

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук



д.ф.-м.н. Прудников О.Н.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН)

Диссертация «Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет» выполнена в научно-исследовательской группе численного моделирования электромагнитных и плазменных процессов (№3.1.1) лаборатории энергетики мощных лазеров отдела лазерной плазмы ИЛФ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Шепелин Артем Витальевич работал в ИЛФ СО РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2021 г. окончил магистратуру физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». Прошел обучение в аспирантуре ИЛФ СО РАН (2021-2025 гг.) по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 1.3.6. «Оптика» № 2/25 выдана 2 октября 2025 г. ИЛФ СО РАН.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук Шайхисламов Илдар Фаритович, заведующий отделом лазерной плазмы (№3) ИЛФ СО РАН.

Диссертация «Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет» была рассмотрена на семинаре ИЛФ СО РАН 18 августа 2025 года.

На семинаре присутствовали:

Тайченачев А.В., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. – председатель семинара

Петров В.В., к.ф.-м.н. – секретарь семинара

Автаева С.В., д.ф.-м.н.

Березуцкий А.Г., к.ф.-м.н.

Бражников Д.В., к.ф.-м.н.

Васильев В.А.

Вишняков В.И.

Внуков Д.В.

Голубовский М.П.

Захаров Ю.П., к.ф.-м.н.

Зилов С.А., д.ф.-м.н.

Ильенков Р.Я., к.ф.-м.н.

Коляда Н.А., к.ф.-м.н.
Костюкова Н.Ю., к.ф.-м.н.
Купцов Г.В.
Купцова А.О.
Логинов М.В.
Майоров А.П.
Макаров А.О.
Медведев А.Э.
Мирошниченко И.Б., к.ф.-м.н.
Михайлов А.М.
Петров В.А.
Покасов П.В., к.ф.-м.н.
Посух В.Г.
Прудников О.Н., д.ф.-м.н.
Сере С.Э.
Тищенко В.Н., д.ф.-м.н.
Трашкеев С.И., д.ф.-м.н.
Филонов А.А.
Чаповский П.Л., д.ф.-м.н.
Черкасова О.П., д.б.н.
Шайхисламов И.Ф., д.ф.-м.н.
Шарипов С.С.
Шепелин А.В.

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы

Важной задачей современной астрофизики является определение физико-химических характеристик атмосфер экзопланет, что позволяет судить об их строении, эволюции и потенциальной обитаемости. Основным инструментом для этого служит спектроскопия, однако ее возможности ограничены принципиальной проблемой: интерпретация наблюдаемых спектров, получаемых с наземных и космических телескопов, невозможна без точных моделей, учитывающих, что верхние слои атмосфер находятся в состоянии, далеком от локального термодинамического равновесия (не-ЛТР). Существующие подходы, заимствованные из моделей звездных атмосфер, не учитывают специфику экзопланет — внешнее облучение, сложную трехмерную геометрию и сильную зависимость от переменной звездной активности. Более того, современные подходы, в первую очередь, сконцентрированы на исследовании населенности основного состояния атомов и ионов, в то время как большинство диагностических линий — это переходы с возбужденных состояний (например, линия 777,4 нм атомарного кислорода). Единственным способом решения данной проблемы является разработка нового метода спектральной диагностики, основанного на расчете кинетики возбужденных уровней атомов и ионов в условиях экзопланет. Подобный программный комплекс позволит впервые с единых позиций проводить реалистичный синтез спектров поглощения и рассчитывать энергетический баланс атмосфер с учетом произвольных энергетических уровней, что открывает путь к точному определению фундаментальных параметров далеких миров и корректному обнаружению биомаркеров, таких как кислород.

Таким образом, целью диссертационной работы Шепелина А.В. является исследование физико-химических процессов в атмосферах экзопланет в условиях, далеких от термодинамического равновесия, путем разработки и применения кинетической

модели, основанной на прямом расчете населенностей возбужденных уровней атомов и ионов. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- Разработать вычислительную библиотеку, реализующую решение системы уравнений кинетики возбужденных состояний атомов и ионов в условиях атмосфер экзопланет, и космической плазмы в целом.
- Организовать взаимодействие кинетического кода с сторонними моделями гидростатических и гидродинамических атмосфер (например, ECHO3D).
- Создать модуль расчета спектров поглощения с учетом рассчитанных населенностей и геометрии атмосферы.
- Разработать модуль для расчета процессов нагрева/охлаждения атмосферы за счет возбужденных уровней.
- Организовать возможность учета переменных спектров звезд для исследования влияния вспышечной активности на динамику населенностей уровней в атмосферах экзопланет.
- Исследовать температурные условия, при которых возможна регистрация линий атомарного кислорода 130,4 нм и 777,4 нм в атмосферах экзопланет.
- Исследовать вклад уровней Fe II в процессы нагрева и охлаждения атмосфер ультрагорячих юпитеров на примере KELT-9 b.
- Исследовать влияние звездных вспышек на поглощение линий Лайман-альфа и H-альфа атомарного водорода.

