

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Семенов Алексей Олегович

**Метод подобия в описании температурной структуры
и переноса неравновесного излучения молекул в
верхних атмосферах планет**

Специальность 25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Санкт-Петербург - 2006

Работа выполнена в

Научно-исследовательском институте физики имени В А Фока
Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Швед Густав Моисеевич

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Нагирнер Дмитрий Исидорович
кандидат физико-математических наук,
Перцев Николай Николаевич

Ведущая организация. Институт космических исследований РАН

Защита диссертации состоится " 7 " июня _____ 2006 г
в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.232.35 по за-
щите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-
Петербургском государственном университете по адресу:
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9, ауд 347

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им А М Горького
Санкт-Петербургского государственного университета

Автореферат разослан " 2 " мая _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук


А Л Котиков

2006А
10782

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию задач среднеглобального энергетического баланса термосферы планеты и переноса излучения в колебательно-вращательных полосах молекул в верхней атмосфере планеты с учетом нарушения локального термодинамического равновесия (НЛТР). При исследовании этих задач используется общий подход - метод подобия. Задачи формулируются в терминах безразмерных переменных и функций, после чего находятся основные безразмерные параметры, определяющие решение задачи. Эти параметры принято называть критериями подобия, они конструируются из физических величин, входящих в уравнения рассматриваемой задачи. Использование метода подобия позволяет существенно упростить теоретическое исследование задачи, уменьшив количество входных параметров до минимума, а также дает возможность наиболее эффективно характеризовать и сравнивать различные решения задачи и выявлять общие закономерности в них.

Актуальность темы. В настоящее время основные усилия в моделировании планетных атмосфер направлены на построение все более точных, и соответственно, более сложных моделей. Для атмосфер Земли и ближайших планет, от одномерных моделей энергетического баланса переходят к трехмерным моделям общей циркуляции термосферы, в которых энергетика, динамика и нейтрально-ионный состав атмосферы рассматриваются взаимосвязано. Эти модели постоянно совершенствуются и детализируются за счет подключения большего числа учитываемых физических процессов, привлечения новой экспериментальной информации и математического усложнения моделей. Трехмерные модели общей циркуляции атмосферы позволяют относительно правильно воспроизводить наблюдаемые явления, но получаемые при использовании этих моделей результаты практически также сложны для анализа и интерпретации, как реальная атмосфера. Поэтому одномерные моде-

ли энергетического баланса атмосферы по-прежнему сохраняют важное теоретическое значение

С обнаружением внесолнечных планет в течение последнего десятилетия стало ясно, что будущие исследования планетных атмосфер уже не будут ограничиваться только планетами Солнечной системы. В связи с этим, становится актуальным построение общих теорий структуры планетных атмосфер в том же ключе, как созданы модели звездных атмосфер. Например, уже имеется попытка создания теории структуры и спектра нижнего слоя атмосфер внесолнечных планет-гигантов. Общие теории также полезны для классификации атмосфер планет Солнечной системы по их структуре и получения представления о структуре атмосферы Земли в прошлом. Поэтому **целью** данной работы является развитие общей теории и разработка простых моделей температурной структуры и переноса излучения в верхних слоях планетных атмосфер.

Научная новизна. В настоящей работе предпринята первая попытка построить общую теорию температурной структуры верхних слоев планетной атмосферы — термосферы. Также впервые исследованы общие закономерности поведения неравновесных населенностей колебательных состояний молекул в верхней атмосфере.

Научная и практическая значимость. В настоящей работе показана принципиальная возможность создания простой общей модели термосферы планеты, позволяющей в едином виде описать среднеглобальный энергетический баланс в термосферах разных планет. Модель также позволяет по известному эмпирическому профилю температуры в термосфере количественно оценить компоненты нагрева и охлаждения термосферы. Путем подгонки расчетных профилей температуры под эмпирические профили были получены значения безразмерных параметров модели и соотношения между ними для случая термосфер Земли и Марса. В результате обработки данных миссии Mars Global Surveyor (MGS) о торможении спутника в термосфере Марса в работе получен средний профиль температуры в дневной термосфере северного полу-

шария Марса для весны при умеренном уровне солнечной активности. Можно считать, что этот профиль дает наиболее близкое приближение к среднеглобальной температурной структуре термосферы Марса из доступных в настоящее время наблюдательных данных. Важен также методический вклад настоящей работы. В частности, сформулированная стандартная задача переноса излучения в колебательно-вращательной полосе при НЛТР может быть использована как основа будущих студенческих научных работ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1 Полуэмпирическая модель среднеглобальной температурной структуры земной термосферы с переменным содержанием углекислого газа.

