

На правах рукописи

**Шепелин Артем Витальевич**

**Моделирование кинетики уровней атомов и ионов для спектральной  
диагностики и расчета энергетического баланса в атмосферах экзопланет**

Специальность 1.3.6 — «Оптика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2025

Работа выполнена в Научно-исследовательской группе численного моделирования электромагнитных и плазменных процессов лаборатории Энергетики мощных лазеров Отдела лазерной плазмы «Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук»

- Научный руководитель: **Шайхисламов Илдар Фаритович**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт лазерной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук
- Официальные оппоненты: **Тригуб Максим Викторович**,  
доктор технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт оптики атмосферы  
им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской  
академии наук
- Снытников Валерий Николаевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки «Федеральный исследовательский  
центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова  
Сибирского отделения Российской академии наук»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт космических  
исследований Российской академии наук

Защита состоится «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.028.01, созданного на базе Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института автоматики и электрометрии СО РАН <http://www.iae.nsk.su/>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
Доктор физико-математических наук

Л.В. Ильичев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В последние десятилетия исследование экзопланет, т.е. планет за пределами Солнечной системы, из области гипотетической астрономии перешло в статус одного из центральных направлений наблюдательной астрофизики. Открытие первой достоверной экзопланеты 51 Пегаса b (Димидий), обращающейся вокруг звезды главной последовательности на расстоянии 50,1 световых лет от нас, в 1995 году положило начало новой эпохе, в которой изучение удаленных от нас планетных систем стало возможным благодаря бурному развитию методов фотометрии и спектроскопии, а также созданию специализированных космических обсерваторий [1]. На текущий момент (2025 год), в одном из наиболее актуальных каталогов экзопланет NASA Exoplanet Archive [2] числится более 5870 подтвержденных экзопланет, большая часть которых является так называемыми горячими юпитерами или теплыми нептонами — горячими газообразными планетами, вращающимися на близком расстоянии от звезды. При этом, наличие планет у звезд, скорее правило, чем исключение, и их количество в нашей галактике оценивается не менее чем 100 миллиардов [3]. Важно отметить, что большая часть найденных экзопланет предполагала технологических усилий на пределе их возможностей. Это означает, что зачастую данных фотометрии (интегральный поток света) и спектрометрии (смещение спектральных линий, поток на конкретных длинах волн) хватает исключительно на подтверждение факта существования экзопланеты. Для более подробного изучения, например химического состава атмосфер и других важных свойств экзопланет зачастую применяются подходы вычислительной физики, с помощью которых пытаются выявить неизвестные параметры путем согласования ограниченных данных наблюдаемых оптических спектров и уже известных теорий.

Одной из важнейших задач современной экзопланетологии (раздел астрономии и астрофизики, занимающийся изучением экзопланет) является определение физических и химических характеристик атмосфер экзопланет. Далее, по свойствам атмосферы возможно делать предположения о внутренней структуре планеты, ее эволюции и об условиях на поверхности. Для горячих экзопланет также является естественным деление атмосферы на нижнюю и верхнюю. При этом, ключевым инструментом изучения экзопланет является оптическая спектроскопия, позволяющая исследовать химический состав, температуру, структуру и динамику атмосфер, а также аэрономию. Детальное спектроскопическое исследование атмосфер может обнаружить элементы, потенциально сопутствующие биомаркерам, такие как молекулярный кислород, озон, метан и водяной пар, а также выделить потенциально обитаемые объекты.

Однако для получения достоверной информации из спектральных данных необходимо создание реалистичных моделей атмосфер экзопланет. Проблема осложняется тем, что, в отличие от относительно близких нам планет Солнечной системы, атмосферы экзопланет, доступные в настоящее время для исследований, часто находятся в экстремальных условиях — они подвержены интенсивному ультрафиолетовому и рентгеновскому излучению от родительской звезды, могут демонстрировать большие температурные градиенты, а также испытывать интенсивное истечение вещества.

Особую значимость представляет разработка методов оптической спектроскопии, способных интерпретировать наблюдаемые спектры с учетом

неравновесных процессов. Первое поколение моделей экзопланетных атмосфер основывались на предположении о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР, local thermodynamic equilibrium, LTE). Это допущение сильно упрощает расчет энергетических уровней атомов и ионов, но не соответствует реальным условиям, особенно в верхних слоях атмосферы. Это актуально не только для верхних атмосфер горячих экзопланет, но и ионосфер планет Солнечной системы. Для получения более точных моделей, способных правильно интерпретировать наблюдательные данные, необходимо учитывать не-ЛТР (неравновесное, НЛТР, NLTE, non-LTE) распределение населенностей возбужденных уровней элементов, которое зависит не только от температуры, но и от множества дополнительных факторов: плотности, поля излучения, столкновительных процессов. Именно в этих условиях и становятся актуальными спектральные методы с применением кинетических моделей.

Таким образом, задача создания физически полных моделей для анализа не-ЛТР процессов в экзопланетных атмосферах с возможностью синтеза спектра поглощения излучения и расчета теплового баланса имеет первостепенное значение как для фундаментальной науки, так и для практики интерпретации наблюдательных данных современных телескопов, таких как космический телескоп «Джеймс Уэбб» (JWST), космический телескоп «Хаббл» (HST), а также будущих миссий ARIEL (Атмосферный инфракрасный исследователь экзопланет дистанционного зондирования), LUVOIR (Большой ультрафиолетовый оптический инфракрасный исследователь) и Российской космической миссии «Спектр-УФ».

## **Степень разработанности проблемы**

Разработка методов спектроскопического анализа атмосфер восходит к классическим работам по моделированию звездных атмосфер [4,5], где впервые были описаны численные схемы расчета кинетики квантовых переходов, учитывающие сразу и ударные и радиационные процессы для многоуровневых атомов и ионов. Спектральные исследования атмосфер экзопланет активно развиваются, начиная с работ по детектированию натрия в атмосфере HD 209458 b [6] до недавних наблюдений JWST, охватывающих молекулярный состав суперземель и горячих юпитеров. В рамках моделирования пространственной структуры и динамики атмосфер экзопланет подходы варьируются от простых изотермических моделей [7] до сложных 3D гидродинамических и магнитогидродинамических расчетов [8,9]. Важным аспектом является возможность перекрытия линий спектров различных веществ при наблюдениях, которая также решается с помощью моделирования радиационного переноса.

Однако большинство теоретических моделей ограничивается предположением ЛТР, что не отражает реальных условий верхних атмосфер горячих экзопланет, где прямые и обратные кинетические процессы зачастую не уравниваются друг друга, поскольку происходит передача энергии от излучения звезды в нагрев и течение вещества. Не-ЛТР модели широко применяются для звездных атмосфер и солнечной короны [10], но их адаптация к экзопланетным условиям все еще находится на начальной стадии. Известны отдельные попытки учета не-ЛТР эффектов, например, в расчетах линий водорода [11,12], гелия [13,14], металлов (Fe II, Mg II) [15,16], резонансных линий O I, C II, Si III [17,18], но в большинстве случаев модели не включают полную кинетику с десятками или сотнями уровней. Кроме того, они редко интегрируются с расчетом термодинамических характеристик атмосферы (нагрев и охлаждение).

Некоторые из моделируемых линий возможно обнаружить с помощью наземных телескопов, что усиливает практический смысл данной задачи. Впервые таким методом была детектирована линия He I 10 830 Å [13], но уже вскоре более 30 новых объектов было исследовано с положительным обнаружением поглощения в более чем половине случаев [16].

Также важным направлением является создание 1D и 3D моделей атмосфер с учетом излучения и химических реакций (например, программы PHOENIX, HELIOS и др.) [19,20]. Однако ни один из известных кодов не сочетает в себе одновременно: 3D магнитную гидродинамику, не-ЛТР кинетику возбужденных состояний, возможность расчета нагрева и охлаждения, синтеза спектра, анализа вклада отдельных атомов и ионов в тепловой баланс, учета эффектов спектральной переменности (например, звездных вспышек).

## **Цель работы**

Исследование физико-химических и оптических 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.

## **Основные задачи**

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать программный комплекс для моделирования оптических свойств (населенностей квантовых уровней, спектров поглощения и энергетического баланса) неравновесной плазмы атмосфер экзопланет, обеспечив его интеграцию с гидродинамическими моделями.
2. Создать и верифицировать методику спектральной диагностики температурных условий в атмосферах экзопланет на основе анализа соотношения интенсивностей линий атомарного кислорода 130,4 нм и 777,4 нм.
3. Исследовать влияние оптических переходов иона Fe II на процессы нагрева и охлаждения в атмосферах ультрагорячих юпитеров и оценить их вклад в формирование наблюдаемых спектров.
4. На примере линии H-альфа оценить оптический отклик атмосфер экзопланет на переменность звездного излучения в УФ-диапазоне, вызванную вспышечной активностью.

## **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются атмосферы горячих и ультрагорячих экзопланет, в первую очередь транзитных объектов, у которых можно наблюдать линии поглощения в УФ- и ближнем ИК-диапазонах.

Предметом исследования выступают физико-химические процессы, связанные с возбуждением и ионизацией атомов и ионов, их влиянием на спектры поглощения и на энергетический баланс атмосфер экзопланет в условиях не-ЛТР.

## **Методы исследования**

В работе применяются: методы моделирования гидростатических атмосфер (распределение температуры и плотности химических элементов в зависимости

от гравитационного поля планеты и звезды) в 1D, 2D и 3D; численные методы решения системы уравнений баланса населенностей уровней атомов и ионов с учетом радиационных и столкновительных переходов; алгоритмы синтеза спектра поглощения (интегрирование уравнений переноса излучения) на основе рассчитанных населенностей уровней; расчет процессов охлаждения и нагрева атмосферы; генерация синтетических спектров поглощения и их сопоставление с наблюдательными данными; учет звездных вспышек путем вариации звездных спектров в УФ диапазоне.

## **Научная новизна**

Впервые получены следующие результаты:

1. Создан программный комплекс, объединяющий не-ЛТР кинетику, синтез спектров поглощения 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).
2. Обнаружено, что соотношение спектральных линий кислорода 130,4 нм и 777,4 нм чувствительно к температуре верхних слоев атмосферы, что важно для планирования оптических наблюдений и обнаружения кислорода в атмосферах экзопланет.
3. Установлено, что оптические процессы с участием иона железа оказывают значительное влияние на тепловой баланс ультрагорячих экзопланет за счет специфической кинетики возбужденных уровней.
4. Определен диапазон параметров звездных вспышек и рекомендации по их наблюдениям для обнаружения оптической линии Н-альфа в атмосферах экзопланет.

## **Практическая значимость**

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

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Соотношение интенсивностей линий атомарного кислорода 130,4 нм и 777,4 нм, обусловленное различием в механизмах их возбуждения, является новым спектроскопическим методом независимого определения температуры атмосфер горячих юпитеров в диапазоне 2000–12 000 К.
2. Оптические свойства иона Fe II, определяемые его уникальной структурой уровней, обуславливают его наибольший среди примесных элементов вклад в энергетический баланс атмосфер ультрагорячих юпитеров. Эффективное охлаждение осуществляется за счет интенсивного переизлучения в УФ-области спектра на множестве переходов, а полный учет не-ЛТР кинетики уровней Fe II необходим для корректной интерпретации его наблюдаемых спектров поглощения.

