» на *Венере-15*.

В параграфе **1.1** отмечается важность исследования термического строения средней атмосферы (мезосферы) Венеры (55-100 км). Параграф **1.2** посвящен описанию эксперимента. Характеристики ФС-В15 приведены в таб. 1 наряду с описанием других фурье - спектрометров, применявшихся для исследования Марса и Венеры. Выделены эксперименты, данные которых использованы в диссертации.

ФС-В15 имел спектральный диапазон 6–40 мкм при спектральном разрешении  $4.5\text{--}6.5\text{ см}^{-1}$ . (Moroz et al., 1986; Oertel et al., 1987). КА *Венера-15* работал на околополярной орбите, так что Северный полярный район наблюдался под углами, близкими к надиру ( $Z_{\text{obs}} = 0$  достигался при  $\varphi = 87^\circ$ ). Учитывая, что наклон плоскости орбиты Венеры к ее экватору составляет всего  $3^\circ$ , близкая к полярной орбита позволила осуществлять наблюдения вдоль меридиана от  $10\text{--}20^\circ\text{ N}$  до высоких широт практически одновременно (в пределах 0.5 часа) и при одном и том же местном времени. Наблюдения продолжались в течение всего двух месяцев. Остались не покрытыми измерениями секторы, соответствующие местному времени вблизи полудня (10:30 – 16:00) и вблизи полуночи (22:30 – 4:00). Несмотря на неполноту покрытия, эти

измерения показали эффективность метода ИК-спектроскопии для исследования средней атмосферы Венеры, ее термической структуры, термического ветра, вертикальных профилей аэрозоля и малых составляющих. Впоследствии это было учтено при выборе орбиты аппарата *Венера Экспресс*, а сам эксперимент послужил прототипом Планетного фурье-спектрометра ПФС (*Марс-96, Марс-Экспресс и Венера-Экспресс*).

Таблица 1. Орбитальные космические аппараты, на борту которых были установлены ИК фурье - спектрометры для исследования Венеры и Марса

Эксперимент	Год запуска	Спектр. диапазон см-1	Спектр. разрешение, см-1	Кол-во полученных спектров	Орбита
<b>IRIS Mariner 9</b>	<b>1971</b>	<b>250-2000</b>	<b>2</b>	<b>20 000</b>	<b>i=64°</b>
<b>ФС Венера 15</b>	<b>1983</b>	<b>250-1600</b>	<b>4.6-6.5</b>	<b>2 000</b>	<b>полярная</b>
<i>TES MGS</i>	<i>1996</i>	<i>250-1600</i>	<i>10-20</i>	<i>Много миллионов</i>	<i>полярная</i>
<b>ПФС Марс Экспресс</b>	<b>2003</b>	<b>300 - 8000</b>	<b>1.6</b>	<b>&gt; 500 000</b>	<b>полярная</b>
<i>ПФС Венера Экспресс</i>	<i>2005</i>	<i>300 - 9000</i>	<i>1.6</i>	<i>Не работает</i>	<i>полярная</i>

Примечание. Курсивом выделены эксперименты, результаты которых не использовались в диссертации: это TES MGS, имеющий низкое спектральное разрешение, и неработающий ПФС на *Венере-Экспресс*. В настоящей работе использованы данные другого прибора на *Венере-Экспресс* – картирующего спектрометра VIRTIS.

В параграфе **1.3** анализируются наблюдательные данные ФС В15. Описываются принципы спектральной классификации и поведение различных спектральных особенностей для характерных областей Венеры. Примеры типичных спектров приведены на рис. 1.

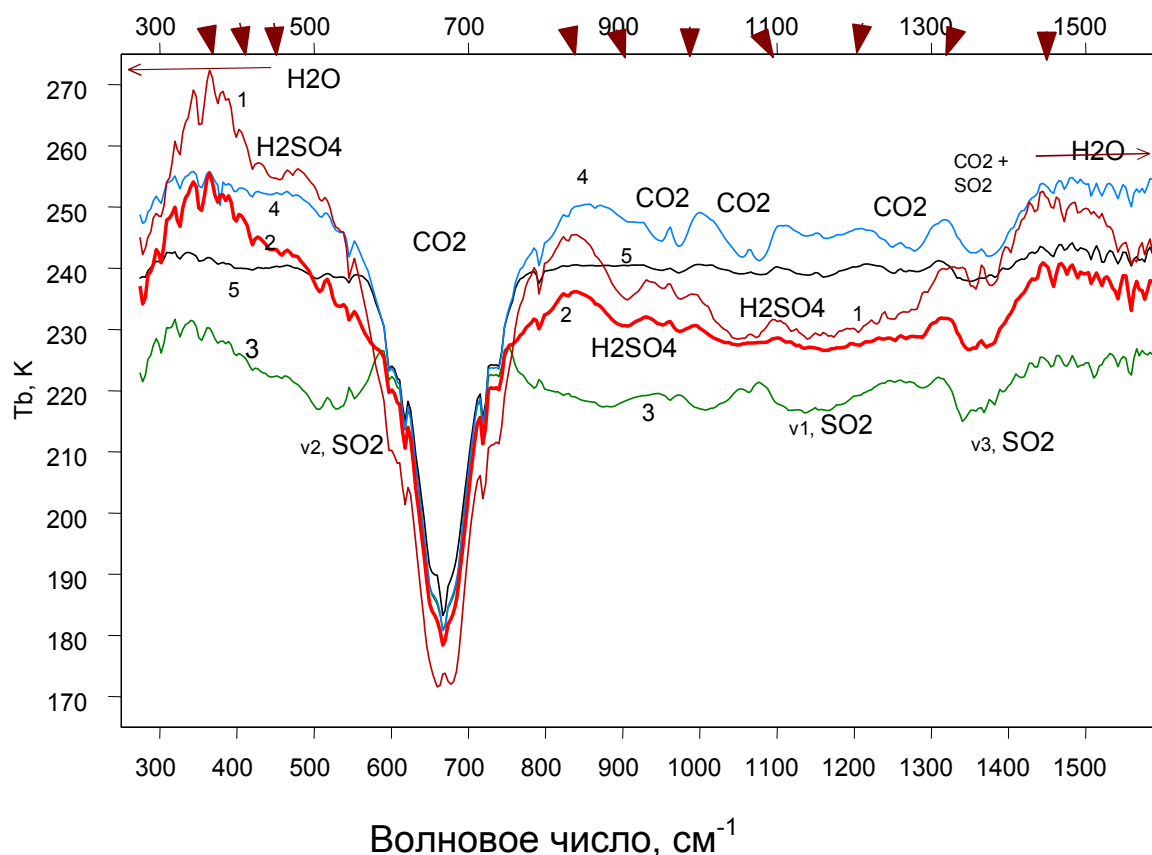


Рис.1. Усредненные спектры для типичных областей Венеры: 1 -  $10^\circ < \varphi < +10^\circ$ ,  $LS = 75^\circ$ ; 2 – «теплые области» на широтах  $\varphi = 60 - 80^\circ$ ; 3 – холодный воротник,  $\varphi = 60 - 80^\circ$ ; 4 – горячий диполь,  $\varphi = 75 - 85^\circ$ , 5 -  $\varphi > 85^\circ$ . Стрелками показаны положения спектральных каналов, свободных от газового поглощения, которые используются для аэрозольного зондирования. Показано положение газовых полос поглощения  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  и жидкой серной кислоты.

В параграфе **1.4** приводится описание алгоритма самосогласованного восстановления температурного и аэрозольного профилей для мезосферы Венеры с использованием ИК-спектра во всем наблюдаемом спектральном интервале, включающем как полосы поглощения  $CO_2$ , так и аэрозольные полосы концентрированной серной кислоты.

Интенсивность уходящего излучения  $I_\nu$  на волновом числе  $\nu$  в случае поглощающей атмосферы в тепловой ИК-области спектра определяется уравнением переноса. Приведем его в интегральной форме:

$$I_\nu = B_\nu(T_0) \cdot t_\nu(P_0) + \int_0^{P_0} B_\nu[T(P)] \cdot K_\nu(P, T) \cdot d \lg P, \quad (1)$$

где  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $B_\nu(T)$  – функция Планка,  $t_\nu$  – функция пропускания атмосферы от верхней границы до некоторого уровня  $P$ ,  $K_\nu(P, T)$  – весовая функция, которая определяет вклад данного уровня  $(P, T)$  в интенсивность уходящего излучения;

$$K_\nu = -\partial t_\nu / \partial \lg P. \quad (2)$$

Пропускание атмосферы от верхней границы до уровня  $P$  на данном волновом числе определяется выражением:

$$t_\nu = \exp \left\{ \sec \theta \int_{-\lg P}^{-\infty} H \cdot k_\nu(P, T) \cdot d \lg P \right\}, \quad (3)$$

где под экспонентой стоит оптическая толщина атмосферы;  $\theta$  – зенитный угол наблюдения;  $H$  – шкала высоты;  $k_\nu(P, T)$  – объемный коэффициент поглощения, который в общем случае представляет собой сумму газового и аэрозольного коэффициентов поглощения.

Уравнение (1) решается итерационным методом (Twomey et al., 1977) с использованием соотношений релаксации соответственно для температурного и аэрозольного профилей:

$$T^{(n+1)}(P_j) = T^{(n)}(P_j) \cdot \sum_{i=1}^{I0} T_B(\nu_i) / T_B^{(n)}(\nu_i) \cdot K_{ij} \cdot \sigma_i / \sum_{i=1}^{I0} K_{ij} \cdot \sigma_i, \quad (4)$$

$$N^{(n+1)}(P_j) = N^{(n)}(P_j) \cdot \sum_{i=1}^{I0} I^{(n)}(\nu_i) / I(\nu_i) \cdot K_{ij} \cdot \sigma_i / \sum_{i=1}^{I0} K_{ij} \cdot \sigma_i, \quad (5)$$

где  $T_B(\nu_i)$  – яркостная температура на волновом числе  $\nu_i$ . Индексы  $i$  и  $j$  относятся соответственно к волновому числу и уровню в атмосфере,  $n$  –



номер итерации,  $\sigma_j$  – ошибка измерений,  $N(P)$  – эквивалентное число аэрозольных частиц.

Для описания вертикального аэрозольного профиля используется понятие вертикального профиля эквивалентных частиц. После измерений на *Пионер-Венера* было предложено четырехмодовое распределение частиц по размерам, которое описано в работах Pollack et al., 1980; Zasova et al. 2007. В верхнем облачном слое основная мода – это мода 2 (частицы с размером около 1 мкм). Частицы моды 2 были приняты в качестве эквивалентных частиц.

Для расчета свернутых функций пропускания используются интерполяционные формулы. При этом полинейно для трех температурных профилей  $T^{min}(P)$ ,  $T^0(P)$ ,  $T^{max}(P)$  рассчитываются функции пропускания, которые затем свертываются с инструментальным контуром и вычисляются интерполяционные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  в зависимости от волнового числа и давления. Новая функция пропускания связана с  $t_v^0 [T^0(P)]$  следующим соотношением:

$$\ln t_j = \ln t_{j-1} + (\ln t_j^0 - \ln t_{j-1}^0) \left( \frac{\bar{T}_j^0}{\bar{T}_j} \right)^{\beta_j(\nu)} \exp \left( \alpha_j(\nu) \frac{\bar{T}_j - \bar{T}_j^0}{\bar{T}_j \bar{T}_j^0} \right), \quad (6)$$

где  $j$  относится к уровню в атмосфере, а  $\bar{T}_j$  и  $\bar{T}_j^0$  равны соответственно:

$$\bar{T}_j = \frac{T_j + T_{j-1}}{2}, \quad \bar{T}_j^0 = \frac{T_j^0 + T_{j-1}^0}{2}. \quad (7)$$

Ошибки метода проанализированы в работе Ignatiev et.al (2005).