2 Аналитические зависимости для перепада температуры в земной термосфере и высоты положения мезопаузы как функции содержания углекислого газа с учетом вариаций солнечной активности.

3 Эмпирический средний профиль температуры в дневной термосфере северного полушария Марса для весны при умеренном уровне солнечной активности.

4 Общая модель температурной структуры планетной термосферы, охлаждаемой излучением в единственной колебательно-вращательной полосе.

5 Стандартная задача переноса излучения в колебательно-вращательной полосе в планетной атмосфере с учетом НЛТР для колебательных состояний.

6 Аппроксимационная формула для оценки высоты в атмосфере, начиная с которой населенности возбужденных колебательных состояний молекул отклоняются от равновесных значений, как функция параметров колебательно-вращательной полосы и условий в атмосфере.

Личный вклад автора. Автор принимал участие в постановке исследованных задач, разработке и реализации численного алгоритма их решения. Все изложенные в диссертации результаты получены автором самостоятельно.

Апробация работы и публикации. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на международных и российских конференциях, а также на семинарах. отдела физики атмосферы НИИФ СПбГУ, кафедры астрофизики Астрономической обсерватории СПбГУ, института метеорологии Лейпцигского университета и Национального центра атмосферных исследований США в Боулдере. По теме диссертации опубликовано 12 работ, включая тезисы конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Общий объем составляет 94 страницы текста, включая 25 рисунков и библиографию из 89 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, кратко изложены основные этапы работы и сформулированы защищаемые положения.

Возможность создания простой общей теории температурной структуры планетной термосферы зависит от того, насколько просто удается приближенно описать механизмы ее нагревания и охлаждения. Оказалось, что при описании среднеглобального энергетического баланса термосферы достаточно принять во внимание только главные механизмы, формирующие температурную структуру термосферы. Этими механизмами являются: нагревание за счет поглощения солнечного ультрафиолетового излучения, перенос тепла молекулярной теплопроводностью вниз и охлаждение собственным излучением атмосферы. Первые два механизма математически описываются просто. Поэтому основной упор был сделан на поиск простого способа описания лучистого охлаждения. Здесь трудность заключалась в поиске простой универсальной функции охлаждения термосферы, единым образом описывающей охлажде-

ние как в термосферах с низким, так и с высоким относительным содержанием охлаждающего газа. Другая трудность заключалась в поиске записи нижнего граничного условия, наиболее полно соответствующего физическому смыслу поставленной задачи. В результате были разработаны две одномерные модели среднеглобальной температурной структуры термосферы, последовательно изложенные в первой и второй главах диссертации. Последняя третья глава диссертации посвящена задаче переноса неравновесного излучения молекул в верхних атмосферах планет.

Первая глава. На первом этапе разработки общей модели температурной структуры термосферы была сначала предпринята попытка применения метода подобия в моделировании земной термосферы. В результате была построена одномерная модель среднеглобальной температурной структуры земной термосферы. Модель работает в широком диапазоне изменения содержания углекислого газа (на порядок больше/меньше, по сравнению с современным значением) и учитывает вариации солнечной активности. Механизмы нагревания и охлаждения термосферы в модели разделены на две группы. В первую группу входят те основные механизмы нагревания и охлаждения, вклад которых в энергетический бюджет земной термосферы может быть оценен достаточно уверенно. Вклад механизмов второй группы, называемых нами “дополнительным” нагреванием и охлаждением термосферы, устанавливается согласно требованию, чтобы моделируемая температурная структура земной термосферы описывала ее наблюдаемую температурную структуру для разных уровней солнечной активности. Указанное обстоятельство делает предлагаемую модель термосферы Земли полуэмпирической.

В начале первой главы обсуждается роль различных источников нагревания и охлаждения земной термосферы в ее энергетическом балансе. Далее вводятся безразмерные переменные, функции и параметры, описывающие нагревание и охлаждение термосферы, определяются значения параметров и оценивается точность модели.