Личное участие соискателя

Личный вклад автора включает в себя полную разработку программного комплекса Astrea, в ядре которого лежит кинетический модуль для расчета населенностей квантовых уровней, с дополнительными модулями для создания гидростатических моделей атмосфер экзопланет, работы с 3D гидростатическими и гидродинамическими моделями атмосфер, спектрального синтеза, энергетического баланса, моделирования звездных вспышек. Проводилось тестирование и сравнение с многочисленными работами по исследованиям экзопланет и звезд, а также с другими программными кодами.

Новизна

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- Создан программный комплекс, объединяющий не-ЛТР кинетику, синтез спектра и детальный анализ энергетического баланса атмосферы с учетом вклада отдельных процессов и энергетических уровней элементов и возможностью использования многомерных 1D/2D/3D входных данных (скалярные поля плотностей, температур и векторные поля скоростей).
- Обнаружено, что соотношение линий кислорода 130,4 нм и 777,4 нм чувствительно к температуре верхних слоев атмосферы, что важно для планирования наблюдений и обнаружения кислорода в атмосферах экзопланет.
- Установлено, что ионы железа оказывают значительное влияние на тепловой баланс ультрагорячих экзопланет за счет специфической кинетики возбужденных уровней.
- Определен диапазон параметров звездных вспышек и рекомендации по их наблюдениям для обнаружения линии H-альфа в атмосферах экзопланет.

Степень достоверности результатов

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям, наблюдениям и теоретическим результатам других работ. Все теоретические и вычислительные результаты получены с помощью апробированных методик и известных вычислительных методов. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых

мировых журналах и представлены на международных конференциях, что свидетельствует об обоснованности и достоверности сделанных выводов.

Практическая значимость

Разработанный методический аппарат может быть использован: для планирования и интерпретации наблюдений с помощью современных и планируемых к запуску космических и наземных телескопов (HST, JWST, VLT (Очень Большой Телескоп), ARIEL, LUVOIR, Спектр-УФ); для более точных расчетов аэрономии, термодинамики и эволюции атмосфер экзопланет; в качестве базы для расширения существующих МГД пакетов моделирования космической плазмы и атмосфер; в задачах автоматического поиска кислорода в атмосферах экзопланет, а также других биомаркеров.

Соответствие специальности

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 «Оптика», так как тематика и методы исследования соответствуют паспорту специальности в части физико-математических наук.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Работа освещалась на 13 международных и всероссийских конференциях: Семнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2022; The thirteenth Moscow solar system symposium 13M-S3, Moscow 2022; Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2023; The fourteenth Moscow solar system symposium 14M-S3, Moscow 2023; Двадцать восьмая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных, Новосибирск 2024; Международная школа «Исследования экзопланет – 2022» для молодых ученых и студентов, Москва 2022; Конкурс-конференция ИЛФ СО РАН 2022, Новосибирск 2022; Конференция «Исследование звезд с экзопланетами», Москва 2022; I-ая Всероссийская школа Национального центра физики и математики для студентов и молодых учёных по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике, Саров 2023; Всероссийская астрономическая конференция «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», Нижний Архыз 2024; Конференция «XXV Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям», Новосибирск 2024; Конференция «Исследование звезд с экзопланетами», Москва 2024; Конференция молодых учёных ИЛФ СО РАН, Новосибирск 2024.

Основные материалы работы опубликованы в 9 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах рекомендованных ВАК, 5 — в трудах конференций. Разработанная в ходе диссертационного исследования программа для ЭВМ «Астрея: Экзопланеты» прошла официальную государственную регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Публикации в журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Rumenskikh M.S., Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Miroshnichenko I.B., Berezutsky A.G., Shepelin A.V., Dwivedi N.K. Mysterious non-detection of HeI (23S) transit absorption of GJ436b // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Oxford University Press (OUP), 2023. P. 4120–4129.
2. Shaikhislamov I.F., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S., Shepelin A.V., Berezutsky A.G., Sharipov S.S., Golubovsky M.P., Chibrarov A.A., Khodachenko M.L. Aeronomy of the atmosphere of ultra-hot jupiter Kelt9b with allowance for the kinetics of hydrogen atom levels // Astronomy Reports. Pleiades Publishing Ltd, 2024. Vol. 68, № 8. P. 802–817.

3. Shaikhislamov I.F., Golubovsky M.P., Shepelin A.V., Miroshnichenko I.B., Sharipov S.S., Rumenskikh M.S., Berezutsky A.G., Chibrarov A.A., Khodachenko M.L. Kinetic simulation of ultra-hot jupiter KELT-9b // Solar System Research. Pleiades Publishing Ltd, 2025. Vol. 59, № 3. P. 23.
4. Shaikhislamov I.F., Miroshnichenko I.B., Sharipov S.S., Rumenskikh M.S., Golubovsky M.P., Berezutsky A.G., Shepelin A.V., Chibrarov A.A., Khodachenko M.L. Aeronomy of the upper atmosphere of KELT-9 b // Astronomy & Astrophysics. EDP Sciences, 2025. Vol. 696. P. A211.

Официально зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности:

1. Шепелин А.В. Программный комплекс для спектральной диагностики атмосфер экзопланет «Астрея: Экзопланеты». прогр. для ЭВМ, RU2025684208, зарег. 11.09.2025; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация «Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет» Шепелина Артема Витальевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Секретарь семинара,
к.ф.-м.н.



Петров В.В.

Ученый секретарь ИЛФ СО РАН,
к.ф.-м.н.



Покасов П.В.