



Утверждаю:  
Заместитель директора Федерального  
бюджетного учреждения науки  
Института космических исследований  
Российской академии наук

/ А. А. Лутовинов  
«07» декабря 2023 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ НА ДИССЕРТАЦИОННУЮ РАБОТУ

Руменских Марины Сергеевны  
«Оптический метод транзитных поглощений в линии метастабильного гелия  
для определения параметров экзопланетных атмосфер»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.6. – Оптика.

Диссертационная работа Руменских М. С. посвящена интерпретации транзитных поглощений горячих экзопланет в линии метастабильного гелия HeI на длине волны  $\lambda=1083$  нм. Основу работы составляют расчеты спектральных транзитных поглощений в численной трехмерной самосогласованной глобальной гидродинамической модели. 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. Численная модель была разработана в коллективе соискателя в институте ИЛФ СО РАН.

Применяемый комплексный подход для интерпретации транзитных поглощений горячих экзопланет на тесных орбитах был применен впервые. Проведено сравнение расчетов с измерениями, полученными на крупнейших наземных телескопах мира, с целью получения параметров различных планетарных систем с горячими экзопланетами.

### Актуальность

Физика атмосфер экзопланет является очень молодой и перспективной областью исследований. На данный момент известно об обнаружении более 6000 планет за пределами Солнечной системы, и это число продолжает расти. Для некоторых из обнаруженных планет получены транзитные измерения, в том числе в узких спектральных диапазонах, которые позволяют получить информацию о скорости, плотности и температуре различных атомов атмосферы.

В последние годы внимание исследователей в области физики экзопланетных атмосфер в УФ области спектра перешло в ИК диапазон. Настоящая работа посвящена комплексному анализу механизмов, приводящих к образованию транзитных поглощений горячих экзопланет в линии HeI  $\lambda=1083$  нм. Эта линия является универсальной для исследования процессов во множестве атмосфер экзопланет, по причине широкой распространенности элемента во Вселенной и яркости ближней ИК области в спектрах многих звезд, поэтому исследования, нацеленные на интерпретацию транзитных поглощений в линии HeI  $\lambda=1083$  нм, заслуживают особого внимания.

Актуальность настоящей работы, в первую очередь, обусловлена необходимостью интерпретации массива наблюдательных данных экзопланет, полученных наземными и

космическими телескопами. Результаты диссертационного исследования нацелены на определение физико-химических параметров окружения экзопланет, что, в частности, разрабатывает методику дистанционного зондирования гелийсодержащих атмосфер горячих экзопланет в ИК линии HeI  $\lambda=1083$  нм.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы**

Отличительной особенностью работы является полнота и детальность применяемых подходов. Впервые проведен комплексный анализ факторов и процессов, влияющих на населенность метастабильного уровня гелия в условиях атмосфер горячих экзопланет. Таким образом, теоретическая значимость настоящего исследования в основном связана с развитием существующих представлений о динамике и содержании отдельных химических элементов в верхней атмосфере и экзосфере экзопланет, характере их взаимодействия со звездным ветром и их влиянии на заселенность уровня, обуславливающего поглощение в линии HeI  $\lambda=1083$  нм. На основании теоретического анализа были определены физико-химические параметры, оказывающие наибольшее влияние на транзитные поглощения в линии метастабильного гелия, и сделаны некоторые обобщения результатов моделирования для групп горячих экзопланет. Особое внимание было уделено проблеме ускорения атомов радиационным давлением излучения родительской звезды.

Практическая значимость главным образом связана с развитием методики интерпретации транзитных поглощений горячих экзопланет в ИК линии HeI  $\lambda=1083$  нм. С ее помощью была выполнена количественная оценка параметров космической погоды в планетной системе родительской звезды. Важным является определение параметров звездного ветра. Сравнение параметров ветров разных звезд расширяет наши представления о возможных проявлениях Солнечной космической погоды и приведет к лучшему пониманию и прогнозированию процессов, происходящих также и в околоземном пространстве. Кроме того, результаты работы могут быть применены в рамках популярной в последние годы тематики – поиска биомаркеров в планетных системах с горячими планетами на тесных орбитах.

### **Структура диссертационной работы**

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы 129 страниц, включая 27 рисунков, 9 таблиц; список литературы содержит 93 наименования.

Во **введении** обоснован выбор объекта исследования.

**Первая глава** освещает актуальность темы исследования, современное состояние в данной области (в виде литературного обзора), цели и задачи, описывает методы исследования, что показывает теоретическую и практическую значимость.

