

На правах рукописи



Руменских Марина Сергеевна

**ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРАНЗИТНЫХ ПОГЛОЩЕНИЙ В ЛИНИИ
МЕТАСТАБИЛЬНОГО ГЕЛИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР**

Специальность 1.3.6 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Шайхисламов Илдар Фаритович
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических наук
Снытников Валерий Николаевич,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Институт катализа
им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской
академии наук»

доктор физико-математических наук
Шематович Валерий Иванович
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук

Защита состоится «2» февраля 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.070.01, созданного на базе Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН
Института лазерной физики СО РАН <http://www.laser.nsc.ru/>

Автореферат разослан «20» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д.ф.-м.н. Прудников О.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На настоящее время оптические методы остаются единственными для изучения космических объектов за пределами Солнечной системы. Одними из самых новых и обсуждаемых в последнее время астрофизических объектов являются экзопланеты. Первая внесолнечная планета была открыта методом радиальной скорости – периодических смещений звездных спектральных линий. Подавляющее количество экзопланет обнаруживается методом транзитной оптической фотометрии, который представляет особенный интерес в контексте данной работы. Он дает обширную информацию об экзопланетарных системах. Этот метод заключается в регистрации изменения уровня поглощения излучения звезды при транзите планеты перед её диском. Помимо самого факта наличия экзопланет в звездной системе, этот метод предоставляет обширную информацию о составе и плотности атмосфер экзопланет путем сканирования поглощения излучения при транзите планеты перед диском звезды в спектральных диапазонах, соответствующих переходам между квантовыми состояниями различных атомов и молекул. Наиболее подходящим при этом оказывается оптический диапазон спектра.

Некоторые аспекты взаимодействия планетарных атмосфер и плазмосфер с излучением и ветром родительских звезд имеют четкие наблюдательные проявления. Чтобы выявить обусловленность наблюдательных проявлений конкретными физическими явлениями, необходимо привлекать численные модели, описывающие оптические свойства атмосфер экзопланет. Транзитные поглощения, воспроизведенные такими моделями, сравнивают с данными оптических приборов - телескопов, и на основании сравнения делают вывод об особенностях атмосферы и физико-химических условиях вокруг экзопланет. А именно, для моделирования выбираются объекты с надежно детектированными транзитными поглощениями, а также известными и надежно измеренными доступными параметрами систем, как было сделано и в настоящей работе.

Актуальность настоящей работы продиктована впечатляющими успехами мирового научного сообщества в получении космическими и наземными телескопами данных наблюдений экзопланет с одной стороны, и недостатке физических моделей, описывающих оптические и спектральные свойства атмосфер экзопланет при заданных физико-химических условиях, с другой. Транзитные измерения позволяют определить свойства и состав атмосфер экзопланет, но для этого необходимо достаточно сложное численное моделирование. Помимо этого, сравнение результатов измерений с моделированием позволяет оценить такие важные характеристики, недоступные для других методов, как интенсивность плазменного ветра звезды, интенсивность излучения в области ультрафиолета и мягкого рентгена, роль

радиационного давления излучения на атомы планетарной атмосферы и прочее. Также необходимо упомянуть об эволюции планетарных атмосфер, существовании миров, пригодных для жизни, и поиска биомаркеров. Возрастной ряд экзопланет, как уже обнаружено, также обширен, как и у звезд. Таким образом, характеристика и анализ особенностей их атмосфер в зависимости от возраста дает картину эволюции экзопланет. Кроме того, апробация различных оптических и спектральных методик диагностирования биомаркеров будет происходить именно на горячих экзопланетах. Изучение каменистых экзопланет земного типа, хоть еще и недоступно непосредственно, уже сейчас проходит этап разработки методов детектирования параметров космической погоды и свойств атмосфер на примере именно горячих газовых экзопланет.

Актуальность настоящей работы обусловлена следующими задачами, имеющими междисциплинарный и общенаучный интерес:

- Определение параметров и состава атмосфер экзопланет методом моделирования оптических транзитов и спектральных поглощений
- Исследование космической погоды в звездных системах с экзопланетами
- Эволюция планетных атмосфер
- Тестирование спектральных методов для потенциальных биомаркеров

Цель диссертационной работы.

Определение физико-химических условий внесолнечных планетарных систем по оптическим транзитным поглощениям в триплетной линии $\text{HeI}(2^3S)$ метастабильного гелия.

Задачи

- Выявление механизмов заполнения гелием верхних атмосфер экзопланет и основных процессов заселения и депопуляции метастабильного уровня гелия в различных областях плазмоферы
- Расчет оптических транзитных поглощений в триплетной линии $\text{HeI}(2^3S)$ метастабильного гелия для конкретных планетарных систем. Оценка параметров атмосферы и звездного ветра из сопоставления результатов моделирования с транзитными измерениями
- Анализ характеристик планетарных систем, для которых наблюдение в линии метастабильного гелия наиболее перспективно с точки зрения обнаружения оптических транзитных поглощений
- Исследование влияния радиационного давления излучения звезды на наблюдательные проявления оптических транзитных поглощений горячих экзопланет

Научная новизна

Впервые получены следующие результаты:

- Показана значимость учета особенностей коротковолнового и оптического спектра звездного излучения при расчете транзитных поглощений горячих экзопланет в линии метастабильного гелия.
- Показано, что транзитные поглощения излучения звезд верхними атмосферами горячих экзопланет в линии $\text{HeI}(2^3\text{S})$ на длине волны 1083 нм дают количественную информацию об интенсивности ионизирующего излучения звезды (F_{XUV}) и относительном содержании гелия (He/H) в атмосферах планет.
- Оценены параметры планетарных атмосфер, а также интенсивность звездного ветра (M_{sw}), у ряда горячих экзопланет с использованием трехмерной глобальной гидродинамической модели верхних атмосфер горячих экзопланет.
- Установлено, что для некоторых экзопланет заселение уровня метастабильного гелия происходит в ударном слое за счет столкновений атомов $\text{HeI}(1^1\text{S})$ с горячими электронами звездного ветра и, таким образом, должно учитываться при интерпретации данных наблюдений.
- Установлено, что для некоторых экзопланет на оптическую толщину и контур линии поглощения $\text{HeI}(2^3\text{S})$ значительное влияние оказывает радиационное ускорения метастабильных атомов гелия и, таким образом, должно учитываться при интерпретации данных наблюдений.