3. Звездные вспышки с энергией  $10^{30}$ – $10^{34}$  эрг вызывают наблюдаемое усиление поглощения в оптической линии Н-альфа водорода в атмосферах экзопланет на величину  $\sim 0,25$  % с характерным временем релаксации 1–3 часа, что доступно для регистрации современными астрофизическими оптическими приборами.

**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 исследованию экзопланет и звезд, а также с другими программными кодами.

## **Апробация результатов и публикации**

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 2024 года «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.

## **Публикации**

Основные материалы работы опубликованы в 9 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах рекомендованных ВАК, 5 — в трудах конференций. В рамках работы разработана и опубликована под лицензией GPL-3.0 программная библиотека Astrea. Дальнейшим развитием данного продукта стал Программный комплекс для спектральной диагностики атмосфер экзопланет «Астрей: Экзопланеты», который прошел государственную регистрацию (свидетельство о государственной регистрации № 2025684208 от 11.09.2025).

## **Объем и структура диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, содержит 119 страниц, 20 рисунков, 12 таблиц и библиографический список из 129 пунктов.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** рассматривается значимость темы диссертационного исследования, формулируются цели и задачи, описываются методы исследования, подчеркивается научная новизна полученных результатов, а также приводятся защищаемые положения.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** описаны современные спектральные методы, применяемые для исследования атмосфер экзопланет, а также ключевые проблемы и перспективы их изучения. Рассмотрены основные подходы к наблюдению и моделированию экзопланетных атмосфер, уделено внимание влиянию неравновесных эффектов на интерпретацию спектроскопических данных.

**Раздел 1.1** описывает роль атмосфер экзопланет как важного источника информации об их составе, физических условиях и эволюционных процессах. Особое внимание уделено молекулам, связанным с потенциальной обитаемостью, таким как вода, кислород и метан. Также рассмотрены технические сложности наблюдений, обусловленные малыми угловыми размерами планет и ярким фоном родительских звезд. Описаны основные типы спектроскопических методов, включая высокое, среднее и низкое разрешение, а также мультиспектральные наблюдения, и приведены примеры инструментов, используемых для таких исследований.

В **разделе 1.2** приведены основные спектроскопические методы изучения экзопланетных атмосфер, такие как транзитная и эмиссионная спектроскопия, а также фазовая спектроскопия. Подробно рассмотрены принципы транзитного метода, включая формирование спектра пропускания и его зависимость от температуры, состава и геометрии атмосферы. Описаны преимущества эмиссионной спектроскопии для изучения теплового излучения планет, а также возможности фазовой спектроскопии в исследовании перераспределения тепла и динамики атмосфер.

**Раздел 1.3** посвящен влиянию кинетики возбужденных уровней (не-ЛТР эффектов) на аэрономию и интерпретацию наблюдательных данных. Показано, что в верхних слоях атмосфер экзопланет условия часто далеки от локального термодинамического равновесия, что требует решения кинетических уравнений для точного расчета населенностей уровней. Обсуждаются последствия пренебрежения не-ЛТР эффектами, включая ошибки в определении состава и температурных профилей.

В **разделе 1.4** дан обзор существующих кинетических моделей, применяемых в астрофизике, таких как CHIANTI, Cloudy, ATMO и других. Описаны их возможности и ограничения, особенно в контексте моделирования экзопланетных атмосфер. Подчеркнута необходимость разработки специализированных подходов, учитывающих сложную геометрию, многоуровневую кинетику и взаимодействие различных физических процессов.

**Раздел 1.5** описывает проблемы обнаружения ключевых элементов, включая кислород и металлы, в атмосферах экзопланет. Рассмотрены факторы, затрудняющие их детектирование, такие как наложение спектральных линий, влияние земной атмосферы и звездной активности. Приведены примеры успешных наблюдений, демонстрирующие возможности современных инструментов при условии корректного моделирования.



В **разделе 1.6** обсуждается роль возбужденных уровней в энергетическом балансе атмосфер экзопланет. Показано, как процессы нагрева и охлаждения, связанные с возбужденными состояниями атомов и ионов, влияют на термодинамическую структуру атмосфер. Особое внимание уделено линиям металлов, таким как Fe II и Mg II, которые могут играть ключевую роль в охлаждении верхних слоев атмосфер ультрагорячих юпитеров.

В **разделе 1.7** приводится итог о первой главе, ее роли в формировании теоретической основы для последующих исследований, подчеркивается важность учета не-ЛТР эффектов и необходимость разработки новых методов моделирования для точной интерпретации спектроскопических данных.

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** описаны методы расчета спектральных характеристик излучения в неравновесной плазме атмосфер экзопланет, включая постановку задачи, алгоритмы численного моделирования и архитектуру разработанного программного обеспечения.

**Раздел 2.1** описывает постановку задачи в рамках глобального моделирования атмосфер экзопланет. Рассмотрены ключевые аспекты, такие как необходимость учета неравновесных эффектов (не-ЛТР), интеграция гидродинамических и радиационных процессов, а также синтез спектра. Особое внимание уделено взаимодействию различных физических модулей, что позволяет анализировать энергетический баланс и строить реалистичные модели. Архитектура вычислительной схемы, включая последовательность операций, представлена на рисунке 1.

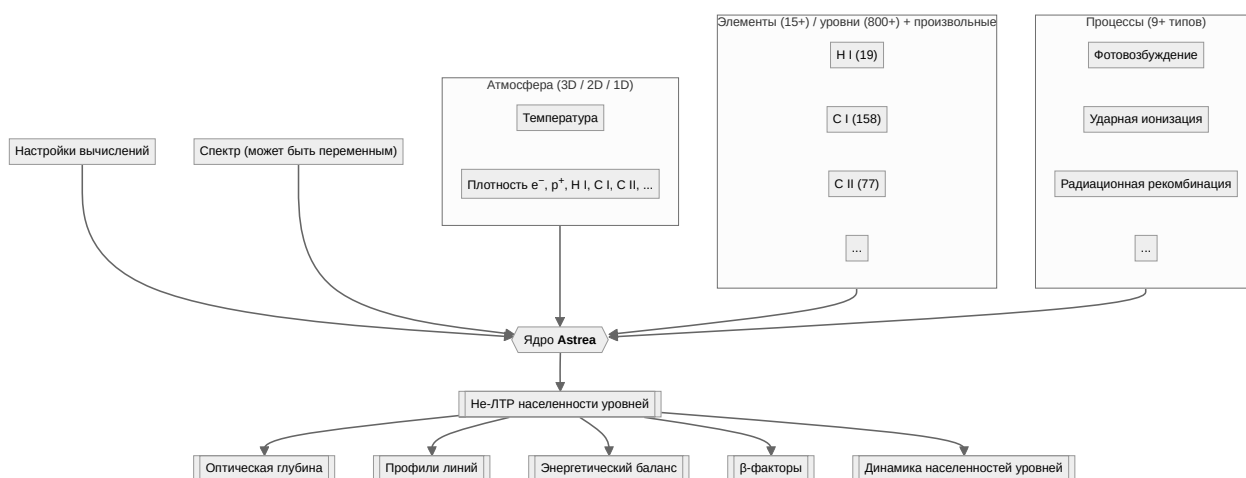


Рисунок 1: Архитектура и последовательность операций Astrea.

В **разделе 2.2** приведены входные данные, необходимые для моделирования: распределения температуры, плотностей электронов и ионов, а также геометрическая структура атмосферы. Описаны методы задания начальных параметров, включая использование барометрической формулы и баланса фотоионизации — радиационной рекомбинации. Особое внимание уделено адаптации модели к различным геометриям (1D, 2D, 3D) и методам интерполяции данных.

**Раздел 2.3** посвящен методике расчета населенностей уровней в условиях ЛТР и не-ЛТР. Подробно рассмотрены уравнения ЛТР (Больцмана и Саха), а также система кинетических уравнений (1 – 3), описывающая переходы между уровнями:

$$\frac{d\mathbf{n}}{dt} = \hat{R} \mathbf{n}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{n}$  — вектор населенностей уровней,  $t$  — время,  $\hat{R}$  — «матрица связей» (матрица скоростей переходов, оператор полной энергии системы), которая выражается через скорости переходов  $R_{if}$  (переход  $i \rightarrow f$ ):

$$\hat{R} = \begin{cases} -\sum_{k \neq i} R_{ik}, & i = j \\ R_{ji}, & i \neq j \end{cases},$$

и выполняется условие  $\sum_{k=0} \hat{R}_{kj} = 0$ .

В дискретном виде уравнение (1) сводится к нахождению населенностей на следующем шаге по времени:

$$\mathbf{n}_{\tau+1} = \hat{P} \mathbf{n}_{\tau} = (I - \hat{R}\Delta t)^{-1} \mathbf{n}_{\tau}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — индекс итерации по времени,  $\hat{P}$  — оператор скоростей квантовых переходов (оператор временной эволюции, пропагатор системы),  $I$  — единичная матрица,  $\Delta t$  — шаг по времени. Система уравнений для не-ЛТР — это в общем случае жесткая система линейных уравнений. Для ее решения используется LU-разложение с модифицированной итерацией Гаусса, либо метод обратной матрицы с предварительной нормализацией, в зависимости от размера задачи.

Скорость перехода  $R_{if}$  (из уровня/континуума  $i$  в уровень/континуум  $f$ ), в общем случае, это интеграл вида

$$R_{if} \sim \int_{E_{min}}^{\infty} \sigma_{if}(E) F(E) dE, \quad (3)$$

где  $E$  — энергия (или пропорциональная/обратная энергии величина вроде частоты или длины волны),  $E_{min}$  — минимальная энергия для осуществления перехода,  $\sigma_{if}$  — сечение перехода,  $F$  — статистическое распределение энергии (например, спектр излучения, или скорости электронов). Чаще всего этот интеграл не вычисляется напрямую, а используются различные аппроксимации в зависимости от типа перехода, химического элемента и условий плазмы (частные случаи подробно описаны в разделе).

Матричный подход к решению этих уравнений позволяет эффективно учитывать радиативные и ударные процессы. В разделе также приведены таблицы, содержащие списки поддерживаемых переходов и аппроксимационные формулы для сечений и скоростей процессов.

**Раздел 2.4** описывает базы данных химических элементов и спектров, используемые в модели. Рассмотрены такие источники, как NIST ASD, Kurucz

Atomic Spectral Line Database, CHIANTI и другие, а также методы их унификации и валидации. Важными источниками данных также являются многочисленные статьи, посвященные исследованиям Солнца и других звезд [21–28]. Отдельно упомянуты встроенные в программу Astrea звездные спектры.

В разделе 2.5 представлены алгоритмы численного решения, включая методы расчета населенностей уровней, синтеза спектра и энергетического баланса. Описаны способы решения жестких систем уравнений (LU-разложение, итерационные методы), а также учет оптических глубин и эффекта Доплера при синтезе спектра.