**Вторая глава** содержит детали метода исследования, в частности, используемой гидродинамической численной модели. В описании модели приведены сведения об учитываемых физико-химических процессах, используемых приближениях с обоснованиями, методе разбиения вычислительной сетки. Также приведены особенности переноса излучения в среде и численного решения соответствующих уравнений, и реакции, влияющие на заселенность метастабильного уровня HeI ( $2^3S$ ).

В **третьей главе** приведены результаты численного моделирования горячих экзопланет HD 189733b, GJ 436b и GJ 3470b, а также систематизация результатов с целью выявления влияния спектра излучения звезды на заселенность метастабильного уровня и поглощение в линии HeI  $\lambda=1083$  нм. Сделан вывод о том, что поглощение в линии HeI( $2^3S$ ) обусловлено совместным действием ряда кинетических процессов, таких, как рекомбинация ионов гелия, а также ударного взаимодействия атомов гелия со свободными электронами.

**Четвертая глава** содержит количественные оценки физико-химических параметров систем HD189733b, Wasp69b и HD209458b, полученных сравнением результатов численного моделирования транзитных поглощений в линии HeI  $\lambda=1083$  нм с наблюдениями различных наземных телескопов обсерваторий Calar Alto и Keck. В частности, приводились оценки на начальное соотношение концентраций гелия и водорода  $n_{\text{He}}/n_{\text{H}}$ , поток излучения звезды в области ультрафиолета и мягкого рентгена  $F_{\text{XUV}}$  и скорость потери массы звездного вещества  $M_{\text{sw}}$ . На основании результатов расчетов для этих планетных систем был сделан вывод о том, что  $M_{\text{sw}}$  в большинстве случаев не оказывает существенного влияния на поглощение в линии HeI  $\lambda=1083$  нм, в отличие от параметра звездного излучения  $F_{\text{XUV}}$  и относительной концентрации гелия в атмосфере планеты  $n_{\text{He}}/n_{\text{H}}$ .

В **пятой главе** обсуждается роль радиационного давления звезды на транзитные поглощения в линии 1083 нм при интерпретации поглощений, измеренных телескопами. Выводы о важности учета радиационного давления на атомы HeI( $2^3\text{S}$ ) были сделаны на примере моделирования экзопланет GJ 436b и Wasp 107b.

#### **Замечания к содержанию диссертации:**

1. В диссертации условие Куранта-Фридрихса-Леви (КФЛ) названо сокращенно критерием Куранта, выбор числового значения для условия КФЛ не обоснован, хотя само значение приведено.
2. Используются некоторые заимствованные термины, например «депопуляция» вместо «обеднение» или «вырождение», «девозбуждение», вместо «релаксация» и т. п.
3. Рекомендовано показать наглядно транзит экзопланеты, пояснить актуальность биомаркеров в тематике данной работы, а также пронумеровать слайды.
4. Рисунок 3.1: уровень  $2^3\text{S}$  не может быть триплетным. Таковым является уровень  $2^3\text{P}$ , при переходе на который происходит поглощение в линии HeI  $\lambda=1083$  нм. Предположительно, автор имел в виду триплетную линию, но из рисунка этого заключить нельзя.

Следует отметить, что вышеуказанные замечания носят характер рекомендаций, и не влияют на значимость и результаты диссертационного исследования

**Результаты диссертационного исследования** докладывались в Институте космических исследований РАН, а также были представлены на семинарах Института лазерной физики СО РАН, Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Института астрономии РАН, Главной астрономической обсерватории РАН. По теме диссертации в соавторстве Руменских М.С. опубликовала 14 работ, 14 из которых в журналах перечня Web of Science или Scopus и 13 в журналах, входящих в перечень ВАК.

Диссертация Руменских Марины Сергеевны вносит существенный вклад в астрономию, систематизацию имеющихся представлений о горячих короткопериодических экзопланетах, а результаты работы значительно дополняют существующие знания о физических процессах в верхних атмосферах горячих экзопланет. Работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно паспорту специальности 1.3.6. Оптика по направлению 16 «Оптика звездных и планетарных атмосфер» и рекомендуется к защите.

Отзыв составлен и обсужден на НТС отдела 53 «Физики планет и малых тел Солнечной системы» ИКИ РАН, 6 декабря 2023 г, Протокол № 4.

Зав. сектором «Динамики атмосфер»  
ИКИ РАН  
д.ф.-м.н., профессор

А. С. Петросян

Подпись А. С. Петросяна заверяю  
Ученый секретарь ИКИ РАН

А. М. Садовский

телефон: +74953334133,  
электронный адрес [tavrov@iki.rssi.ru](mailto:tavrov@iki.rssi.ru)

ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук, Москва 117997,  
ГСП-7, Профсоюзная ул. 84/32, [iki@cosmos.ru](mailto:iki@cosmos.ru), тел. +7-495-3335212, факс 3331248