

На правах рукописи

Гладышева Юлия Геннадьевна

**Аэрономия водородно-гелиевых верхних атмосфер
горячих экзопланет-гигантов**

1.3.1. Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Жилкин Андрей Георгиевич

Официальные оппоненты: **Хайбрахманов Сергей Александрович**,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет,
старший научный сотрудник

Тавров Александр Викторович,
доктор технических наук,
ФГБУН Институт космических исследований РАН,
заведующий лабораторией

Ведущая организация: ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН), г. Санкт-Петербург

Защита состоится 23 декабря 2025 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при ФГБУН Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д.48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д.48, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.032.01.

Автореферат разослан 11 ноября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.032.01,
канд. физ.-мат. наук

Чупина Наталия Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследование физики и химии верхних атмосфер экзопланет представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений современной астрофизики. Это направление ключевым образом связано с решением фундаментальных проблем формирования и эволюции планетных систем, механизмов потери атмосфер и, в конечном счете, определения потенциальной обитаемости внесолнечных миров.

С момента открытия первых экзопланет [1], [2] стало ясно, что наблюдаемые характеристики планетных атмосфер формируются сложными физико-химическими процессами, включающими нагрев, охлаждение, ионизацию и гидродинамические выбросы вещества. Особенно значимым становится изучение водородно-гелиевых верхних атмосфер, так как водород и гелий составляют основную массу газовых гигантов. Аэрономия — наука о физике верхних слоев атмосферы — позволяет понять, каким образом воздействие жесткого ультрафиолетового и рентгеновского излучения звезд приводит к нагреву, химическим реакциям и потере массы атмосферы.

В этом контексте особый интерес представляют горячие юпитеры и теплые нептун — классы планет-гигантов, находящихся на экстремально тесных орбитах. Их близкое расположение обуславливает интенсивное воздействие потока звездного излучения, что делает верхние атмосферы этих планет объектами для изучения процессов фотохимии, нагрева и гидродинамического оттока вещества в условиях, не встречающихся в Солнечной системе.

Спектральные наблюдения показали, что горячие экзопланеты-гиганты окружены протяженной оболочкой. Было установлено, что атмосферы планет с такими оболочками испытывают газодинамический отток вещества. Ключевым фактором, влияющим на распределение параметров атмосферы, является ее химический состав. Он позволяет получить информацию о физических процессах, формировании и эволюции атмосфер экзопланет.

Для (экзо)планет-гигантов химический состав газовой фазы имеет решающее значение для определения циркуляции, температуры и наблюдаемых свойств планетных атмосфер [3–5]. Непрозрачность для звездного излучения, определяемая составом, управляет нагревом, который, в свою очередь, определяет динамику. Химическое моделирование атмосфер экзопланет в значительной степени ограничивалось одномерными кодами химической кинетики (например, [6–9]), показывая, что вертикальный перенос может приводить к отклонениям от химического равновесия. Атмосфера горячего юпитера имеет большие горизонтальные градиенты температуры из-за интенсивного облучения дневной стороны, что

приводит к высокой горизонтальной скорости ветра. Следовательно, неравновесный химический состав, обусловленный горизонтальным переносом, так же важен, как и вертикальное перемешивание в атмосферах горячих юпитеров [9–12].

Одним из наиболее изученных горячих юпитеров является экзопланета HD 209458b. В работе [13] приведены первые наблюдения первичных транзитов этой планеты в $\text{Ly}\alpha$ с помощью спектрографа STIS на борту HST и сообщается о величине поглощения в 15% в высокоскоростном си-нем крыле линии. Повторный анализ тех же данных [14; 17] дал несколько меньшие (6–9%) и более симметричные профили поглощения. Первичные измерения прохождения HD 209458b по диску звезды на длинах волн дальнего ультрафиолета (с помощью спектрографа HST/STIS) также выявили глубину поглощения в $10 \pm 4.5\%$ в резонансных линиях OI (2P-2D) и $7.5 \pm 3.5\%$ в резонансных линиях CII (3P-3S) [18]. Новую возможность исследовать расширяющиеся атмосферы горячих юпитеров и теплых нептунов открывают измерения метастабильной триплетной линии гелия 2^3S на 108300 нм [19]. Такой обширный материал наблюдений, доступный для HD 209458b, делает этот горячий юпитер основным кандидатом для применения сложных численных аэрономических моделей, направленных на интерпретацию измерений и вывод физических параметров и особенностей звездно-планетной системы.

Одномерные аэрономические модели, описывающие структуру верхних атмосфер горячих экзопланет-гигантов, можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся стационарные модели, в которых предполагается, что все гидродинамические величины (плотность, скорость, концентрации компонентов и др.) не зависят от времени и являются только функциями радиуса. Формирующееся истечение атмосферы имеет, как правило, трансзвуковой характер. Поэтому получаемое решение задачи представляет собой аналог решения Паркера [20] для солнечного ветра. Интегральная кривая должна проходить через особую точку, в которой скорость атмосферного ветра равна местной скорости звука. В результате в задаче появляется дополнительное условие сшивки, которое необходимо учесть при построении решения. Модели подобного типа используются, например, в работах [21; 22]. Ко второй группе относятся нестационарные модели, в которых полученное решение либо стремится к стационарному, либо является квази-стационарным. В этих моделях уравнения гидродинамики можно решать как в лагранжевых, так и в эйлеровых переменных. В первом случае из-за расширения атмосферы к моменту выхода на стационарный режим внешняя подвижная граница расчетной области может удалиться на достаточно большое расстояние от центра планеты, что не всегда удобно. Этого эффекта можно частично избежать, задавая внешнюю среду (например, звездный ветер) [23; 24]. При использовании эйлеровых переменных решение строится в фиксированной расчетной области. При

этом на внешней границе задаются условия свободного вытекания. Такой подход использовался во многих работах (см., например, [25–30]). В данной работе также использовались эйлеровы переменные.