Спектрально разрешенное поглощение  $\alpha(v) = 1 - \kappa(v)$  вычисляется путем интегрирования лучей, исходящих от звезды до наблюдателя:

$$\alpha = \sum_i \frac{1 - \exp(-\tau_i)}{N},$$

$$\tau = \int_0^L n \sigma dl,$$

$$\sigma = A_{ji} \frac{g_j}{g_i} \frac{c^2}{8\pi^2 \nu_{ij}^2} \frac{\sqrt{\pi}}{\Delta \nu_D} H(u, a),$$

где  $v$  — доплеровские скорости,  $\tau$  — оптическая глубина,  $N$  — количество лучей,  $L$  — длина луча от звезды до наблюдателя (по расчетной области),  $n$  — населенности нижнего уровня,  $\sigma$  — сечения перехода,  $A_{ji}$  — скорость спонтанной эмиссии,  $g_i$  и  $g_j$  — статистические веса уровней  $i$  и  $j$ ,  $c$  — скорость света в вакууме,  $\nu_{ij}$  — частота перехода между уровнями  $i$  и  $j$ ,  $\Delta \nu_L$  — естественная (лоренцевская) ширина линии,  $\Delta \nu_D$  — термальная (доплеровская) ширина линии,  $H(u, a)$  — функция Фойгта.

Охлаждение атмосферы  $\Lambda$  определяется ударной ионизацией «сi» (потерей энергии при столкновениях, приводящих к ионизации) и ударным возбуждением «се» (переходом частиц на более высокие уровни с поглощением тепловой энергии), и имеет вид:

$$\Lambda = \sum_{ij} E_{ij} R_{ij}^{ce} n_i + \sum_i I_i R_{ik}^{ci} n_i, \quad (4)$$

где  $E_{ij}$  — разность энергий между уровнями  $i$  и  $j$ ,  $I_i$  — потенциал ионизации уровня  $i$ .

Нагрев атмосферы обусловлен фотоионизацией «pi» (поглощением высокоэнергетических фотонов, приводящим к ионизации атомов) и ударным деовозбуждением «cd» (передачей энергии от возбужденных частиц к термическому газу при неупругих столкновениях), и функция нагрева  $\Gamma$  вычисляется как сумма вкладов от этих процессов:

$$\Gamma = \sum_{ij} E_{ij} R_{ji}^{cd} n_j + \sum_j \left( I_j - \frac{3}{2} k_B T \right) R_{jk}^{pi} n_j, \quad (5)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана.

**Раздел 2.6** раскрывает архитектуру программного обеспечения, включая модули для работы с геометрией, атомными данными, расчетом населенностей и визуализацией результатов. Подчеркнута гибкость и масштабируемость модели, обеспечивающая ее применение для различных классов экзопланет.

В **разделе 2.7** проведена верификация модели путем сравнения с аналитическими решениями, результатами программы Cloudy (рисунок 2) и опубликованными данными. Показана устойчивость алгоритмов к вариациям входных параметров, что подтверждает надежность разработанных методов.

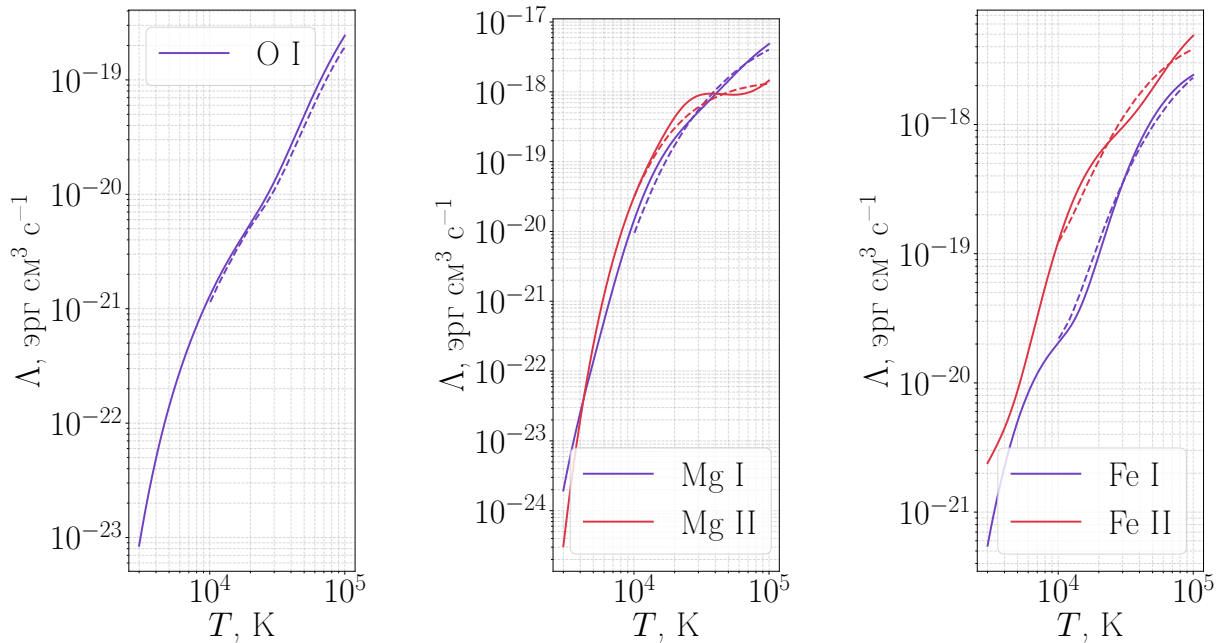


Рисунок 2: Функции охлаждения элементов вычисленные с помощью Astrea (сплошная линия) и Cloudy [29] (штриховая линия). Сравнение предполагает отсутствие радиационного поля и нормализацию на плотность электронов и плотность ионов.

В **разделе 2.8** подведены итоги — вторая глава представляет комплексный подход к моделированию спектральных характеристик атмосфер экзопланет, сочетающий теоретические методы, численные алгоритмы и практическую реализацию в виде программного обеспечения.

В **ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ** 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. Особое внимание уделено расчету населенностей уровней в условиях неравновесной термодинамики (не-ЛТР) с помощью разработанной программы Astrea.

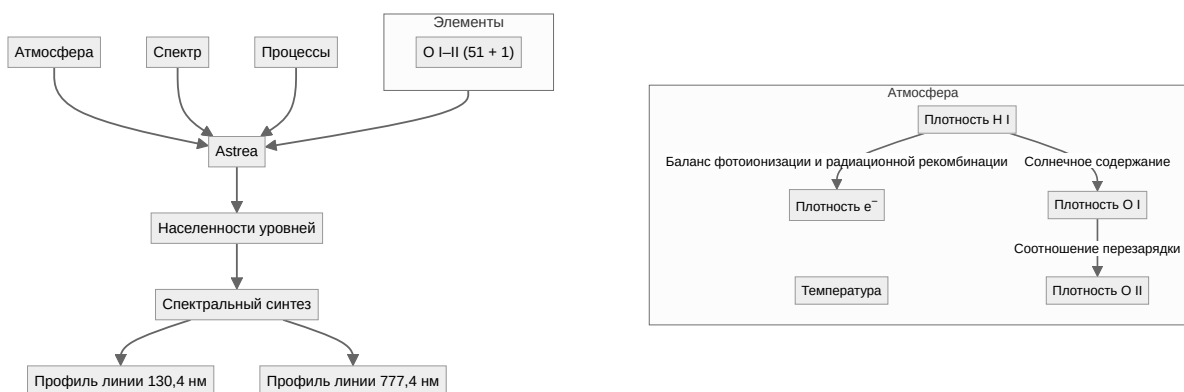


Рисунок 3: Конфигурация вычислений для исследования поглощения в линиях O I 130,4 нм и 777,4 нм.

**Раздел 3.1** описывает физику формирования линий O I 130,4 нм и 777,4 нм, включая их электронные переходы и чувствительность к различным процессам. Показано, что ультрафиолетовая линия 130,4 нм формируется преимущественно за счет радиационных процессов, таких как резонансное рассеяние и фотоионизация, тогда как инфракрасная линия 777,4 нм в большей степени зависит от столкновительного возбуждения. Также обсуждаются эффекты самопоглощения и влияние геометрии атмосферы на профили линий.

Таблица 1: Используемые параметры планетных систем для создания моделей атмосфер, где  $M_J$  — масса Юпитера,  $R_J$  — радиус Юпитера,  $R_p$  — радиус планеты,  $R_S$  — радиус Солнца,  $M_S$  — масса Солнца. Данные адаптированы из базы Encyclopaedia of exoplanetary systems [30].

Планета	Масса планеты, $M_J$	Радиус планеты, $R_J$	Орбита планеты, $R_p$	Радиус звезды, $R_S$	Масса звезды, $M_S$
GJ 436 b	0,05836	0,32519	0,02887	0,464	0,452
HD 189733 b	1,138	1,138	0,031	0,805	0,8
HD 209458 b	0,7	1,36	0,045	1,2	1,148
KELT-9 b	2,88	1,936	0,03368	3,0	3,0
KELT-16 b	2,75	1,415	0,02044	1,36	1,211
MASCARA-1 b	3,7	1,5	0,043	2,1	1,72
MASCARA-5 b	3,14	1,508	0,04	1,92	1,9
TOI-1518 b	2,3	1,875	0,039	1,95	1,79
WASP-189 b	1,99	1,619	0,04	2,33	1,887

В **разделе 3.2** приведены методы параметрического построения трехмерных гидростатических моделей атмосфер, используемых для последующих расчетов. Описаны основные параметры моделей, включая распределение температуры, плотности и химического состава, а также их зависимость от характеристик планетных систем. В таблице 1 представлены параметры исследуемых экзопланет, такие как масса, радиус и орбитальные характеристики, которые были использованы для создания моделей. Условная схема вычислений, применяемая в работе, проиллюстрирована на рисунке 3.

**Раздел 3.3** посвящен расчету не-ЛТР населенностей уровней атомарного

кислорода. Рассмотрены ключевые процессы, влияющие на населенности, включая радиационные и столкновительные переходы, фотоионизацию и рекомбинацию. Описан численный подход к решению системы уравнений кинетики, а также методы верификации результатов, такие как сравнение с ЛТР-населенностями и реконструкция наблюдаемых спектров.

