

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 «__» _____ 2023 г. в __:__ 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 «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Доктор физико-математических наук

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 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 плазмосферы
- Расчет оптических транзитных поглощений в триплетной линии 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 HeI(2^3S) 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 HeI(1^1S) 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 HeI(2^3S) 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 плазмифотохимии 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 Доплера 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 моделирования, 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 ($\text{He}/\text{H}=0.1$) до величин примерно на порядок меньше.

3. На примере экзопланет GJ 436b 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:

- Развита алгоритмы интерпретации оптических наблюдений телескопами
- Сделана количественная оценка физико-химических параметров атмосфер ряда экзопланет, включая содержание гелия
- Сделана количественная оценка параметров космической погоды – интенсивности ионизирующего 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 диссертационной работе 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, 23-72-10060, а также программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” Национального центра физики и математики.

Личный вклад. Все результаты, изложенные в 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 25 конференциях:

Moscow Solar system symposium (2018, 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» (2018, 2019, 2020, 2021, 2022); Международный симпозиум «Люминесценция и лазерная физика» (2019); International symposium “Modern problem of laser physics”, ILP SB RAS, Novosibirsk (2018, 2021); международная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, ИКИ РАН, Москва (2019, 2020, 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 **14** 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 ионизирующим излучением родительской звезды (далее XUV, $\lambda \leq 912 \text{ \AA}$) 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 – HD 209458b ([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 HD 189733b ([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 GJ 436b и HD 209458b. Для описания планетарного течения авторами использовалась простейшая модель Паркерского ветра, не учитывался ряд ключевых физических процессов, а потому оценки оптических поглощений из работы [8] не показали соответствия данным наблюдений как для GJ 436b [9], так и HD 209458b [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 навизны 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:

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

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

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

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

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:

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

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:

$$\sigma_{abs} = f_{12} \sqrt{\pi} \frac{e^2}{m_e c^2} \cdot \frac{c}{\Delta \nu_D} \cdot H = f_{12} \sqrt{\pi} \frac{e^2 \lambda_0}{m_e c^2} \cdot \sqrt{\frac{m_p c^2}{2kT}} \cdot H \quad (2.2.3)$$

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, $\alpha = \Delta \nu_L / 2 \Delta \nu_D = \frac{\Delta \nu_L}{\nu_0} \sqrt{\frac{m_p c^2}{8k}}$, $x = \frac{V - V_Z}{\sqrt{\frac{2kT}{m_p}}}$, 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 плазмифотохимии.

В разделе 2.3 подробно обсуждаются физико-химические процессы, ответственные за возбуждение и девозбуждение уровня метастабильного гелия HeI(2³S) – 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 HD 189733b, GJ 436b и GJ 3470b. **Раздел 3.1** посвящен анализу особенностей заселения уровня HeI(2³S) в атмосфере «горячего юпитера» HD 189733b.

Экзопланета HD 189733b является хорошо изученным объектом. С достаточной точностью известны масса и радиус самой планеты и ее родительской звезды, температура поверхности, и некоторые спектральные области излучения HD 189733A. 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 HD 189733A с помощью кода звездной атмосферы LLmodels [20]. Поток излучения

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

N	F_{XUV}	He/H	M'_{sw} 10^{10}r/c	M'_{pw} 10^{10}r/c	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 HD 189733b, 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.