Новизна настоящей работы обусловлена использованием уникальной численной модели, не имеющей аналогов в мире. Она отличается от инструментов других групп учетом естественной трехмерной сферической геометрии задачи. Модель обеспечивает самосогласованный расчет планетарного течения многокомпонентной плазмы с учетом полного набора реакций водородно-гелиевой плазмофотохимии верхних слоев атмосферы горячих экзопланет. Поглощающий элемент – атом метастабильного гелия – рассчитывается как отдельная жидкость, с учетом собственной температуры и скорости, что особенно важно, поскольку эффект Допплера является ключевым в уширении и смещении спектрального профиля транзитных поглощений.

Методы исследования. Расчеты спектральных транзитных поглощений численной трехмерной самосогласованной глобальной гидродинамической моделью. Модель основана на решении многожидкостной динамической системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии в трехмерной сферической неинерциальной системе отчета с учетом сил гравитации и Кориолиса, светового давления, а также процессов плазмо-фотохимии атмосферных компонент, поглощения и переноса спектрального излучения

звезды. Сравнение расчетов с измерениями, полученными на крупнейших оптических телескопах мира.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов основана на сравнении с результатами других работ, комплекса использованных методов, зарекомендовавших себя на решении ряда задач, связанных с интерпретацией транзитных поглощений горячих экзопланет в линиях различных элементов, таких, как SiIII, CII, OI, MgI, FeII. Результаты численного моделирования, полученные с использованием трехмерного гидродинамического кода, сравниваются с результатами моделей, выполненными с использованием других подходов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Поглощение в линии метастабильного гелия 1083 нм может формироваться как в верхней атмосфере экзопланеты, где метастабильный гелий образуется в результате фото-ионизации атома и его последующей рекомбинации, так и в ударном слое звездного ветра за счет прямого возбуждения атомов горячими электронами. При этом нижние слои атмосферы не дают вклада в поглощение из-за эффективного девозбуждения в столкновениях с атомами и молекулами.

2. Спектральные профили оптических транзитных поглощений в линии метастабильного гелия дают количественную информацию о потоке ионизирующего излучения звезды и относительном содержании гелия в атмосфере планеты. Впервые оценены параметры планетарных атмосфер у ряда горячих экзопланет и установлено, что содержание гелия у газовых экзопланет варьируется от стандартного солнечного ($\text{He/H}=0.1$) до величин примерно на порядок меньше.

3. На примере экзопланет GJ436b и Wasp107b установлено, что оптическое давление излучения звезд оказывает влияние на динамику метастабильных атомов гелия в верхней атмосфере, и должно учитываться в моделировании транзитных поглощений в линии HeI(2^3S).

Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость:

- Впервые проведен комплексный анализ факторов и процессов, влияющих на населенность метастабильного уровня гелия в условиях атмосфер горячих экзопланет
- Впервые выявлены физические параметры, которые наиболее сильно влияют на транзитное поглощение в линии метастабильного гелия

- Впервые показано, что для адекватной интерпретации оптического поглощения в линии метастабильного гелия необходимо учитывать эффект ускорения атомов радиационным давлением
- Сделано обобщение результатов моделирования конкретных экзопланет с выводами по группе горячих экзопланет в целом
- Получили дальнейшее развитие существующие представления о динамике и содержании отдельных химических элементов в верхней атмосфере и экзосфере экзопланет, характере их взаимодействия со звездным ветром

Практическая значимость:

- Развиты алгоритмы интерпретации оптических наблюдений телескопами
- Сделана количественная оценка физико-химических параметров атмосфер ряда экзопланет, включая содержание гелия
- Сделана количественная оценка параметров космической погоды – интенсивности ионизующего излучения и плазменного ветра звезд. Сравнение разных звезд расширяет наши представления о возможных проявлениях Солнечной космической погоды
- Разработаны методы, которые в дальнейшем могут быть применены в задаче поиска биомаркеров

Представленные в докторской диссертации исследования проводились в рамках проектов РФФИ 20-02-00520, 19-12-50043, 18-32-00029 и РНФ 18-12-00080, 21-72-00129, 23-12-00134, а также программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” Национального центра физики и математики.

Личный вклад. Все результаты, изложенные в докторской диссертации, получены автором лично, либо при её непосредственном участии. Автором был определен выбор объектов, результаты которых положены в основу работы, а также проведен самостоятельный анализ оптических, химических и гидродинамических явлений, оказывающих влияние на транзитные поглощения. Автор принимала участие в разработке численного блока по расчету оптических поглощений в линии метастабильного гелия, проверяла допустимость аппроксимаций и производила расчет влияния ряда оптических эффектов, связанных с непосредственным измерением транзитных поглощений телескопами.

Апробация работы

Результаты работы обсуждались на семинарах Института лазерной физики СО РАН, Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Института космических исследований РАН, Института астрономии РАН, Главной астрономической обсерватории РАН.

Результаты работы были представлены на 18 конференциях:

Moscow Solar system symposium (2019, 2020, 2021, 2022); IV Russian Conference on Magnetohydrodynamics (2021); Всероссийская астрономическая конференция с международным участием "Магнетизм и активность Солнца и звезд" (2021, 2022); Всероссийская школа «Исследования звезд с экзопланетами» (2020, 2021); Международный симпозиум «Люминесценция и лазерная физика» (2019); International symposium “Modern problem of laser physics”, ILP SB RAS, Novosibirsk (2021); международная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, ИКИ РАН, Москва (2019, 2021, 2022, 2023); ФизикА Спб (2021); COSPAR-22 44th scientific assembly, Greece (2022); 20th Annual meeting AOGS-23, Singapore (2023); Asia-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM-23), Japan (2023).

Публикации

Основной материал диссертации опубликован в **28** печатных изданиях, из которых **13** изданы в журналах, рекомендованных ВАК, **12** - в трудах конференций.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы 127 страниц, включая 27 рисунков, 9 таблиц; список литературы содержит 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** описывается обусловленность выбора объекта исследования. В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** описывается актуальность темы исследования, современное состояние исследований в данной области, производится постановка целей и задач, оговариваются методы исследования, показывается теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту. В **разделе 1.2** приводится краткий анализ ключевых работ, оказавших основное влияние на развитие представлений и методах интерпретации оптических и спектральных транзитных поглощений. После обнаружения экзопланет на близких орбитах, в работе [1] было впервые показано, что богатая водородом атмосфера таких объектов будет нагреваться интенсивным ионизующим излучением родительской звезды (далее XUV, $\lambda \leq 912\text{A}$) до нескольких тысяч градусов Кельвина, что приведет к газодинамическому ускорению и истечению и отразится на оптических транзитных поглощениях.