Целью диссертационной работы является исследование структуры и динамики водородно-гелиевых верхних атмосфер горячих экзопланет-гигантов на основе усовершенствованной одномерной аэрономической модели и определение ключевых параметров, влияющих на процесс гидродинамического убегания.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Построение аэрономической модели в эйлеровых переменных, учитывающей процессы нагрева и охлаждения, приливную силу, диффузию и теплопроводность.
2. Решение полученной нестационарной системы путем разбиения задачи на физические процессы и моделировании каждого процесса соответствующими численными методами.
3. Проведение и анализ численных расчетов рассматриваемых моделей для различных конфигураций граничных и начальных условий.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

1. Построена одномерная аэрономическая модель верхней водородно-гелиевой атмосферы горячих экзопланет-гигантов, которая учитывает химический состав, функции нагрева и охлаждения, диффузию и теплопроводность.
2. Проведены расчеты влияния потока излучения звезды на структуру верхней атмосферы в условиях вспышечной активности звезды.
3. Обнаружен облачный слой, формирующийся в результате тепловой неустойчивости в химически реагирующем газе.

Практическая значимость. Одномерная аэрономическая модель для горячих экзопланет позволит впоследствии проводить интерпретацию спектральных наблюдений верхних атмосфер на планируемой к запуску космической обсерватории Спектр-УФ.

Полученные с помощью разработанной модели результаты важны с точки зрения граничных условий для последующего трехмерного моделирования оболочек горячих экзопланет-гигантов.

Методология и методы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы создан программный комплекс для проведения расчетов аэрономической модели. Комплекс включает следующие алгоритмы:

1. Разработан химический модуль, позволяющий учитывать химические процессы, включая процессы фотоионизации и фотодиссоциации. Химический модуль включает следующие этапы:

формирование сетки реакций по заданным параметрам, генерация системы обыкновенных дифференциальных уравнений химической кинетики и блок для численного решения полученной системы.

2. Разработан модуль расчета коэффициентов скоростей реакций фотопроцессов, а также проведена аппроксимация полученных значений аналитическими выражениями.
3. Для интерпретации полученных результатов разработаны программные пакеты на языке Python для построения графиков.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана оригинальная одномерная аэрономическая модель водородно-гелиевых верхних атмосфер горячих экзопланет-гигантов, основанная на приближении одножидкостной многокомпонентной гидродинамики в эйлеровых переменных. Модель наиболее полным образом учитывает все основные процессы, влияющие на структуру и динамику верхней атмосферы: химические реакции, процессы нагрева и охлаждения, приливная сила, диффузия и теплопроводность.
2. По результатам численных расчетов найдена зависимость интенсивности гидродинамического оттока атмосферы от внутренних граничных условий и начального химического состава. Исследована структура атмосферы горячих экзопланет-гигантов различных типов. Установлено, что внешние слои атмосферы горячего юпитера являются полностью ионизованными, в то время как атмосфера теплого нептунa в основном состоит из нейтрального газа.
3. В атмосферах горячих экзопланет обнаружен новый тип облаков, которые представляют собой плотные холодные образования, свободно плавающие в разреженном теплом газе. В горячих юпитерах облачный слой формируется на высоте порядка 1000 км от фотометрической поверхности, а его толщина составляет около 2000 км. Показано, что механизмом формирования данного облачного слоя является тепловая неустойчивость в химически реагирующем газе.
4. Моделирование влияния вспышечной активности родительской звезды на структуру верхней атмосферы горячих экзопланет-гигантов показало, что в результате дополнительного нагрева возникает динамический отклик, приводящий к образованию ударных волн и заметному увеличению оттока атмосферы. По результатам расчетов установлено, что в случае сильных вспышек, помимо значительного локального нагрева верхней атмосферы возможно также существенное увеличение концентрации водорода во внешних слоях в первые часы после вспышки. Указанные эффекты

могут быть наблюдаемы с помощью планируемой к запуску космической обсерватории Спектр-УФ.

Достоверность обусловлена обсуждением результатов диссертации на научных конференциях и семинарах, а также публикацией их в рецензируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Conference IAU 362: The Predictive Power of Computational Astrophysics as a Discovery Tool, poster (Online, November 8-12, 2021);
2. Школа-семинар «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике» (ИКИ РАН, Таруса, 27 июня — 1 июля 2022);
3. Школа для студентов и молодых ученых «Экзопланеты/Exoplanets2022» (ИНАСАН, Москва, 17 — 18 октября 2022);
4. Конкурс молодых ученых ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 15 ноября 2022);
5. Конференция «Исследование звезд с экзопланетами—2022» (Суздаль, 23-27 ноября 2022)
6. Школа-семинар «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике» (ИКИ РАН, Таруса, 3 — 7 июля 2023);
7. Школа «Исследования экзопланет — 2023» (ИНАСАН, Москва, 4 — 5 октября 2023);
8. Conference Challenges and Innovations in Computational Astrophysics V (Online, November 7 — 9, 2023);
9. Конференция «ВАК-2024» (п. Нижний Архыз, 25 — 31 августа 2024);
10. Школа «Исследования экзопланет — 2024» (ИНАСАН, Москва, 18 — 19 ноября 2024).