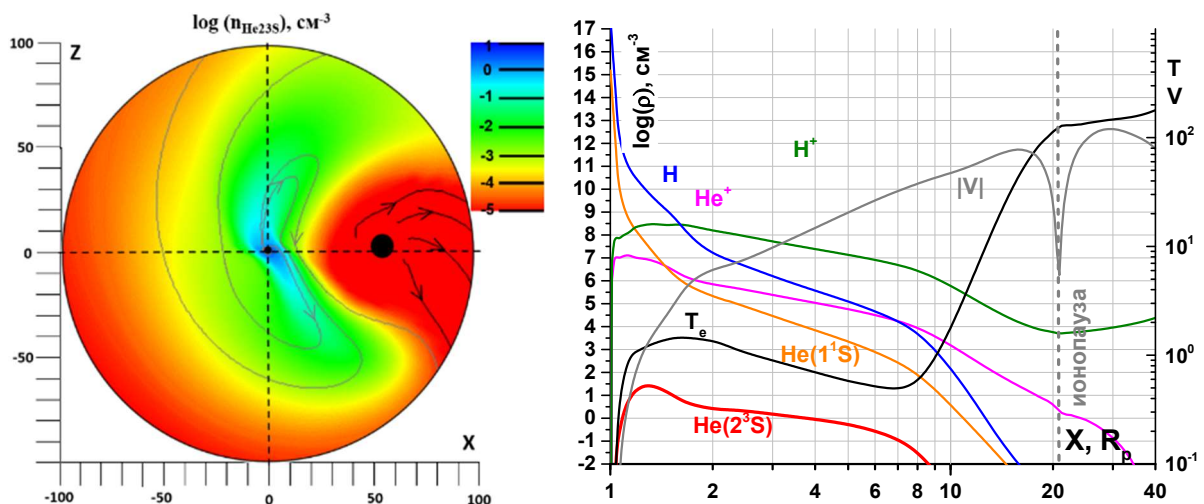


Рисунок 1. Слева: распределение плотности метастабильного гелия в атмосфере планеты HD-189733b. Справа: распределение основных компонент атмосферы в зависимости от расстояния. Все масштабы выражены в радиусах планеты

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

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

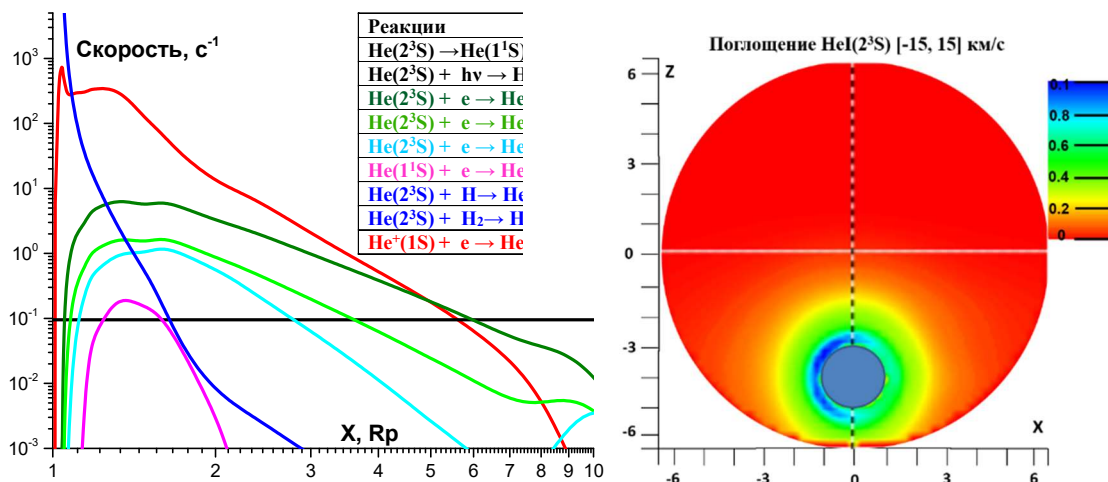


Рисунок 2. Слева: распределение скоростей реакций вблизи экзопланеты HD 189733b в расчете с параметрами №2. Справа: распределение поглощения метастабильного гелия в окрестности планеты по диску звезды

Интерпретация наблюдаемых транзитных поглощений в линии метастабильного гелия с расчетами позволила оценить параметры планетарной атмосферы и звездного ветра следующими значениями: содержание гелия He/H ~ 0.03 ÷ 0.05, $F_{XUV} \sim 7.5 \div 55$, $M_{sw} \sim 10^{11} \div 2 \cdot 10^{12}$ 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 HeI(2^3S) и с шириной линии, соответствующим измерениям [22]. Второй сценарий задействует более низкий поток XUV, чтобы соответствовать поглощению около 0.7% в центре линии,