Точность восстановления температурного профиля в интервале высот 60 - 80 км составляет 2 - 3 °, ошибка растет ниже и выше этих уровней.

В параграфе 1.5 описываются трехмерные температурные поля в координатах широта-высота в мезосфере в зависимости от местного

времени. Основные динамические особенности, наблюдаемые в ИК-области, – это полярный диполь и холодный воротник. Прослежены их вариации в зависимости от местного времени. Полярный диполь и холодный воротник, наблюдаемые в Южном полушарии в эксперименте VIRTIS на *Венере-Экспресс*, показывают сходное строение со структурными деталями, наблюдавшимися ФС В15 в Северном полушарии.

Поля температуры, усредненные как глобально, так и по квадрантам солнечной долготы, показаны на рис. 2 и 3. Эти данные усреднены по  $5^{\circ}$  широты. На зонально усредненном поле (рис. 2) ясно видно возрастание температуры от низкоширотных областей к полюсу в интервале высот 65 – 90 км, т.е. в среднем условие циклострофического баланса соблюдается до высот 90 км. На уровне около 95 км (на низких широтах) наблюдается температурный минимум, связанный с температурной инверсией, на высоких широтах температурные профили близки к изотермичным. Ниже уровня 65 км температура падает с широтой - до широты  $65 - 70^{\circ}$ , где наблюдается температурный минимум, связанный с холодным воротником. В полярной области ( $\varphi > 80^{\circ}$ ) в интервале высот 58 - 70 км температура остается практически постоянной (в пределах 5К).

Термическая структура атмосферы подвержена суточным вариациям на всех высотах и широтах. Для всех квадрантов, за исключением послеполуденного, условие циклострофического баланса выполняется до высоты 95 км: полярные температуры превышают низкоширотные на величину, большую 10 К на изобарических уровнях.

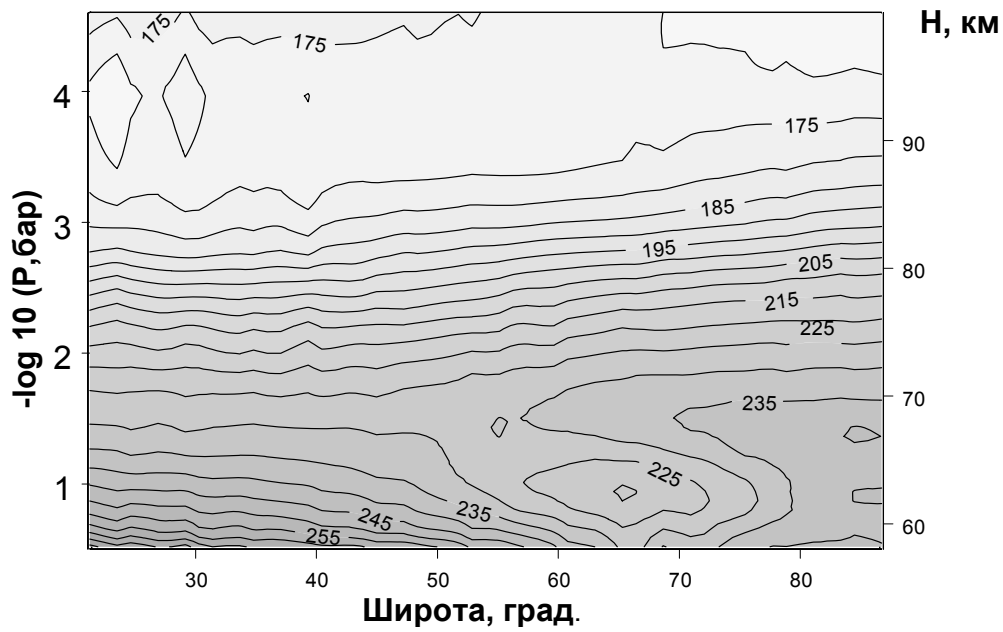


Рис. 2. Зонально усредненное поле температуры

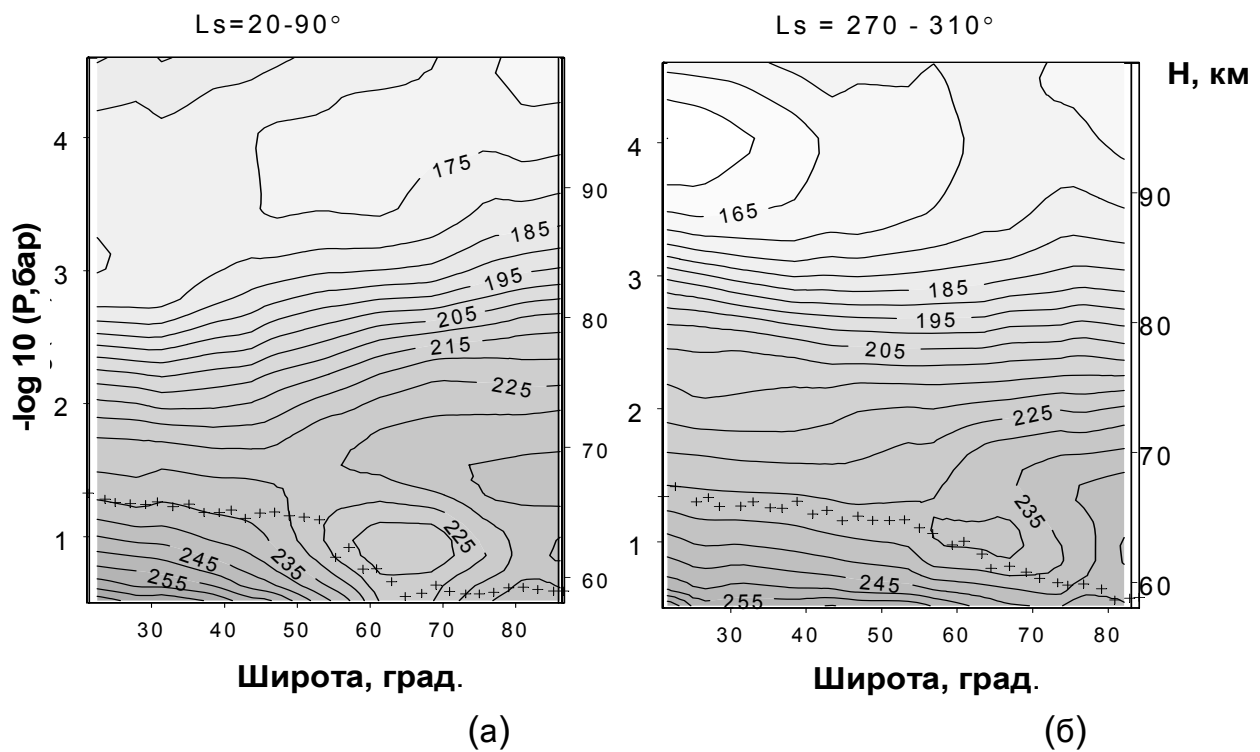


Рис. 3 а,б. Поля температуры, усредненные по квадрантам солнечной долготы. Крестиками показано положение верхней границы облаков. Дневная сторона: а) утро, б) вечер

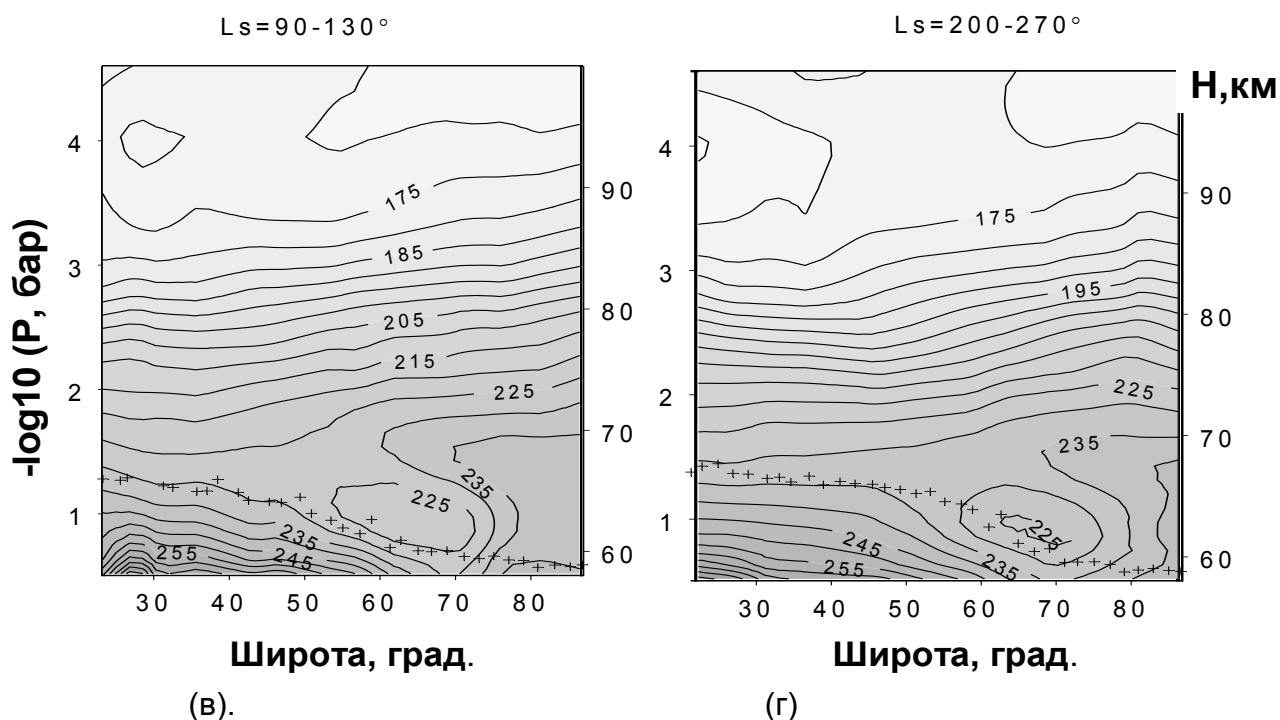


Рис. 3 в,г. То же, что и 3 а,б, но ночная сторона: в) утро, г) вечер

Высота верхней границы облаков также подвержена суточным вариациям (рис. 3). Ранее суточные вариации верхней границы облаков в экваториальной области (в ИК-области спектра) были обнаружены на Венере-9, 10 (Ксанфомалити и др., 1976; Ksanfomality, 1980) и при наземных наблюдениях (Apt et al., 1980).

В параграфе 1.6. описывается поведение термического прилива в атмосфере Венеры. Возможность измерять большой интервал широт практически при одном и том же местном времени и практически одновременно особенно важна для исследования солнечно-связанных структур (термических приливов). По современным представлениям (Gierasch et al., 1997), солнечные термические приливы дают энергию на поддержание суперротации атмосферы. Они являются результатом поглощения значительной части (50%) солнечной энергии в узком (около 10 км толщиной) верхнем облачном слое «неизвестным УФ-поглостителем».

Как было показано выше, тепловая структура средней атмосферы Венеры на большинстве интервалах высот сильно зависит от широты и местного времени. Для более подробного исследования было выбрано 15 уровней между 0.1 и 600 мбар (55 – 95 км). Перепад высот между уровнями выбран равным 1 - 2 км в облачном слое и 3 – 3,5 км над уровнем облаков. Зависимость температуры на изобарических уровнях от солнечной долготы (или местного времени) была представлена в форме ряда Фурье, содержащего пять членов:

$$T(p, \phi, L_s) = T_0(p, \phi) + T_1((p, \phi) \cos(L_s + \varphi_1(p, \phi)) + T_2((p, \phi) \cos(2L_s + \varphi_2(p, \phi)) + T_3((p, \phi) \cos(3L_s + \varphi_3(p, \phi)) + T_4((p, \phi) \cos(4L_s + \varphi_4(p, \phi)) \quad (8)$$

где  $P$  - давление,  $\phi$  - широта,  $T_i$ ,  $\varphi_i$  – амплитуда и фаза  $i$ -й гармоники,  $T_0$  - средняя температура,  $T_1$  – амплитуда суточной приливной волны,  $T_2$  – амплитуда полусуточной приливной волны, и т.д. Амплитуды и фазы зависят от широты и давления (высоты).