В том же 2003 году было впервые зарегистрировано на телескопе Хаббл значительное спектральное поглощение в ультрафиолетовой линии Ly α , происходящее во время транзита горячего юпитера – HD209458b ([2], [3]). Оптическая глубина поглощения $\sim 10\%$ указывала на существование плотной водородной оболочки, в три раза превышающей радиус планеты. В дальнейшем аналогичные данные были зарегистрированы для горячих юпитеров HD189733b ([4], [5]) и Cnc55b [6], которые подтвердили существование сильно раздутых верхних атмосфер горячих экзопланет. Однако исследование атмосфер экзопланет с использованием линии Ly α не всегда возможно по причине того, что эта линия не проходит через оптически плотную в данной спектральной области атмосферу Земли, искажается за счет оптического эффекта геокорональной эмиссии, и может быть исследована только посредством космических телескопов, и только для относительно близких звезд, поскольку еще подвержена значительному поглощению межзвездной средой.

Как было предсказано в работе [7], инфракрасная линия $\lambda=1083$ нм атомарного гелия в триплетном переходе $2^3S \rightarrow 2^3P$ нижний уровень которого HeI(2^3S) является метастабильным, дает альтернативный инструмент оптического зондирования, лишенный указанных выше недостатков. Интенсивность излучения в указанном ИК диапазоне высока для большинства звезд, что обеспечивает необходимую величину оптического сигнала. Гелий – второй по распространенности элемент во вселенной и его наличие в атмосферах газовых планет ожидаемо. Из-за отсутствия поглощения в межзвездной среде и атмосферой Земли эта линия может наблюдаться наземными оптическими ИК телескопами с гораздо большей чувствительностью в течении гораздо большего времени и, соответственно, с гораздо большим соотношением сигнал/шум (S/N). В пионерской работе [8] было впервые проведено, в качестве прогноза, численное моделирование транзитных поглощений в линии HeI(2^3S) для планет GJ436b и HD209458b. Для описания планетарного течения авторами использовалась простейшая модель Паркеровского ветра, не учитывался ряд ключевых физических процессов, а потому оценки оптических поглощений из работы [8] не показали соответствия данным наблюдений как для GJ436b [9], так и HD209458b [10]. Несмотря на это, исследования по данному направлению продолжили другие группы, особенно после первого надежного обнаружения поглощения в линии метастабильного гелия, полученного для экзопланеты Wasp107b [11].

В настоящей работе проводится анализ транзитов горячих экзопланет в линии $\lambda=1083$ нм метастабильного гелия, физико-химических условий, влияющих на особенности оптических профилей поглощения, и на основании численного моделирования трехмерным многожидкостным газодинамическим кодом делаются оценки параметров планетарных систем. **Раздел 1.3 Введения** посвящен постановке целей и соответствующих задач, **раздел 1.4** посвящен описанию основных пунктов новизны настоящей работы, в **разделах 1.5 и 1.6**

обсуждаются теоретическая и практическая значимость работы, а в **разделе 1.7** описаны методы исследования.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена особенностям численного моделирования оптических транзитных поглощений верхних атмосфер горячих экзопланет. В **разделе 2.1** представлены системы уравнений, на решении которых основана численная трехмерная глобальная гидродинамическая модель с учетом переноса излучения и широкого ряда уравнений водородно-гелиевой плазмо-фотохимии модель. Основные гидродинамические уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} n_j + \nabla(V_j n_j) &= S_{XUV,j-1} + n_{j+1} n_e \gamma_{rec,j+1} + n_{j-1} n_e V_{Te} \sigma_{ion,j-1} \\ &- S_{XUV,j} - n_j n_e \gamma_{rec,j} - n_j n_e V_{Te} \sigma_{ion,j} \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} V_j + (V_j \nabla) V_j = -\frac{1}{\rho_j} \nabla n_j k T_j - \frac{Z_j}{\rho_j} n_e k T_e + \nabla G - 2V_j \times \Omega - \Sigma C_{ji}^V (V_j - V_i) \quad (2.1.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} T_j + (V_j \nabla) T_j + (\gamma - 1) T_j \nabla V_j = \Sigma C_{je}^T (T_i - T_j) - C_{je}^T (T_j - T_e) \quad (2.1.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} T_e + (V_e \nabla) T_e + (\gamma - 1) T_e \nabla V_e = W_{XUV} + \Sigma C_{je}^T (T_j - T_e) - W_{cool} \quad (2.1.4)$$

В уравнении (2.1.1) учтены процессы фотоионизации, рекомбинации и ударной ионизации, приводящие к изменению ионного состояния элементов. В уравнении (2.1.2) включена гравитация планеты и звезды, сила Кориолиса и столкновительный обмен импульсами между частицами. В уравнениях (2.1.3) и (2.1.4) учтены процессы столкновительного обмена энергии между частицами, включая электроны, а также нагрев фотоэлектронами в результате фотоионизации. Предполагается квазинейтральность плазмы, $n_e = \sum Z_j n_j$. Далее приводится соответствующий ряд численных, начальных и граничных условий, описание включенных в модель уравнений водородно-гелиевой плазмо-фотохимии, а также физических процессов, влияющих на истечение планетарного вещества, в порядке значимости.

Раздел 2.2 посвящен особенностям численного решения уравнений, описывающих оптический процесс переноса излучения звезд в атмосферах горячих экзопланет. Поглощение излучения в атмосферах горячих экзопланет:

$$Absorption = 1 - \frac{I_{transit,v}}{I_{out,v}} = \frac{1}{\pi R_{St}^2} \int (1 - e^{-\tau}) \cdot dS \quad (2.2.1)$$

где оптическая толщина:

$$\tau(V) = \int_L^{-L} dz \cdot n_H \cdot \sigma_{abs}(V, V_z, T) \quad (2.2.2)$$

а сечение поглощения в рассматриваемых условиях определяется Фойгхтовским интегралом Фойгхта H по следующей формуле:

$$\sigma_{abs} = f_{12} \sqrt{\pi} \frac{e^2}{m_e c^2} \cdot \frac{c}{\Delta v_D} \cdot H = f_{12} \sqrt{\pi} \frac{e^2 \lambda_o}{m_e c^2} \cdot \sqrt{\frac{m_p c^2}{2kT}} \cdot H \quad (2.2.3)$$

Профиль Фойгхта линии поглощения Максвелловским ансамблем атомов определяется следующим образом:

$$H = \frac{1}{\pi} \alpha \int \frac{e^{-y^2}}{(x-y)^2 + \alpha^2} dy \quad (2.2.4)$$

Где f_{12} – сила осциллятора, $\alpha = \Delta v_L / 2 \Delta v_D = \frac{\Delta v_L}{v_o} \sqrt{\frac{m_p c^2}{8k}}$, $x = \frac{V - V_z}{\sqrt{\frac{2k}{m_p}}}$, V_z – скорость

вдоль луча зрения.