Личный вклад. Автор принимал участие в постановке задач, написании численного кода, получении и обработке результатов численных экспериментов. Участвовал в обсуждении результатов и формировании выводов. В частности:

1. Написан химический модуль на языке C++ с помощью открытого программного пакета CVODE;
2. Принимал активное участие в отладке численного кода, реализующего аэрономическую модель;
3. На языке программирования Python написаны программы для обработки анализа и визуализации данных, полученных с помощью аэрономической модели;
4. Проведение численных расчетов структуры верхних атмосфер горячих экзопланет-гигантов с разными начальными значениями, химическим составом и потоком излучения родительской звезды;

5. Автор принимал активное участие в написании статей по результатам работ. В статьях, где соискатель является первым автором, ее вклад является определяющим.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 4 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 144 страницы, включая 45 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 149 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы; формируются цели и задачи работы; описаны методология и методы исследования; излагается научная новизна и практическая значимость работы; представлены основные положения, выносимые на защиту; обосновывается достоверность результатов и указывается личный вклад соискателя; представлен список публикаций соискателя.

Первая глава посвящена описанию одномерной аэрономической модели водородно-гелиевых верхних атмосфер горячих экзопланет-гигантов, основанной на приближении одножидкостной многокомпонентной гидродинамики.

В **Разделе 1.1** приведен обзор существующих подходов к исследованию верхних атмосфер горячих экзопланет-гигантов. Приведены результаты наблюдений экзопланет методом транзитов, рассмотрена классификация одномерных аэрономических моделей.

В **Разделе 1.2** представлена базовая модель верхней атмосферы, которая включает газодинамические уравнения непрерывности, движения и энергии. Также, поскольку модель является многокомпонентной, она дополнена уравнениями распределения компонентов водородно-гелиевой химии: H , H^- , H^+ , H_2 , H_2^+ , H_3^+ , He , He^+ , HeH^+ и электроны e^- . Для данного химического состава приведена сетка реакций, состоящая из 33 реакций, включая процессы фотоионизации и фотодиссоциации. Коэффициенты скоростей реакций взяты из открытых источников, а скорости фотопроцессов рассчитаны с учетом спектра излучения звезды.

Основным механизмом, приводящим к нагреву верхней атмосферы, является поглощение жесткого УФ излучения родительской звезды. При описании процесса охлаждения атмосферы учитываются следующие эффекты: столкновения электронов с ионами, столкновение электронов с

нейтралами, излучение молекул H_3^+ , излучение в линиях атомов, адиабатическое охлаждение и охлаждение за счет адвекции. Также на процессы нагрева-охлаждения влияет теплопроводность.

В Разделе 1.3 описаны дополнительные эффекты, которые учитывались при построении аэрономической модели. К этим эффектам относятся приливная сила, диффузия и теплопроводность. При проведении численного анализа, модель рассматривается в сферической системе координат (r, θ, φ) с началом в центре планеты. Центр звезды располагается в точке с координатами $r = A, \theta = \pi/2, \varphi = 0$. Общая система уравнений, учитывающая все перечисленные эффекты, в эйлеровых переменных (время t и радиальная координата r , отсчитываемая от центра планеты) имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{GM_{\text{pl}}}{r^2} + f_{\text{tidal}}, \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{P}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \Gamma - \Lambda, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 n_\alpha v) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 n_\alpha w_\alpha) + K_\alpha - n_\alpha L_\alpha. \quad (4)$$

Здесь ρ — плотность вещества, v — средняя массовая радиальная скорость, P — полное давление, ε — удельная внутренняя энергия, T — температура, G — гравитационная постоянная, M_{pl} — масса планеты. Последнее слагаемое f_{tidal} в правой части уравнения (1) описывает силу приливного взаимодействия от звезды. В уравнении энергии (3) λ — коэффициент теплопроводности, а величины Γ и Λ представляют собой объемные коэффициенты нагрева и охлаждения соответственно (измеряются в $\text{эрг} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$). Для каждого компонента сорта α определены концентрация n_α , темп производства K_α ($\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) и скорость расхода L_α (с^{-1}). Величина w_α определяет диффузионную скорость компонента сорта α , т.е. разность между средней массовой скоростью v и средней скоростью компонента v_α .

Для замыкания системы уравнений (1)–(4) используются уравнения состояния идеального газа

$$P = \frac{k_B \rho T}{\mu m_p}, \quad \varepsilon = \frac{k_B T}{(\gamma - 1) \mu m_p}, \quad (5)$$

где k_B — постоянная Больцмана, m_p — масса протона, $\gamma = 5/3$ — показатель адиабаты, μ — средний молекулярный вес.