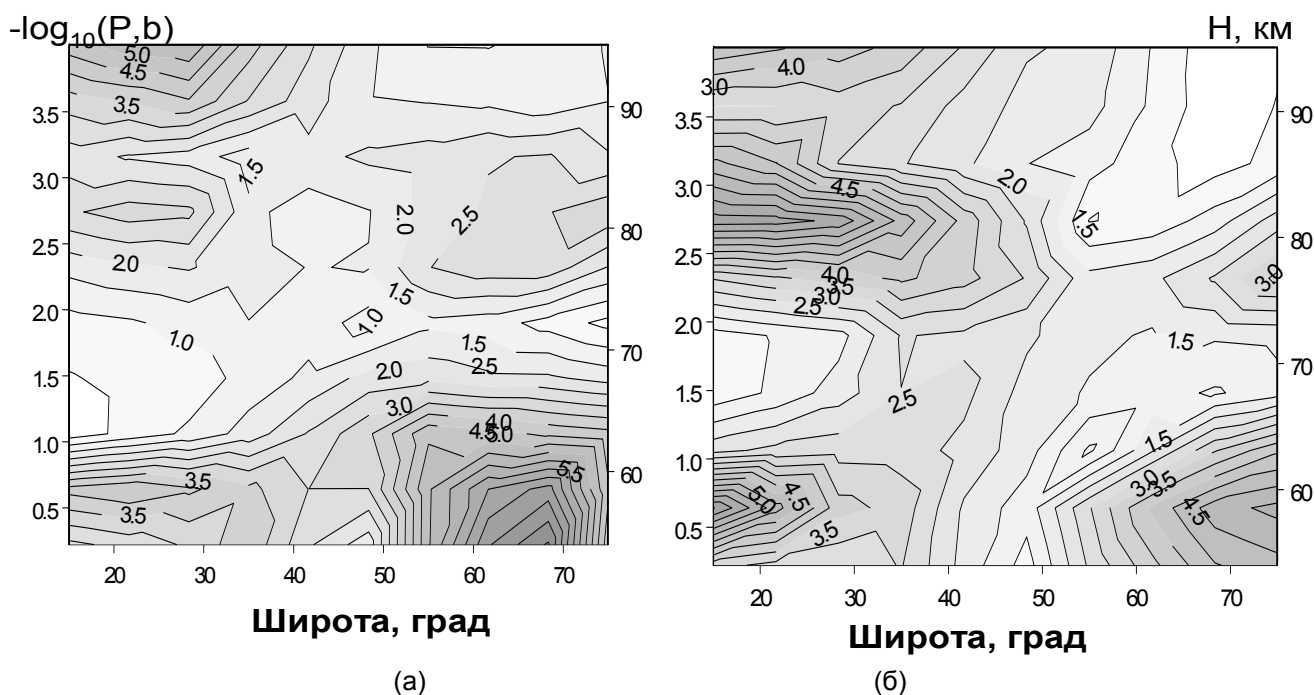


Рис.4. Распределение гармоник термического прилива в зависимости от широты и высоты в мезосфере: а)  $T_1$ , б)  $T_2$ .

Было впервые получено распределение зонально усредненной, суточной,  $\frac{1}{2}$ -,  $\frac{1}{3}$ - и  $\frac{1}{4}$ -суточной гармоник термического прилива в зависимости от широты и высоты в средней атмосфере.

Амплитуды прилива достигают максимума в верхнем облачном слое ( $h < 70$  км), который характеризуется максимумом поглощенной здесь солнечной энергии. Можно отметить, что даже  $\frac{1}{3}$ - и  $\frac{1}{4}$ - суточные волны имеют здесь значительную интенсивность, достигая 5 К и 3 К соответственно на уровне 300 мбар. На высоких широтах амплитуда этих волн ниже, максимальное значение (3 К и 2 К соответственно) достигается на уровне 200 мбар. В надоблачной атмосфере  $T_1$  достигает максимума на высоте 90 км и выше,  $T_2$  - между 83 – 86 км, а  $T_3$  -- на высоте 72 – 76 км (на низких широтах).

Суточные вариации высоты верхней границы облаков также носят солнечно-связанный характер, и зависят от широты: зонально средняя компонента  $H_0$  ( $1218\text{см}^{-1}$ ) изменяется от 69 км при  $\varphi = 15^\circ$  до 59 на  $75^\circ$ . В низких широтах суточная и полусуточная амплитуды достигают 1 км, максимальное значение суточная амплитуда имеет в холодном воротнике, превышает 1.5 км.

В параграфе 1.7. обсуждается строение и состав верхнего облачного слоя и приводится сравнение результатов эксперимента ФС на КА *Венера-15* и VIRTIS КА *Венера-Экспресс*). Впервые показано, что видимый облачный слой состоит из серной кислоты на всех широтах Венеры (включая северный и южный полярные районы). Крупные частицы моды 3 (3 - 4 мкм), наблюдавшиеся в области верхней границы облачного слоя в холодном воротнике ( $H < 60$  км), как и частицы моды 2 (1 мкм), в основном также состоят из серной кислоты. Крупные, возможно кристаллические, частицы впервые были обнаружены в результате нефелометрического эксперимента на *Венерах- 9,10* ниже основного облачного слоя (Маров и др., 1976, 1977; Marov et al., 1980).

Knollenberg and Hunten (1980) в результате эксперимента на *Пионер-Венера* обнаружили частицы  $r > 3$  мкм (мода 3) в экваториальной области ниже 58 км в среднем и нижнем облачном слое.

Положение верхней границы облаков ( $\tau = 1$ ) для двух волновых чисел, соответствующих минимуму ( $365 \text{ см}^{-1}$ ) и максимуму ( $1218 \text{ см}^{-1}$ ) коэффициента поглощения в серной кислоте в зависимости от широты, приведено на рис. 5. Высота верхней границы облаков на  $1218 \text{ см}^{-1}$  уменьшается от 67 – 72 км на низких широтах до 58–60 км в полярной области. На  $365 \text{ см}^{-1}$  высота верхней границы облаков на высоких широтах варьируется в пределах 1 км для данной широты, на низких широтах эти вариации достигают 5 км. Систематическая ошибка в высоте верхней границы облаков порядка 2 км, тогда как относительная ошибка определения высоты верхней границы значительно меньше.

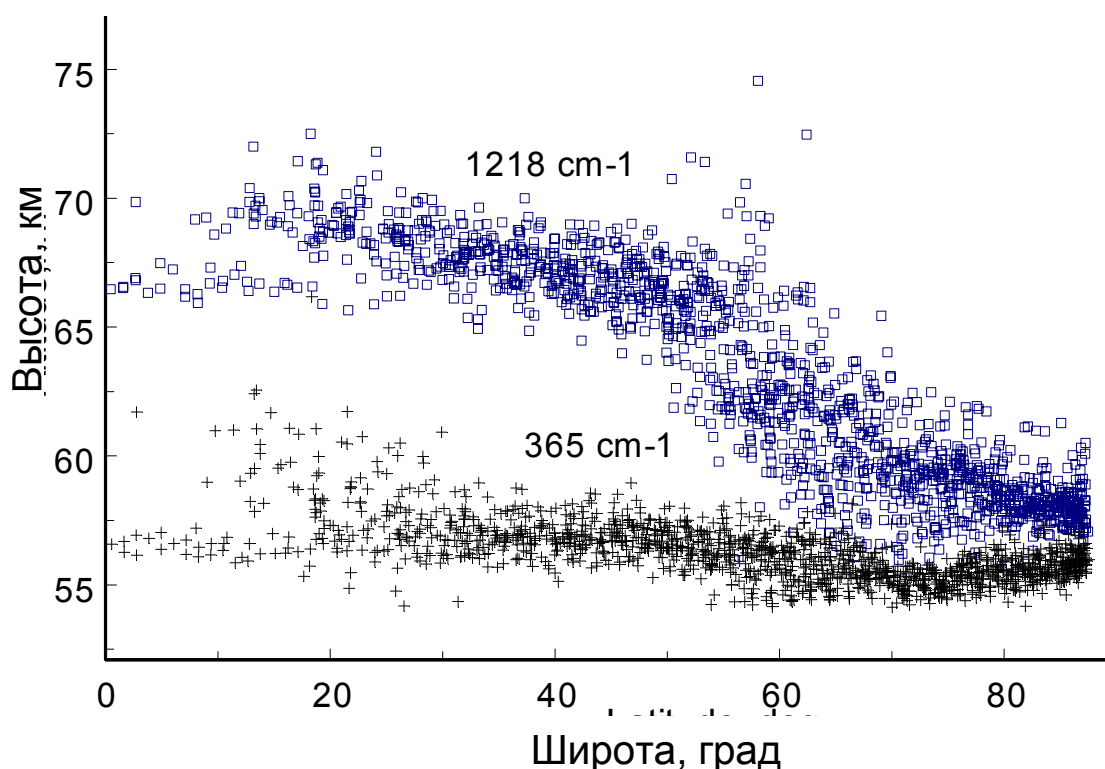


Рис.5. Положение верхней границы облаков в двух волновых числах, соответствующих максимуму ( $1218 \text{ см}^{-1}$ ) и минимуму ( $365 \text{ см}^{-1}$ ) поглощения в серной кислоте в рассматриваемом спектральном интервале. Облачный слой диффузный, поэтому верхняя граница определяется как высота уровня  $\tau = 1$  и зависит от волнового числа

В параграфе 1.8. обсуждается содержание двуокиси серы в верхнем облачном слое (ФС на *Венере-15*) и природа «неизвестного УФ-поглотителя». Двуокись серы и пары воды являются химическими предшественниками  $H_2SO_4$ , и их полосы поглощения были впервые обнаружены ФС В15. (Zasova et al. 1993; Moroz et al. 1990; Ignatiev et al. 1999). Вертикальные профили  $SO_2$  были получены с использованием трех фундаментальных полос (Zasova et al., 1993; Esposito et al. 1997). Форма этих полос зависит не только от коэффициентов поглощения в газе, но и в значительной степени от вертикальных профилей температуры и плотности аэрозоля, которые получаются из того же самого спектра. В среднем содержание  $SO_2$  возрастает с широтой. Однако интегральное содержание  $SO_2$  (газ+аэрозоль) выше уровня 62 км примерно одинаково на низких и на высоких широтах ( $4\cdot 5e+19$  см<sup>-2</sup>). На низких широтах вертикальное распределение  $SO_2$  контролируется фотохимическими процессами формирования облаков, а на средних и высоких широтах оно определяется динамическими процессами в атмосфере. В холодном вентнике вертикальная шкала составляет около 1 км (на высотах 55 - 65 км), а в наиболее теплых областях на тех же широтах она близка к 5 км (в интервале высот 55 -72 км), что сопоставимо со шкалой высот для облачного слоя. Выше облаков шкала высоты  $SO_2$  уменьшается до 1 км. Содержание  $SO_2$ , приведенное к 62 км высоты, составляет в среднем 100 - 500 ppb на низких широтах и 100ppb – 10 ppt - на высоких (ошибка  $\pm 50\%$ ).