Для определения поглощения в линии необходимо знать распределение плотности, скорости и температуры поглощающего вещества вдоль луча зрения. Для этого решаются уравнения (2.1.1-2.1.4) с учетом реакций гелиевой плазмофотохимии.

В разделе 2.3 подробно обсуждаются физико-химические процессы, ответственные за возбуждение и девозбуждение уровня метастабильного гелия $\text{HeI}(2^3S)$ – рекомбинация, электронные и атомные столкновения, фотоионизация.

В разделе 2.4 представлены выводы по второй главе.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены рассчитанные профили характерных величин и скоростей реакций и результаты интерпретации транзитных измерений планетарных систем HD189733b, GJ436b и G3470b. **Раздел 3.1** посвящен анализу особенностей заселения уровня $\text{HeI}(2^3S)$ в атмосфере горячего юпитера HD189733b.

Экзопланета HD189733b является хорошо изученным объектом. С достаточной точностью известны масса и радиус самой планеты и ее родительской звезды, температура поверхности, и некоторые спектральные области излучения HD189733A. Для моделирования оптических транзитов планеты измеренные величины принимались в качестве постоянных, а остальные, неизвестные – в качестве свободных параметров в рамках разумного диапазона вариаций. Конкретные параметры моделирования в различных расчетах представлены в таблице 1. В качестве спектрального распределения энергии излучения звезды (SED) использовался синтетический спектр, рассчитанный специально для HD189733A с помощью кода звездной атмосферы LLmodels [20]. Поток

излучения в области XUV составляет $F_{\text{XUV}} \sim 25$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ на расстоянии 1 астрономической единицы (AE).

N	F_{XUV}	He/H	M'_{sw} 10^{10}г/с	M'_{pw} 10^{10}г/с	Максимум поглощения, %	Полуширина поглощения, км/с	F_{1083}	F_{VUV}
1	7.5	0.006	10	10.6	0.9	19.1	20	10^3
2	15	0.006	10	17.1	1.1	21	20	10^3
3	25	0.006	10	24.7	1.35	21.2	20	10^3
4	40	0.006	10	35.8	1.6	21.9	20	10^3
5	55	0.006	10	46.3	1.75	22.2	20	10^3
6	7.5	0.005	10	7.5	0.77	19.2	20	10^3
7	20	0.005	10	16.2	1.1	22.4	20	10^3
8	25	0.003	10	21.6	0.8	22	20	10^3
9	55	0.003	10	40.4	1.05	22.4	20	10^3
Наблюдения					1.1 ± 0.1 1*	22.5 ± 1 *	20	10^3
					0.7 ± 0.1 2*	27.2 ± 2 *		

Таблица 1. Список расчетов с соответствующими параметрами моделирования и рассчитанными характеристиками поглощения. В нижней строке указаны измеренные значения максимума поглощения, представленные в работах: (1*) – [22], (2*) – [23]

На правой панели рисунка 1 показаны распределения основных характерных физических величин в атмосфере HD189733b, полученные в расчете №1: плотности, скорости и температуры планетарного вещества вдоль оси планета–звезда. Из-за высокой гравитации планеты скорость истечения относительно низкая, а температура достигает 15000 К довольно близко к планете. Левая панель рисунка 1 демонстрирует типичное двумерное распределение атомов метастабильного гелия вокруг планеты. На рисунке видно, что планетарное вещество вытекает за полость Роша ($\sim 3 R_p$) и растекается вдоль орбиты.

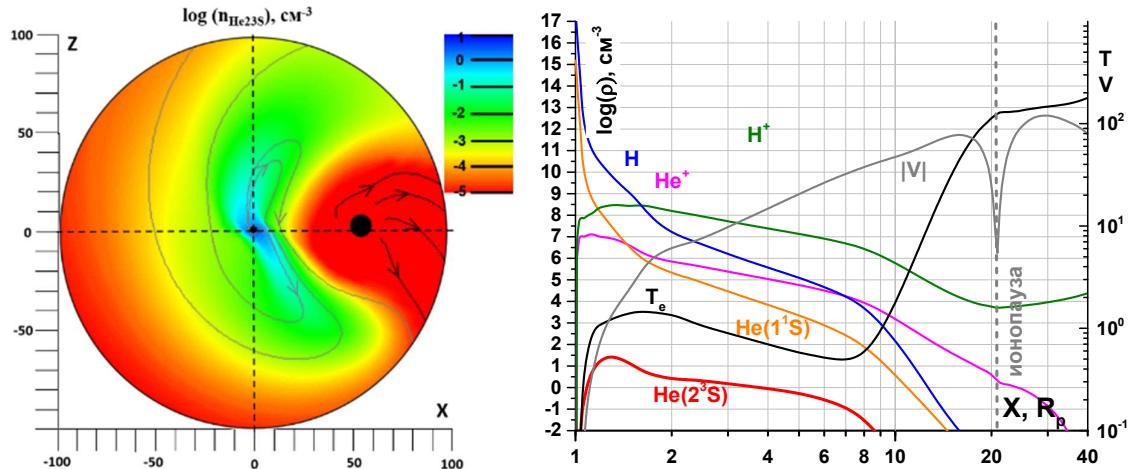


Рисунок 1. Слева: распределение плотности метастабильного гелия в атмосфере планеты HD-189733b. Справа: распределение основных компонент атмосферы в зависимости от расстояния. Все масштабы выражены в радиусах планеты

На левой панели рисунка 2 показаны скорости химических процессов, увеличивающие и уменьшающие населенность метастабильного уровня гелия

$\text{HeI}(2^3\text{S})$. Видно, что рекомбинационную накачку из ионизированного гелия He^+ в состояние $\text{HeI}(2^3\text{S})$ балансируют автоионизационные столкновения с атомами Н на малых высотах $r < 1.3R_p$, и столкновительное девозбуждение электронами на больших высотах.