В Разделе 1.4 приведено краткое описание численного метода системы (1)–(5). Алгоритм решения состоит из нескольких последовательных

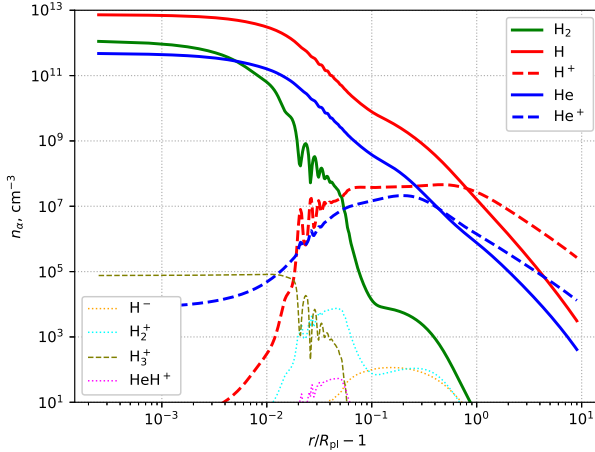


Рисунок 1 — Профиль концентраций компонентов n_α в верхней атмосфере горячего юпитера для модели a3 ($n_{\text{atm}} = 10^{13} \text{ см}^{-3}$).

этапов, которые возникают в результате применения метода расщепления по физическим процессам.

Предполагается, что в начальный момент времени верхняя атмосфера находится в состоянии гидростатического равновесия при заданном профиле температуры $T(r)$. На фотометрическом радиусе фиксируется постоянное значение давления P_{atm} . Алгоритм включает следующие этапы: система многокомпонентной гидродинамики, химических реакций, нагрев и охлаждение, диффузия и теплопроводность.

Вторая глава посвящена исследованию структуры верхней атмосферы экзопланет-гигантов, вращающихся вокруг солнцеподобных звезд. В качестве объекта исследования выбран типичный горячий юпитер HD 209458b, спектр родительской звезды которой, соответствует спектру спокойного Солнца. Расчеты проводились до сходимости к стационарному состоянию, условие которого определялось по изменению скорости газа на внешней границе. Химический состав определялся параметром $\chi = [\text{He}/\text{H}]$, который равен отношению числа ядер гелия к числу ядер водорода.

В Разделе 2.1 представлены результаты расчетов одномерной аэрономической модели верхней атмосферы горячего юпитера. Анализ показал, что наиболее глубокие слои атмосферы (толщина менее $0.05R_{\text{pl}}$) характеризуются высокой плотностью и относительно низкой температурой. Температура этих слоев оказывается порядка 1000 K.

С увеличением радиуса r температура начинает резко возрастать из-за эффективного нагрева жестким излучением звезды и примерно на

высоте $0.5R_{\text{pl}}$ достигает максимального значения около 9400 К. В этой области происходит формирование гидродинамического истечения атмосферы (планетный ветер), в котором плотность, давление и температура монотонно падают с увеличением расстояния, а скорость, наоборот, монотонно возрастает. За счет процессов фотохимии жесткое излучение родительской звезды поглощается веществом атмосферы и преобразуется в его кинетическую энергию. Формирующееся течение является трансзвуковым. Звуковая точка, в которой выполняется условие $v = c_s$ расположена на расстоянии примерно $r_s = 4R_{\text{pl}}$ от центра планеты. Характерные скорости на внешней границе ($r = 10R_{\text{pl}}$) оказывались порядка 6 – 7 км/с.

На рис. 1 показаны высотные профили концентраций компонентов n_α . С ростом параметра n_{atm} , определяющего давление на фотометрическом радиусе P_{atm} увеличивается скорость формирования молекулярного водорода в глубоких слоях атмосферы. Во внешних частях атмосферы концентрация H_2 остается низкой. Самые внешние слои атмосферы горячего юпитера состоят из водородно-гелиевой плазмы. В переходной зоне вещество представляет собой нейтральную смесь атомов водорода и гелия. Концентрации остальных фракций остаются относительно низкими, не превышая значение 10^5 см^{-3} . Из них наибольшую роль играют молекулы H_3^+ , поскольку они определяют тепловой баланс внутренних слоев атмосферы.

На высоте порядка $0.015R_{\text{pl}}$ обнаружены колебания значений концентрации некоторых компонентов, которые обусловлены развитием неустойчивости. Таким образом, в атмосферах горячих юпитеров обнаружен новый тип облаков — плотные холодные образования, плавающие в разреженном теплом газе. Облачный слой формируется на высоте порядка 1000 км от фотометрической поверхности, толщина которого составляет около 2000 км (рис. 1).

В Разделе 2.2 представлены результаты расчетов верхней атмосферы типичного теплого нептона, параметры которого соответствуют GJ 3470b. Родительская звезда данной планеты относится к спектральному классу M1.5, спектр которой должен сильно отличаться от солнечного. Поэтому в рамках данной численной модели была рассмотрена аналогичная планета, в окрестности которой солнечный поток фотонов f_λ в 10 раз меньше по сравнению с величиной, использованной выше для горячего юпитера. Это соответствует большой полуоси орбиты теплого нептона примерно равной 0.15 а.е.

Результаты расчетов структуры верхней атмосферы качественно повторяют аналогичные профили для горячего юпитера. В наиболее глубоких слоях атмосферы (толщина менее $0.1R_{\text{pl}}$) снова формируется область с высокой плотностью и низкой температурой. Формирующийся планетный ветер также является трансзвуковым. Характерные скорости на внешней границе составляют значения примерно 5.2 км/с. Если внешние слои атмосферы горячего юпитера были почти полностью ионизованными, то

атмосфера теплого нептона большей частью состоит из нейтрального газа. Степень ионизации внешних слоев не превышает 0.3.

