

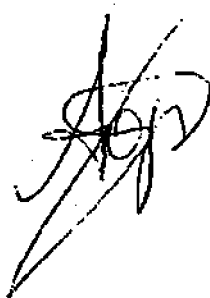
*На правах рукописи*

**Афанасенко Тарас Сергеевич**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО  
БАЛАНСА АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ.**

**01.03.04 Планетные исследования**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**



**Москва, 2006**

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН.

Научный руководитель:  
Кандидат физ.-мат. наук

Родин Александр Вячеславович

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н.

Маров Михаил Яковлевич(ИПМ  
им. Келдыша)

д.ф.-м.н.

Швед Густав Моисеевич(НИИФ)  
С.-Петербургского университета

Ведущая организация:  
ИФА РАН

Защита диссертации состоится 28 декабря 2006 г. на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 в конференц-зале Института космических исследований РАН по адресу:  
Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 28 ноября 2006 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 002.113.02  
к.т.н.



А.Ю. Ткаченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Почти после двадцатилетнего перерыва возобновились исследования Венеры с помощью АМС "Венера-Экспресс". Наземные наблюдения Венеры также заметно активизировались после открытия окон прозрачности в ближнем инфракрасном диапазоне, позволяющие наблюдать тепловые потоки нижних слоев атмосферы и поверхности. Интерпретация, а также задачи расчета теплового баланса и общей циркуляции атмосферы Венеры, требуют точного знания спектральных непрозрачности атмосферных газов в диапазонах спектра, где поглощения минимально, а именно в далеких крыльях колебательно-вращательных полос углекислого газа. Существующие теории дают для этих областей результаты, различающиеся более чем на порядок величины, а в практических расчетах используются эмпирические модели форм-фактора линии, справедливые только для фиксированных температуры и давления. По этому актуальной является разработка физически обоснованной модели спектрального поглощения углекислого газа, опирающейся на современные теории форм-фактора, которая позволила бы рассчитывать спектральные поглощения газов в широком диапазоне термодинамических параметров. Для решения целого ряда задач климатологии Венеры, в первую очередь, оценки вертикального каскада энергии между различными слоями атмосферы, а также для интерпретации данных дистанционного зондирования планеты, необходимо провести расчеты переноса излучения и радиационного баланса атмосферы Венеры, основанные на предлагаемой в данной работе модели спектрального поглощения.

## **Цели работы**

1. Построение физически обоснованной теории спектральных свойств нижней атмосферы Венеры.
2. Построение модели переноса излучения в атмосфере Венеры от поверхности до гомопаузы.
3. Расчет теплового баланса атмосферы Венеры при вариациях химического состава и структуры атмосферы и уточнение современных теорий парникового эффекта на Венере.

## **Научная новизна**

На сегодняшний день предложены несколько альтернативных теорий спектрального поглощения молекулярных газов в далеких крыльях колебательно-вращательных полос, которые в силу сложности и неоднозначности алгоритма не используются в практических расчетах переноса излучения в атмосферах планет. В данной диссертационной впервые делается попытка расчета такого рода, основанного на теориях спектрального поглощения углекислого газа с учетом интерференции вращательных состояний в приближении сильных столкновений и вклада потенциала межмолекулярного взаимодействия в далекие крылья линий. Это позволило провести моделирование тепловых потоков в атмосфере планеты и интенсивности уходящего теплового излучения и получить значения, которые находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что от выбора модели спектрального поглощения зависят теоретические значения потоков как в нижней атмосфере, так и в подоблачном слое, где инфракрасная прозрачность атмосферы существенно выше. Впервые на основе численных расчетов показано, что источником разогрева нижнего яруса облачного слоя, обеспечивающего конвекцию в слое, является поглощение в облаках теплового инфракрасного излучения,

рожденного в плотных слоях атмосферы на высотах 25–40 км. Впервые построен радиационный блок климатической модели Венеры, учитывающий форм-фактор колебательно-вращательных полос.