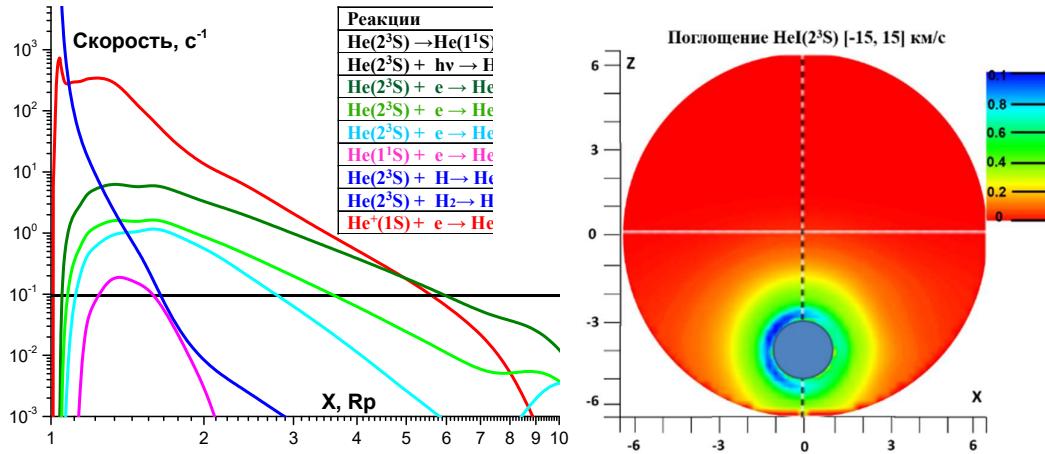


Рисунок 2. Слева: распределение скоростей реакций вблизи экзопланеты HD189733b в расчете с параметрами №2. Справа: распределение поглощения метастабильного гелия в окрестности планеты по диску звезды

Интерпретация наблюдаемых транзитных поглощений в линии метастабильного гелия с расчетами позволила оценить параметры планетарной атмосферы и звездного ветра следующими значениями: содержание гелия $\text{He}/\text{H} \sim 0.03 \div 0.05$, $F_{\text{XUV}} \sim 7.5 \div 55$, $M_{\text{sw}} \sim 10^{11} \div 2 \cdot 10^{12}$ г/с. Умеренный звездный ветер не влияет на профиль поглощения, в то время как сильный ветер значительно уменьшает поглощение в красном крыле линии, которое соответствует течению поглощающего вещества к звезде, а также общую ширину и глубину профиля.

На рисунке 3, слева видно, что моделируемая глубина поглощения и, в меньшей степени, ширина профиля поглощения увеличиваются с увеличением потока XUV. Это связано с более эффективной ионизацией гелия, которое приводит к увеличению скорости рекомбинации, и большей скоростью течения планетарной атмосферы. Таким образом, разницу в уровне поглощения в 1.5 раза между измерениями [22] и [23], выполненными в разное время, можно объяснить переменностью звездного XUV-излучения в пределах естественных временных вариаций.

На правой панели рисунка 3 отображены результаты двух сценариев, подобранных на соответствие двум различным измерениям. Первый сценарий предполагает более высокий поток XUV, необходимый для воспроизведения поглощения около 1% в центре линии $\text{HeI}(2^3\text{S})$ и с шириной линии, соответствующим измерениям [22]. Второй сценарий задает поток XUV, чтобы соответствовать поглощению около 0.7% в центре линии,

измеренному [23]. Обоим сценариям соответствует относительно низкое содержание гелия, $\text{He/H} \sim 0.003 \div 0.005$.

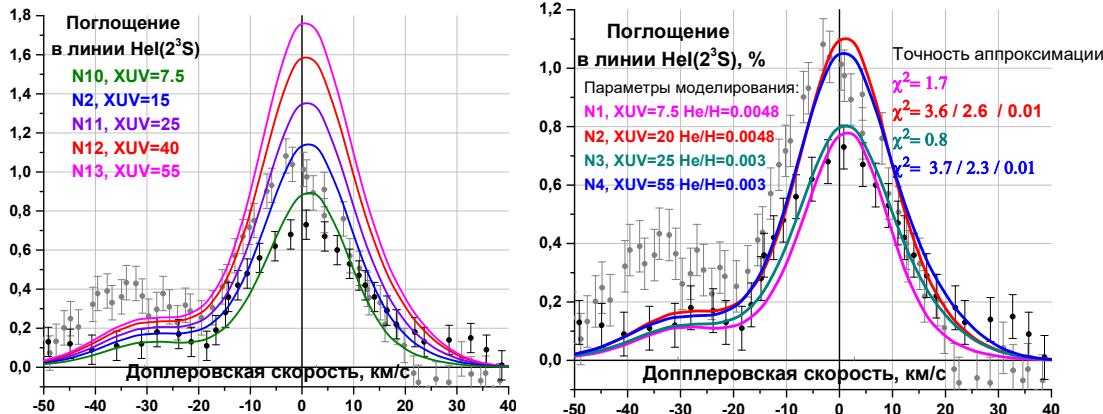


Рисунок 3. Слева: Поглощение в линии HeI (2^3S) при различной величине ионизующего излучения звезды. Справа: Сравнение расчетных поглощений при различных значениях интенсивности XUV-излучения и содержания гелия с данными двух наблюдений ([22]- серые точки, [23]- черные)

Разделы 3.2 и 3.3 посвящены описанию оптических и столкновительных процессов, приводящих к возбуждению и девозбуждению уровня HeI(2^3S) в атмосферах планет GJ436b и GJ4370b. В **разделе 3.4** представлены выводы по третьей главе.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА содержит ряд моделей оптических транзитных поглощений, выполненных для оценки физико-химических параметров систем HD189733b, Wasp69b и HD209458b. **Раздел 4.1** посвящен оценке параметров физико-химических условий в окрестности экзопланеты HD189733b, а **разделы 4.2 и 4.3** описывает результаты моделирования Wasp69b и HD209458b.

В таблице 2 приведены параметры, моделирующие различные сценарии взаимодействия планетарной атмосферы Wasp69b с излучением и ветром родительской звезды.

N	F _{XUV} [erg cm ⁻² s ⁻¹], на 1 АЕ	M' _{sw} [×10 ¹⁰ g/s]	He/H	M' _p [×10 ¹⁰ g/s]	Полуширина, км/с	Максимум поглощения, %
1	1	10	0.1	1.82	11.68	1.52
2	3	10	0.1	5.3	12.08	2.55
3	7	10	0.1	11.35	16.46	3.5
4	5	10	0.15	8.6	15.43	3.8
5	3	10	0.2	5.5	14.68	3.46
Наблюдения					17.8	3.53

Таблица 2. Список параметров моделирования с рассчитанными поглощениями в линии метастабильного гелия для экзопланеты Wasp69b

Для Wasp69b была обнаружена существенная корреляция между интенсивностью XUV излучения и поглощением в линии метастабильного гелия, что указывает на ключевую роль рекомбинационных процессов в заселении уровня метастабильного гелия. Скорость истечения планетарного вещества, формирующая Допплеровский профиль поглощения линии (рисунок 4, слева), также определяется звездным XUV излучением. Таким образом, сравнение оптических профилей поглощения с измеренными в работе [20] позволяет ограничить параметр F_{XUV} значениями $4 \div 7$ эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ (рисунок 4, справа). В этих расчетах применялось значение скорости потери массы звездного вещества 10^{11} г/с, оцененное в работе [21].

