

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



/ А.А. Петрукович
«27» 04 2026 г.

**ОТЗЫВ
ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ 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.

Диссертационная работа посвящена моделированию кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет. В рамках работы автором создан программный комплекс Astrea, включающий модули для кинетического моделирования, построения 3D-моделей атмосфер, синтеза спектров поглощения и учета звездной активности. Практическая применимость программного комплекса показана на исследовании горячих и ультрагорячих экзопланет, обращающихся на близких орбитах. В качестве входных данных, помимо встроенных гидростатических моделей, могут использоваться более сложные магнетогидродинамические модели, например, ECHO3D, разработанная в коллективе соискателя в ИЛФ СО РАН. Используемые методы рассчитывают населенности квантовых уровней, синтезируют спектры поглощения и анализируют процессы нагрева и охлаждения в условиях, далеких от термодинамического равновесия.

Впервые реализован комплексный подход, позволяющий детально исследовать влияние отдельных линий элементов и отдельных процессов на синтезированные спектры поглощения и термодинамические характеристики атмосферы. Учтены элементы с сложной структурой близкорасположенных уровней (например, Fe II), а также, линии, сильно зависящие от условий плазмы и излучения звезды (например, O I 777.4 нм), что раньше было возможно только с помощью значительно упрощенных моделей. Проведено сравнение результатов моделирования с данными наблюдений наземных и космических телескопов, а также с результатами, полученными с помощью известных кодов, таких как Cloudy, что подтвердило точность и надежность разработанных методов и программной реализации.

Актуальность

Исследование экзопланетных атмосфер является одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной астрофизики. Открытие тысяч внесолнечных планет, в том числе уникальных классов, таких как ультрагорячие юпитеры, поставило задачу перехода от обнаружения к изучению их физико-химических свойств. Ключевым инструментом для этого служит транзитная трансмиссионная спектроскопия. Интерпретация наблюдаемых спектров требует создания физических моделей атмосфер, способных учитывать экстремальные условия, далеких от термодинамического равновесия.

Особую актуальность в последние годы приобрела проблема отказа от упрощенного предположения о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) при моделировании верхних слоев атмосфер горячих экзопланет. Существующие модели, основанные на ЛТР, не способны корректно описать процессы в условиях интенсивного звездного излучения, больших температурных градиентов и интенсивной ионизации, что приводит к существенным погрешностям в расчете населен-

ностей уровней, синтезе спектров и определении энергетического баланса. Этому свидетельствует ряд накопившихся неразрешенных проблем: при каких условиях формируется диагностическая линия атомарного кислорода 777,4 нм, и как она связана с другими линиями кислорода; почему ион железа Fe II приводит к аномально высокому нагреву атмосферы KELT-9 b; могут ли звездные вспышки «усиливать» интенсивность слабых линий. Именно учет неравновесной (не-ЛТР) кинетики атомов и ионов становится критически важным для ответа на эти вопросы.

Актуальность данной работы, в первую очередь, обусловлена тем, что на данный момент не существовало методов, способных в кинетическом приближении детально анализировать влияние отдельных уровней и процессов на формирование спектральных линий поглощения, а также термодинамических характеристик атмосферы. Данная работа направлена на создание подобной физически полной модели, которая позволит корректно интерпретировать спектроскопические наблюдения, а также разрешить выявленные аномалии.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость работы заключается в развитии и применении методов неравновесной (не-ЛТР) кинетики для моделирования экзопланетных атмосфер. Работа вносит существенный вклад в фундаментальные представления о физике процессов в верхних атмосферах горячих и ультрагорячих планет: в ней установлены количественные закономерности формирования ключевых спектральных линий (кислорода, Fe II, водорода), определены температурные диапазоны их наблюдаемости и раскрыта роль кинетики возбужденных уровней ионов металлов (в частности, Fe II) в энергетическом балансе. Разработанный подход позволяет преодолеть ограничения моделей, основанных на локальном термодинамическом равновесии, а также упрощенных не-ЛТР моделей, и создает основу для реалистичного описания радиационных, столкновительных и ионизационных процессов при экстремальных условиях.

Практическая значимость работы определяется созданием программной библиотеки «Astrea» (и программного комплекса «Астрея: Экзопланеты», зарегистрированной в государственном реестре программ для ЭВМ). Этот инструмент может быть непосредственно использован для планирования и интерпретации наблюдательных данных с современных и будущих космических (JWST, HST, ARIEL, LUVOIR, «Спектр-УФ») и наземных (VLT, ELT) телескопов. Разработанные методики позволяют решать прикладные задачи: автоматизированный поиск кислорода и других элементов в атмосферах экзопланет, анализ влияния звездной активности на наблюдаемые спектры, а также уточнение гидродинамических моделей атмосфер. Комплекс также служит основой для интеграции в более сложные системы моделирования не только планетных атмосфер, но и любой космической плазмы.