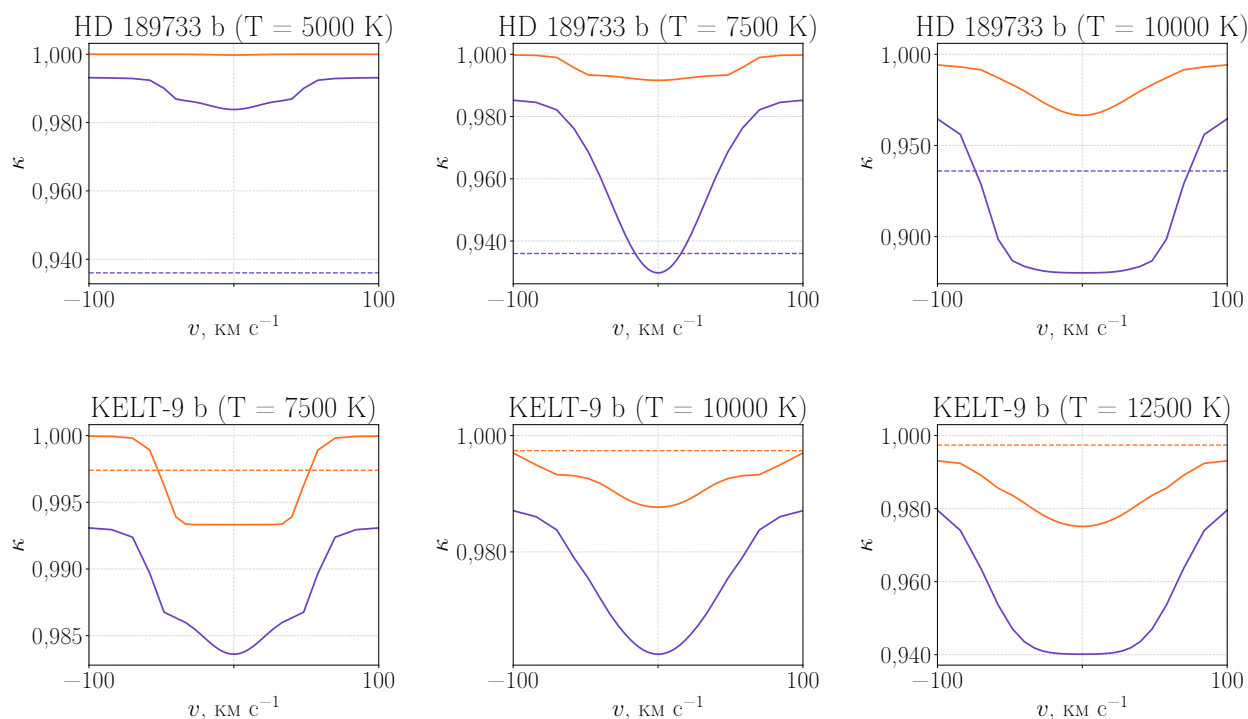


Рисунок 4: Профили поглощения линий О I 130,4 нм (■) и 777,4 нм (■) в атмосферах экзопланет HD 189733 b и KELT-9 b в зависимости от доплеровской скорости. Пунктиром обозначены результаты наблюдения глубины поглощения соответствующей линии в атмосфере соответствующей экзопланеты.

В разделе 3.4 анализируется зависимость взаимной интенсивности линий 130,4 нм и 777,4 нм от температуры. Показано, что их соотношение служит чувствительным индикатором температурных условий в атмосферах экзопланет. На рисунке 4 представлены профили поглощения этих линий для планет HD 209458 b и KELT-9 b, демонстрирующие их поведение в зависимости от доплеровской скорости.

Раздел 3.5 определяет температурные границы, в которых линии кислорода остаются наблюдаемыми и информативными. Установлено, что оптимальный диапазон для их использования составляет 5000–8000 K, тогда как при температурах выше 10 000 K интенсивность линий снижается из-за ионизации кислорода.

В разделе 3.6 обсуждаются рекомендации для наземных и космических наблюдений линий кислорода. Рассмотрены перспективные инструменты, такие как HST, JWST, LUVOIR и ELT, а также стратегии наблюдений, включая накопление сигнала за несколько транзитов. На рисунке 5 представлена карта обнаружения линий О I в параметрическом пространстве масса — температура, которая помогает планировать наблюдательные кампании.

Раздел 3.7 резюмирует, что глава 3 предоставляет комплексный анализ



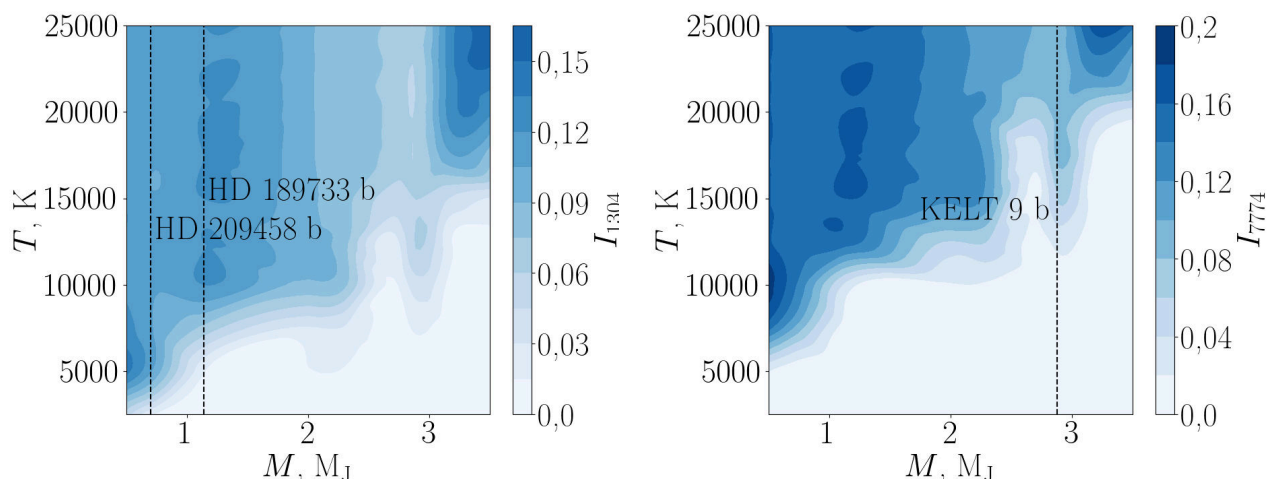


Рисунок 5: Карта обнаружения линий О I 130,4 нм и 777,4 нм в параметрическом пространстве масса—температура. Интенсивность цвета отражает глубину поглощения соответствующей линии. Важно учитывать, что эффективная температура атмосфер ультрагорячих юпитеров может достигать 10 000 К и более. Так, KELT-9 b с температурой, превышающей 10 000 К, находится в оптимальной зоне для наблюдений линии 777,4, что вполне согласуется с наблюдениями. В то же время, линия 130,4 нм обнаружима в атмосферах HD 189733 b и HD 209458 b с максимальными температурами верхних слоев до 8000 К.

спектральных линий кислорода как инструмента диагностики атмосфер экзопланет, включая теоретическое обоснование, численное моделирование и практические рекомендации для наблюдений.

**ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА** посвящена исследованию роли иона Fe II и его возбужденных уровней в аэрономии атмосфер ультрагорячих юпитеров, в частности, планеты KELT-9 b. В главе детально анализируются процессы нагрева и охлаждения, связанные с этим ионом, а также их влияние на тепловой баланс атмосферы. Для расчета населенностей уровней и энергетического баланса атмосфер в условиях сильного отклонения от локального термодинамического равновесия (не-ЛТР) используется разрабатываемая автором вычислительная библиотека Astrea. Общая схема исследования представлена на рис. 6.

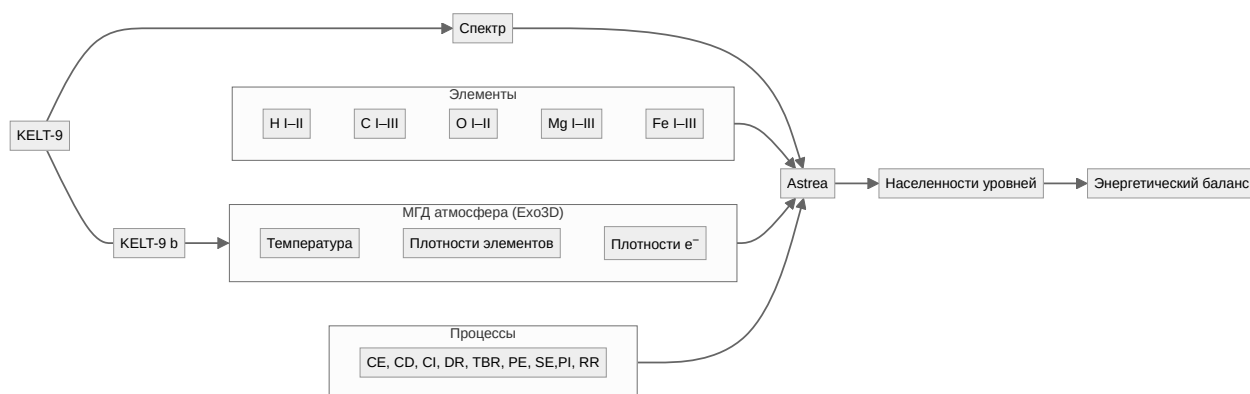


Рисунок 6: Конфигурация вычислений для исследования энергетического баланса экзопланеты KELT-9 b.

**Раздел 4.1** описывает ультрагорячий юпитер KELT-9 b и его уникальные особенности. Планета обладает высокой температурой (до 4600 K) и интенсивной ионизацией атмосферы из-за близости к звезде спектрального класса B9.5–A0V. В разделе подчеркивается, что KELT-9 b служит «естественной лабораторией» для изучения процессов, не встречающихся в Солнечной системе, таких как формирование протяженной плазмосферы и потеря массы атмосферы.

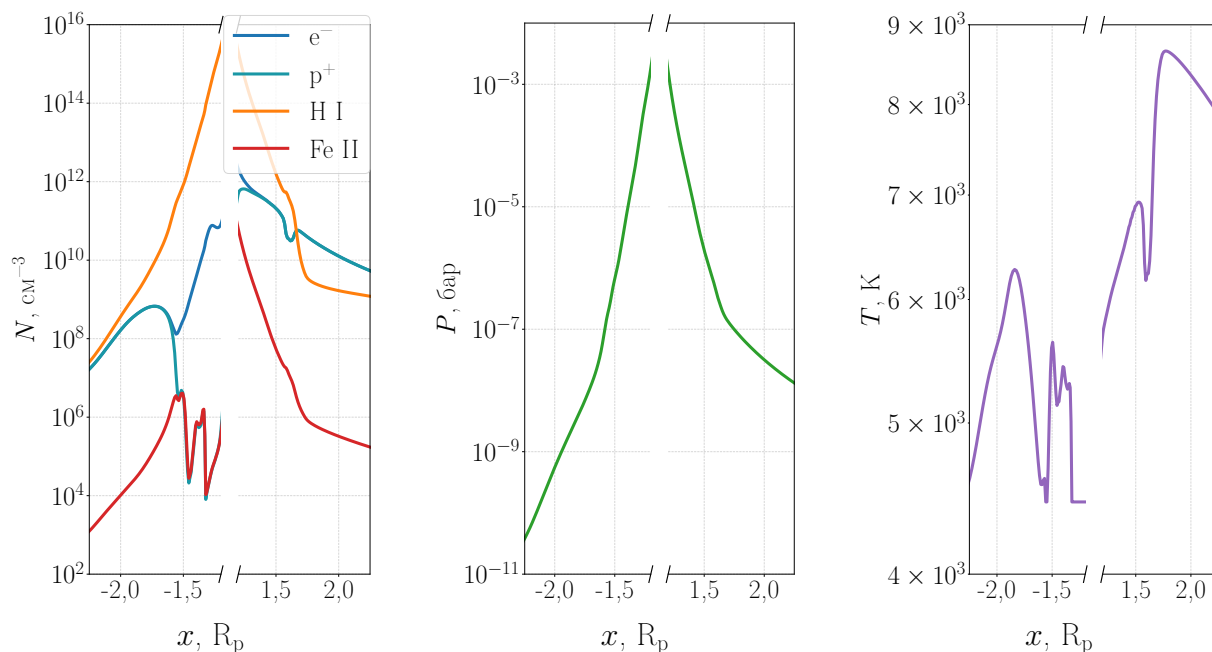


Рисунок 7: Распределения (а) частиц и элементов, (b) давления и (с) температуры в атмосфере KELT-9 b вдоль линии планета–звезда.

