На правах рукописи

1/epenul

Черенков Александр Александрович

# Исследование физических механизмов и явлений, определяющих газодинамику оболочек горячих юпитеров

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Mockba - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель:	Бисикало Дмитрий Валерьевич, д.фм.н., профессор, член-корр. РАН, директор Института астрономии Российской академии наук, г. Москва
Официальные оппоненты:	Беленькая Елена Семеновна, д.фм.н., ведущий научный сотрудник отдела космических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва Шайхисламов Иллар Фаритович.
	д.фм.н., заместитель директора по научной работе Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск
Ведущая организация:	ФГБУН Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, п. Нижний Архыз

Защита состоится 5 июня 2018 года в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте http://www.inasan.ru.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат физико-математических наук

\_2018 года. Иурира

Чупина Н. В.

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Обнаружение экзопланет — планет, обращающихся вокруг других звезд, — является одним из величайших открытий астрономии конца прошлого столетия. Значительную долю известных на сегодняшний день экзопланет составляют так называемые «горячие юпитеры». Это планеты-гиганты (с массой порядка массы Юпитера), обращающиеся на низких орбитах (в пределах 0.1 а.е.) вокруг своих родительских звезд. Обнаружение этих объектов поставило перед научным сообществом ряд принципиальных вопросов — как они образуются, какова их эволюция, какими свойствами обладают их атмосферы и т.д. В представленной диссертационной работе исследуются различные физические механизмы, определяющие газодинамику и эволюцию атмосфер горячих юпитеров.

Нужно отметить, что вопрос о свойствах атмосфер горячих юпитеров является одним из наиболее интересных в современной астрофизике. Из-за близости этих объектов к их родительским звездам они подвержены сильному гравитационному влиянию, значительному облучению и почти непрерывному воздействию плазменных явлений, происходящих в короне звезд, и, соответственно, их атмосферы должны существенно отличаться от атмосфер планет Солнечной системы.

При фотометрических наблюдениях на длине волны Лайман-альфа (УФ) первичного транзита (прохождения планеты перед диском родительской звезды) горячего юпитера HD 209458b, проведенных с использованием телескопа имени Хаббла (HST), было зафиксировано падение интенсивности на 9-15%, тогда как в оптическом диапазоне диск планеты поглощает всего 1.8% излучения звезды [1, 2]. Это означает, что наблюдаемый горячий юпитер окружен водородной оболочкой, размеры которой в несколько раз превышают размер самой планеты. Причем эта оболочка настолько велика, что выходит за пределы полости Роша планеты – области вокруг планеты, в которой возможно существование стабильной атмосферы. Аналогичные оболочки также были обнаружены для планет HD 189733b и WASP-12b, в том числе в линиях ионов других элементов (C, O, Si, Mg) [3-8]. Кроме того, наблюдения WASP-12b в 2009 году показали, что вход в затмение планеты в УФ полосах происходит примерно на 50 минут ранее, чем затмение планетным диском в видимом спектре. Это означает, что значительная часть относительно

плотного газа оболочки простирается вперед по ходу движения планеты на расстояние 4-5 радиусов планеты [9].

Для корректной интерпретации полученных данных наблюдений необходимо определить структуру исследуемой оболочки. Из-за большого размера оболочек горячих юпитеров их форма будет определяться не сферически симметричным потенциалом планеты, как в случае планет Солнечной системы, а более сложным потенциалом Роша — в этом случае форма оболочки будет отклоняться от сферической, а для оболочек, превышающих размер полости Роша, будет наблюдаться истечение вещества из окрестностей точек Лагранжа L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub> и, соответственно, их форма должна быть чрезвычайно сложной. Согласно оценкам, сделанным в работе [10], атмосферы как минимум трети известных на тот момент горячих юпитеров переполняют их полости Роша. Одна из загадок горячих юпитеров связана со стабильностью их атмосфер. Действительно, из-за большого радиуса планеты и ее близкого расположения к родительской звезде в системе должен происходить постоянный отток атмосферы, который привел бы к быстрому исчерпанию массы большинства наблюдаемых горячих юпитеров.