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

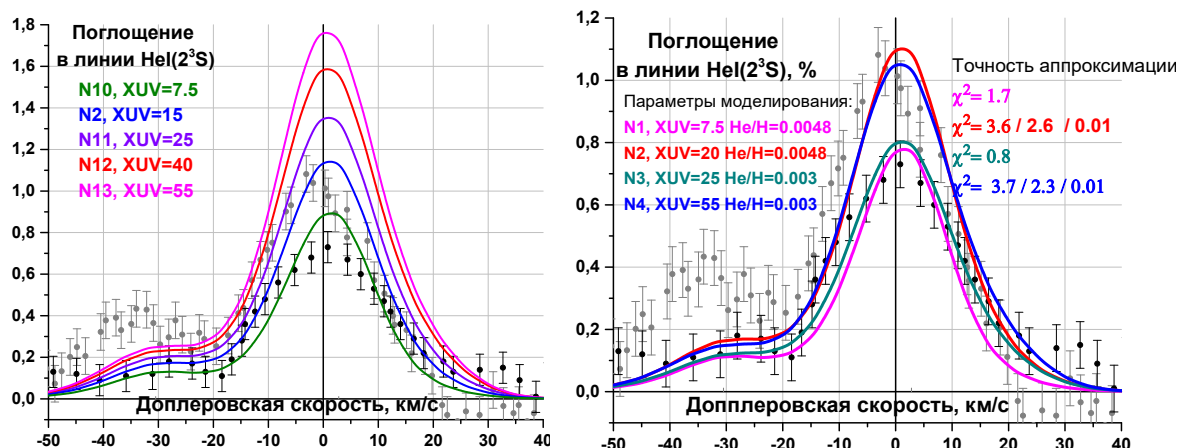


Рисунок 3. Слева: Поглощение в линии HeI (2^3S) при различной величине ионизирующего излучения звезды. Справа: Сравнение расчетных поглощений при различных значениях интенсивности XUV-излучения и содержания гелия с данными двух наблюдений ([22]- серые точки, [23]- черные)

Разделы 3.2 и 3.3 посвящены описанию оптических и столкновительных процессов, приводящих к возбуждению и девозбуждению уровня HeI (2^3S) в атмосферах планет GJ 436b и GJ 3470b. В разделе 3.4 представлены выводы по третьей главе.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА содержит ряд моделирований оптических транзитных поглощений, выполненных для оценки физико-химических параметров систем HD 189733b, Wasp 69b и HD 209458b. Раздел 4.1 посвящен оценке параметров физико-химических условий в окрестности экзопланеты HD 189733b, а разделы 4.2 и 4.3 описывает результаты моделирования Wasp 69b и HD 209458b.

В таблице 2 приведены параметры, моделирующие различные сценарии взаимодействия планетарной атмосферы Wasp 69b с излучением и ветром родительской звезды.

N	F_{XUV} [erg cm ⁻² s ⁻¹], на 1 АЕ	\dot{M}_{sw} [$\times 10^{10}$ g/s]	He/H	\dot{M}_p [$\times 10^{10}$ 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 Wasp 69b

Для Wasp 69b 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].

