

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу *Шепелина Артема Витальевича*

«Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.6** – оптика, физико-математические науки.

Диссертационная работа Шепелина А.В. направлена на исследование физико-химических и оптических процессов в атмосферах экзопланет, где не успевают установиться локальное термодинамическое равновесие. Для изучения указанных процессов соискатель разрабатывает и применяет кинетическую модель прямого расчета населенностей возбужденных уровней атомов и ионов - O, Fe, H. В диссертации создается спектральная методика оценки температуры среды в атмосферах экзопланет на основе анализа соотношения интенсивностей линий атомарного кислорода 130,4 нм и 777,4 нм. Для ультрагорячих юпитеров изучается нагрев и охлаждение их атмосфер по оптическим переходам иона Fe II. Для линии H-альфа делается расчет изменения ее поглощения в атмосферах экзопланет при вариации звездного излучения в УФ-диапазоне, вызванную вспышечной активностью.

В целом, в диссертации создан программный комплекс для расчета населенностей квантовых уровней ряда одиночных элементов, спектров поглощения и энергетического баланса неравновесных ионосфер экзопланет. Программный комплекс может функционировать как самостоятельно, так и в интеграции с газодинамическими моделями плазмы. Комплекс имеет хороший потенциал для своего дальнейшего развития.

Проблематика диссертации находится на переднем крае и в русле современных научных исследований – международные журналы, в которых опубликованы две статьи, имеют рейтинг Q1. **Актуальность** этой проблематики с ее Нобелевской премией 2019 года определяется открытием более 20-ти лет назад первой экзопланеты. Их на сегодня свыше 5800. Для многих из них пошли широким потоком наблюдательные данные с современных астрономических телескопов. В частности, появились спектры поглощения излучения родительской звезды в ионизованной части атмосфер экзопланет. Поэтому встала задача обработать эти данные применительно к конкретному звездному объекту. Полученные в диссертации результаты по определению физико-химических условий

около изученных экзопланет актуальны. Результаты диссертации важны для интерпретации наблюдательных данных современных телескопов космического базирования «Джеймс Уэбб» (JWST), «Хаббл» (HST), для будущего российского телескопа «Спектр-УФ».

Научная новизна диссертационного исследования, подтвержденная публикациями в международных журналах высшего уровня и российских астрономических журналах, состоит в создании оригинального программного комплекса для спектральной диагностики атмосфер экзопланет. Этот программный комплекс включает расчет заселенности уровней атомов и ионов, синтез спектров поглощения в вариантах использования входных данных полей концентраций, температур и скоростей атмосфер экзопланет. Это позволило получить, в частности, новую количественную информацию о зависимости взаимной интенсивности линий 130,4 нм и 777,4 нм атомарного кислорода от температуры для планет HD 209458 b и KELT-9 b. Соотношение интенсивностей этих линий служит чувствительным индикатором температурных условий в атмосферах этих экзопланет. Впервые определен диапазон параметров звездных вспышек для обнаружения оптической линии Н-альфа в атмосферах экзопланет.

Теоретическая **значимость результатов** данной диссертации состоит в создании численной 3D модели экзопланетных атмосфер, включающей излучение и химические реакции. Она включает 3D магнитную гидродинамику, охватывает расчет неравновесной кинетики возбужденных состояний, нагрев и охлаждение среды, а также эффекты звездных вспышек. В качестве выходных зависимостей модель располагает синтезом спектра поглощения излучения для стороннего наблюдателя, анализом вклада отдельных атомов и ионов в тепловой баланс атмосферы экзопланеты.

Практическое использование результатов данной диссертации будет определяться осуществимостью международного сотрудничества в интерпретации оптических наблюдений с помощью современных и планируемых к запуску космических и наземных телескопов (HST, JWST, VLT, ARIEL, LUVOIR, Спектр-УФ); в задачах поиска кислорода в атмосферах экзопланет, а также других биомаркеров.

Достоверность полученных результатов обоснована проделанной методологической работой, отраженной в диссертации. В частности, проведена верификация модели путем сравнения с аналитическими решениями, результатами программы Cloudy и опубликованными данными. Показана устойчивость алгоритмов к вариациям входных параметров, что подтверждает надежность разработанных методов. Полученные результаты проверены коллективом соавторов статей и обсуждались на 13 международных и российских конференциях.