Таким образом, основным отличием атмосферы теплого нептона от атмосферы горячего юпитера является ее относительно слабая ионизация. Темп потери массы теплого нептона на порядок меньше соответствующей величины для горячего юпитера. Характерное значение составляет $3.7 \cdot 10^9$ г/с.

В Разделе 2.3 исследуется влияние химического состава на структуру атмосферы горячего юпитера. Для этого варьировался параметр $\chi = [\text{He}/\text{H}]$ и принимал значения от 0.01 до 0.5. Из всей сетки реакций параметр χ влияет на распределение профиля коэффициентов скоростей реакций фотопроцессов, которые в свою очередь влияют на распределение концентраций компонентов в атмосфере, а также на нагрев атмосферы.

Профили температуры $T(r)$ распределены следующим образом. В самых глубоких слоях атмосферы температура примерно постоянна и не превышает 2000K для всех моделей. С увеличением радиуса температура начинает резко возрастать, в связи с воздействием нагрева от жесткого ультрафиолетового излучения от звезды. При этом с ростом χ начало резкого увеличения T сдвигается в сторону фотометрического радиуса, так как с увеличением χ прогреваются более глубокие слои атмосферы. В области $0.1R_{\text{pl}} \leq r \leq R_{\text{pl}}$ температура во всех моделях достигает пика, после чего температура резко падает. В этой области формируется планетный ветер и начинается убегание вещества из атмосферы.

Наиболее глубокие слои атмосферы характеризуются высокой плотностью (толщина менее $0.05R_{\text{pl}}$), затем происходит монотонное снижение плотности. В силу того, что скорость убегания вещества с ростом χ снижается, падает и плотность. С ростом χ ионизация проникает в более глубокие слои атмосферы. Плотность газа падает с увеличением χ , а, следовательно, падает общая концентрация атомов во внешних слоях атмосферы. Кроме того, концентрация водорода H, у которого энергия ионизации меньше, чем у He, уменьшается с ростом χ , а фотоны с этой энергией, ионизовав H во внешних слоях атмосферы, получают доступ к более глубоким слоям.

Темп потери массы нелинейно уменьшается с ростом χ . Это согласуется с результатами расчетов других авторов (см., например, [31]). Что касается распределений концентраций компонентов, важно отметить, что исходя из условий моделей, с ростом χ увеличивается исходная концентрация гелия He и уменьшается исходная концентрация водорода H. Во всех моделях в глубоких слоях атмосферы преобладает концентрация молекулярного водорода H_2 .

Область колебания значений концентраций компонентов формируется во всех моделях, но ее ширина и интенсивность варьируется. С увеличением χ облачный слой расширяется в сторону фотометрического радиуса. При этом внешняя граница облачного слоя незначительно

сдвигается также в сторону фотометрического радиуса. Характерно, что с расширением облачного слоя частота осцилляций падает. Таким образом, плотные холодные образования (облака) увеличиваются в размерах с ростом χ . Кроме того, с ростом χ пространственные осцилляции ионизованного водорода H^+ наблюдаются в более глубоких слоях атмосферы.

В Разделе 2.4 проводится анализ полученных результатов расчетов. С целью выявления возможной природы осцилляций некоторых компонентов были проведены дополнительные исследования. Было выполнено несколько расчетов моделей горячего юпитера на различных сетках, в которых варьировалось число ячеек и степень сжатия к фотометрической поверхности. Однако картина получаемого решения при этом практически не изменялась.

Кроме того, появление осцилляций не связано также и с влиянием граничных условий на фотометрическом радиусе. Это обусловлено тем обстоятельством, что они возникают довольно далеко (по количеству ячеек) от внутренней границы, а вблизи самой фотометрической поверхности решение остается гладким. Таким образом, можно сделать вывод, что эти осцилляции, имеют не численную, а физическую природу.

Модель является одномерной и соответствует сферически-симметричному приближению. В таком подходе отмеченная неустойчивость приводит к образованию сферических слоев. При переходе от одного слоя к следующему происходит резкое изменение концентраций компонентов n_α , а также значений некоторых других величин (в том числе плотности ρ и температуры T). В трехмерном случае развитие неустойчивости должно приводить к формированию структур конечного объема — клампов или облаков. Таким образом речь идет о формировании некоего облачного слоя в верхней атмосфере горячего юпитера.

Как показывают расчеты, профиль давления $P(r)$ не испытывает осцилляций и остается гладким. Следовательно, облака находятся в равновесии по давлению с окружающим газом. Сами облака являются более плотными образованиями. Плотность в них превышает плотность окружающего газа. Соответственно температура облаков оказывается ниже температуры окружения. Таким образом, облачный слой в атмосфере горячих юпитеров формируется вследствие тепловой неустойчивости [15] в химически реагирующем газе [16].

Третья глава посвящена исследованию влияния приливной силы и потока звездного излучения на структуру верхней атмосферы горячего юпитера.

В Разделе 3.1 приведены результаты исследования влияния приливной силы, в условиях спектра спокойного Солнца. Показано, что наличие приливной силы приводит к дополнительному ускорению планетного ветра. Скорость ветра на внешней границе в модели без приливной силы оказывается равной 1/3 от скорости ветра в модели с приливной силой. В

результате учет приливной силы приводит к меньшим значениям плотности и температуры (из-за адиабатического охлаждения) вблизи внешней границы. Профили степени ионизации оказываются практически одинаковыми. Темп потери массы без учета приливной силы составляет $\dot{M} = 2.98 \cdot 10^{10}$ г/с, а в решении с учетом приливной силы $\dot{M} = 7.32 \cdot 10^{10}$ г/с.