**В Главе 2** обсуждаются нетепловые ИК-эмиссии, наблюдавшиеся в эксперименте VIRTIS на КА *Венера-Экспресс*. Параграф 2.1 посвящен эмиссиям кислорода, параграф 2.2 - эмиссиям ОН.

Нами впервые были обнаружены эмиссионные ИК полосы ОН (полосы Мейнеля) в спектрах Венеры. Можно говорить об открытии



новой молекулы в атмосфере этой планеты. Эмиссии ОН были обнаружены в 1948 году в атмосфере Земли (Meinel, 1950), и никогда не наблюдались в спектрах других планет. На Венере вращательно-колебательные ИК-полосы ОН 1.44 мкм (2-0) и 2.7 - 3.1 мкм (1 - 0, 2 - 1, 3 - 1) были отождествлены при лимбовых наблюдениях в окрестности антисолнечной точки на ночной стороне планеты. Их интенсивности тесно коррелируют с интенсивностью и вертикальными профилями свечения кислорода. Максимальная интенсивность свечения ОН (как и O<sub>2</sub>) наблюдается на высоте 98 ± 2 км. Вращательные температуры, полученные по полосам ОН, составляют 250±25К для случаев максимальной интенсивности свечения.

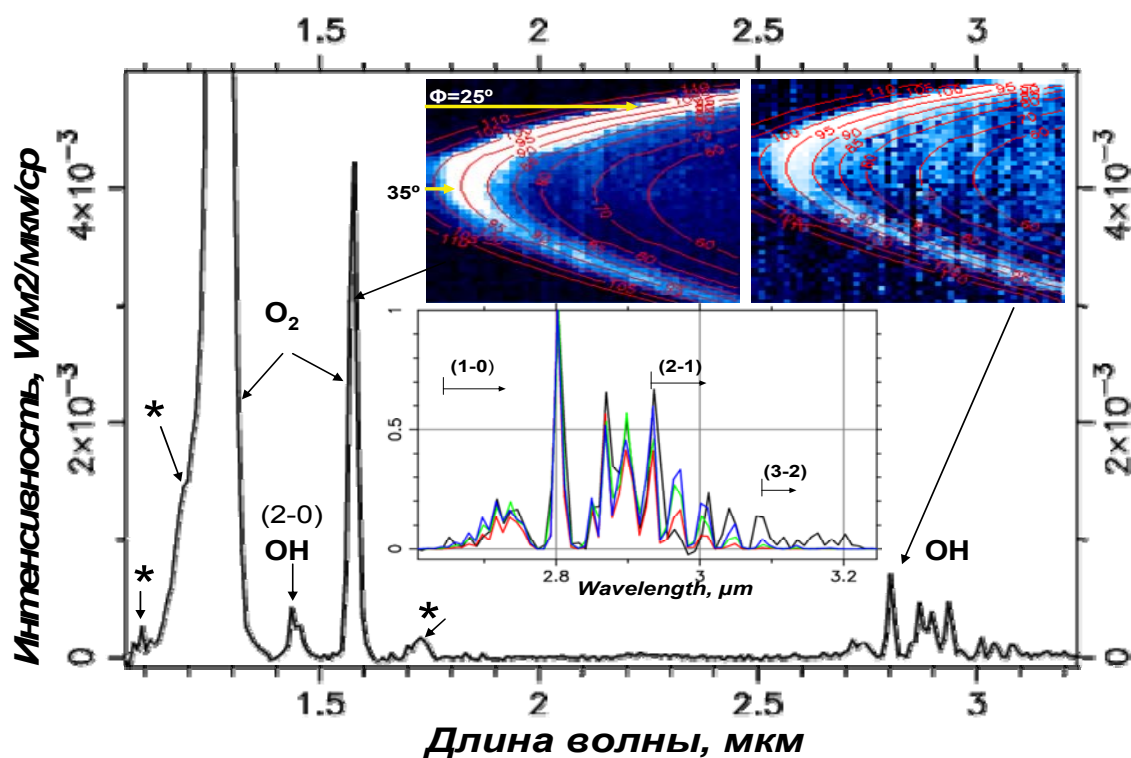


Рис. 6. Лимбовый спектр VIRTIS, усредненный в пределах 90 - 100 км высоты и 25 - 35°N широты.

В спектре (на рис.6) наблюдаются эмиссии молекулярного кислорода O<sub>2</sub> (0-0) 1.27 мкм и в ~ 80 раз более слабая O<sub>2</sub> (1-0) на 1.58 мкм, а также эмиссии ОН 1.44 мкм (2-0) и 2.81 мкм (1-0). Звездочками показаны следы

теплового излучения нижней атмосферы, прошедшего в окнах прозрачности между полосами CO<sub>2</sub> и рассеянного высокой дымкой. На врезке приведен измеренный спектр вместе с модельными спектрами для вращательных температур  $T_R = 200, 250, 300$  К. Левое изображение – лимб на  $\lambda = 1.58$  мкм (O<sub>2</sub>), правое – 2.81 мкм (ОН). На изображениях нанесена высота над поверхностью.

**Часть II** посвящена ИК-спектрометрии Марса.

**В Главе 3** обсуждается применение методики к данным ИК-спектрометра-интерферометра IRIS на *Маринере-9*.

Параграф **3.1.** посвящен особенностям задачи самосогласованного восстановления температурного профиля и аэрозольной оптической толщи для марсианской атмосферы. В отличие от Венеры, аэрозоль здесь представлен различными компонентами: конденсационными облаками, пылью, или тем и другим. Низкое давление у поверхности и, как правило, низкая плотность аэрозоля не позволяют определить вертикальный профиль аэрозоля из ИК-спектра в тепловой области – возможно восстановление лишь интегральной оптической толщи (за исключением некоторых случаев с немонотонным температурным профилем).

В параграфе **3.2** показаны температурные профили над вулканами Tharsis (рис. 7) и развитие температурной инверсии на северном склоне вулкана. Температурные профили с инверсией подтвердили результаты, полученные с помощью модели общей циркуляции. Как правило, инверсия наблюдается на ночной стороне. Однако тепловая инерция в высокогорных областях Tharsis (Palluconi&Kieffer, 1986) в 10 – 15 раз ниже, чем на равнине, что приводит к быстрому охлаждению низкоинерционной поверхности при более высокой инерции атмосферы и может быть причиной сильной инверсии температурных профилей.

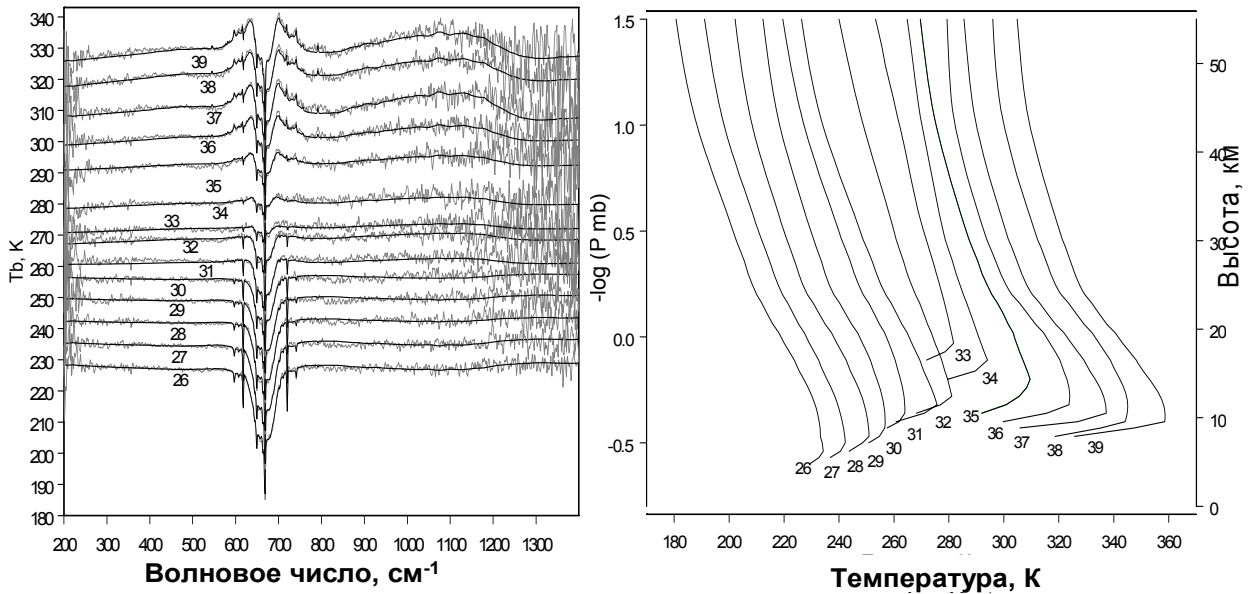


Рис. 7. Разрез через вершину Arsia Mons (LT=17:30). Соседние кривые сдвинуты на  $10^0$  на обоих графиках. Слева – сравнение наблюдаемых и синтетических спектров; справа – соответствующие восстановленные температурные профили. Вдоль вертикальной левой оси отложены значения логарифма давления, а вдоль правой – приблизительные значения высоты

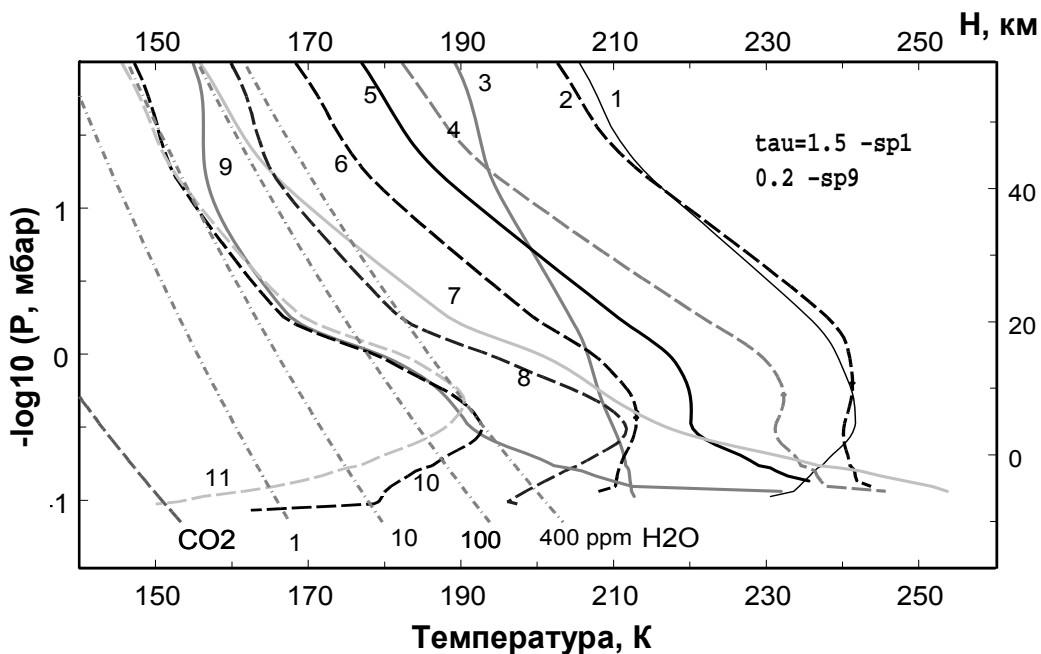


Рис. 8. Район Hellas: вариации температуры атмосферы в процессе затухания пылевой бури. Штриховая линия отмечает температуру конденсации  $\text{CO}_2$ , а штрих-пунктирные – температуру конденсации воды при ее содержании 1, 10, 100 и 400 ppm. (1)  $L_s = 293^\circ$ , LT = 18:20; (2)  $L_s = 297.0^\circ$ , LT = 15:20; (3)  $L_s = 302^\circ$ , LT = 6:30; (4)  $L_s = 309^\circ$ , LT = 13:15; (5)  $L_s = 310^\circ$ , LT = 10:00; (6)  $L_s = 312^\circ$ , LT = 6:50; (7)  $L_s = 330^\circ$ , LT = 12:30; (8)  $L_s = 332^\circ$ , LT = 6:50; (9)  $L_s = 350^\circ$ , LT = 10:40; (10)  $L_s = 44^\circ$ , LT = 8:00; (11)  $L_s = 55^\circ$ , LT = 4:50.