В разделе 4.2 приведены методы построения газодинамической модели атмосферы KELT-9 b с использованием кода Exo3D. Модель основана на многожидкостной магнитогидродинамике (МГД) и учитывает ключевые процессы, включая нагрев за счет звездного излучения, ионизацию, адиабатическое охлаждение и гравитационное влияние. На рисунке 7 представлены распределения частиц, элементов, давления и температуры вдоль линии планета — звезда, что позволяет визуализировать сложную структуру атмосферы.

**Раздел 4.3** посвящен расчету населенностей уровней Fe II с использованием библиотеки Astrea. Описана методология учета 89 квантовых уровней иона железа, включая резонансные переходы и эффекты оптической толщины (self-shielding). На рисунке 8 показаны  $\beta$ -факторы для Fe II, демонстрирующие сильное отклонение от ЛТР, особенно для высоколежащих уровней. Результаты подчеркивают важность фотовозбуждения и ударных процессов в формировании населенностей.

В разделе 4.4 проведен анализ вклада Fe II в тепловой баланс атмосферы. Рассмотрены процессы нагрева (фотоионизация, девозбуждение) и охлаждения (ударное возбуждение, ударная ионизация). На рисунке 9 приведено сравнение вклада различных элементов в нагрев и охлаждение, из которого видно, что Fe II выступает как эффективный охладитель, особенно в плотных слоях атмосферы.

**Раздел 4.5** содержит углубленный анализ вклада отдельных уровней и процессов. Уровни Fe II разделены на группы (основные, промежуточные, высоколежащие), и для каждой группы изучено поведение в различных условиях. Показано, что совокупное действие множества слабых переходов играет ключевую



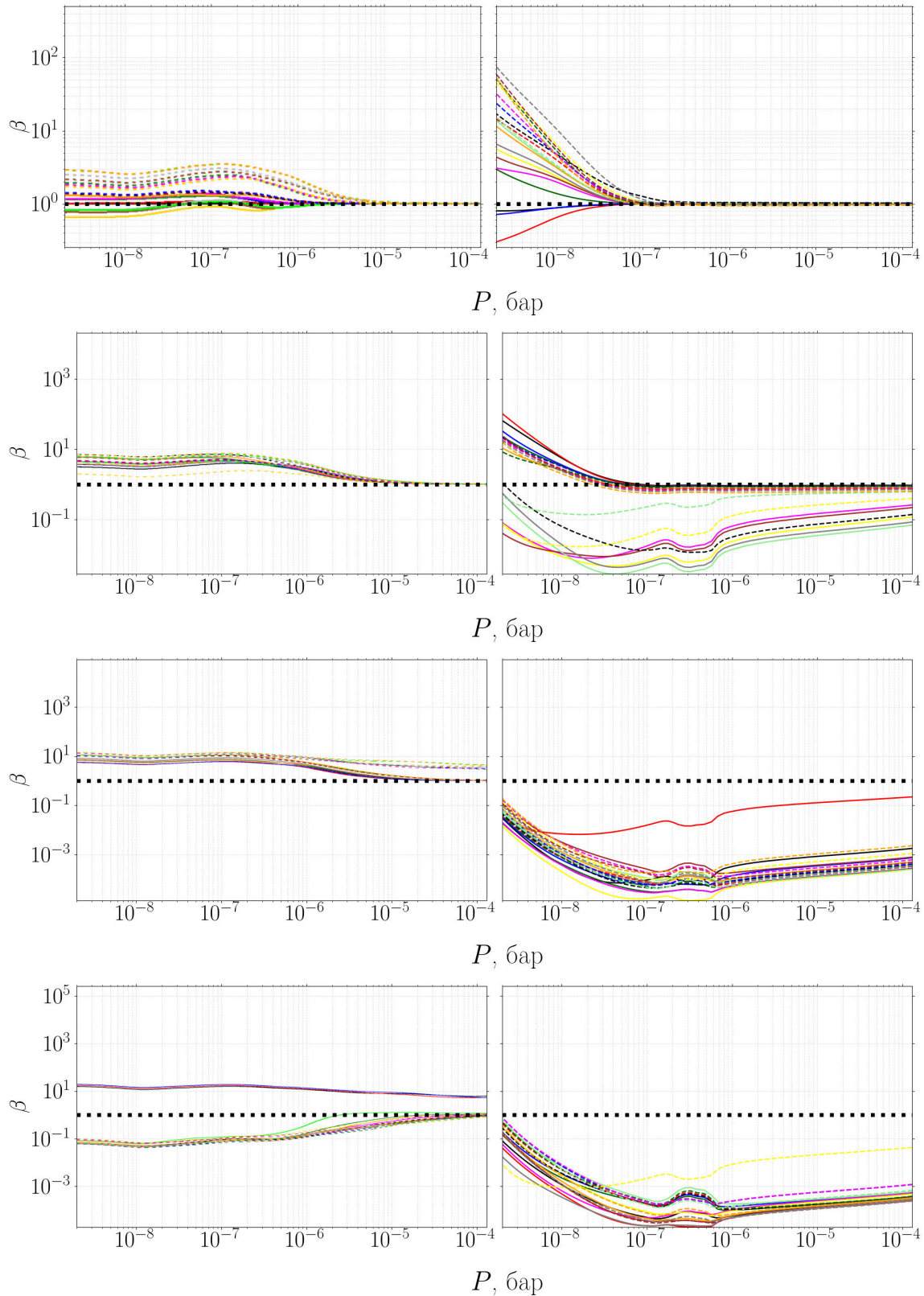


Рисунок 8:  $\beta$ -факторы для Fe II в модели атмосферы KELT-9 b. Слева результат моделирования с помощью Cloudy for Exoplanets (из [16]). Справа результат моделирования Astrea. Уровни упорядочены следующим образом: сначала идут 10 сплошных линий (черная, красная, синяя, темно-зеленая, пурпурная, желтая, коричневая, синяя, светло-зеленая, оранжевая), затем 10 штриховых линий с аналогичным порядком цветов. Черным пунктиром обозначен уровень ЛТР  $\beta = 1$ .

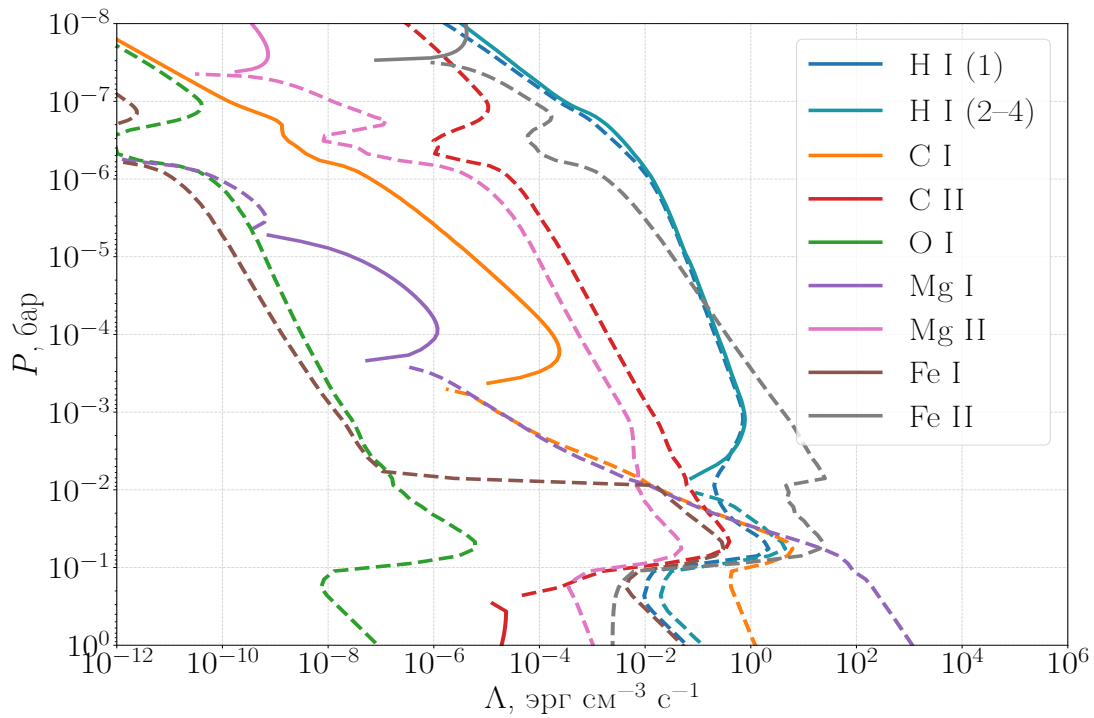


Рисунок 9: Вклад различных элементов в охлаждение и в нагрев (штриховая и сплошная линия, соответственно) атмосферы KELT-9 b. Отдельно учтенные диапазоны уровней указаны в круглых скобках. Для H I используются профили из работы [31].

роль в охлаждении, что противоречит упрощенным моделям, учитывающим лишь несколько сильных линий.

В **разделе 4.6** проведено сравнение с предыдущими работами, в частности, с исследованиями, использовавшими код Cloudy. На рисунке 10 представлены термальные характеристики атмосферы KELT-9 b, демонстрирующие лучшее согласие с наблюдательными данными при учете полной системы уровней Fe II и эффекта self-shielding. Раздел разрешает противоречия, связанные с «железной аномалией», и подчеркивает важность детального исследования отдельных линий и процессов для интерпретации наблюдательных данных.

**Раздел 4.7** обобщает выводы главы, подчеркивая доминирующую роль Fe II в охлаждении атмосферы KELT-9 b и значимость разработанной методики для исследований других ультрагорячих юпитеров. Результаты главы имеют фундаментальное значение для развития теорий атмосферной аэрономии и могут быть применены в будущих миссиях по изучению экзопланет.

**ПЯТАЯ ГЛАВА** посвящена исследованию влияния вспышечной активности звезд на усиление сигналов в атмосферах экзопланет на примере линий H-альфа и Лайман-альфа атомарного водорода. В работе предложена новая методика моделирования не-ЛТР процессов в экзопланетных атмосферах под воздействием вспышек, реализованная в оригинальном коде Astrea.