Структура диссертационной работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем работы 119 страниц, включая 20 рисунков, 12 таблиц, 129 пунктов библиографического списка.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования.

Первая глава освещает современное состояние исследований экзопланетных атмосфер и теоретические основы неравновесной кинетики.

Вторая глава посвящена методике расчета спектральных характеристик. В ней описана архитектура разработанного программного комплекса, представлены ключевые уравнения кинетики, методы расчета населенностей уровней, синтеза спектров и энергетического баланса. Приведена верификация модели.

Третья глава содержит исследование линий атомарного кислорода (130,4 нм и 777,4 нм) как инструмента диагностики. На основе не-ЛТР моделирования установлена чувствительность соотношения их интенсивностей к температуре, определены оптимальные диапазоны для наблюдений и даны рекомендации для планирования наблюдательных программ.

Четвертая глава исследует роль иона Fe II в энергетическом балансе атмосферы ультрагорячего юпитера KELT-9 b. Показано сильное отклонение населенностей его уровней от ЛТР, де-

тально проанализирован его вклад в охлаждение атмосферы и проведено сравнение результатов с другими моделями.

Пятая глава изучает влияние звездных вспышек на усиление сигналов в линиях водорода (Лайман-альфа и H-альфа) в атмосферах экзопланет. Разработана методика моделирования отклика атмосферы, количественно оценено усиление поглощения и определены оптимальные временные окна для наблюдений такого эффекта.

В заключении сформулированы основные научные результаты и выводы работы.

Замечания к содержанию диссертации:

1. Целесообразно рекомендовать автору более детально обозначить пути развития программного комплекса, такие как расширение библиотеки атомных данных и улучшение пользовательского интерфейса для более широкого использования.

2. В рамках устного доклада рекомендована демонстрация меньшего числа ключевых графиков, сопровождая их более подробным разбором физической сущности продемонстрированных зависимостей. Для облегчения восприятия сложных графиков, в особенности профилей поглощения, рекомендуется снабжать их более подробными подписями, включающими явное описание обозначений и осей.

3. Полученный вывод об усилении линии H-альфа во время вспышек был сделан в рамках моделей с водородосодержащей атмосферой. Для полноты картины стоит отметить, что для планет с иным составом (таких как 55 Cancri e или TRAPPIST-1 c) наблюдаемый эффект будет определяться их реальной атмосферой, что является важным направлением для дальнейшего изучения.

4. В рамках презентации результатов представляется полезным уделить дополнительное внимание описанию исходных параметров гидродинамической модели (например, содержанию элементов) и обоснованию ее соответствия наблюдаемым данным для конкретных экзопланет.

5. Результат о температурном максимуме поглощения кислорода заслуживает более детального физического объяснения: почему для планет типа HD 189733 b оптимальный сигнал соответствует температуре около 7500 К, а не, например, 5000 К, следует показать связь между температурой, населенностями уровней и интенсивностью линий.

Следует подчеркнуть, что отмеченные замечания имеют рекомендательный характер и не умаляют научной значимости и достоверности результатов, представленных в диссертационном исследовании.

Результаты диссертационного исследования докладывались в Институте космических исследований РАН, а также были представлены на семинарах Института лазерной физики СО РАН и Института автоматики и электрометрии СО РАН. По теме диссертации в соавторстве Шепелин А.В. опубликовал 9 работ, 4 из которых входят в перечень журналов Web of Science, Scopus и ВАК, а также оформлена одна государственная регистрация программы для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации №2025684208 от 11.09.2025).

Диссертация Шепелина Артема Витальевича вносит существенный вклад в развитие методов спектральной диагностики и моделирования энергетического баланса в атмосферах экзопланет на основе детального учета неравновесной кинетики атомов и ионов. Работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно паспорту специальности 1.3.6. Оптика и рекомендуется к защите.

Отзыв составлен и обсужден на НТС отдела 53 «Физики планет и малых тел Солнечной системы» ИКИ РАН, 5 февраля 2026 г, Протокол № 1.

Зав. отделом «Физики планет и малых тел Солнечной системы» ИКИ РАН
д.ф.-м. н., член-корр. РАН

Подпись О. И. Кораблева заверяю
Ученый секретарь ИКИ РАН

телефон: +7 495 333-41-33
электронный адрес: korab@cosmos.ru



О. И. Кораблев

А.М. Садовский

ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук, Москва 117997, ГСП-7,
Профсоюзная ул. 84/32, iki@cosmos.ru, тел. +7 495 333-52-12, факс +7 495 333-12-48.