Основным механизмом лучистого выхолаживания земной термосфе-

ры является эмиссия атмосферы в 15 мкм полосе CO₂. Поэтому перепад температуры в термосфере напрямую зависит от содержания CO₂. В настоящее время объемное отношение смеси CO₂ в нижней атмосфере составляет $c_{CO_2,0} = 3.6 \times 10^{-4}$, убывая с высотой в верхней атмосфере. В рамках построенной модели мы осуществили численные эксперименты, изменяя содержание CO₂ равномерно по высоте в большую и меньшую сторону, по сравнению с современным значением. Результаты экспериментов представлены следующими приближенными формулами для перепада температуры $T(\infty)/T_m$ между верхней термосферой и мезопаузой и для высоты мезопаузы x_m в лог-изобарической системе координат ($x = \ln(1000[p\text{Па}]/p)$, где p – давление).

$$T(\infty)/T_m = [(1\ 163 - 0.267 \ln c_{CO_2,0})(0.412 + 102.9/T_m) \times \\ \times (0.597 + F_{10\ 7}/303 - (F_{10\ 7}/495)^2)]^{3/2}, \quad (1)$$

$$x_m = 25.95 + 0\ 587[\ln(c_{CO_2,0}/T_m) - 960.2/T_m], \quad (2)$$

где T_m – температура на мезопаузе, а $F_{10\ 7}$ – индекс солнечной активности. С помощью формул (1) и (2) можно получить представление о температурной структуре термосферы Земли как в прошлом, когда содержание CO₂ в атмосфере существенно отличалось от современного, так и в будущем ввиду его возможного антропогенного роста. Формулы (1) и (2) справедливы только в некотором ограниченном диапазоне изменения $c_{CO_2,0}$ около его современного значения, поскольку при их получении использовались наблюдательные данные, соответствующие современному составу термосферы. Сильные вариации $c_{CO_2,0}$ должны приводить к изменениям в циркуляции атмосферы и ее состава, которые не могут быть учтены в рамках предложенной полуэмпирической модели.

Имеется ряд исследований, в которых дан прогноз изменения температуры в верхней термосфере в случае удвоения содержания CO₂ в земной атмосфере. В целом они согласуются с результатами нашей модели, которая при удвоении отношения смеси CO₂ предсказывает падение сред-

неглобальной температуры верхней термосферы примерно на 70 К при низком уровне солнечной активности и примерно на 110 К при высоком

Вторая глава диссертации представляет собой первую попытку создания общей теории температурной структуры термосферы.

В начале второй главы формулируется и обосновывается предлагаемая общая модель температурной структуры термосферы. Вводятся универсальные безразмерные функции нагревания и охлаждения термосферы, а также безразмерные параметры подобия, входящие в них. Ключевое внимание уделяется тому факту, что термосфера располагается над слоем лучистого равновесия, в котором солнечное нагревание (с учетом запаса энергии в химической форме и ее перехода в тепло при реакциях) балансируется охлаждением атмосферы ее собственным излучением.

В термосфере, за счет уменьшения частоты молекулярных столкновений с высотой, начиная с некоторых высот скорость лучистого охлаждения резко падает. В результате лучистое выхолаживание оказывается неспособным сбалансировать нагревание. В этой ситуации основным механизмом охлаждения в атмосфере становится молекулярная теплопроводность, которая переносит тепло сверху вниз, что и приводит к росту температуры с высотой в термосфере. Условие лучистого равновесия успешно используется при формулировании нижнего граничного условия модели. Оно позволяет не уточнять физическую природу лучистого стока тепла в нижней термосфере. Для остальной части термосферы делается предположение, что с некоторых высот лучистое выхолаживание осуществляется только в одной колебательно-вращательной полосе. Такая ситуация, например, полностью реализуется в углекислых атмосферах Венеры и Марса, в которых на всех высотах термосферы в лучистом выхолаживании абсолютно доминирует 15 мкм полоса CO_2 . Аналитический вид скорости лучистого охлаждения в полосе получен в **приложении А**, с использованием ряда приближений. Функция нагревания вводится в виде суперпозиции двух компонент - чепменовской