Оценки, основанные на теоретических моделях, показывают, что движение планеты относительно звездного ветра на всех расстояниях от звезды будет сверхзвуковым — на низких орбитах за счет высокой орбитальной скорости, на высоких — за счет радиальной скорости ветра. При таком движении перед планетой образуется отошедшая ударная волна, за которой следует контактный разрыв — поверхность, разделяющая вещество звездного ветра и атмосферы. Косвенным признаком наличия ударной волны на существенном расстоянии от планеты является наблюдение раннего затмения у некоторых горячих юпитеров падение блеска звезды в ультрафиолетовых линиях таких планет начинается существенно раньше, чем сама планета пересекает лимб звезды. Численные расчеты, проведенные в работе [11], показали, что динамическое давление звездного ветра может оказаться достаточным, чтобы остановить расширение атмосферы, делая часть атмосферы стабильной даже за пределами полости Роша планеты.

Исследование горячих юпитеров по-прежнему остается актуальной и интересной задачей. Несмотря на большое количество открытых планет такого типа, горячие юпитеры все еще остаются слабо изученными объектами, поскольку их непосредственное наблюдение крайне затруднено наличием яркой звезды рядом. В связи с этим особую важность приобретает работа по созданию численных моделей, с помощью которых появляется возможность в деталях исследовать течение в их атмосферах и оболочках. Для этого необходимо разработать численную модель, корректно учитывающую основные физические явления и процессы, влияющие на формирование оболочек таких планет. Такая модель также может быть полезна для уточнения эволюционных сценариев данных планет, для определения механизмов и места формирования таких объектов в планетных системах. Полученные результаты могут пролить свет на многие загадки, связанные с формированием и эволюцией других планетных систем что, в конечном итоге, приблизит нас к пониманию особенностей нашей собственной Солнечной системы.

Целью данной диссертационной работы является исследование особенностей основных физических механизмов и явлений, определяющих газодинамику оболочек горячих юпитеров.

# Цели диссертационной работы

- 1. Определение темпов потери массы и проведение анализа структуры течения для горячих юпитеров с оболочками различных видов. В соответствии с работой [11], тип газовой оболочки экзопланеты зависит от положения точки лобового столкновения (ТЛС, точки, в которой динамическое давление ветра уравновешивает давление атмосферы экзопланеты) относительно границ полости Роша. У планет, ТЛС которых лежат внутри полости Роша планеты, оболочки имеют почти сферическую форму классической атмосферы, слабо искаженную воздействием звезды и взаимодействием с газом звездного ветра. Из атмосфер планет, ТЛС которых находится за пределами полости Роша, начинается истечение вещества через окрестности точек Лагранжа L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub>, при этом формирующаяся оболочка становится существенно несимметричной. Последний класс объектов также можно разделить на два типа. Если динамического давления газа звездного ветра достаточно для того, чтобы остановить наиболее мощное истечение из внутренней точки Лагранжа L<sub>1</sub>, то, как впервые было показано в работе [12], в системе формируется квазизамкнутая стационарная оболочка сложной формы. Если ветер не может остановить струю из L<sub>1</sub>, то в системе формируется открытая оболочка. Определение темпа потери массы для оболочек различных видов является чрезвычайно актуальной задачей, так как ее решение позволит не только определять их эволюционный статус, но и корректно интерпретировать имеющиеся и планируемые наблюдения.
- 2. Исследование влияния резкого изменения параметров звездного

ветра, так называемых корональных выбросов масс (KBM), на газодинамику и эволюцию оболочек горячих юпитеров. На примере Солнца мы знаем, что параметры ветра звезд главной последовательности постоянно изменяются, и в период максимума активности Солнца корональные выбросы массы могут происходить с частотой около 4 раз в день. Во время КВМ плотность и скорость ветра может кратковременно возрастать на порядок величины, а динамическое давление — на несколько порядков. Учитывая, что часть квазизамкнутой оболочки горячих юпитеров, лежащая вне полости Роша, слабо связана с планетой гравитационно, даже небольшое изменение динамического давления звездного ветра может сделать такую оболочку нестабильной и привести к срыву части оболочки. У более молодых звезд вспышки происходят еще чаще, поэтому необходимо учитывать этот механизм потери массы в эволюционных моделях таких планет.