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

Научная ценность работы заключается в согласовании различных теорий поглощения молекулярных газов при высоких давлениях и температуры, оценки потоков теплового излучения и параметрической зависимости парникового эффекта для атмосферы Венеры. Самостоятельной научной значимостью обладают уточненные характеристики парникового эффекта на Венере, а также теоретические оценки потоков излучения и вертикального каскада энергии в подоблачной атмосфере Венеры.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в создании оптимизированных алгоритмов решения прямых и обратных задач дистанционного зондирования атмосферы Венеры в инфракрасном диапазоне и разработка радиационного блока для модели общей циркуляции атмосферы Венеры. В настоящее время в моделях такого рода применяются лишь эмпирические радиационные блоки, точность которых крайне невысока.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из 4 глав. Объем диссертации – 85 страницы, в том числе 30 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 95 ссылок.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

На защиту выносятся:

Численная модель спектрального поглощения углекислого газа в колебательно-вращательных полосах в диапазоне давлений до 100 атм. и температур до 1000 К с учетом интерференции вращательных состояний и вклада потенциала межмолекулярного взаимодействия в поглощение далеких крыльев спектральных линий.

Численное моделирование потоков уходящего теплового излучения, скоростей радиационного нагрева и выхолаживания, турбулентного тепло переноса и энергетического баланса нижней атмосферы Венеры. Исследование параметрической зависимости парникового эффекта на Венере от концентраций водяного пара, других малых составляющих, структуры и состава облачного слоя.

Разработка радиационного блока для модели общей циркуляции атмосферы Венеры

Сравнение модельных потоков уходящего теплового излучения Венеры с имеющимися данными наблюдения тепловой эмиссии ночной стороны Венеры в инфракрасных окнах прозрачности.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались на Всероссийской астрономической конференции (ВАК-2004) "Горизонты Вселенной", на 40 и 42 микросимпозиумах ГЕОХИ им.Вернадского и университета Брауна, на конференции Европейского геофизического общества в 2002, 2003, 2006 году, на Конференции молодых ученых ИКИ РАН 2004 г., на XLVII научной конференции 2004 МФТИ, на III Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» 2006 г. ИКИ РАН, на совещании рабочей группы эксперимента VIRTIS KA "Венера-Экспресс".

По материалам диссертации имеется 9 публикаций (из них 1 в реферируемых изданиях)

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Введение

Введение начинается с описания климата атмосферы Венеры. Рассмотрены сходства и отличия атмосферы Венеры с атмосферами планет земной группы. Описаны характерные явления свойственные только атмосфере Венеры, такие как суперротация, особенности физических условий и вытекающие отсюда сложности в моделировании климатической системы планеты. В частности, фундаментальной нерешенной проблемой является перенос теплового излучения в молекулярном газе при высоких температурах и давлениях. Баланс тепловых потоков важен для понимания парникового эффекта, явление которое определяет состояние климата Венеры.

Во введении подробно рассмотрена проблема парникового эффекта в историческом ракурсе, в разрезе успешных миссий, а также дано простое описание парникового эффекта с точки зрения физики.

В связи с экстремальными условиями в атмосфере Венеры, а также скудостью экспериментальных данных, моделирование атмосферы Венеры крайне затруднено. Во введении описываются эти сложности, а так же возможные пути их разрешения, применяемые как в данной работе, так и в работах других авторов. Обосновывается актуальность данной работы, описываются недостатки существующих моделей и подходов. На основании этих данных сформулированы цели работы:

4. Построение физически обоснованной теории спектральных свойств нижней атмосферы Венеры.
5. Построение модели переноса излучения в атмосфере Венеры от поверхности до гомопаузы.

6. Расчет теплового баланса и оценка парникового эффекта на Венере при вариациях химического состава и структуры атмосферы.

## 7. Расчет молекулярных спектров поглощения при высоких давлениях.

Первая глава посвящена расчетам молекулярных спектров для разных физических условий и при разных приближениях. В начале главы рассмотрены особенности спектрального поглощения молекулы углекислого газа. Описаны спектральные базы данных, необходимые для расчета молекулярного поглощения, такие как HITRAN и HITEMP. Рассмотрены основные понятия и эффекты, различные представления форм-фактора спектральной линии, механизмы уширения линий, его зависимость от термодинамических условий.

Рассмотрена теория спектров поглощения молекулярных газов для нормальных давлений и температур. Рассмотрены основные существующие приближения, пригодные для расчета спектров поглощения при венерианских условиях, описывающие такие явления, как интерференция молекулярных состояний и уширение линий в результате межмолекулярного взаимодействия в процессе столкновений. В работе впервые разработаны схемы расчетов для этих двух приближений и приводится сравнение с общепринятым алгоритмом расчета спектров, основанным на эмпирической параметризации форм-фактора спектральных линий.