В Разделе 3.2 исследуется влияние потока жесткого излучения звезды. В рамках расчетов варьировалась величина потока жесткого УФ излучения звезды.

Увеличение потока жесткого излучения приводит к росту плотности и температуры в атмосфере планеты. Профили температуры имеют стандартный для горячих юпитеров вид (см., например, [21–26; 28–30]). В самых глубоких слоях атмосферы температура оказывается близкой к эффективной температуре планеты $T_{\text{atm}} = 1200$ К. На высотах порядка $0.5R_{\text{pl}}$ температура достигает максимума. При этом, чем выше поток жесткого излучения, тем больше максимальное значение температуры. В этой области происходит формирование планетного ветра. Во внешней зоне температура монотонно падает с высотой.

Формирующееся гидродинамическое истечение является трансзвуковым. Увеличение потока жесткого УФ излучения родительской звезды приводит к росту скорости планетного ветра. Звуковая точка, в которой происходит смена режима течения, с увеличением потока излучения приближается к фотометрической поверхности. Характерные скорости на внешней границе лежат в диапазоне от 12 до 25 км/с.

Что касается высотных профилей концентраций компонентов, то с увеличением потока жесткого УФ излучения звезды структура внутренней части атмосферы изменяется слабо. Однако внешние слои атмосферы горячего юпитера становятся более ионизованными. В частности, высоты, на которых выполняются равенства концентраций нейтралов и ионов $n_{\text{H}} = n_{\text{H}^+}$ и $n_{\text{He}} = n_{\text{He}^+}$ с увеличением потока излучения смещаются в более глубокие слои атмосферы. Рост потока жесткого излучения приводит к диссипации облачного слоя. При этом его положение и толщина не изменяются.

В Разделе 3.3 исследуется отклик атмосферы горячего юпитера на вспышечное воздействие со стороны родительских звезд солнечного типа. Предполагалось, что непосредственно перед вспышкой верхняя атмосфера планеты находится в стационарном состоянии при условии постоянного потока жесткого УФ излучения, равного потоку от современного спокойного Солнца. Процесс вспышки описан с помощью некоторой зависимости потока жесткого УФ излучения от времени $F_{\text{XUV}}(t) = X(t)F_{\text{XUV}}^0$, где $X(t)$ — безразмерный фактор, описывающий относительное изменение потока по сравнению с потоком для спокойного Солнца F_{XUV}^0 . При моделировании вспышки считалось, что в момент начала вспышки фактор $X(t)$ резко возрастал до величины X_{max} и оставался таким в течение некоторого времени,

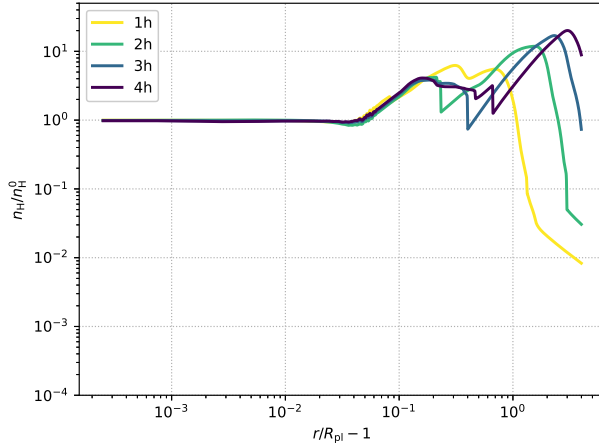


Рисунок 2 — Профиль отношения концентрации атомарного водорода n_{H} текущего состояния атмосферы к соответствующему значению до вспышки n_{H}^0 для модели $X_{\text{max}} = 1000$.

после чего возвращался к исходному значению $X = 1$. Продолжительность отдельной вспышки во всех вариантах расчетов составляла 30 мин.

В результате вспышки происходит локальный разогрев атмосферы, приводящий к росту температуры. Вспышка не оказывает влияния на глубокие слои атмосферы, которые характеризуются относительно низкой температурой.

Основное воздействие приходится на внешние слои атмосферы, где формируются две ударные волны, распространяющиеся по газу в противоположных направлениях. Одна ударная волна распространяется вовнутрь, а другая — наружу атмосферы горячего юпитера. В первые часы после вспышки профили температуры и скорости существенно изменяются. Однако затем структура атмосферы постепенно восстанавливается и возвращается в исходное состояние. Динамический отклик атмосферы существенно зависит от интенсивности вспышки.

Качественного изменения распределения концентраций компонентов после вспышки не происходит. Распространение ударных волн приводит к дополнительному перемешиванию вещества во внешних слоях атмосферы. Это обусловлено оттоком из промежуточной зоны во внешнюю область нейтрального газа, состоящего в основном из атомов водорода и гелия. В результате степень ионизации внешней части атмосферы уменьшается. Однако затем происходит релаксация атмосферы и это вещество вновь ионизируется излучением звезды.

Вспышки (особенно сильные) могут частично разрушать облачный слой, что приводит к его диссипации. В спокойном состоянии атмосферы облачный слой через определенное время восстанавливается вновь.