3. Исследование влияния радиативного давления излучения родительской звезды на газодинамику оболочек горячих юпитеров. Существуют научные группы, которые полагают, что динамика оболочек горячих юпитеров определяется в первую очередь радиационным давлением звезды, а не взаимодействием со звездным ветром [13]. Это предположение основано на том факте, что отношение силы радиационного давления к силе гравитации, действующих на одиночный атом водорода в основном состоянии в системе с солнечноподобной звездой, составляет порядка единицы, и, предположительно, давление излучения должно иметь огромное влияние на газовую динамику оболочек горячих юпитеров. Однако при расчете влияния радиативного давления на газодинамику оболочки горячего юпитера необходимо учитывать ряд других ключевых факторов: степень ионизации вещества в оболочке, интенсивность линии Лайман-альфа родительской звезды, поглощение при распространении внутри оболочки; при этом необходимо также учитывать взаимное пространственное воздействие различных сил: радиационного давления, теплового давления, гравитационных сил и динамического давления звездного ветра. Данная задача представляет интерес для моделирования атмосфер близких экзопланет других типов — таких как теплые нептуны и суперземли вокруг карликовых звезд, а также горячих юпитеров вокруг молодых и активных звезд — где физические условия могут существенно отличаться.

# Положения, выносимые на защиту

- 1. По результатам трехмерных газодинамических расчетов оболочек горячих юпитеров впервые определены темпы потери массы атмосферами данных планет. Установлено, что для замкнутой атмосферы темп потери массы для типичного горячего юпитера с параметрами HD 209458b составляет  $\dot{M} \leq 1\cdot 10^9$  г/с, для квазизамкнутой атмосферы  $\dot{M} \simeq 3\cdot 10^9$  г/с, для открытой атмосферы  $\dot{M} \simeq 3\cdot 10^9$  г/с, для открытой атмосферы  $\dot{M} \simeq 3\cdot 10^9$  г/с, для открытой атмосферах основной отток вещества происходит через точку Лагранжа L<sub>2</sub>, а для открытой оболочки преимущественно через L<sub>1</sub>. Показано, что квазизамкнутая оболочка, несмотря на размеры, превышающие полость Роша, является квазистационарным и долгоживущим объектом.
- 2. Разработана модель расчета воздействия корональных выбросов массы (KBM) на газовую динамику оболочек горячих юпитеров. результатам моделирования, на примере По экзопланеты HD 209458b, показано, что типичный KBM солнечного типа срывает и уносит большую часть оболочки, нахоляшуюся вне полости Роша, при этом характерная величина теряемой массы составляет  $\Delta M \sim 10^{15}$  г. Учитывая частоту столкновений с KBM от солнечноподобной звезды, масса горячего юпитера, теряемая за год вследствие воздействий КВМ, имеет тот же порядок величины, что и масса, потерянная планетой в отсутствие КВМ при стационарном темпе потери массы. С учетом того, что вспышечная активность молодых звезд выше, эффекты КВМ и космической погоды имеют большее значение и должны учитываться при расчетах эволюции близких планет.
- 3. Разработана численная модель для учета давления излучения в линии Лайман-альфа в оболочках горячих юпитеров. При расчете давления излучения учитывается доплеровский сдвиг в линии, поглощение излучения при его распространении в атмосфере планеты и расчет неравновесной ионизации на основе уравнения баланса с учетом фотоионизации. Разработанная модель может быть использована для моделирования атмосфер горячих юпитеров и других близких к родительской звезде экзопланет (напр. теплых нептунов и суперземель).
- 4. По результатам трехмерных газодинамических расчетов с учетом

переноса излучения показано, что радиативное давление излучения родительской звезды не оказывает существенного влияния на структуру и динамику оболочки типичного горячего юпитера HD 209458b, обращающегося вокруг звезды солнечного типа. Установлено, что эффекты радиативного давления могут значительно изменить газодинамику оболочки исследуемой экзопланеты только в том случае, если интенсивность линии Лайман-альфа будет выше на два порядка, чем наблюдаемая в исследуемой системе, что, в принципе, возможно для системы с молодой звездой.