Личный вклад автора состоит в разработке программного комплекса Astrea с кинетическим модулем для расчета населенностей квантовых уровней. Комплекс также включает гидростатические и гидродинамические модели экзопланетных атмосфер различной пространственной размерности, модули спектрального синтеза, моделирования звездных вспышек. Диссертант проводил сравнение своих результатов с многочисленными работами по исследованию экзопланет и звезд, а также с результатами других программных кодов. Диссертант участвовал в формулировании выводов статей и в подготовке публикаций.

Диссертация с изложением основных результатов исследования на 119 страницах включает пять глав, введения, заключения и приложения. В тексте 20 рисунков и 12 таблиц. Список используемой литературы состоит из 129 ссылок.

«Введение» состоит из всех обязательных пунктов диссертации, среди которых Положения, выносимые на защиту и состоящие из трех пунктов. В разделе «Актуальность» справедливо указывается, что одной из важнейших задач современной астрофизики является определение физических и химических характеристик атмосфер экзопланет. В разделе «Степень разработанности» приведен краткий литературный обзор данных, полученных по атмосферам экзопланет, оптическому методу зондирования экзопланетных атмосфер с помощью излучения самой звезды при транзитных прохождениях наблюдаемого объекта в поле зрения телескопа. Здесь же указывается, что развитие теоретических моделей подошло к необходимости снятия предположения о ЛТР. Это допущение не отражает реальных условий верхних атмосфер горячих экзопланет, где прямые и обратные кинетические процессы зачастую не уравнивают друг друга, поскольку происходит передача энергии от излучения звезды в нагрев и течение вещества. Модели, в которых не закладывается условие ЛТР, широко применяются для звездных атмосфер и солнечной короны. Однако есть необходимость их адаптации к экзопланетным условиям с учетом большого числа физических и химических процессов.

В главе 1, состоящей из 7 разделов рассмотрены современные спектральные методы, применяемые для исследования атмосфер экзопланет. Рассмотрены основные подходы к наблюдению и моделированию экзопланетных атмосфер, уделено внимание влиянию неравновесных эффектов на интерпретацию спектроскопических данных. Дан обзор существующих кинетических моделей, применяемых в астрофизике. Указано, что развитие научных исследований подошло к необходимости создания программных комплексов, трехмерные пространственные эффекты и взаимодействие различных физических процессов. В Один из разделов 1.5 описывает проблемы обнаружения тяжелых химических элементов, в частности, кислород и металлы, в атмосферах

экзопланет. Рассмотрены наложение спектральных линий, влияние земной атмосферы и звездной активности как факторы, затрудняющие их детектирование.

В главе 2 изложены методы расчета спектральных характеристик излучения в неравновесной плазме атмосфер экзопланет. Выполнена постановка трехмерной по пространству задачи моделирования атмосфер экзопланет, рассмотрены алгоритмы численного моделирования и архитектура разработанного программного обеспечения. В этой же главе приведены результаты верификации модели путем сравнения с аналитическими решениями, другими расчетными результатами и опубликованными данными. Показана устойчивость алгоритмов к вариациям входных параметров. В главе 3 описаны методы диагностики атмосфер экзопланет с использованием спектральных линий атомарного кислорода O I 130,4 нм и 777,4 нм. Рассмотрены физические механизмы формирования этих линий, их зависимость от термодинамических условий, а также применение для определения температуры, плотности и степени ионизации в верхних слоях атмосфер. В качестве примера приведены параметры 9 экзопланет, две из которых имеют массы меньше массы Юпитера GJ 436 b, HD 209458 b. Остальные имеют большую массу. Сделаны рекомендации для наземных и космических наблюдений линий кислорода перспективными телескопами HST, JWST и другими. В главе 4 исследуется роль иона Fe II и его возбужденных уровней в аэрономии атмосфер ультрагорячих юпитеров, в частности, планеты KELT-9 b. Важным результатом представляются термальные характеристики атмосферы KELT-9 b, демонстрирующие лучшее согласие с наблюдательными данными при учете полной системы уровней Fe II. В главе 5 рассмотрено влияние вспышечной активности звезд на усиление сигналов в атмосферах экзопланет на примере линий H-альфа и Лайман-альфа атомарного водорода. Для экзопланет HD 189733 b, HD 209458 b и KELT-9 b показано, что традиционные методы наблюдения этих линий сталкиваются с проблемами из-за их слабого сигнала. Соискатель разработал оригинальную методику численного моделирования процессов с отклонением от ЛТР в среде экзопланетных атмосфер под воздействием вспышек. Он показал, как получить усиление поглощения линии H-альфа за счет вспышек звезды. В Заключении соискатель подвел основные итоги своей диссертации из 4 результатов: создание новой вычислительной программы Astrea, детектирование кислорода в атмосферах экзопланет по линиям 130,4 нм и 777,4 нм, исследование влияния переходов Fe II на тепловой баланс атмосферы ультрагорячих юпитеров, методика усиления наблюдаемых сигналов от экзопланетных атмосфер вследствие звездных вспышек на примере линий Лайман-альфа и H-альфа.