В параграфе **3.3.** обсуждаются вариации температурного профиля в зависимости от содержания пыли в атмосфере в процессе затухания пылевой бури на примере района низменности Hellas (рис. 8) При изменении оптической толщины пыли на волновом числе  $1075 \text{ см}^{-1}$  от 1.5 до 0.2 температура атмосферы на высоте 20 км падает на 70К, от 240 до 170 К.

В параграфе **3.4.** обсуждается строение ночной атмосферы в северной полярной области в зимний сезон. Впервые для нее были восстановлены температурные профили (рис. 9), а также показаны области в атмосфере, где происходит конденсация  $\text{CO}_2$  и водяного льда.

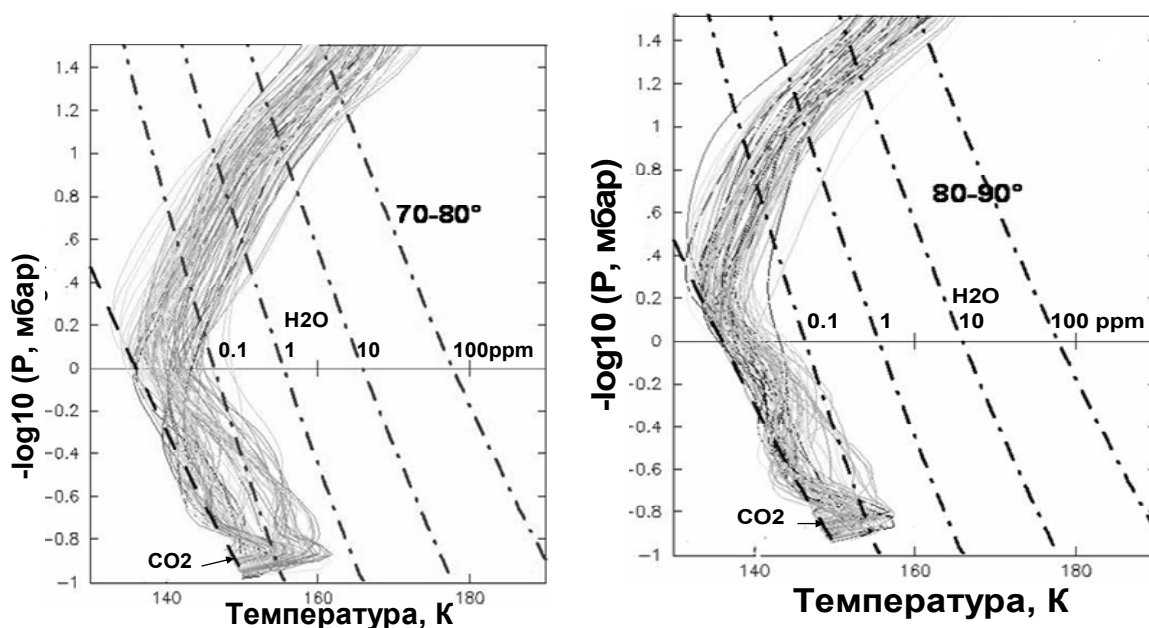


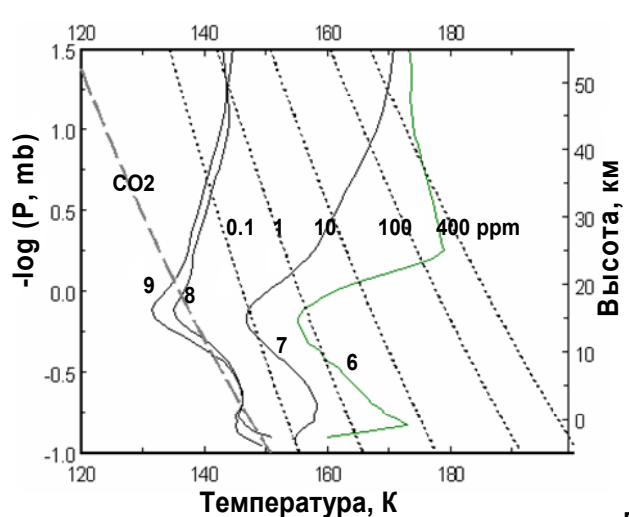
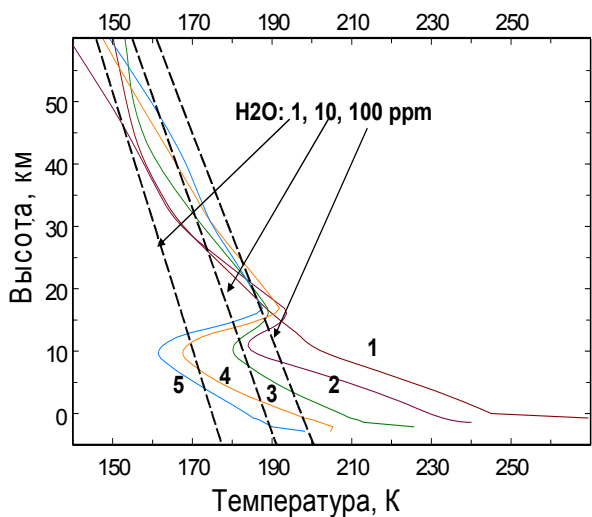
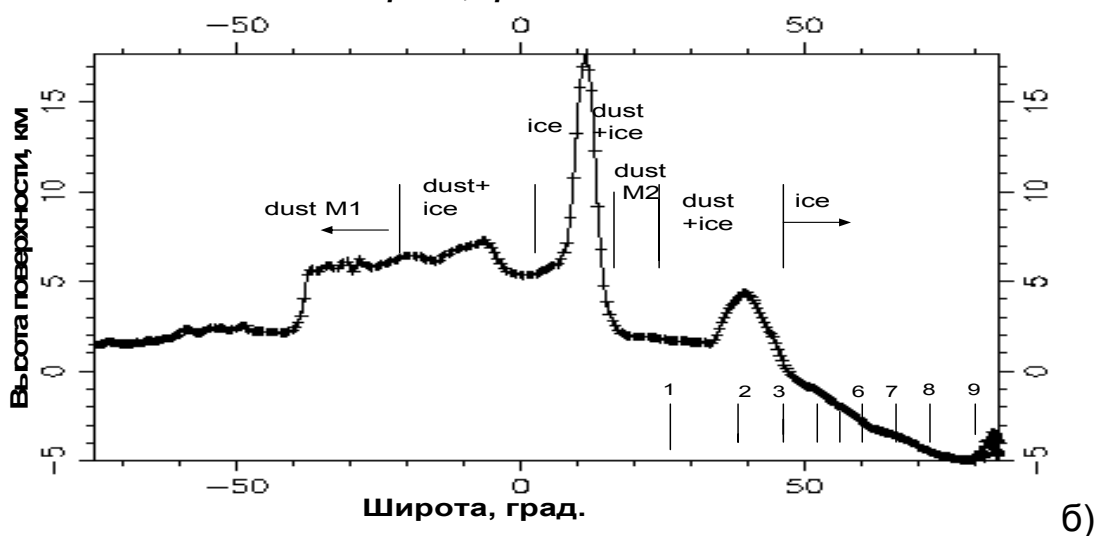
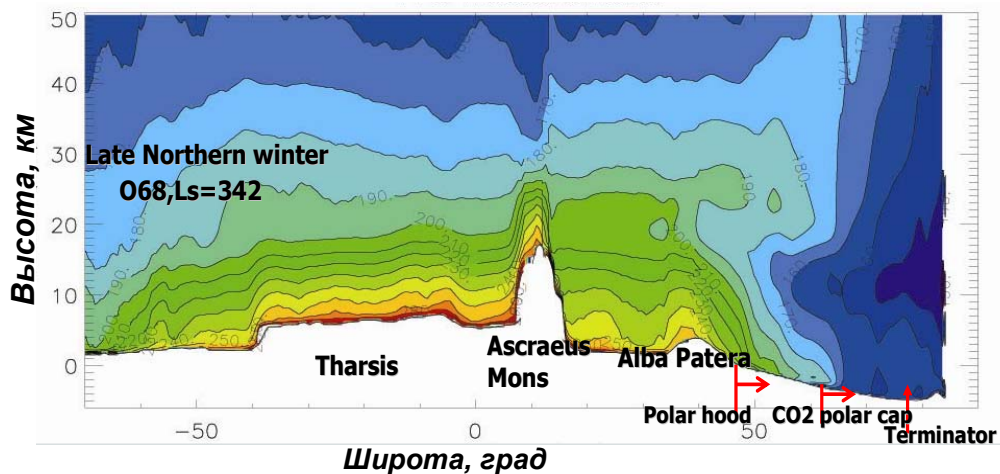
Рис. 9. Температурные профили, восстановленные из спектров IRIS, полученных для северной полярной области в ночное время для широт  $70-80^{\circ}\text{N}$  (a) и  $80-90^{\circ}\text{N}$  (b). Штриховая линия – температура насыщения для  $\text{CO}_2$ , штрих-пунктирная линия – температура насыщения  $\text{H}_2\text{O}$  при относительном содержании  $f_{\text{H}_2\text{O}} = 0.1, 1, 10$  и  $100 \text{ ppm}$ .

В параграфе **3.5** обсуждаются наблюдения облаков из водяного льда над областью Tharsis, наблюдения, проведенные в дневные часы, когда Марс находился вблизи афелия. Многие спектры TES и ПФС содержат полосы водяного льда, однако только три таких среди

спектров IRIS. Они относятся к области Tharsis при  $L_s = 98^{\circ}$ . Для нее также имеются одновременно полученные изображения в видимой области спектра. Оценен размер частиц в ледяных облаках (2 - 3 мкм) и его вариации со временем.

**В главе 4** описываются результаты, полученные с помощью Планетного фурье-спектрометра. В параграфе **4.1** описываются особенности метода самосогласованного восстановления температурного профиля и аэрозольной оптической толщи, ранее апробированный на спектрах IRIS, в применении к данным ПФС на *Марс-Экспресс*. При восстановлении не используются данные из модели общей циркуляции, поэтому получаемые результаты важны не только для определения физических условий на Марсе, но и для проверки и совершенствования моделей. Начальный температурный профиль и начальная оптическая толщина аэрозоля берутся непосредственно из измерений: начальный температурный профиль для каждого спектра определяется из яркостной температуры в полосе  $\text{CO}_2$  15 мкм, а начальное значение аэрозольной толщины - по глубине аэрозольных полос поглощения.

В параграфе **4.2** обсуждаются строение и сезонные вариации полярного воротника. Обнаруженная температурная инверсия на высоте 10-20 км в атмосфере, по-видимому, связана с нагревом в нисходящей ветви циркуляции Хэдли (рис. 10). Она коррелирует с присутствием облаков из водяного льда и наблюдается в зимний сезон на широте  $40-60^{\circ}$ .



в)

Рис. 10. а). Температурное поле вдоль орбиты 68 (конец северной зимы). б) Профиль высоты поверхности. Отмечены области, где наблюдалась пыль и облака из водяного льда, а также положение областей, для которых были восстановлены профили, приведенные на рис. в) .