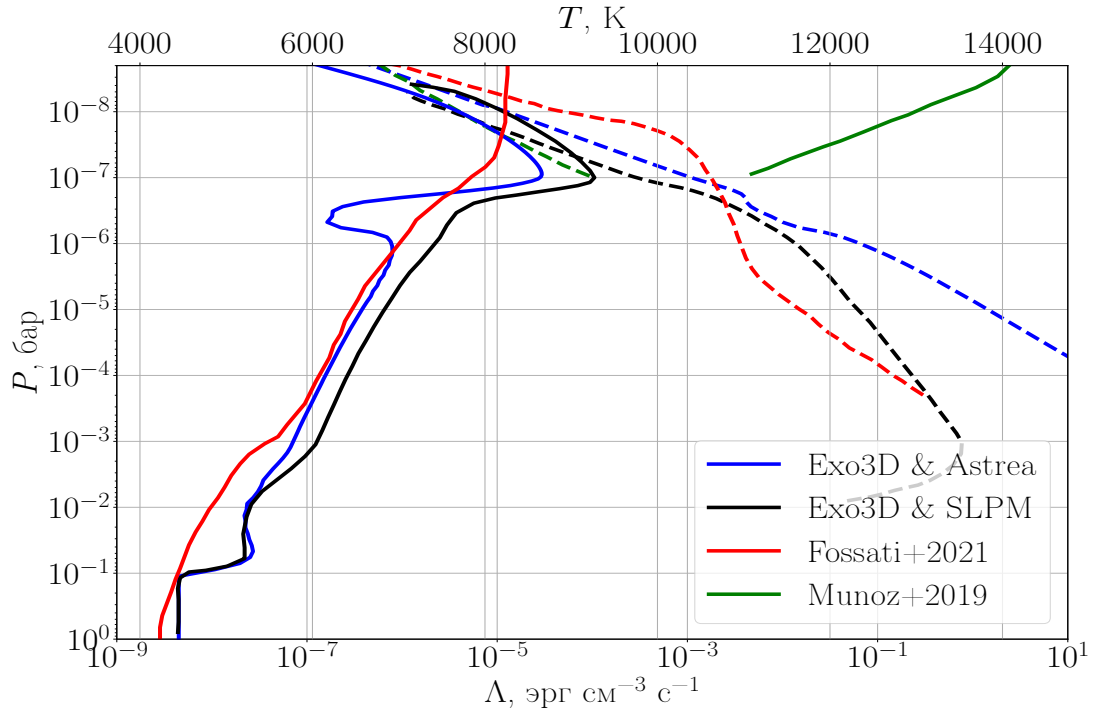


Рисунок 10: Профили температуры KELT-9 b (сплошные линии) и профили полного нагрева от всех смоделированных элементов (штриховые линии). Приводится сравнение с предыдущими работами: черная кривая [31], красная кривая [16], зеленая кривая [32].

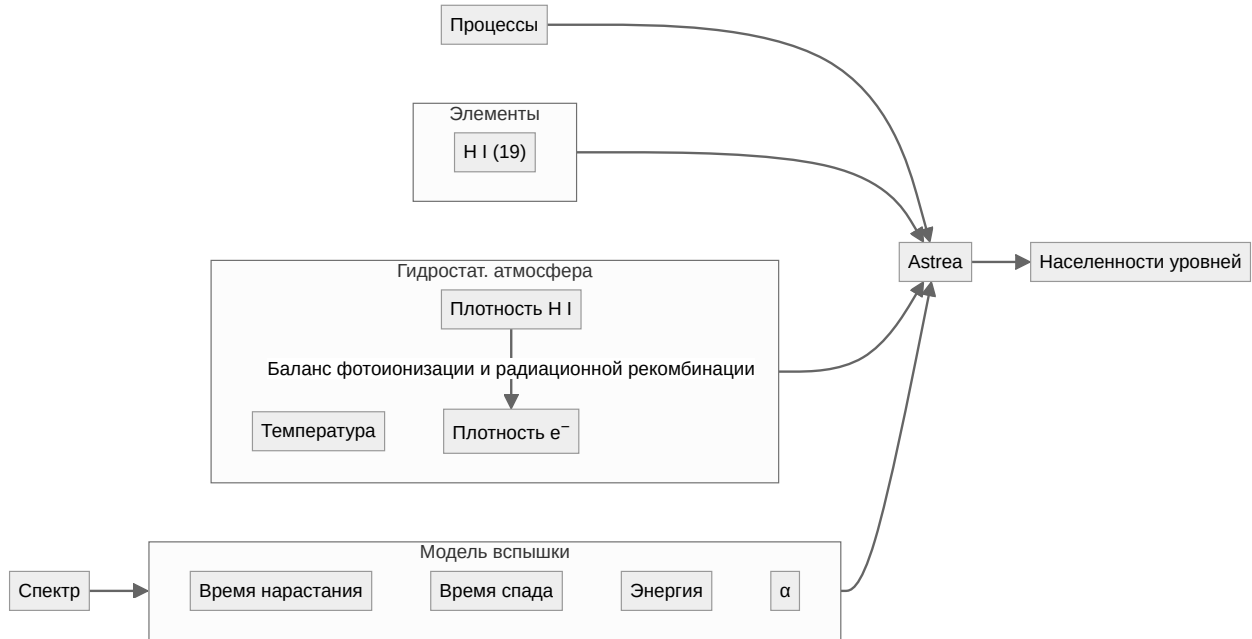


Рисунок 11: Конфигурация вычислений для исследования влияния вспышечной активности звезд на динамику населенностей уровней H I  $n = 2$  и  $n = 3$ , а также на поглощение в линиях Лайман-альфа и H-альфа.

Таблица 2: Параметры вспышек для различных систем. Энергии вспышек ( $10^{30}$ – $10^{34}$  эрг) выбраны в соответствии с известными значениями для звезд класса G и A [33,34].

Система	Энергия вспышки, эрг	$\alpha$	$\tau_r$ , с	$\tau_d$ , с	Спектральный эталон
HD 209458 b	$10^{32}$	1,5	60	600	Солнце [34]
HD 189733 b	$10^{34}$	2	100	1000	HD 85512 [35]
KELT-9 b	$10^{30}$	1,5	300	3000	Солнце [34]
TRAPPIST-1 c	$10^{34}$	3	300	3000	GJ 3470 [12]
WASP-12 b	$10^{32}$	2	100	1000	Солнце [34]
55 Cancri e	$10^{32}$	2	100	1000	HD 85512 [35]

В разделе 5.1 описывается ключевая роль линий Лайман-альфа и Н-альфа в диагностике верхних слоев атмосфер экзопланет. Особое внимание уделено механизмам формирования этих линий в условиях отсутствия локального термодинамического равновесия (не-ЛТР). На примере систем 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.

В разделе 5.2 приведены основные принципы разработанной методики моделирования (рис. 11). Подробно описана параметризация вспышечной активности с использованием степенной зависимости потока излучения и экспоненциального временного профиля. В таблице 2 систематизированы характерные параметры вспышек для различных экзопланетных систем. Особое внимание уделено процедуре верификации модели на известных наблюдательных данных.

Раздел 5.3 содержит основные результаты исследования. На рисунке 12 представлено пространственное распределение населенности уровня  $n = 2$  водорода в атмосферах экзопланет с различными параметрами, демонстрирующее максимум на высотах 1,5–2 радиусов планеты. Рисунок 13 иллюстрирует временную динамику изменения населенности уровня  $n = 2$  после вспышки для шести различных экзопланетных систем. На основе анализа этих данных установлены оптимальные временные окна для наблюдений вспышечно-индуцированных изменений.

Рисунок 14 демонстрирует усиление поглощения линии Н-альфа за счет вспышек, достигающее 10–25 % для землеподобных планет и суперземель 55 Cancri e и TRAPPIST-1 c. В атмосфере горячего юпитера HD 189733 b поглощение увеличивается на 0,25 %. Таким образом в атмосферах экзопланет при вспышках возможно обнаружение Н-альфа и других слабых линий.

В разделе 5.4 (выводы) подчеркивается, что разработанная методика позволяет не только усиливать сигналы от экзопланетных атмосфер, но и получать новую информацию о физических процессах в верхних слоях атмосфер. Полученные результаты имеют важное значение для планирования наблюдательных кампаний с использованием современных и будущих телескопов.

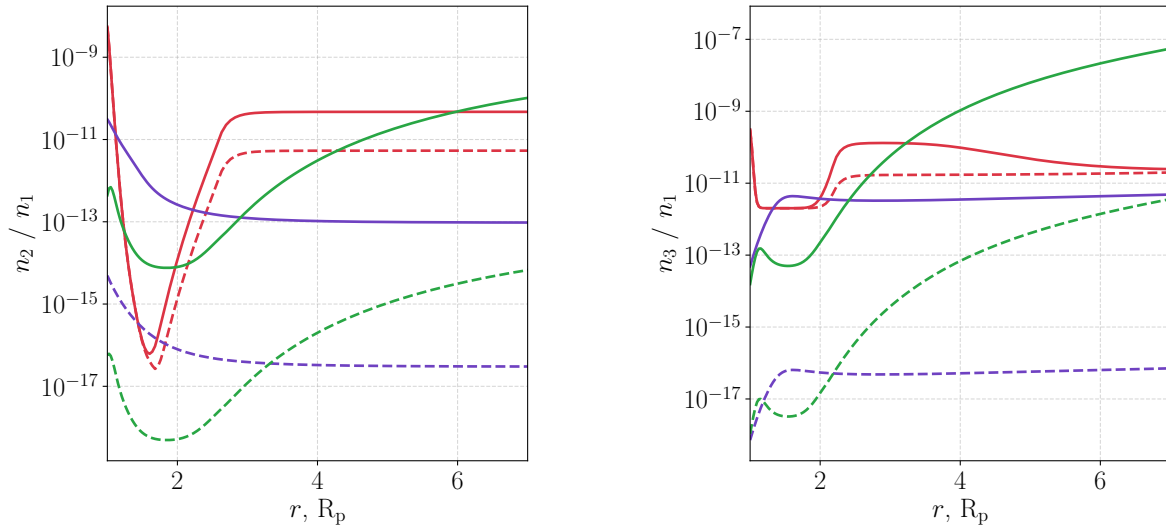


Рисунок 12: Пространственное распределение населенности уровней  $n = 2$  и  $n = 3$  водорода по высоте в атмосферах экзопланет KELT-9 b ( $T = 6000$  K, ■), TRAPPIST-1 c ( $T = 500$  K, ■) и HD 209458 b ( $T = 3000$  K, ■). Пунктирные линии соответствуют равновесным значениям до вспышки, сплошные — максимальным значениям после вспышки. Максимум достигается на  $1,5\text{--}2 R_p$ , что обусловлено балансом фотоионизации и столкновений.