На рис. 2 показаны профили отношения $n_{\text{H}}/n_{\text{H}}^0$, где n_{H} — концентрация атомов водорода в текущем состоянии атмосферы, а n_{H}^0 — соответствующее значение концентрации в спокойном состоянии, для вспышки $X_{\text{max}} = 1000$. Видно, что этот параметр изменяется на три порядка величины. При этом на различных высотах может происходить как уменьшение этого параметра, так и его увеличение.

Полученный результат интересен с точки зрения регистрации отклика атмосфер горячих юпитеров на вспышечные воздействия со стороны их родительских звезд. Возможно несколько вариантов наблюдательных проявлений такого отклика атмосферы, которые потенциально можно обнаружить с помощью существующих и планируемых к запуску космических УФ обсерваторий (например, проекты HST и Спектр-УФ).

Во-первых, при сильных вспышках верхняя атмосфера планеты может существенно разогреться и расшириться. В первые часы после вспышки, из-за того, что XUV излучение звезды не успевает ионизовать нейтралы во внешней области атмосферы, в этой области, как следует из рис. 2, наблюдается сильное (в 10 раз) увеличение концентрации нейтрального водорода. Таким образом, под воздействием сильной звездной вспышки у горячего юпитера образуется расширенная плотная атмосфера. Следовательно, в УФ диапазоне длин волн может возрасти и глубина транзита, $R_{\text{pl}}^2/R_{\text{st}}^2 = f(\lambda)$, где R_{st} — радиус звезды. Это увеличение глубины транзита потенциально отразится на кривых блеска, полученных по фотометрическим наблюдениям планетной системы в УФ диапазоне, как, например, в работе [32] при регистрации протяженной оболочки у горячего юпитера WASP-12b. В этом случае, начало транзита в УФ диапазоне длин волн за счет большей оптической толщины может опережать начало транзита в видимом диапазоне.

Еще одним важным проявлением реакции атмосферы горячего юпитера на сильную вспышку родительской звезды, которое может быть потенциально обнаружено по спектральным транзитным наблюдениям в УФ диапазоне длин волн, является увеличение поглощения в синем крыле спектральной линии H I Ly α . Это поглощение может быть связано с образованием ЭНА водорода, H_{ENA}, в реакциях перезарядки атомарного H атмосферы экзопланеты с протонами звездного ветра, $\text{H} + \text{p} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{H}_{\text{ENA}}$. Скорость производства ЭНА зависит от концентрации нейтрального водорода во внешних слоях атмосферы экзопланеты и концентрации протонов в звездном ветре. Таким образом, при воздействии сильной XUV вспышки на атмосферу горячего юпитера и последующем увеличении концентрации H в верхних частях атмосферы (рис. 2), интенсификации планетного ветра, глубина транзита в синем крыле линии H I Ly α может быть значительно

увеличена. Это изменение глубины транзита может быть потенциально зарегистрировано с помощью существующих и планируемых УФ телескопов.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Для расчета структуры верхних водородно-гелиевых атмосфер горячих экзопланет-гигантов разработана одномерная нестационарная аэрономическая модель, основанная на приближении одножидкостной многокомпонентной гидродинамики.
2. Изучена зависимость гидродинамического оттока атмосферы от внутренних граничных условий и от начального химического состава. Внешние слои атмосферы горячего юпитера оказываются полностью ионизованными, в то время как атмосфера теплого непуна в основном состоит из нейтрального газа.
3. Обнаружен новый тип облаков в атмосферах экзопланет – плотные холодные образования, свободно плавающие в разреженном теплом газе. Облачный слой формируется в результате тепловой неустойчивости в химически реагирующем газе.
4. По результатам расчетов было показано, что в случае сильных вспышек, помимо значительного локального нагрева верхней атмосферы возможно также существенное увеличение концентрации водорода в этих областях в первые часы после вспышки. Указанные эффекты могут быть наблюдаемы с помощью планируемой к запуску космической обсерватории Спектр-УФ.

Благодарности. Соискатель выражает особую благодарность научному руководителю Жилкину А.Г. за всестороннюю помощь в проведении исследований, ценные замечания, переданные знания и формирование научного мышления и мировоззрения. Соискатель благодарен Шематовичу В. И. и Шайхисламову Э.Ф. за всестороннюю помощь, переданные знания и совместные научные обсуждения.

Соискатель благодарен коллективу Института астрономии РАН за научные обсуждения, дружелюбную обстановку, которые были очень важны при проведении научных исследований.

Публикации автора по теме диссертации

- [A1] Жилкин А. Г., Гладышева Ю. Г., Шематович В. И., Бисикало Д. В. Аэрономическая модель водородно-гелиевых верхних атмосфер горячих экзопланет-гигантов // *Астрономический журнал*. – 2023. – т.100, №12. – с.1190-1209.
- [A2] Жилкин А. Г., Гладышева Ю. Г., Шематович В. И., Цуриков Г. Н., Бисикало Д. В. Влияние потока жесткого излучения звезды на структуру водородно-гелиевой верхней атмосферы горячего юпитера // *Астрономический журнал*. – 2024. – т.101, №11. – с.938-953.