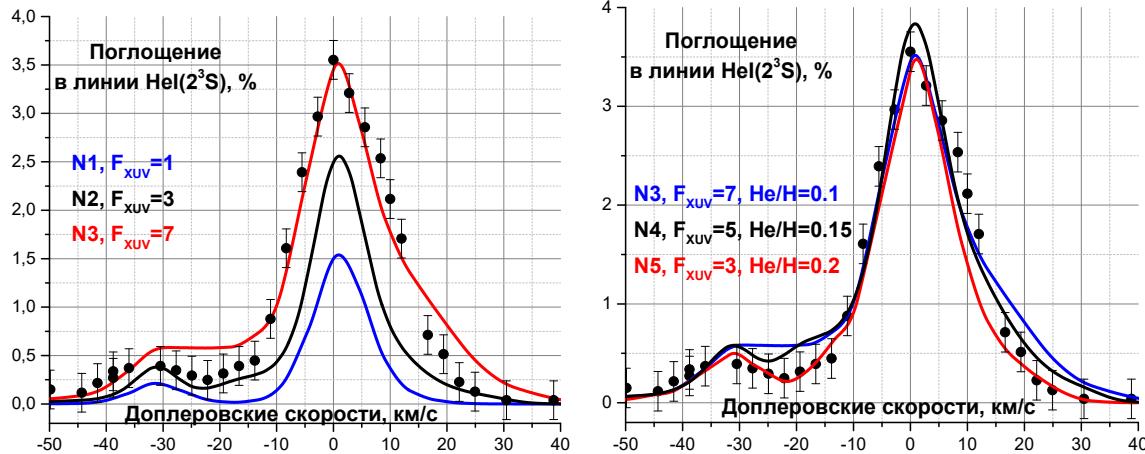


Рисунок 4. Слева: профили поглощения в линии HeI(2³S), смоделированные для разных значений потока XUV излучения при стандартном содержании гелия He/H=0.1. Справа: сравнение расчетного поглощения с наблюдениями (черные точки, [20]) при различных значениях интенсивности XUV излучения и содержания гелия.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ обсуждается важность учета радиационного давления звезды в окрестности линии 1083 нм для интерпретации транзитных поглощений горячих экзопланет в линии HeI(2³S). Выводам, сделанным на примере данных измерений экзопланет GJ436b и Wasp107b, посвящены **разделы 5.1 и 5.2**. В работе [17] были определены параметры, при которых достигается наилучшее соответствие между моделированием и измерениями транзитов экзопланеты GJ436b в водородной линии Lyα. Среди них – скорость звездного ветра $V_{\text{sw}}=540$ км/с, интегральный поток звездной плазмы $M'_{\text{sw}}=2.5 \cdot 10^{11}$ г/с, а также интенсивность ионизирующего излучения звезды $F_{\text{XUV}}=0.86$ эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ на 1 АЕ. Эти параметры использовались как исходные для анализа поглощения в линии HeI(2³S). При реальные звездные системы могут быть подвержены времененным вариациям. Для выявления влияния изменения различных характеристик и ветра родительской звезды, а также состава атмосферы GJ436b на оптические транзитные поглощения в линии HeI(2³S) были выполнены моделирования с различными наборами параметров.

N	F_{XUV} , erg·cm $^{-2}$ ·s $^{-1}$	M'_{sw}	He/H	F_{10830} , erg·cm $^{-2}$ ·s $^{-1}$ Å $^{-1}$	M'_{pw}	Полуширина, км/с	Максимум поглощения, %
1	0.86	25	0.03	3	0.59	12	0.74
2	0.86	25	0.1	3	0.74	14.1	2.1
3	0.86	25	0.2	3	0.77	15.6	2.7
4	0.86	25	0.03	0.3	0.58	11.6	1.2
5	0.86	25	0.03	20	0.6	12.1	0.36
Наблюдения							< 0.2

Таблица 3. Наборы параметров моделирования GJ436b. В последнем ряду - данные наблюдений из [21]

Расчеты оптических транзитов с разным содержанием гелия (N1-3) показывают, что увеличение концентрации гелия в атмосфере GJ436b в диапазоне He/H=0.03÷0.2 практически не влияет на интенсивность истечения планетарного вещества (таблица 3, колонка M'_{pw} , значения даны в ед. 10^{10} г/с). При этом транзитное поглощение в линии HeI(2^3S) заметно растет, но значительно медленнее, чем линейным образом.

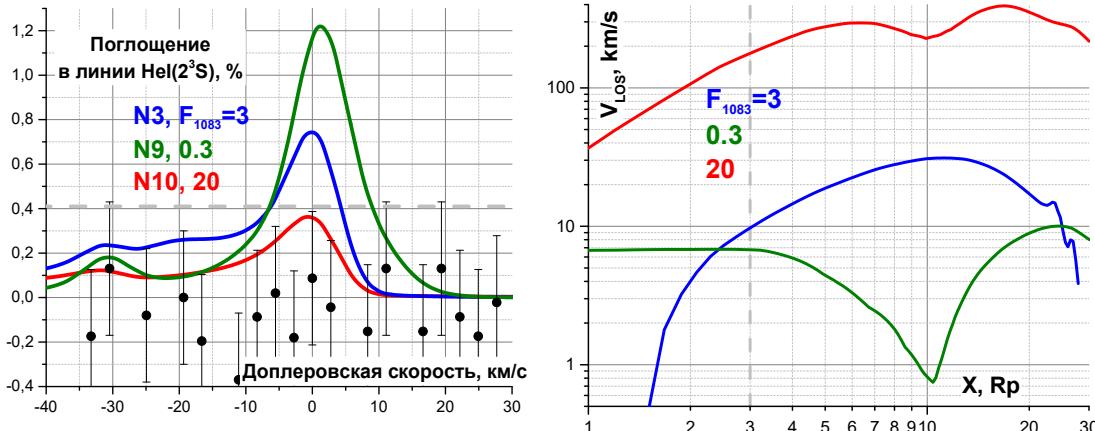


Рисунок 5. Оптические профили поглощения HeI(2^3S) (слева) и проекция скорости атомов метастабильного гелия на ось наблюдения, рассчитанные с наборами параметров (N1, N4 и N5) с разными потоками F_{1083} , т. е. разными силами радиационного давления, действующими на атомы HeI(2^3S).

Наблюдения оптических транзитных поглощений, полученные в работе [9] показаны черными точками, серая пунктирная линия – верхний предел необнаружения поглощения.