В главе представлены результаты моделирования спектров поглощения малых составляющих атмосферы и аэрозольной компоненты. Производится анализ влияния различных химических компонентов атмосферы на спектры поглощения в различных спектральных и высотных интервалах.



Завершается глава анализом актуальности выбора модели форм-фактора для корректного описания спектров поглощения для атмосферы Венеры.

### **8.Потоки ИК-излучения и тепловой баланс.**

Второй глава посвящена расчету тепловых потоков в атмосфере Венеры на основании ранее полученных спектров молекулярного поглощения. Численная модель переноса излучения строиться на основе решения интегрально-дифференциального уравнения переноса излучения методом линеаризации функции источника внутри модельного слоя. Моделируются потоки теплового излучения и скорости радиационного нагрева и выхолаживания от поверхности и до высоты 100км. Кроме молекулярного поглощения углекислого газа, в модель включены поглощения малых составляющих, а также поглощение и рассеяние в облаках.

Приведены результаты численного моделирования тепловых потоков для различных приближений молекулярного поглощения, а также различных моделей облаков, содержания малых составляющих и зависимости их содержания их от высоты. Проводится анализ сравнения результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

## **Экспериментальная проверка теории поглощения в окнах прозрачности.**

В третьей главе представлено сравнение расчетов спектров уходящего излучения для различных приближений и вариаций параметров с данными наземных наблюдений и дистанционного зондирования Венеры с борта КА "Венера-Экспресс". На основании данных сравнений делаются оценки корректности применения различных приближений для атмосферы Венеры. Предлагается проект лабораторного эксперимента, который мог бы ответить на вопрос о границах применимости используемых численных моделей.

**Заключение** содержит основные результаты диссертационной работы.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Т.С.Афанасенко, А.В.Родин.** Влияние столкновительного уширения линий на спектр и потоки теплового излучения в нижней атмосфере Венеры. // *Астрономический вестник*, 2005, том 39, № 3, с. 1-13

**T. S. Afanasenko and A. V. Rodin:** Line mixing and collisional broadening in the thermal radiation of the lower Venus atmosphere // *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 8, 00708, 2006, EGU06-A-00708

**AFANASENKO, T.S.; RODIN, A.V.; RODIMOVA, O.B.; TVOROGOV, S.D.:** *Thermal radiation in the lower Venus atmosphere* // EGS02-A-04810; PS1.02-1TH5P-011

**AFANASENKO, T.S.; RODIN, A.V.** Thermal balance of the lower Venus atmosphere: radiative and dynamical effects // EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 - 11 April 2003, abstract #13301

**А.В. Родин, Т.С. Афанасенко.** Тепловое излучение в нижней атмосфере Венеры. // *Всероссийская Астрономическая Конференция (ВАК-2004) "Горизонты Вселенной"*

**T. S. Afanasenko and A. V. Rodin:** Line mixing and collisional broadening in the thermal radiation of the lower Venus atmosphere // Brown University, Vernadsky Institute: MICROSYMPOSIUM 42, M42\_01

**T. S. Afanasenko and A. V. Rodin:** Thermal radiation in the lower Venus atmosphere: the effect of the collisional line broadening.// Brown University, Vernadsky Institute: MICROSYMPOSIUM 40

**Т.С.Афанасенко, А.В.Родин.** *Тепловое излучение в нижней атмосфере Венеры: эффект столкновительного уширения спектральных линий* // МФТИ XLVII НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ 26 – 27 ноября 2004 года

Lebonnois, Sebastien; Hueso, R.; Luz, D.; Wilson, C. F.; Drossart, P.; Piccioni, G.; Sanchez-Lavega, A.; Titov, D.; Baines, K. H.; Taylor, F.; the VIRTIS/Venus Express Team *Venus Atmospheric Dynamics From VIRTIS On Venus Express - Preliminary Results* // 09/2006 American Astronomical Society, DPS meeting #38, #16.08

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН  
Москва, 117997, Профсоюзная, 84

---

Подписано к печати 24.11.06

---

Заказ 2063

Формат 70X108/32

Тираж 100

0,4 уч.-изд.п.