# Научная новизна

- 1. Впервые на основе трехмерных газодинамических расчетов вычислены темпы потери массы атмосферой горячего юпитера с оболочками различных типов.
- 2. Впервые оценено влияние КВМ на темп потери массы горячего юпитера с квазизамкнутой оболочкой в рамках трехмерной газодинамической модели. Установлено, что типичный КВМ солнечноподобной родительской звезды при взаимодействии срывает и уносит большую часть оболочки, находящуюся вне полости Роша и гравитационно слабо связанную с планетой.
- 3. Впервые разработана трехмерная газодинамическая модель атмосфер горячих юпитеров, позволяющая исследовать влияние давления излучения в линии Лайман-альфа с учетом поглощения излучения, допплеровского смещения и расчета неравновесной ионизации. Использование модели показало, что для типичного горячего юпитера, вращающегося вокруг звезды солнечного типа, эффектом радиационного давления при расчете газодинамики его оболочки можно пренебречь.

# Научная и практическая значимость

Моделирование атмосфер горячих юпитеров является важной областью исследования экзопланет. Сейчас, когда в динамично развивающейся науке об экзопланетах уже накоплен значительный наблюдательный материал, от задачи обнаружения самих экзопланет акцент смещается на детальное описание и моделирование экзопланетных атмосфер. Так как некоторые физические атмосферные явления проявляются в их оболочках в более ярко выраженной форме, чем у планет Солнечной системы, это делает их уникальными лабораториями. Благодаря спектроскопическим наблюдениям атмосфер данных экзопланет был открыт эффект газодинамического оттока их газовых оболочек, предполагавшийся ранее только теоретически для первичных водородно-гелиевых атмосфер планет земной группы.

В представленной диссертации исследуется газодинамика горячих юпитеров. Данные исследования необходимы как для объяснения наблюдений, так и для определения эволюционного статуса оболочек разных типов. Так как горячие юпитеры и другие близкие планеты имеют оболочки сложной несимметричной формы, подверженные воздействию звездного ветра, необходимо учитывать это при интерпретации наблюдений. Построение модели атмосферы горячего юпитера также поможет теоретикам при разработке полной модели планетных систем, так как, несмотря на распространенность горячих юпитеров, до конца не ясен механизм их образования и возможной миграции. Эти исследования также помогут в исследовании атмосфер планет Солнечной системы, их эволюции при молодом Солнце, что, в свою очередь, поможет как заглянуть в прошлое, так и предсказать будущее нашей планеты.

# Апробация работы

По результатам исследований опубликовано 8 работ, 5 из них – в журналах, рекомендованных ВАК. Результаты, представленные в диссертации, были доложены на 18 научных конференциях и семинарах:

- 56-ая научная конференция МФТИ, ИКИ РАН, Москва, Россия, 25–30 ноября 2013.
- Семинар «ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ», ИКИ РАН, Москва, Россия, 3–4 июня 2014.
- Конкурс молодых ученых ИНАСАН, Москва, Россия, 28 октября 2014.
- 57-ая научная конференция МФТИ, ИКИ РАН, Москва, Россия, 24–29 ноября 2014.
- Конкурс молодых ученых ИНАСАН, Москва, Россия, 6 ноября 2015.
- 45-я студенческая научная конференция «Физика Космоса», Коуровка, Россия, 1–5 февраля 2016.