Перейдем к анализу оптического эффекта радиационного давления на атомы HeI(2^3S). Для этого, помимо моделирования с измеренным для GJ436 значением потока излучения в окрестности 1083 нм $F_{1083} = 3$ эрг $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}\text{\AA}^{-1}$ на расстоянии 1 АЕ от звезды (N1), были выполнены расчеты с наборами параметров N4 и N5 с более низким и более высоким потоком F₁₀₈₃ соответственно. Моделирование

показало, что сила оптического давления излучения ближнего ИК-диапазона действительно вызывает заметное ускорение метастабильных атомов гелия, и связанное с этим транзитное поглощение (таблица 3). В частности, в случае типичного потока $F_{1083} = 3 \text{ эрг с}^{-1}\text{см}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$ на 1 АЕ сила радиационного давления на порядок превышает силу звездного притяжения и ускоряет атомы HeI(2^3S) до скоростей $\sim 30 \text{ км/с}$ (синяя линия на правой панели рисунка 5).

В работе [20], посвященной моделированию оптических транзитных поглощений в линии HeI(2^3S) в атмосфере GJ436b простой полуаналитической одномерной моделью величина поглощения (8%) на порядки превосходила верхний оптический предел не обнаружения поглощения (0.2%), полученный из измерений. Одной из причин был не учет в работе [20] радиационного давления. Ускорение радиационным давлением приводит к тому, что метастабильные атомы гелия становятся рассеянными по более широкой области вдоль оси наблюдения. По результатам моделирования можно сделать вывод, что учет силы радиационного давления излучения и соответствующий расчет ускорения, безусловно необходим для корректного описания динамики атомов HeI(2^3S) и транзитного поглощения в линии 1083 нм в атмосфере планеты GJ436b.

В разделе 5.3 представлены выводы по пятой главе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Оптические транзитные поглощения горячих экзопланет в триплетной инфракрасной линии HeI(2^3S) на длине волны 1083 нм, измеренные с использованием наземных телескопов, предоставили новую возможность спектрального зондирования параметров экзопланетных систем. Моделирование данных наблюдений в этой линии дали новый импульс в развитии существующих моделей и физических сценариев взаимодействия атмосфер экзопланет с излучением и ветром родительских звезд, а в будущем могут быть использованы для исследования атмосфер землеподобных планет, их эволюции и, потенциально, поиска биомаркеров.

Основные выводы настоящей работы:

1. Моделирование оптических транзитных поглощений горячих экзопланет позволило оценить физико-химические параметры в окрестности следующих планетарных систем: HD189733A, HD209458, Wasp107, Wasp69, GJ3470.
2. Показано, что транзитные поглощения в линии метастабильного гелия дают количественную информацию об интенсивности ионизирующего излучения звезды и относительном содержании гелия в атмосферах планет.
3. Поглощение в центре линии HeI(2^3S) с малыми допплеровскими скоростями $<1 \text{ км/с}$ образуется не вблизи фотометрических радиусов

планет, а на высотах более $0.2R_p$, что позволяет оптически зондировать верхнюю атмосферу планеты.

4. В основном поглощение в линии метастабильного гелия сосредоточено в области $0.2 < r < 3R_p$, то есть относительно близко к планетам. Однако для некоторых систем поглощение образуется в области ударной волны, что позволяет ее использовать для определения параметров звездного ветра.
5. Оптическая толщина верхней атмосферы горячих экзопланет в линии HeI(23S) обусловлена совместным действием ряда кинетических процессов - рекомбинация, столкновения с электронами и атомами, излучение и фотоионизация, каждый из которых играет важную роль в разных пространственных областях и обуславливает необходимость применения для интерпретации данных наблюдений комплексных трехмерных моделей.
6. Радиационное давление излучения звезды на атомы метастабильного гелия является важным фактором и должно учитываться при численном моделировании оптических транзитных поглощений горячих экзопланет.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

- 1 Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф. (2024) Исследование оптических свойств атмосфер горячих экзопланет численным моделированием транзитных поглощений в линии He I 10830 Å. Оптика атмосферы и океана, 37(1)
- 2 Rumenskikh M.S., Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Miroshnichenko, I.B., Berezutsky A. G., Shepelin A.V., Dwivedi N.K. (2023). Mysterious non-detection of He i (23S) transit absorption of GJ 436b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 526(3), 4120-4129.
- 3 Fossati L., Pillitteri I., Shaikhislamov, I.F. Bonfanti, A., Borsa F., Carleo I., Rumenskikh M.S. (2023). Possible origin of the non-detection of metastable He I in the upper atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b. Astronomy and Astrophysics, 673, A37.
- 4 Rumenskikh M.S., Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Miroshnichenko I.B., Berezutsky A.G., Fossati L. (2022). Global 3D Simulation of the Upper Atmosphere of HD189733b and Absorption in Metastable He I and Ly α Lines. The Astrophysical Journal, 927(2), 238.
- 5 Fossati L., Guilluy G., Shaikhislamov I. F., Carleo I., Borsa F., Bonomo A. S., Rumenskikh M.S., Stoev H. (2022). The GAPS Programme at TNG-XXXII. The revealing non-detection of metastable He I in the atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b. Astronomy & Astrophysics, 658, A136.

- 6 Berezutsky A.G., Shaikhislamov I.F., Rumenskikh M.S., Khodachenko M.L., Lammer H., Miroshnichenko I.B. (2022). On the transit spectroscopy features of warm Neptunes in the TOI-421 system, revealed with their 3D aeronomy simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515(1), 706-715.
- 7 Fossati, L., Khodachenko, M. L., Guilluy, G., Bonomo, A. S., Giacobbe, P., Brogi, M., ... & Molinari, E. (2022). The GAPS Programme at TNG: XXXII. the revealing non-detection of metastable He i in the atmosphere of the hot Jupiter WASP-80b. *Astronomy and Astrophysics*, 658, A136-A136.
- 8 Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Fossati L., Lammer H., Rumenskikh M.S., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Efimov M.A. (2021) Simulation of 10 830 Å absorption with a 3D hydrodynamic model reveals the solar He abundance in upper atmosphere of WASP-107b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 503(1) Pages L23–L27.
- 9 Khodachenko M.L., Shaikhislamov, I. F., Lammer H., Miroshnichenko, I. B., Rumenskikh M. S., Berezutsky A.G., Fossati, L. (2021). The impact of intrinsic magnetic field on the absorption signatures of elements probing the upper atmosphere of HD209458b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(3), 3626-3637.
- 10 Shaikhislamov I.F., Fossati L., Khodachenko M.L., Lammer H., García Muñoz A., Youngblood A., Dwivedi N.K., Rumenskikh M.S. (2020). Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of π Men c: comparison with Ly α transit observations. *Astronomy & Astrophysics*, 639, 109
- 11 Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Berezutsky, A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S. (2020). Three-dimensional modelling of absorption by various species for hot Jupiter HD 209458b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(3), 3435-3447.
- 12 Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S., Kislyakova K.G., Dwivedi N.K. (2019). Global 3D Hydrodynamic Modeling of In-transit Ly α Absorption of GJ 436b. *The Astrophysical Journal*, 885(1), 67
- 13 Shaikhislamov, I.F., Khodachenko, M.L., Lammer H., Berezutsky, A. G., Miroshnichenko, I. B., & Rumenskikh, M. S. (2018). 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481(4), 5315-5323.