Параграф 4.3 посвящен восстановлению температурных профилей в ночной атмосфере над полюсом в зимний сезон (т.е. при низкой температуре атмосферы и поверхности). Показано, что вблизи терминатора на дневной стороне может осуществляться конденсация  $\text{CO}_2$ . С областями возможной конденсации  $\text{CO}_2$  совпадают области на изображениях OMEGA *Марс-Экспресс* (рис. 11). В них наблюдаются гравитационные волны, наиболее ярко выраженные в свечении молекулярного кислорода и в полосах поглощения льдов  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  образования этих льдов, по-видимому, связана с тем, что вариации (последние антикоррелируют между собой). Неустойчивость процесса температуры приводят к быстро растущему преобладанию конденсации одного льда над другим: при росте температуры испаряется лед  $\text{CO}_2$  и в облаках начинает преобладать лед  $\text{H}_2\text{O}$ , а его испарение вызывает понижение температуры и приводит к конденсации  $\text{CO}_2$ .

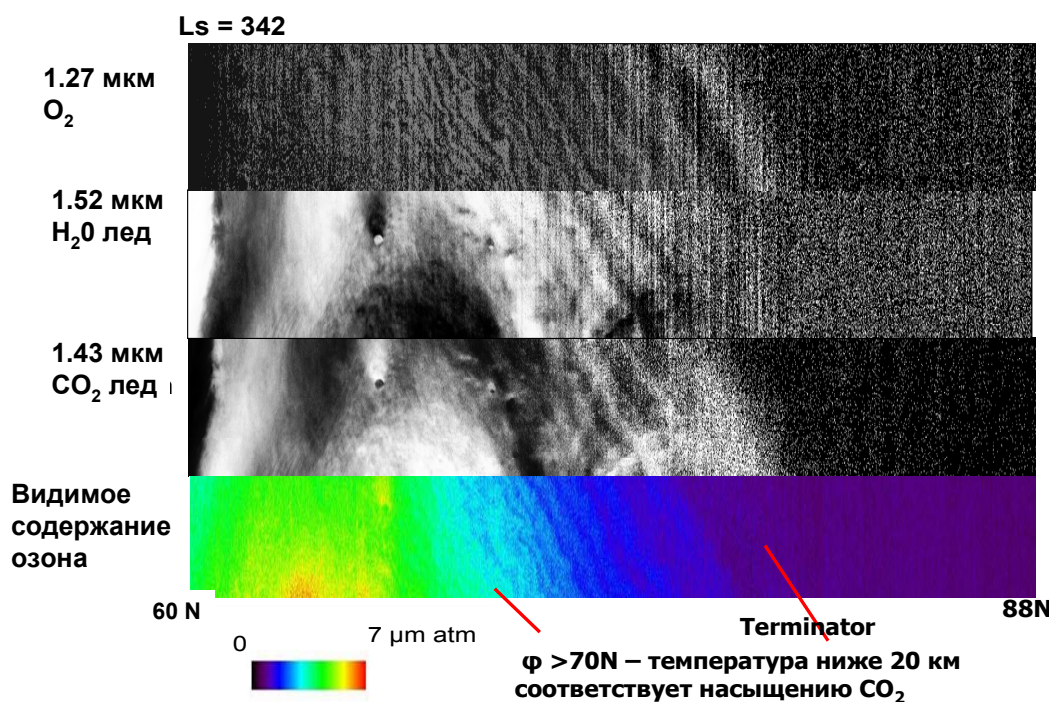


Рис.11. Структура марсианской атмосферы в Северной полярной области. Эмиссия  $\text{O}_2$  и содержание  $\text{O}_3$  в конце марсианской зимы. Эксперименты OMEGA и PFS.

В параграфе 4.4. описывается температурный режим над низменностью Hellas и Valles Marineris и сезонные и суточные вариации температуры и аэрозоля в широком интервале условий - от утренних и вечерних туманов до локальных пылевых бурь. Одновременные измерения утренней дымки, полученные с использованием ПФС, OMEGA и камер HRSC, вызвали многочисленные дискуссии о ее составе. Благодаря широкому спектральному интервалу ПФС было показано, что дымка состоит из пылевых частиц, покрытых льдом, или ледяных частиц с  $r_{\text{eff}} > 4$  мкм. В Valles Marineris зафиксирована локальная пылевая буря при  $L_s=136^\circ$ , вблизи полудня. Пыль имела типичный для Марса силикатный состав, а ее оптическая толщина превышала 1 на  $1075 \text{ см}^{-1}$ .

- В параграфе 4.5 рассматриваются облака из водяного льда в области вулканов и в экваториальном поясе. Нами впервые были обнаружены облака из водяного льда над северным полюсом в момент наиболее интенсивного таяния полярной шапки. Проведенные измерения были подтверждены расчетами в рамках модели общей циркуляции атмосферы (F. Montmessin). Найденное нами абсолютное содержание воды в экваториальных облаках для сезона северного лета составляет 20 - 40 ppm на широтах  $-10 - +20^\circ$  и превышает 50 ppm над северным полюсом.

- **В Заключении** подводятся основные итоги работы и делаются завершающие выводы. Основным итогом работы является создание методики, дающей возможность получения и анализа оригинальных данных по широкому спектру характеристик атмосфер планет, и использование этого метода для обработки и моделирования спектральных наблюдений в области теплового ИК излучения Венеры и Марса с борта нескольких космических аппаратов. Автором был



разработан и использован метод построения самосогласованных моделей высотного распределения температуры, а также состава и оптических свойств аэрозолей. Продемонстрирована эффективность созданного метода для исследования климата планет: как для определения локальных характеристик атмосфер, так и для изучения зависимости их свойств от местного времени, от положения на планете и времени года. Многие выводы и оценки, касающихся атмосфер Венеры и Марса, были сделаны впервые (см. раздел «Новизна работы»). В частности, впервые были обнаружены и исследованы температурные инверсии над холодными высокоширотными областями Марса и показана их связь с динамикой атмосферы и с присутствием облаков из водяного льда, исследована динамика изменений, происходящих в атмосфере Марса при затухании пылевой бури, показан приливной характер температурных вариаций и вариаций положения границы облачного слоя Венеры. Отождествлены не наблюдавшиеся ранее эмиссии в верхней мезосфере на ночной стороне Венеры:  $O_2$  (0-1) 1.58 мкм и OH полосы Мейнеля (2-0) 1.44 мкм и (1-0) 2.8 мкм. Важным является открытие молекулы гидроксила в мезосфере Венеры. Несмотря на то, что работа представляет собой завершённый этап исследования атмосфер двух планет по ИК спектральным данным, ее результаты имеют перспективы дальнейшего развития и применения для исследования тел солнечной системы с атмосферой.

Все перечисленные выше результаты диссертации являются новыми и актуальными и имеют практическое применение в области исследования атмосфер и климата планет.

### **Список цитируемой литературы**

Авдуевский В.С., Годнев А.Г., Семенченко А.В. и др. Исследование характеристик стратосферы Венеры по измерениям перегрузок при

- торможении станций "Венера-13" и "Венера-14" // Космич. исслед. 1983. Т. 21. Р. 205.
- Васильев А.В., Мельникова И.Н. Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере Земли. Измерения. Интерпретация. С-Петербург: С-Пб НЦ РАН, НИЦ ЭБ РАН, С-Пб ГУ, 2002.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1970.
- Краснопольский В.А., Крысько А.А., Рогачев В.Н., Паршев В.А. Спектроскопия ночного свечения Венеры с орбитеров Венера9,10 // Космич. исслед. 1976. Т. 14. Р.789-795.
- Ксанфомалити Л.В., Дедова Е.В., Обухова Л.Ф. и др.. Инфракрасное излучение облаков Венеры // Космические исслед. 1976. Т. 14. С.768-775.
- Маров М.Я. , Бывшев Б.В., Мануйлов К.Н. и др. Нефелометрические измерения на станциях Венера 9 и 10 // Космич. исслед. 1976. Т. 14. С. 729-734.
- Маров М.Я., Бывшев Б.В., Баранов Б.П. и др. Аэрозольная компонента атмосферы Венеры по данным измерений на станции "Венера-11".// Космические исслед. 1979. Т. 17. С. 743-746.
- Мороз В.И., Хантрес Б.Т., Шевалев И.Л. Планетные экспедиции XX века // Космич. Исслед. 2002. Т.40. №5. С. 451-481.
- Черемухина З.П., Морозов С.Ф., Бородин Н.Ф. Оценка температуры стратосферы Венеры по данным о перегрузках автоматической станции "Венера-8" // Космич. исслед.1974. Т. 12. №2. С. 264.
- Эртель Д., В.И.Мороз, В.М. Линкин, и др. "Венера-15", "Венера-16": первые результаты эксперимента по инфракрасной спектрометрии // ПАЖ. 1984. Т.10. №.2, Р. 101.
- Эртель Д., В.И.Мороз, И.Нопираковский и др. Инфракрасный эксперимент на АМС "Венера-15" и "Венера-16". 1. Методика и первые результаты // Космические исслед. 1985. Т. XXIII. С. 191-205.
- Apt J., Brown R.A., Goody R. Character of the thermal emission from Venus // J Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 7934-7940.
- Avduevsky, V. S., M. Ya. Marov, Yu. N. Kulikov, V. P. Shari, A. Ya. Gorbachevskiy, G. R. Uspenskiy, and Z. P. Cheremukhina,. Structure and parameters of the Venus atmosphere according to Venera probe data. // In .Venus. Tucon: Arizona Press, P. 681–765,1983.
- Bougher S.W., S. Rafkin, P. Drossart. Dynamics of the Venus upper atmosphere: Outstanding problems and new constraints expected from Venus Express // Planet. Space Sci. 2006. V. 54. P.1371-1380.
- Bougher, S.W., Borucki, W.J. Venus O2 visible and IR nightglow: implications for lower thermosphere dynamics and chemistry // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 3759–3776.
- Christensen P.R. Variations in Martian surface composition and clouds occurrence determined from thermal infrared spectroscopy: analysis of Viking and Mariner-9 data// J. Geophys.Res. 1998. V. 103. E1. P. 1733-1746.

- Clancy R.T., S.W. Lee, G.R. Gladstone, W. McMillan and T. Roush. A new model of Mars atmospheric dust based upon analysis of ultraviolet through infrared observations from Mariner 9, Viking and Phobos // *J. Geophys. Res.*1995. V. 100. P. 5251-5263.
- Clancy R.T., M. J. Grossman , M. J. Wolf, P. B. James, D. J. Rudy, Y.N. Billawala, B.J. Sandor and S.W. Lee. Water vapor saturation at low altitudes around Mars aphelion // 1996. *Icarus*. V. 122. P. 36-62.
- Clancy, R.T., Wolf ., Whitney B., Cantor B., Smith M. Mars equatorial mesospheric clouds: Global occurrence and physical properties from Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer and Mars Orbiter Camera limb observations // *J. Geophys. Res.*2007. V. 112. 2006JE002805
- Connes P., Connes J., et al. O<sub>2</sub> emission in the day & night airglow of Venus // *Astroph. J.* 1979. V. 233. L29-L32.
- Conrath B., R. Curran, R. Hanel, V.Kunde, W. Magnire, J. Pearl, J. Pirraglia and J. Walker, Atmospheric and surface properties of Mars obtained by infrared spectroscopy on Mariner// *J. Geophys. Res.* V. 1973. V. 78. P. 4267-4278.
- Conrath B., Thermal structure of the Martian atmosphere during the dissipation of the dust storm of 1971. // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 36-46.
- Crisp, D.; Meadows, V. S.; Bézard,B.; de Bergh, C.; Maillard, J.-P.; Mills, F. P.// *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. E2. P. 4577-4594.
- Curran R.G., B.J.Conrath, R.A. Hanel and V.G. Kunde, J.S. Pearl, Mars: Mariner 9 spectroscopic evidence for H<sub>2</sub> O ice clouds // *Science*. 1973. V. 182. P. 381-383.
- Esposito L.W., Knollenberg R.G., Marov M.Ya., Toon R.B. , and Turko R.P. The clouds and hazes of Venus // In *Venus. Tucon: The University of Arizona Press*. P. 484-458, 1983.
- Esposito L.W., Bertaux J.-L., Krasnopolsky V., Moroz V.I., and Zasova L.W. Chemistry of lower atmosphere and clouds //In *Venus II*, Bougher S.W., Hunten D.M., and Phillips R.J., eds. P. Tucon: The University of Arizona Press. P. 415-458, 1997.
- Fenton F.K., J.C. Pearl and T. Martin. Mapping Mariner 9 dust opacity // *Icarus*. 1997. V. 130. P. 115-124.
- Forget, F., Hourdin, F., Fournier, R., Hourdin, C., Talagrand, O., Collins, M., Lewis, S.R., Read, P.L., Huot, J. 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.
- Gierasch P. and R. Goody , The effect of the dust on the temperature of the Martian atmosphere // *J. Atmosph. Sci.* 1972. V. 29. P. 400-402.
- Gierash P.J., et al. // The general circulation of the Venus atmosphere and assessment. In *Venus II*. Tucon: The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1997.