слоевой аппроксимации источника нагревания атмосферы коротковолновым излучением и монотонно убывающей с высотой функции нагревания нижних слоев термосферы

Модель позволяет по известному эмпирическому профилю температуры в термосфере определить значения параметров модели, и, как следствие, оценить компоненты нагревания и охлаждения термосферы. Испытание модели и получение безразмерных параметров проводится для термосфер Земли и Марса, относительно которых можно составить основывающееся на наблюдениях представление о среднеглобальном профиле температуры. Для Земли имеется детальная эмпирическая модель средней и верхней атмосферы MSISE-90. Для Марса пока еще недостаточно данных спутниковых измерений для построения детальной эмпирической модели. До недавнего времени имелись только единичные измерения вертикальных профилей плотности с помощью спускаемых аппаратов Viking и Pathfinder. В 1998 году с помощью спутника MGS были получены около 2000 вертикальных профилей плотности термосферы Марса. Хотя эти данные не покрывают весь диапазон возможных условий, реализуемых в термосфере Марса, они позволили нам получить средний профиль температуры в дневной термосфере северного полушария Марса для весны при умеренном уровне солнечной активности.

В конце второй главы диссертации сравниваются скорости нагревания/охлаждения термосфер Земли и Марса, полученные с помощью нашей модели (по средним эмпирическим профилям температуры) и прямыми расчетами. Также показано, как с помощью построенной простой общей модели термосферы можно оценить содержание атомного кислорода в термосфере Марса.

Третья глава диссертации посвящена задаче переноса излучения в колебательно-вращательной полосе в верхних слоях планетной атмосферы.

Если в нижних достаточно плотных слоях планетных атмосфер большая частота столкновений молекул обеспечивает выполнение распреде-

ления Больцмана для населенности колебательных состояний, то по мере подъема вверх плотность атмосферы, а с ней и частота столкновений молекул, уменьшается, и в формирование населенности состояний вовлекаются радиационные переходы. В результате начиная с некоторых высот населенность состояний (или функция источников) отклоняется от распределения Больцмана, или, другими словами, имеет место НЛТР. Положение этой высоты отклонения зависит от оптических свойств молекулы и структуры ее колебательно-вращательной полосы, структуры и состава атмосферы и параметров столкновений молекул. В работе предложен простой способ оценки этой высоты с помощью введенных безразмерных параметров τ_N и a_N , описывающих соответственно оптическую толщину полосы и контур ее линий. А именно, путем численного моделирования получена формула, дающая оценку давления p , до которого функция источников S может быть аппроксимирована ее равновесным (больцмановским) значением \bar{S} с заданной относительной точностью δS в диапазоне $10^{-4} - 10^{-1}$.

$$p/p_N = \frac{A}{1 + \frac{\sqrt{\tau_N}}{\sqrt{\delta S} + \sqrt{a_N}}},$$

$$A = 1/(2\delta S) - 1, \quad \delta S = (\bar{S} - S)/S \quad (3)$$

Здесь p_N — некоторое опорное давление, выражаемое простым соотношением

Сложность задачи переноса излучения в колебательно-вращательной полосе при НЛТР заключается в необходимости совместного решения уравнения переноса излучения и задачи определения населенности колебательных состояний. В **приложении Б** изложен метод решения интегрального уравнения для функции источников.

На основе модели линейной молекулы с двумя колебательными состояниями сформулирована стандартная задача переноса излучения в колебательно-вращательной полосе для плоской оптически полубесконечной планетной атмосферы. Решение задачи описывает высотное изме-

нение населенности возбужденного колебательного состояния, обусловленное выходом излучения в мировое пространство через верхнюю границу атмосферы. С помощью стандартной задачи нами были исследованы общие закономерности поведения населенности колебательных состояний.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертации

1 Разработанная простая полуэмпирической модель земной термосферы позволяет предсказать понижение температуры в термосфере с ростом содержания CO_2 также достоверно, как и более детальные модели атмосферы. Получены аппроксимационные формулы, характеризующие перепад температуры в термосфере при изменении объемного отношения смеси CO_2 от 3.6×10^{-5} до 3.6×10^{-3} с учетом вариаций солнечной активности.