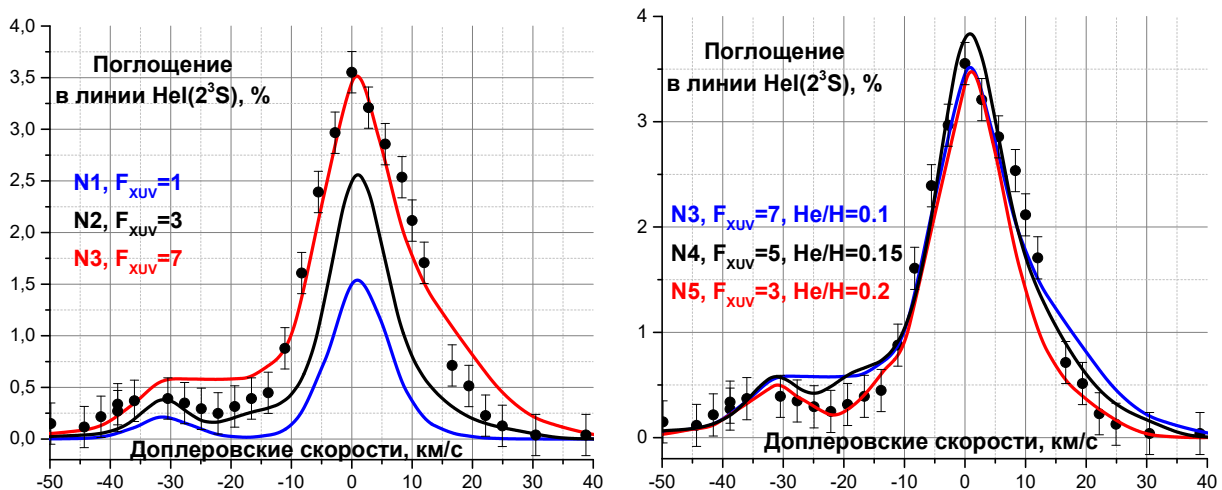


Рисунок 4. Слева: профили поглощения в линии HeI(2³S), смоделированные для разных значений потока XUV излучения при стандартном содержании гелия He/H=0.1. Справа: сравнение расчетного поглощения с наблюдениями (черные точки, [20]) при различных значениях интенсивности XUV излучения и содержания гелия.

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 GJ 436b 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 GJ 436b в водородной линии Ly α . 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). Реальные звездные системы могут быть подвержены временным вариациям физических параметров. Для выявления влияния изменения различных характеристик и ветра родительской звезды, а также состава атмосферы GJ 436b на оптические транзитные поглощения в линии HeI(2³S) были выполнены моделирования с различными наборами параметров.

N	F_{XUV} , $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	M'_{sw}	He/H	F_{10830} , $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\text{A}^{-1}$	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 GJ 436b. В последнем ряду - данные наблюдений из [21]

Расчеты оптических транзитов с разным содержанием гелия (N1-3) показывают, что увеличение концентрации гелия в атмосфере GJ 436b 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.