- Grassi, D., Ignatiev, N.I., Zasova, L.V., Maturilli, A., Formisano, V., Study and development of theoretical and software tools for the analysis of data from the Planetary Fourier Spectrometer on board of the Mars Express mission. // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. P. 1017-1034.
- Grassi, D., Fiorenza, C., Zasova, L.V., Ignatiev, N.I., Maturilli, A., Formisano, V., Giuranna, M., The Martian atmosphere above Great Volcanoes: early Planetary Fourier Spectrometer observations // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. P. 1053-1064.
- Hanel R., B. Conrath, W. Hovis, A. Kunde, P. Lowman et al., Investigation of the Martian environment by infrared spectroscopy on Mariner 9 // *Icarus*. 1972. V. 17. P. 423-442.
- Hinson D. and J.Jenkins Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus// *Icarus*. 1995. V. 114. P. 310.
- Hinson D.P., R.A. Simpson, J.D. Twicken, Tyler G.L. and Flasar F.M. Initial results from radio occultation measurements with Mars Global Surveyor // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. E11. P. 26977- 27012.
- Huntress W.H., Moroz V.I., and Shevaley I.L.,. Lunar and planetary robotic and exploration missions in the 20<sup>th</sup> century // *Space Sci. Rev.* 2002. V107. №3. P. 541-649.
- Ignatiev N.I., Moroz V.I., Zasova L.V., Khatuntsev I.V. 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.
- Ignatiev, N.I., Grassi D., Zasova L.V. Planetary Fourier Spectrometer data analysis: Fast radiative transfer models // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. P. 1035-1042.
- Jenkins V.M. et al. Radio occultation of the Venus atmosphere with the Magellan spacecraft. 2. Results from the October 1991 experiment // *Icarus*. 1994. V. 111. P. 79.
- Kliore A., and U. Patel, Thermal structure of the atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultations // *Icarus*. 1982. V. 52. P. 320-334.
- Kliore A., V.I. Moroz , and G.Keating . The Venus International Reference Atmosphere // *Adv. Space Res.* 1985 .
- Kliore, A. J., Recent Results on Venus Atmosphere from Pioneer Venus Radio Occultations // *Adv.Space Res.* 1985. V. 5. №9. P. 41-49.
- Knollenberg R.G., and D.M. Hunten, The microphysics of the clouds of Venus: results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 8039-8058.
- Krasnopolsky, V.A. Vega mission results and chemical composition. of Venussian clouds. // *Icarus*. 1989 V. 80. P. 202–210.
- Krasnopolsky V.A. Venus spectroscopy in the 3000-8000Å region by Venera9 and 10. In: Hunten, D.M., Colin, L., Donahue, T.M., Moroz, V.I. (Eds.). *Venus*. The University of Arizona Press, Tucson, AZ. P. 459-483,1983.

- Krasnopolsky V.A. Chemical composition of Venus atmosphere and clouds: Some unsolved problems // *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54. P. 1352–1359.
- Ksanfomality L.V. Venera 9 and 10 thermal radiometry // *Icarus*. 1980. V. 41. P. 36-64.
- Lewis S.R., M. Collins, P.L. Read, F. Forget, F. Hourdin, F. Fournier, C. Hourdin, O. Talagrand, J.-P. Huot, A climate database for Mars // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104, P. 24,177- 24,194.
- Marov M.Ya., Lystsev V.E., Lebedev V.N. et al. The structure and microphysics properties of Venus clouds: Venera 9,10,11 data // *Icarus*. 1980. V. 44. P. 608-639.
- McCleese, D., J. T. Schofield, F. W. Taylor, et al. Mars Climate Sounder: An investigation of thermal and water vapor structure, dust and condensate distributions in the atmosphere, and energy balance of the polar regions // *Geophys. Res.* 2007. V. 112.
- Meinel, I. OH Emission Bands in the Spectrum of the Night Sky. // *Ap.J.*1950. V.111.P.555
- Mills F.P, Allen M., A review of selected issues concerning the chemistry in Venus middle atmosphere // *Planetary and Space Sci.* 2007. V. 55. P. 1729-1740.
- Moroz V.I., Spankuh D., Linkin V.M., Dohler W., Matsygorin. I.A., Schafer K., Zasova L.V., Oertel D. et al. Venus spacecraft's infrared radiance spectra and some aspects of their interpretation. // *Applied Optic.* 1986. V. 25. P.1710–1719.
- Oertel, D., Moroz, V.I., Spankuh, D. et al. Infrared spectrometry from Venera-15 and Venera-16 // *Advances in Space Res.*1987. V. 5. № 9. P. 25.
- Palluconi F. and H. Kieffer, Thermal inertia mapping of Mars from 60°S to A 60°N // *Icarus*. 1986. V. 45. P. 415-426.
- Pearl J. C., Smith M. D., Conrath B. J. et al. Mars Global Surveyor TES results: observations of water ice clouds // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1999. V. 31. № 4. P. 1190-1191.
- Pollack J.B., Colburn D.S., Flasar F. M., et al. Properties and effect of dust particles suspended in the Martian Atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. B6. P. 2929-2945.
- Pollack J.B., Toon O.B., Whitten R.C. et al. Distribution and source of the UV-absorber in Venus' atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1980. V.5. A13. P. 8141-8150.
- Rodgers, C.D. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice* // World Scientific, Singapore, 2000.
- 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.
- Schofield, J. T., and F. W. Taylor. Measurement of the mean solar fixed temperature and cloud structure of the middle atmosphere of Venus // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1983. V. 109. P. 57–80.

- Seiff A., Kirk D., Young R. et al. Measurements of thermal structure and thermal contrasts in the atmosphere of Venus and related dynamic observations: results from the four Pioneer Venus probes // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. A13. P. 7903-7933.
- Seiff A. Thermal structure of the atmosphere of Venus // In *Venus*. Hunten D.M., Colin L., Donahue T.M., and Moroz V.I., eds. Tucson: The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1983.
- Seiff A., Schofield J.T., Kliore A.J. et al. Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 km altitude // *Advances in Space Res.* 1985. V. 5. № 11. P. 3-58.
- Smith, D. E., Zuber M. T., Frey H. V. et al. // *Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA): Experiment summary after the first year of global mapping of Mars* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. E10. P. 23689-23722.
- Smith, P. H. and M. Lemmon, Opacity of the Martian atmosphere measured by the Imager for Mars Pathfinder // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. E4. P. 8975-8985.
- Smith, M. D. Interannual variability in TES atmospheric observations of Mars during 1999–2003 // *Icarus*. 2004. V. 167. P. 148–165.
- Smith, M. D., Conrath B. J., Pearl J. C., and Christensen P. R. Thermal Emission Spectrometer observations of Martian planet-encircling dust storm 2001A // *Icarus*. 2002. V. 157 P. 259–263.
- Smith, M. D., et al. First atmospheric science results from the Mars Exploration Rovers Mini-TES // *Science*. 2004. V.306. P.1750–1752.
- Shubert G. General circulation and dynamical state of the Venus atmosphere. In: Hunten, D.M., Colin, L., Donahue, T.M., Moroz, V.I. (Eds.). *Venus*. The University of Arizona Press, Tucson, AZ. P. 681–765, 1983.
- Taylor, F. W., Beer R., Chahine M. T. et al. Structure and meteorology of the middle atmosphere of Venus: Infrared remote sensing from the Pioneer orbiter // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 7963–8006.
- Taylor F.W., Hunten D.M., and Ksanfomality L.V. The thermal balance of the middle and upper atmosphere of Venus // In *Venus*. Hunten D.M., Coli L., Donahue T.M., and Moroz V.I., eds. P. 650-680. Tucson: The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1983.
- Toon O.B., Pollack J.B. and C. Sagon, Physical properties of the particles composing the Martian dust storm of 1971-1972 // *Icarus*. 1977. V. 30. P. 663 - 696.
- Twomay S., Herman D. and R. Rabinof, A extension of Chahine method of inverting the radiative transfer solution equation // *J. Atmosph. Sci.* 1977. V. 34. P. 1085.
- Yakovlev, O. L., Gubenko V. N., Matyugov S. S. et al. Atmosphere of Venus in South Subpolar Region // *Cosmic Res.* 1987a. V. 25. № 25. P. 258-266 .
- Yakovlev, O. L., Matyugov S. S., Efimov A. et al. Atmosphere of Venus in North Polar Region // *Cosmic Res.* 1987b. V. 25. № 25. P. 267-274.

- Yakovlev, O. L., Matyugov S. S. and Gubenko V. N. Venera-15 and 16 Middle Atmosphere Profiles from Radar Occultations: Polar and Near Polar Atmosphere of Venus // *Icarus*. 1991. V. 94. P. 493-510.
- Zurek R., Smrekar E. An overview of the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) science mission // *Geophys. Res.* 2007. V. 112. 2006JE002701.

### **Публикации по теме диссертации**

- Засова Л.В.**, Устинов Е.А. Применение метода дискретных ординат к решению уравнения переноса в оптически плотной неоднородной атмосфере // *Астрон. журн.* 1987. Т. 57. С. 624-634.
- Zasova L.V.**, Krasnopolsky V.A., Moroz V.I. Vertical distribution of SO<sub>2</sub> in upper cloud layer of Venus and origin of the UV absorption // *Adv. Space res.* 1981. V. 1. P. 31.
- Засова Л.В.**, Шпенкух Д., Мороз В.И. и др. Инфракрасный эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». Некоторые выводы о строении облаков, основанные на анализе спектров // *Космич. исслед.* 1985. Т. 23. С. 221-235.
- Шпенкух Д., **Засова Л.В.**, Шеффер К., Устинов Е.А., Делер В. И др. эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». Предварительные результаты восстановления температурных профилей // *Космич. исслед.* 1985. Т. 23. С. 206-220.
- Мороз В.И., Делер В., Устинов Е.А., Шеффер К., **Засова Л.В.**, Шпенкух Д., и др. Инфракрасный эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». Предварительные результаты анализа спектров в области полос H<sub>2</sub>O и SO<sub>2</sub> // *Космич. исслед.* 1985. Т. 23. С. 236-247.
- Moroz V.I., Spankuh D., Linkin V.M., Dohler W., Matsygorin I.A., Schafer K., **Zasova L.V.**, Oertel D. et al. Venus spacecraft's infrared radiance spectra and some aspects of their interpretation // *Applied Optics*. 1986. V. 25. P. 1710–1719.
- Schafer K., **Zasova, L.V.**, Spankuch, D., et al.. Structure of the middle atmosphere of Venus from analyses of Fourier-spectrometer measurements aboard Venera-15 // *Adv. Space Res.* 1987. V.7. N 12. P.17.
- Zasova L.V.**, Spankuh D., Moroz V.I. et al. Venera-15 and Venera-16 infrared experiment. 3. Some on the cloud structure // *Veroff. Fo.ber. Geo-Kosmowi.* 1989. V. 18.