Публикации, вошедшие в базу РИНЦ и имеющие DOI (цифровой идентификатор объекта):

- 14 Rumenskikh M. S., Shaikhislamov, I. F., Berezutsky, A. G., & Miroshnichenko, I. B. (2020). Numerical Modeling of Spectral Measurements of Near-Orbit Exoplanets. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 84, 788-790.
- 15 Березуцкий А. Г., Шайхисламов И. Ф., Мирошниченко И.Б., Руменских М.С., & Ходаченко М.Л. (2019). Взаимодействие расширяющейся атмосферы со звездным ветром вокруг экзопланеты Gliese 436 b. *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 53(2), 147-154.
- 16 Мирошниченко, И. Б., Шайхисламов, И. Ф., Березуцкий, А. Г., Руменских, М. С., & Ветрова, Е. С. (2021). Влияние Ly α излучения родительской звезды на поглощение в линии H α атмосфер горячих юпитеров HD189733B и HD 209458B. *Астрономический журнал*, 98(1), 66-74.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lammer H. et al. Atmospheric loss of exoplanets resulting from stellar X-ray and extreme-ultraviolet heating //The Astrophysical Journal. – 2003. – Т. 598. – №. 2. – С. L121.
2. Vidal-Madjar A. et al. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b //Nature. – 2003. – Т. 422. – №. 6928. – С. 143-146.
3. Ben-Jaffel L. Spectral, spatial, and time properties of the hydrogen nebula around exoplanet HD 209458b //The Astrophysical Journal. – 2008. – Т. 688. – №. 2. – С. 1352.
4. Des Etangs A. L. et al. Temporal variations in the evaporating atmosphere of the exoplanet HD 189733b //Astronomy & Astrophysics. – 2012. – Т. 543. – С. L4.
5. Des Etangs A. L. et al. Evaporation of the planet HD 189733b observed in H i Lyman- α //Astronomy & Astrophysics. – 2010. – Т. 514. – С. A72.
6. Ehrenreich D. et al. Hint of a transiting extended atmosphere on 55 Cancri b //Astronomy & Astrophysics. – 2012. – Т. 547. – С. A18.
7. Seager S. V., Sasselov D. D. Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits //The Astrophysical Journal. – 2000. – Т. 537. – №. 2. – С. 916.
8. Oklopčić A., Hirata C. M. A new window into escaping exoplanet atmospheres: 1083 nm line of helium //The Astrophysical Journal Letters. – 2018. – Т. 855. – №. 1. – С. L11.
9. Nortmann L. et al. Ground-based detection of an extended helium atmosphere in the Saturn-mass exoplanet WASP-69b //Science. – 2018. – Т. 362. – №. 6421. – С. 1388-1391.
10. Alonso-Floriano F. J. et al. He I λ 10 830 Å in the transmission spectrum of HD209458 b //Astronomy & Astrophysics. – 2019. – Т. 629. – С. A110.

11. Spake J. J. et al. Helium in the eroding atmosphere of an exoplanet //Nature. – 2018. – Т. 557. – №. 7703. – С. 68-70.
12. Oklopčić A. Helium absorption at 1083 nm from extended exoplanet atmospheres: Dependence on stellar radiation //The Astrophysical Journal. – 2019. – Т. 881. – №. 2. – С. 133.
13. Shaikhislamov I. F. et al. Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. I. Modeling of hydrodynamic escape of upper atmospheric material //The Astrophysical Journal. – 2014. – Т. 795. – №. 2. – С. 132.
14. Khodachenko M. L. et al. Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. II. Effects of planetary magnetic field; structuring of inner magnetosphere //The Astrophysical Journal. – 2015. – Т. 813. – №. 1. – С. 50.
15. Shaikhislamov I. F. et al. 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Т. 481. – №. 4. – С. 5315-5323.
16. Shaikhislamov I. F. et al. Global 3D hydrodynamic modelling of absorption in Ly α and He 10830 Å lines at transits of GJ3470b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Т. 500. – №. 1. – С. 1404-1413.
17. Khodachenko M. L. et al. Simulation of 10 830 Å absorption with a 3D hydrodynamic model reveals the solar He abundance in upper atmosphere of WASP-107b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2021. – Т. 503. – №. 1. – С. L23-L27.
18. Khodachenko M. L. et al. The impact of intrinsic magnetic field on the absorption signatures of elements probing the upper atmosphere of HD209458b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Т. 507. – №. 3. – С. 3626-3637.
19. Pillitteri I. et al. FUV variability of HD 189733. Is the star accreting material from its hot Jupiter? //The Astrophysical Journal. – 2015. – Т. 805. – №. 1. – С. 52.
20. Shulyak D. et al. Line-by-line opacity stellar model atmospheres //Astronomy & Astrophysics. – 2004. – Т. 428. – №. 3. – С. 993-1000.
21. Wang L., Dai F. Metastable Helium Absorptions with 3D Hydrodynamics and Self-consistent Photochemistry. I. WASP-69b, Dimensionality, X-Ray and UV Flux Level, Spectral Types, and Flares //The Astrophysical Journal. – 2021. – Т. 914. – №. 2. – С. 98.
22. Salz M. et al. Detection of He I λ 10830 Å absorption on HD 189733 b with CARMENES high-resolution transmission spectroscopy //Astronomy & Astrophysics. – 2018. – Т. 620. – С. A97.
23. Guilluy G. et al. The GAPS programme at TNG-XXII. The GIARPS view of the extended helium atmosphere of HD 189733 b accounting for stellar activity //Astronomy & Astrophysics. – 2020. – Т. 639. – С. A49.

Руменских М.С.

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРАНЗИТНЫХ ПОГЛОЩЕНИЙ В ЛИНИИ
МЕТАСТАБИЛЬНОГО ГЕЛИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЭКЗОПЛАНЕТЫХ АТМОСФЕР

Автореферат

Подписано в печать г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Усл. Печ. 1,5 л.