Из положительных моментов диссертации Шепелина А.В. следует отметить впечатляющий объем проделанной работы, разумный баланс между анализом

экспериментальных данных и результатами численного моделирования, привязанность результатов к действующим телескопам.

Основные научные результаты по теме диссертации изложены в 4 научных статьях, 2 из которых опубликованы в международных журналах «белого списка», 2 из перечня ВАК, индексируемых в международных базах WoS и Scopus.

По диссертации Шепелина А.В. имеются следующие замечания.

1. На странице 23 выбираются «ключевые элементы, такие как кислород, железо и магний». В Таблице 9 приводятся данные по магнию. В то же время в диссертации далее магний не входит в число моделируемых элементов. Поэтому скорее следует исключить магний из формулировки «ключевые элементы» и данную таблицу из текста диссертации.
2. В разделе 1.5 обсуждаются «Проблемы обнаружения кислорода, металлов...». Предполагается, что есть железо. Но тогда почему многие другие элементы, легче железа и которых по космической распространенности элементов может быть больше в среде, исключены из рассмотрения состояния среды? От того, что в спектрах линии других элементов не обнаружены, не означает, что самих элементов нет.
3. Страница 21. «Например, CH₄ при высоких температурах преобразуется в CO и H₂.» В молекуле метана нет кислорода. Поэтому CH₄ не может преобразоваться в CO и H₂.
4. Простая барометрическая формула на стр.31 справедлива для постоянной температуры. Для верхних слоев атмосферы нужно учитывать изменение температуры.
5. Для текста диссертации хотелось бы видеть более тщательное редактирование. Один пример: на странице 57 указаны переходы $[\text{He}]2s^22p^3(^4S^{\circ})3s^3S_1^{\circ}$, хотя там должен быть кислород $O: [\text{He}]2s^22p^3(^4S^{\circ})3s^3S_1^{\circ}$.

Несмотря на указанные недостатки, в целом диссертационная работа Шепелина Артема Витальевича **«Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет»** представляет законченное исследование по направлениям «16. Оптика звездных и планетарных атмосфер» и «5. «Развитие физических основ молекулярной оптики и спектроскопии...» специальности 1.3.6. «Оптика». Тема работы актуальна, результаты работы востребованы для дальнейшего развития в теоретическом плане и в практических приложениях. Научные положения диссертации в своей области применимости достаточно обоснованы, выбранные численные методы адекватны

поставленным задачам. Новизна результатов подтверждается их публикацией в ведущих международных журналах. Публикации диссертанта из списка литературы правильно отражают результаты исследований и выводы, изложенные в диссертации. В **Автореферате** правильно изложено основное содержание диссертации, выводы и защищаемые положения.

Таким образом, диссертационная работа Шепелина **Артема Витальевича**, **«Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет»** соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней (п.9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Федеральный исследовательский центр
«Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения
Российской академии наук»
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник (доцент)
630090, г. Новосибирск, проспект Лаврентьева, д.5
Тел. 8(383) 3269-469, snyt@catalysis.ru

Валерий Николаевич
Снытников
11.06.2026 г.



Подпись Снытникова Валерия Николаевича заверяю

Заведующий отделом кадров О.Т. Колобовкина
11.06.2026