- Dubois R., **Zasova L.V.**, Spankuch D. et al. Thermal structure of the middle atmosphere of Venus from Venera-15 data // Veroff. Fo.ber. Geo-Kosmowi.1989. V. 18.
- Spankuch, D., Matsygorin, I.A., Dubois, R., and **Zasova, L.V.** Venus middle atmosphere temperature from Venera 15. Adv. Space. Res. 1990. V. 10. N 5. P. 67-75.
- Zasova L.V.** and V.I.Moroz, Latitude structure of the upper clouds of Venus // Adv. Space Res. 1992. V. 12. P. 79-90.
- Zasova L.V.**, V.I. Moroz, L.W. Esposito, and C.Y. Na, SO<sub>2</sub> in the middle atmosphere of Venus: IR and UV data // Icarus. 1993. V. 105. P. 92-109.
- Zasova L.V.**, The structure of the Venusian atmosphere at high latitudes // Adv. Space Res. 1995. V. 16. P. 89-98.
- Moroz V.I., **Zasova L.V.**, and Linkin V.M. Venera-15,16 and Vega mission results as sources for improvements of the Venus Reference atmosphere // Adv. in Space Res. 1996. V. 17. N 11. P.171–180.
- Zasova L.V.** and Khatuntsev I.V., Thermal zonal wind in the Venus middle atmosphere according to Venera 15 IR-spectrometry // Adv. Space Res. 1997. V. 19. N. 8. P.1181–1190.
- Esposito L.V., Bertaux J.-L., Krasnopolsky V., Moroz V.I., **Zasova L.V.** Chemistry of lower atmosphere of Venus // VENUS II, Arisona Press. 1997. P. 415 – 458.
- Zasova, L.V.**, Khatountsev I.V., Moroz V.I., and Ignatiev N.I. Structure of the Venus middle atmosphere: Venera 15 IR Fourier Spectrometry data revisited // Adv. Space Res. 1999. V.23. N 9. P.1559–1568.
- Zasova L.V.**, Khatuntsev I.V., and Linkin V.M, Thermal zonal wind in the middle atmosphere of Venus // Cosmic Res. 2000. V. 38. N 1.
- Zasova L.V.**, Grassi D., Formisano F., Maturilli A. Martian atmosphere in the region of Great Volcanoes: Mariner 9 data revisited // Planetary and Space Sci. 2001. V. 49. P. 977-992.
- Zasova L.V.**, V. Formisano, D. Grassi, and A. Maturilli Atmosphere of Mars at north high latitudes from Mariner-9 IRIS data // Advances in Space Research. 2002. V. 29. N 2, P. 157 – 162.
- Zasova L.V.**, Khatuntsev I.V., Ignatiev N.I., and Moroz V.I., Local time variations of the middle atmosphere of Venus: solar-related structures // Adv. Space Res. 2002. V. 299. N 2. P. 243–248.



- Zasova L. V.**, Moroz V.I., Formisano V., Ignatiev N.I., and Khatuntsev I.V. Infrared spectrometry of Venus: IR Fourier spectrometer on VENERA 15 as a precursor of PFS for VENUS EXPRESS // Adv. Space Res. 2004. V.34. P. 1655-1667.
- Zasova L.V.**, Formisano V., Grassi D., Ignatiev N. I., V. I. Moroz. Thermal structure of the Martian atmosphere retrieved from the IR spectrometry in the 15  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> band: input to MIRA // Adv. Space Res. 2005. V. 34. N 8.
- Hansen G., M.Giuranna, V. Formisano, S. Fonti, D. Grassi, H. Hirsh, N. Ignatiev, A. Maturilli, V. Moroz, P. Orleanski, G. Piccioni, M. Rataj, B. Saggin, **L. Zasova** PFS – MEX observation of ices in the residual South polar cap of Mars // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 1089-1095.
- Grassi, D., Ignatiev, N.I., **Zasova, L.V.**, Maturilli, A., Formisano, V., Study and development of theoretical and software tools for the analysis of data from the Planetary Fourier Spectrometer on board of the Mars Express mission. // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 1017-1034.
- Grassi, D., Fiorenza, C., **Zasova, L.V.**, Ignatiev, N.I., Maturilli, A., Formisano, V., Giuranna, M., The Martian atmosphere above Great Volcanoes: early Planetary Fourier Spectrometer observations // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 1053-1064.
- Ignatiev, N.I., Grassi D., **Zasova L.V.** Planetary Fourier Spectrometer data analysis: Fast radiative transfer models // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 1035-1042.
- Zasova L.** , V. Formisano V. Moroz , D. Grassi , N. Ignatiev, M. Giuranna, G. Hansen, M. Blecka, A. Ekonomov, E. Lellouch, S. Fonti, A. Grigoriev, H. Hirsch , I. Khatuntsev, A. Mattana, A. Maturilli, B. Moshkin, D. Patsaev, G. Piccioni, M. Rataj, and B. Saggin, et al.. // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 1065-1077.
- Giuranna M., V. Formisano, D. Biondi, A. Ekonomov, S. Fonti, D. Grassi, H. Hirsch, I. Khatuntsev, N. Ignatiev, M. Michalska, A. Mattana, A. Maturilli, B.E. Moshkin, E. Mencarelli, F. Nespoli, R. Orfei, P. Orleanski, G. Piccioni, M. Rataj, B. Saggin, **L. Zasova**, Calibration of the Planetary Fourier Spectrometer Short Wavelength Channel. // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 975-992.

Giuranna M., V. Formisano, D. Biondi, A. Ekonomov, S. Fonti, D. Grassi, H. Hirsch, I. Khatuntsev, N. Ignatiev, M. Michalska, A. Mattana, A. Maturilli, B.E. Moshkin, E. Mencarelli, F. Nespoli, R. Orfei, P. Orleanski, G. Piccioni, M. Rataj, B. Saggin, **L. Zasova**, Calibration of the Planetary Fourier Spectrometer Long Wavelength Channel // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 993-1007.

Formisano V., T. Encrenaz, S. Fonti, M. Giuranna, D. Grassi, H. Hirsh, I. Khatuntsev, N. Ignatiev, E. Lellouch, A. Maturilli, V. Moroz, P. Orleanski, G. Piccioni, M. Rataj, B. Saggin, **L. Zasova**. A Martian PFS average spectrum: Comparison with ISO SWS. A Martian PFS average spectrum: Comparison with ISO SWS // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 1065-1077.

de Bergh, C.; Moroz, V.I.; Taylor, F.W.; Crisp, D.; Bézard, B.; **Zasova, L.V.** The composition of the atmosphere of Venus below 100 km altitude: An overview // Planetary and Space Science. 2006. V. 54. Issue 13-14. P. 1389-1397.

**Засова Л.В.**, В.И. Мороз, Н.И. Игнатъев, И.В. Хатунцев, В. Формизано. Исследование Венеры с помощью ИК-Фурье спектрометров: ФС на Венере 15 и ПФС – на Венере экспресс // Космич. исслед. 2006. Т. 44. N 4. С. 365-380.

**Засова Л.В.**, В. Формизано, В.И. Мороз, Ж.-П.Бибринг, Д. Грасси и др. Результаты измерений Планетного Фурье Спектрометра на Марс Экспресс: облака и пыль в конце южного лета. Сравнение с изображениями ОМЕГА // Космич. исслед. 2006. Т. 44. N 4. P. 319-331.

**Засова Л.В.**, В.И. Мороз, В.М. Линкин, И.В. Хатунцев, Б. Майоров. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км // Космич. исслед. 2006. Т.44. N 4. С. 381 - 400.

Grassi, D.; Formisano, V.; Forget, F.; Fiorenza, C.; Ignatiev, N.I.; Maturilli, A.; **Zasova, L.V.** The martian atmosphere in the region of Hellas basin as observed by the planetary Fourier spectrometer (PFS-MEX) // Planetary and Space Science. 2007. V. 55. N. 10. P. 1346-1357.

**Zasova, L.**; Piccioni, G.; Migliorini, A.; Drossart, P.; Shakun, A.; VIRTIS/Venus Express Team Vertical Distribution of the 1.27  $\mu\text{m}$  O<sub>2</sub> Airglow from the Limb VIRTIS-M VEX Observations // Bull. American Astronomical Society, DPS. 2007. V.39. N. 45.07.

- Giuranna, M.; Hansen, G.; Formisano, **V.**; **Zasova**, L.; Maturilli, A.; Grassi, D.; Ignatiev, N. Spatial variability, composition and thickness of the seasonal north polar cap of Mars in mid-spring. // Planetary and Space Science. 2007. V. 55. N. 10. P. 1328-1345.
- Zasova**, L.V.; Ignatiev, N.; Khatuntsev, I.; Linkin, V. Structure of the Venus atmosphere // Planetary and Space Science. 2007. V. 55. N. 12. P. 1712-1728.
- 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, N. 7170. P. 641-645.
- Piccioni, G.; Drossart, P.; Sanchez-Lavega, A.; Hueso, R.; Taylor, F.W.; Wilson, C.F.; Grassi, D.; **Zasova**, L.; Moriconi, M.; Adriani, A.; and 95 coauthors, South-polar features on Venus similar to those near the north pole // Nature. 2007. V. 450, Issue 7170. P. 637-640.
- Titov D., Bullock M., Crisp D., Renno F., Taylor F., and **Zasova L.** Radiation in the Atmosphere of Venus. In "Exploring Venus as terrestrial planet". AGU: P.121-138, 2007.
- Grassi D., P. Drossart, G. Piccioni, N. I. Ignatiev, **L. V. Zasova**, A. Adriani, M.L. Moriconi, P.G.J. Irwin, A. Negrao, A. Migliorini. Retrieval of air temperature profiles in the Venusian Mesosphere from VIRTIS-M data: Description and Validation of Algorithms // J.Geophys. Res. 2008. 2008JE003075.
- Piccioni G., P. Drossart, **L. Zasova**, A. Migliorini, J-C Gerard, F.P. Mills, A. Shakun, A. Garcia Munoz, N. Ignatiev, D. Grassi, V. Cottini, F.W. Taylor, S. Erard and VIRTIS-Venus Express Technical Team. First detection of hydroxyl in the atmosphere of Venus // Astronomy & Astrophysics Lett. 2008. DOI: 10.1051/0004-6361:200809761.
- Piccioni G., **L. Zasova**, A. Migliorini, P. Drossart, A. Shakun, A. Garcia Munoz, F. P. Mills, A. Cardesin and the VIRTIS-Venus Express Team. Oxygen nightglow vertical distribution from the VIRTIS Near IR observations in the Venus upper atmosphere // J.Geophys. Res. 2008. 2008JE003133.
- Hueso R., A. Sanchez-Lavega, G. Piccioni, P. Drossart, J.C. Gerard, I. Khatuntsev, **L. Zasova**, and A. Migliorini. Morphology and Dynamics of Venus Oxygen Airglow from Venus Express/VIRTIS observations // J.Geophys. Res. 2008. 2008JE003081.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН  
117997, Москва, Профсоюзная 84/32

---

подписано к печати 24.03.08

---

Заказ 2135

Формат 70x108 1/32

Тираж 100 2 уч.-изд.-л.