2 Показана принципиальная возможность создания адекватной общей модели термосферы в том же ключе, как создана классическая модель “серой” атмосферы для нижних слоев атмосферы. Предложены универсальные функции нагрева и охлаждения термосферы. С помощью разработанной модели показана возможность оценки скорости нагрева и охлаждения термосферы по известному профилю температуры на примере термосфер Земли и Марса

3 Сформулирована стандартная задача переноса излучения в колебательно-вращательной полосе в планетной атмосфере с учетом НЛТР. Общий подход к решению задачи позволил получить аппроксимационные формулы для оценки высоты начала НЛТР, а также предсказать эффект “аномального” просветления атмосферы для значений безразмерного параметра полосы $b > 0$, когда в переносе излучения реально участвуют не более нескольких линий полосы.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- 1 Швед Г М , Семенов А О Стандартная задача переноса излучения в колебательно-вращательной полосе в планетной атмосфере с учетом нарушения локального термодинамического равновесия // *Астрон вестн* , 2001. Т 35, № 3, С 234-249
2. Семенов А.О , Швед Г М Влияние высотного изменения температуры на неравновесную населенность колебательных состояний молекул в планетных атмосферах // *Астрон вестн* , 2003, Т 37, № 4, С. 336-343
3. Семенов А О , Швед Г М Полуэмпирическая модель среднелобальной температурной структуры земной термосферы для переменного содержания углекислого газа // *Изв РАН Физика атмосферы и океана*, 2004, Т 40, № 3. С 291-305
4. Семенов А О Перенос ИК-излучения в планетных атмосферах с учетом нарушения локального термодинамического равновесия // *Тезисы докладов на Пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых*, Екатеринбург, 1999, С 425-427
- 5 Швед Г.М , Семенов А.О Стандартная задача переноса излучения в колебательно-вращательной полосе с учетом нарушения ЛТР // *Тезисы докладов на Международном симпозиуме стран СНГ "Атмосферная радиация"*, Санкт-Петербург, 1999. С 29
6. Семенов А О. Численное моделирование высотного распределения колебательно возбужденных молекул в атмосферах планет // *Тезисы докладов на Пятой Санкт-Петербургской ассамблее молодых ученых и специалистов*, Санкт-Петербург. 2000 С. 44
- 7 Semenov A O , Shved G M Standard problem of radiative transfer in a vibration-rotation band in a planetary atmosphere under non-LTE conditions // *International Radiation Symposium "Current problems in*

- atmospheric radiation*", St Petersburg, 2000, P 83 (Abstracts), 2001, P 337 340 (Proceedings)
- 8 Semenov A O , Shved G M Study of formation of non-equilibrium vibrational state population for molecules in the upper planetary atmosphere // *VIII Joint International symposium "Atmospheric and ocean optics Atmospheric physics "*, Irkutsk, 2001, P 84
 - 9 Shved G M , Semenov A O. Similarity-based method in modeling the temperature structure of planetary thermosphere // *35th COSPAR Scientific Assembly*, Paris, France, 2004, P 1369
 10. Semenov A O , Shved G.M Semi-empirical model of the global mean temperature structure of terrestrial thermosphere for the variable CO₂ abundance // *35th COSPAR Scientific Assembly*, Paris, France, 2004, P. 1021
 - 11 Швед Г М , Семенов А О Полуэмпирическая модель среднеглобальной температурной структуры земной термосферы для переменного содержания углекислого газа // *Тезисы докладов на Международном симпозиуме стран СНГ "Атмосферная радиация"*, Санкт-Петербург, 2004, С. 37-38.
 - 12 Semenov A.O, Shved G.M. Upper thermal boundary layer of planetary atmosphere: an experience of developing a general theory // *American Geophysical Union, Spring Meeting*, New Orleans, USA, 2005, abstract SA21A-12

**Отпечатано копировально-множительным участком отдела
обслуживания учебного процесса физического факультета СПбГУ.**

Приказ № 571/1 от 14.05.03.

Подписано в печать 17.04.06 с оригинал-макета заказчика.

**Ф-т 30х42/4, Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз., Заказ № 299/с
198504, СПб, Ст. Петергоф, ул. Ульяновская, д. 3, тел. 428-43-00.**

2006A
10782

№ 1 0 7 8 2