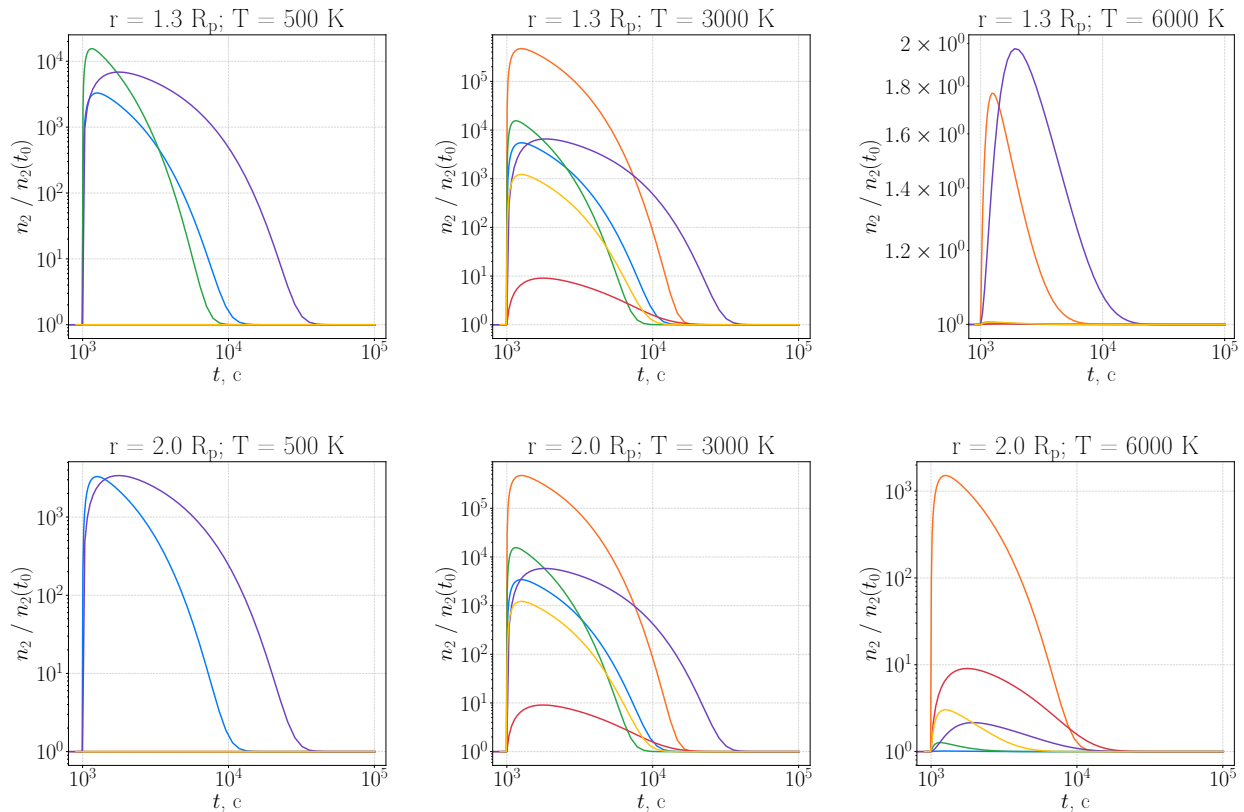


Рисунок 13: Временная эволюция отношения населенности уровня  $n = 2$  к исходному значению до вспышки для шести экзопланетных систем при разных температурах ( $T = 500$  K,  $3000$  K и  $6000$  K) на высотах  $1,3 R_p$  (характерный верхний слой) и  $2 R_p$  (характерный разреженный слой): TRAPPIST-1 c (■), WASP-12 b (■), HD 209458 b (■), 55 Cancri e (■), KELT-9 b (■), HD 189733 b (■).

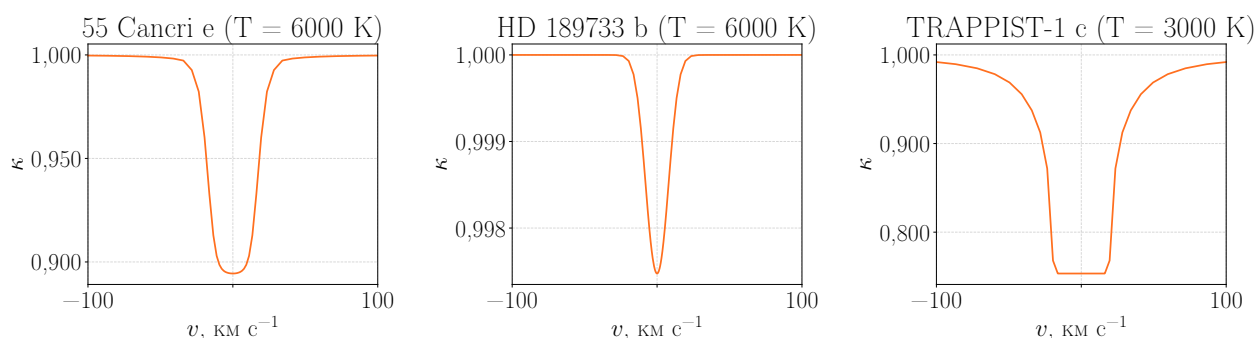


Рисунок 14: Профили поглощения линии Н-альфа в атмосферах экзопланет 55 Cancri e, HD 189733 b и TRAPPIST-1 c после звездной вспышки в зависимости от доплеровской скорости. Профили также демонстрируют увеличение поглощения после вспышки, поскольку до звездной активности поглощение отсутствует. Увеличение температуры атмосферы после вспышки соответствует модельным данным [36].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

### Основные итоги

В настоящей диссертационной работе были разработаны и применены методы кинетики уровней элементов для спектрального исследования физических процессов в атмосферах экзопланет. Основное внимание было уделено моделированию кинетики квантовых переходов в условиях космической плазмы, а также изучению влияния радиационных и ударных процессов на тепловой баланс экзопланетных атмосфер. Результаты работы направлены на решение ключевых задач современной экзопланетной науки — в частности, на разработку более совершенных моделей атмосфер, учитывающих принципиально новые каналы энергетического обмена, и более точно интерпретирующих данные транзитных наблюдений. Это позволяет расширить диагностику элементов, важных для поиска биомаркеров (таких как молекулярный кислород), новыми спектральными линиями поглощения.

Одним из основных результатов диссертации является создание новой вычислительной программы Astrea для моделирования населенностей квантовых уровней в условиях неравновесной плазмы. Программа принимает на вход пространственные распределения плотностей химических элементов, электронов и протонов, а также температуру среды, которые могут быть получены методами гидродинамического или гидростатического моделирования. На выходе рассчитываются неравновесные населенности квантовых уровней, которые далее могут быть использованы для синтеза спектра поглощения излучения атмосферы, а также для определения процессов нагрева и охлаждения, что значительно расширяет возможности интерпретации наблюдаемых спектров экзопланет.

В рамках работы были также разработаны вспомогательные вычислительные модули для построения трехмерных гидростатических моделей атмосфер экзопланет, синтеза спектральных профилей, расчета термодинамических характеристик атмосферы, и моделирования звездных вспышек. Совокупность этих инструментов позволила провести комплексные исследования, сочетающие расчет физических параметров атмосферы с их спектроскопическим проявлением, что является важным шагом для интерпретации наблюдательных данных.



Первый научный результат работы связан с определением температурных ограничений, при которых возможно детектирование кислорода в атмосферах экзопланет по линиям 130,4 нм и 777,4 нм. В результате расчетов установлено, что соотношение интенсивностей этих линий является чувствительным индикатором температуры атмосферных слоев. Было показано, что при определенных температурных условиях кислородные линии могут служить надежными диагностическими признаками наличия кислорода. Эти результаты дают количественные рекомендации для целенаправленного поиска экзопланет с содержанием кислорода в атмосфере на основе ультрафиолетовых и инфракрасных спектральных наблюдений.

Второй научный результат работы заключается в исследовании влияния переходов Fe II на тепловой баланс атмосферы ультрагорячих юпитеров на примере KELT-9 b. Расчеты показали, что учет возбужденных уровней Fe II и соответствующих радиационных процессов заставляет существенно пересмотреть, по сравнению с предыдущими подобными исследованиями, оценку нагрева и охлаждения атмосферы. Анализ отдельных физических процессов продемонстрировал, что некоторые ранее недостаточно учтенные механизмы охлаждения, связанные с линиями Fe II, могут эффективно компенсировать избыточный нагрев, предсказанный прежними моделями. Таким образом, удалось показать, что нет аномальной исключительности элемента Fe II. Не смотря на количественные отличия, его роль такова же, как и других металлов, например Mg — охлаждение за счет ударного возбуждения уровней и переизлучения. Отличие состоит в эффективности охлаждающего эффекта ионом Fe II, за счет его уникальной структуры уровней.

Третий научный результат связан с разработкой методики по прогнозированию усиления наблюдаемых сигналов от экзопланетных атмосфер вследствие звездных вспышек на примере линий Лайман-альфа и H-альфа. Предложенный подход также позволяет получать дополнительную информацию о физических процессах в верхних слоях атмосфер и планировать наблюдения экзопланет у звезд с высокой активностью.

Разработанные в ходе работы методы и программные инструменты обладают широкой применимостью. Они могут быть использованы не только для исследования рассмотренных линий и теплового баланса конкретных экзопланет, но и для более общего анализа физических процессов в атмосферах самых различных типов планет за пределами Солнечной системы, а также, для космической плазмы в целом. Это делает предложенный подход перспективным инструментом для будущих миссий, направленных на изучение экзопланет транзитными методами и методами прямой спектроскопии.

Важно отметить, что примененный в работе подход сочетает реалистичное описание физических условий в атмосфере с точным учетом микроскопических процессов квантовых систем. В отличие от широко распространенных моделей локального термодинамического равновесия (ЛТР), в разработанных моделях учитывается нарушение равновесия вследствие радиационных и столкновительных процессов. Это обеспечивает более достоверное моделирование спектров излучения и позволяет выявлять важные физические эффекты, которые остаются незамеченными в рамках упрощенных моделей.

Кроме того, расчеты показали, что влияние определенных переходов металлов, в частности Fe II, может быть критическим для энергетического баланса

горячих экзопланетных атмосфер. Этот вывод подчеркивает необходимость точного моделирования атомных процессов и их применения в спектральных расчетах.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что учет тонких спектроскопических эффектов и точных атомных процессов является неотъемлемым элементом при построении реалистичных моделей экзопланетных атмосфер. Без их учета могут возникать существенные ошибки как в определении физических параметров атмосферы, так и в интерпретации наблюдательных данных.

Полученные в работе результаты создают основу для проведения более точных и физически адекватных исследований в области спектроскопии экзопланетных атмосфер. Разработанные методы могут быть использованы для анализа новых наблюдательных данных, полученных с использованием современных и перспективных космических телескопов, таких как James Webb Space Telescope (JWST), а также для подготовки к миссиям следующего поколения, таким как Спектр-УФ.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **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 «астрей: экзопланеты». прог. для ЭВМ, RU2025684208, зарег. 11.09.2025; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.



## Публикации в трудах конференций

1. Шепелин А.В., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф. Моделирование транзитного поглощения в линии метастабильного гелия атмосферой планеты GJ 436 b // Семнадцатая ежегодная конференция “физика плазмы в солнечной системе”. Материалы конференции. Москва: Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт космических исследований Российской академии наук, 2022. С. 163.
2. Shepelin A.V., Rumenskikh M.S., Shaikhislamov I.F., Mashonkina L.I. Simulation of aeronomy and transit absorption of trace elements in atmosphere of hot exoplanets: Development of general kinetic non-LTE model // The thirteenth moscow solar system symposium 13M-S3. inproceedings. Moscow: Russian Space Research Institute, 2022. P. 370–371.
3. Шепелин А.В., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф. Моделирование кинетики электронных столкновений в атмосферах экзопланет // Конференция «физика плазмы в солнечной системе». Материалы конференции. Москва: Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. С. 300.
4. Shepelin A.V., Golubovskii M.P., Shaikhislamov I.F. Statistical equilibrium code for exoplanet atmospheres simulations // The fourteenth moscow solar system symposium 14M-S3. inproceedings. Moscow: Russian Space Research Institute, 2023. P. 331.
5. ШЕПЕЛИН А.В., ШАЙХИСЛАМОВ И.Ф. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ в ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР // Двадцать восьмая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных. Материалы конференции. Новосибирск: Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России, 2024. С. 197.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mayor M., Queloz D. [A jupiter-mass companion to a solar-type star](#) // Nature. Springer Science; Business Media LLC, 1995. Vol. 378, № 6555. P. 355–359.
2. Akeson R.L., Chen X., Ciardi D., Crane M., Good J., Harbut M., Jackson E., Kane S.R., Laity A.C., Leifer S., Lynn M., McElroy D.L., Papin M., Plavchan P., Ramírez S.V., Rey R., Braun K. von, Wittman M., Abajian M., Ali B., Beichman C., Beekley A., Berriman G.B., Berukoff S., Bryden G., Chan B., Groom S., Lau C., Payne A.N., Regelson M., Saucedo M., Schmitz M., Stauffer J., Wyatt P., Zhang A. [The NASA exoplanet archive: Data and tools for exoplanet research](#) // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. IOP Publishing, 2013. Vol. 125, № 930. P. 989–999.