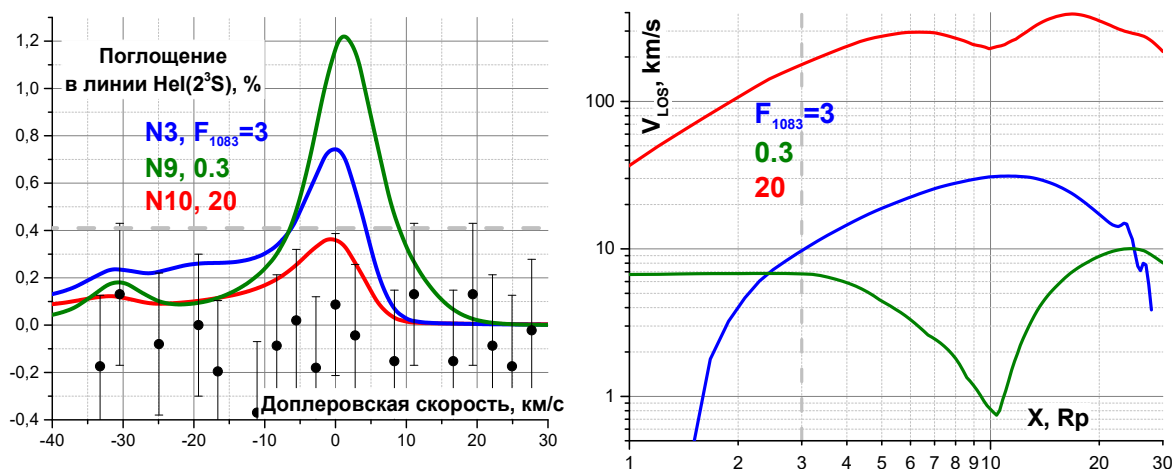


Рисунок 5. Оптические профили поглощения HeI(2^3S) (слева) и проекция скорости атомов метастабильного гелия на ось наблюдения, рассчитанные с наборами параметров (N1, N4 и N5) с разными потоками F_{1083} , т. е. разными силами радиационного давления, действующими на атомы HeI(2^3S). Наблюдения оптических 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 GJ 436 значением потока излучения в окрестности 1083 нм $F_{1083} = 3$ эрг $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}\text{Å}^{-1}$ на расстоянии 1 АЕ от звезды (N1), были выполнены расчеты с наборами параметров N4 и N5 с более низким и более высоким потоками F_{1083} 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 GJ 436b 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 GJ 436b.

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: HD 189733, HD 209458, Wasp 107, Wasp 69, GJ 3470.
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 доплеровскими 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 He I (2^3S) обусловлена совместным действием ряда кинетических процессов - рекомбинации, столкновений с электронами и атомами, излучения и фотоионизации, 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 (2^3S) transit absorption of GJ 436b. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 526(3), 4120-4129.
- 3 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 HD 189733b and Absorption in Metastable He I and Ly α Lines. The Astrophysical Journal, 927(2), 238.
- 4 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.
- 5 M. L. Khodachenko , I. F. Shaikhislamov, H. Lammer, A. G. Berezutsky , I. B. Miroshnichenko , M. S. Rumenskikh, K. G. Kislyakova , and N. K. Dwivedi. Global 3D Hydrodynamic Modeling of In-transit Ly α Absorption of GJ 436b. The Astrophysical Journal, 885:67 (20pp), 2019 November 1.

- 6 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.
- 7 M. L. Khodachenko, I. F. Shaikhislamov, L. Fossati, H. Lammer, M. S. Rumenskikh, A. G. Berezutsky, I. B. Miroshnichenko, M. A. Efimov. 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*, Volume 503, Issue 1, May 2021, Pages L23–L27.
- 8 Shaikhislamov I.F., Fossati L., Khodachenko M.L., Lammer H., García Muñoz A., Youngblood A., Dwivedi N.K., Rumenskikh M.S. Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of π Men c: comparison with Ly α transit observations. *Astronomy & Astrophysics*. (2020) V.639
- 9 Fossati, L., Guilluy, G., Shaikhislamov, I. F., Carleo, I., Borsa, F., Bonomo, A. 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.
- 10 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 HD 209458b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(3), 3626-3637.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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 436b. *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 53(2), 147-154.

Публикация, вошедшая в базу РИНЦ и имеющая DOI (цифровой идентификатор объекта)

- 14 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» HD 189733b и HD 209458b. *Астрономический журнал*, 98(1), 66-74.

Прочие публикации

- 15 В. И. Шематович, И. Ф. Шайхисламов, М. С. Руменских, А. Г. Жилкин, И. С. Саванов, Г. Н. Цуриков, Д. В. Бисикало. Наблюдения горячих экзопланет как новый инструмент исследования и прогноза космической погоды. *Физмат*, Т. 1 №1, ноябрь 2023 (принята к публикации)

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 HD 209458b // *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 нм 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 HD 209458 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. – T. 881. – №. 2. – C. 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. – T. 795. – №. 2. – C. 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. – T. 813. – №. 1. – C. 50.
15. Shaikhislamov I. F. et al. 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – T. 481. – №. 4. – C. 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 GJ 3470b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – T. 500. – №. 1. – C. 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. – T. 503. – №. 1. – C. 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 HD 209458b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – T. 507. – №. 3. – C. 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. – T. 805. – №. 1. – C. 52.
20. Shulyak D. et al. Line-by-line opacity stellar model atmospheres //Astronomy & Astrophysics. – 2004. – T. 428. – №. 3. – C. 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. – T. 914. – №. 2. – C. 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. – T. 620. – C. 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. – T. 639. – C. A49.

Руменских М.С.

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

Автореферат

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