- [A3] Жилкин А. Г., Гладышева Ю. Г., Шематович В. И., Цуриков Г. Н., Бисикало Д. В. Влияние вспышечной активности звезды на структуру водородно-гелиевой верхней атмосферы горячего юпитера // *Астрономический журнал*. – 2024. – т.101, №9. – с.796-809.
- [A4] Гладышева Ю.Г., Жилкин А.Г. Структура верхней атмосферы горячего юпитера при различных соотношениях водорода и гелия // *Научные труды Института астрономии РАН*. – 2025. – т.10, №1. – с.18-23.
- [A5] Гладышева Ю. Г., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В. Химическая модель водородно-гелиевой оболочки горячего юпитера // *Научные труды Института астрономии РАН*. - 2022. - т.7, №3. - с.195-200.
- [A6] Gladysheva Y., Zhilkin A., Bisikalo D. Multi-component MHD model for hydrogen-helium extended envelope of hot jupiter // *Origins: Predictive Power for Computational Astrophysics as a Discovery Tool. Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 362*, pp. 167-168, 2023.
- [A7] Жилкин А. Г., Гладышева Ю. Г., Бисикало Д. В. Гидростатическая модель водородно-гелиевой атмосферы горячего юпитера // *Научные труды Института астрономии РАН*. - 2023. - т.8, №1. - с.26-33.
- [A8] Гладышева Ю. Г., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В. Образование энергетических нейтральных атомов в оболочках горячих юпитеров // *Научные труды Института астрономии РАН*. - 2023. - т.8, №1. - с.34-43.

Список литературы

1. Mayor M., Queloz D., *Nature* **378**, 355 (1995).
2. A. Vidal-Madjar, A. Lecavelier des Etangs, J. M. D’esert, G. E. Ballester, R. Ferlet, G. H’ebrard, and M. Mayor, *Nature*, **422**, 143, 2003.
3. R.I. Dawson, J.A. Johnson, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **56**, 175 (2018).
4. S.-J. Paardekooper, A. Johansen, *Space Science Reviews* **214**, 38 (2018).
5. S. Dash, M. Liton, K. Willacy, et al., *Astrophys. J.* **932**, id.20 (21 pp.) (2022).
6. B. Drummond, P. Tremblin, I. Baraffe, et al., *Astron. and Astrophys.* **594**, A69 (2016).
7. N. Madhusudhan, M. Agundez, J.L. Moses, Y. Hu, *Space Science Reviews* **205**, 1-4, 285 (2016).

8. S.-M. Tsai, J.R. Lyons, L. Grosheintz, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **228**, 20 (2017).
9. E.K.H. Lee, S.-M. Tsai, M. Hammond, et al., *Astron. and Astrophys.* **672**, id.A110 (13 pp.) (2023).
10. A.P. Showman, J.J. Fortney, Y. Lian, et al., *Astrophys. J.* **699**, 564 (2009).
11. J.I. Moses, C. Visscher, J.J. Fortney, et al., *Astrophys. J.* **737**, 15 (2011).
12. B. Drummond, N. J. Mayne, J. Manners, et al., *Astrophys. J.* **855**, L31 (2018).
13. A. Vidal-Madjar, A. Lecavelier des Etangs, J.-M. Desert, G.E. Ballester, et al., *Nature* **422**, 143 (2003).
14. L. Ben-Jaffel, *Astrophys. J.* **671**, L61 (2007).
15. G.B. Field, *Astrophys. J.* **142**, 531 (1965).
16. T. Yoneyama, *Publ. Astron. Soc. Japan* **25**, 349 (1973).
17. L. Ben-Jaffel, S. Sona Hosseini, *Astrophys. J.* **709**, 1284 (2010).
18. A. Vidal-Madjar, J. Desert, A. Lecavelier des Etangs, et al., *Astrophys. J.* **604**, L69 (2004).
19. A. Oklopčic, C.M. Hirata, *Astrophys. J.* **855**, L11 (2018).
20. E.N. Parker, *Astrophys. J.* **128**, 664 (1958).
21. R.A. Murray-Clay, E.I. Chiang, N. Murray, *Astrophys. J.* **693**, 23 (2009).
22. J.H. Guo, *Astrophys. J.* **733**, 98 (2011).
23. D.E. Ionov, V.I. Shematovich, Ya.N. Pavlyuchenkov, *Astron. Rep.* **61**, 387 (2017).
24. D.E. Ionov, Y.N. Pavlyuchenkov, V.I. Shematovich, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **476**, 5639 (2018).
25. R.V. Yelle, *Icarus* **170**, 167 (2004).
26. F. Tian, O.B. Toon, A.A. Pavlov, H. De Sterck, *Astrophys. J.* **612**, 1049 (2005).
27. A. Garcia Munoz, *Planet. Space Sci.* **55**, 1426 (2007).
28. T. Penz, N.V. Erkaev, Y.N. Kulikov, et al., *Planetary and Space Science* **56**, 1260 (2008).

- 29. T.T. Koskinen, J. Y-K. Cho, N. Achilleos, A.D. Aylward, *Astrophys. J.* **722**, 178 (2010).
- 30. I.F. Shaikhislamov, M.L. Khodachenko, Y.L. Sasunov, et al., *Astrophys. J.* **795**, 132 (2014).
- 31. I.F. Shaikhislamov, M.L. Khodachenko, H. Lammer, K.G. Berezutsky, A. G. , et al., *MNRAS* **481**, 5315 (2018).
- 32. L. Fossati, C.A. Haswell, C.S. Froning, L. Hebb, et al., *Astrophys. J.* **714**, L222 (2010).