3. Cassan A., Kubas D., Beaulieu J.-P., Dominik M., Horne K., Greenhill J., Wambsganss J., Menzies J., Williams A., Jørgensen U.G., Udalski A., Bennett D.P., Albrow M.D., Batista V., Brilliant S., Caldwell J.A.R., Cole A., Coutures Ch., Cook K.H., Dieters S., Prester D.D., Donatowicz J., Fouqué P., Hill K., Kains N., Kane S., Marquette J.-B., Martin R., Pollard K.R., Sahu K.C., Vinter C., Warren D., Watson B., Zub M., Sumi T., Szymański M.K., Kubiak M., Poleski R., Soszynski I., Ulaczyk K., Pietrzyński G., Wyrzykowski Ł. [One or more bound planets per milky way star from microlensing observations](#) // Nature. Springer Science; Business Media LLC, 2012. Vol. 481, № 7380. P. 167–169.
4. Kurucz R.L. Model atmospheres for g, f, a, b, and o stars // Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 40, May 1979, p. 1–340. 1979. Vol. 40. P. 1–340.
5. Mihalas D. Stellar atmospheres // San Francisco: WH Freeman. 1978. P. 632.
6. Charbonneau D., Brown T.M., Noyes R.W., Gilliland R.L. [Detection of an extrasolar planet atmosphere](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2002. Vol. 568, № 1. P. 377–384.
7. Fortney J.J., Lodders K., Marley M.S., Freedman R.S. [A unified theory for the atmospheres of the hot and very hot jupiters: Two classes of irradiated atmospheres](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2008. Vol. 678, № 2. P. 1419–1435.
8. Showman A.P., Fortney J.J., Lian Y., Marley M.S., Freedman R.S., Knutson H.A., Charbonneau D. [ATMOSPHERIC CIRCULATION OF HOT JUPITERS: COUPLED RADIATIVE-DYNAMICAL GENERAL CIRCULATION MODEL SIMULATIONS OF HD 189733b and HD 209458b](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2009. Vol. 699, № 1. P. 564–584.
9. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Berezutsky A.G., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S. [3D modeling of absorption by various species for hot jupiter HD209458b](#) // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Oxford University Press (OUP), 2019.
10. Carlsson M., Stein R.F. [Chromospheric dynamics — what can be learnt from numerical simulations](#) // Solar and heliospheric plasma physics. Springer Berlin Heidelberg, 1997. P. 159–178.
11. Kulow J.R., France K., Linsky J., Parke Loyd R.O. [LY \$\alpha\$  TRANSIT SPECTROSCOPY AND THE NEUTRAL HYDROGEN TAIL OF THE HOT NEPTUNE GJ 436b](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2014. Vol. 786, № 2. P. 132.
12. Bourrier V., Lecavelier des Etangs A., Ehrenreich D., Sanz-Forcada J., Allart R., Ballester G.E., Buchhave L.A., Cohen O., Deming D., Evans T.M., García Muñoz A., Henry G.W., Kataria T., Lavvas P., Lewis N., López-Morales M., Marley M., Sing D.K., Wakeford H.R. [Hubble PanCET: An extended upper atmosphere of neutral hydrogen around the warm neptune GJ 3470b](#) // Astronomy & Astrophysics. EDP Sciences, 2018. Vol. 620. P. A147.
13. Oklopčić A., Hirata C.M. [A new window into escaping exoplanet atmospheres: 10830 Å line of helium](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2018. Vol. 855, № 1. P. L11.
14. Lampón M., López-Puertas M., Lara L.M., Sánchez-López A., Salz M., Czesla S., Sanz-Forcada J., Molaverdikhani K., Alonso-Floriano F.J., Nortmann L., Caballero J.A., Bauer F.F., Pallé E., Montes D., Quirrenbach A., Nagel E., Ribas I., Reiners A., Amado P.J. [Modelling the he i triplet absorption at 10 830 Å in the atmosphere of HD 209458 b](#) // Astronomy & Astrophysics. EDP Sciences, 2020. Vol. 636. P. A13.

15. Borsa F., Fossati L., Koskinen T., Young M.E., Shulyak D. [High-resolution detection of neutral oxygen and non-LTE effects in the atmosphere of KELT-9b](#) // Nature Astronomy. Springer Science; Business Media LLC, 2021. Vol. 6, № 2. P. 226–231.
16. Fossati L., Young M.E., Shulyak D., Koskinen T., Huang C., Cubillos P.E., France K., Sreejith A.G. [Non-local thermodynamic equilibrium effects determine the upper atmospheric temperature structure of the ultra-hot jupiter KELT-9b](#) // Astronomy & Astrophysics. EDP Sciences, 2021. Vol. 653. P. A52.
17. Vidal-Madjar A., Dsert J.-M., Etangs A.L. des, Hbrard G., Ballester G.E., Ehrenreich D., Ferlet R., McConnell J.C., Mayor M., Parkinson C.D. [Detection of oxygen and carbon in the hydrodynamically escaping atmosphere of the extrasolar planet HD 209458b](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2004. Vol. 604, № 1. P. L69–L72.
18. Linsky J.L., Yang H., France K., Froning C.S., Green J.C., Stocke J.T., Osterman S.N. [OBSERVATIONS OF MASS LOSS FROM THE TRANSITING EXOPLANET HD 209458b](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2010. Vol. 717, № 2. P. 1291–1299.
19. Hauschildt P.H., Baron E. [Numerical solution of the expanding stellar atmosphere problem](#) // Journal of Computational and Applied Mathematics. Elsevier BV, 1999. Vol. 109, № 1–2. P. 41–63.
20. Malik M., Grosheintz L., Mendonça J.M., Grimm S.L., Lavie B., Kitzmann D., Tsai S.-M., Burrows A., Kreidberg L., Bedell M., Bean J.L., Stevenson K.B., Heng K. [HELIOS: AN OPEN-SOURCE, GPU-ACCELERATED RADIATIVE TRANSFER CODE FOR SELF-CONSISTENT EXOPLANETARY ATMOSPHERES](#) // The Astronomical Journal. American Astronomical Society, 2017. Vol. 153, № 2. P. 56.
21. Mashonkina L., Zhao G., Gehren T., Aoki W., Bergemann M., Noguchi K., Shi J.R., Takada-Hidai M., Zhang H.W. [Non-LTE line formation for heavy elements in four very metal-poor stars](#) // Astronomy & Astrophysics. EDP Sciences, 2007. Vol. 478, № 2. P. 529–541.
22. Mashonkina L., Gehren T., Shi J.-R., Korn A.J., Grupp F. [A non-LTE study of neutral and singly-ionized iron line spectra in 1D models of the sun and selected late-type stars](#) // Astronomy & Astrophysics. EDP Sciences, 2011. Vol. 528. P. A87.
23. Mashonkina L.I., Sitnova T.N., Pakhomov Yu.V. [Influence of departures from LTE on calcium, titanium, and iron abundance determinations in cool giants of different metallicities](#) // Astronomy Letters. Pleiades Publishing Ltd, 2016. Vol. 42, № 9. P. 606–615.
24. Mashonkina L.I., Ryabchikova T.A. [Non-LTE nitrogen abundances in the sun and selected a–f-type stars](#) // Astronomy Letters. Pleiades Publishing Ltd, 2024. Vol. 50, № 6. P. 390–407.
25. Alexeeva S.A., Mashonkina L.I. [Carbon abundances of reference late-type stars from 1D analysis of atomic c i and molecular CH lines](#) // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Oxford University Press (OUP), 2015. Vol. 453, № 2. P. 1619–1631.
26. Alexeeva S., Ryabchikova T., Mashonkina L., Hu S. [NLTE line formation for mg i and mg ii in the atmospheres of b–a–f–g–k stars](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2018. Vol. 866, № 2. P. 153.

27. Sitnova T.M., Mashonkina L.I., Ryabchikova T.A. [Influence of departures from LTE on oxygen abundance determination in the atmospheres of a-k stars](#) // Astronomy Letters. Pleiades Publishing Ltd, 2013. Vol. 39, № 2. P. 126–140.
28. Sitnova T.M., Mashonkina L.I. [Influence of inelastic collisions with hydrogen atoms on non-LTE oxygen abundance determinations](#) // Astronomy Letters. Pleiades Publishing Ltd, 2018. Vol. 44, № 6. P. 411–419.
29. Gnat O., Ferland G.J. [ION-BY-ION COOLING EFFICIENCIES](#) // The Astrophysical Journal Supplement Series. American Astronomical Society, 2012. Vol. 199, № 1. P. 20.
30. Schneider J., Dedieu C., Le Sidaner P., Savalle R., Zolotukhin I. [Defining and cataloging exoplanets: The exoplanet.eu database](#) // Astronomy & Astrophysics. EDP Sciences, 2011. Vol. 532. P. A79.
31. 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.
32. García Muñoz A., Schneider P.C. [Rapid escape of ultra-hot exoplanet atmospheres driven by hydrogen balmer absorption](#) // The Astrophysical Journal Letters. American Astronomical Society, 2019. Vol. 884, № 2. P. L43.
33. Gretelex H.J., Milligan R.O., Chamberlin P.C. [Observational analysis of lya emission in equivalent-magnitude solar flares](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2023. Vol. 954, № 2. P. 120.
34. Tobiska W.K. [Recent solar extreme ultraviolet irradiance observations and modeling: A review](#) // Journal of Geophysical Research: Space Physics. American Geophysical Union (AGU), 1993. Vol. 98, № A11. P. 18879–18893.
35. France K., Loyd R.O.P., Youngblood A., Brown A., Schneider P.C., Hawley S.L., Froning C.S., Linsky J.L., Roberge A., Buccino A.P., Davenport J.R.A., Fontenla J.M., Kaltenegger L., Kowalski A.F., Mauas P.J.D., Miguel Y., Redfield S., Rugheimer S., Tian F., Vieytes M.C., Walkowicz L.M., Weisenburger K.L. [THE MUSCLES TREASURY SURVEY. I. MOTIVATION AND OVERVIEW\\*](#) // The Astrophysical Journal. American Astronomical Society, 2016. Vol. 820, № 2. P. 89.
36. Bisikalo D.V., Cherenkov A.A., Shematovich V.I., Fossati L., Möstl C. [The influence of a stellar flare on the dynamical state of the atmosphere of the exoplanet HD 209458b](#) // Astronomy Reports. Pleiades Publishing Ltd, 2018. Vol. 62, № 10. P. 648–653.