- Международная конференция «The Astrophysics of Planetary Habitability», Вена, Австрия, 8–12 февраля 2016.
- Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Москва, Россия, 13–15 апреля 2016.
- Международная школа для молодых ученых «6th school LesHouches CECAM in numerical physics», Лез Уш, Франция, 16–27 мая 2016.
- Международная школа для молодых ученых «Экзопланеты в двойных звездных системах», ИНАСАН, Москва, Россия, 30 мая 1 июня 2016.
- Международная конференция «Accretion Processes in Cosmic Sources», Санкт-Петербург, Россия, 5–10 сентября 2016.
- Конкурс молодых ученых ИНАСАН, Москва, Россия, 31 октября 2016.
- 59-ая научная конференция МФТИ, МФТИ, Долгопрудный, Россия, 21–26 ноября 2016.
- 46-я студенческая научная конференция «Физика Космоса», Коуровка, Россия, 30 января – 3 февраля 2017.
- Астрофизический семинар ИНАСАН, Москва, Россия, 30 марта 2017.
- Всероссийская астрономическая конференция «Астрономия: Познание без границ» (ВАК-2017), Ялта, Россия, 17–22 сентября 2017.
- Международная школа для молодых ученых «Экзопланеты в двойных звездных системах», ИНАСАН, Москва, Россия, 15–17 октября 2017.
- Астрофизический семинар ИНАСАН, Москва, Россия, 8 февраля 2018.

# Личный вклад соискателя

Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач, разработке модулей для численной модели, их тестировании, проведении расчетов, получении и представлении результатов.

В частности, соискателем:

- 1. Оптимизирована численная реализация вычислительного комплекса для расчета оболочки горячего юпитера.
- Реализован и протестирован анализатор темпов потери массы горячего юпитера.
- Реализован и протестирован модуль, позволяющий моделировать переменные граничные условия для исследования влияния КВМ на оболочку горячего юпитера.
- Реализован и протестирован модуль, позволяющий рассчитывать перенос излучения в оболочке горячего юпитера с учетом поглощения и допплеровского сдвига в линии.
- Реализован и протестирован модуль для расчета неравновесной ионизации вещества оболочки горячего юпитера с учетом фотоионизации излучением родительской звезды.
- 6. Проведен анализ влияния различных источников поглощения для задачи о радиативном давлении в оболочке горячего юпитера.
- 7. Получены и обработаны представленные в работе результаты численного моделирования.

# Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Число страниц в диссертации 115, рисунков 25, таблиц 2. Список литературы состоит из 106 наименований.

# Содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи, поставленные перед автором работы, предмет и методология исследований, обсуждается новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, указан личный вклад соискателя.

Глава 1 «Модель оболочки горячего юпитера»: В данной главе описываются физическая, математическая и численная модели, положенные в основу газодинамического вычислительного кода для моделирования оболочек горячих юпитеров, используемого в данной работе. Формулируются необходимые требования, которые должна учитывать физическая модель оболочек близких к родительской звезде планет для описания имеющихся на настоящий момент наблюдений. Так как современные приборы позволяют, в основном, проводить спектрометрические наблюдения только для атмосфер горячих юпитеров, то построение самосогласованной численной модели, позволяющей корректно интерпретировать получаемые наблюдательные данные, является важнейшей задачей современной теоретической астрофизики.

В параграфах 1.1 «Физическая модель» и 1.2 «Математическая модель» описываются физические приближения и математическая модель, лежащие в основе численного кода. Данный вычислительный комплекс разрабатывался для определения влияния различных физических механизмов, обуславливающих газодинамику оболочек горячих юпитеров. Физические приближения и предположения, принятые в данном коде, позволяют, не искажая поведения моделируемой системы, его упростить. Так, при моделировании предполагается круговая орбита, и, так как характерное время синхронизации горячего юпитера значительно меньше его времени жизни, мы предполагаем, что обращение планеты по орбите и собственное вращение вокруг своей оси синхронизованы друг с другом. При моделировании газовых оболочек горячих юпитеров необходим учет полного гравитационного потенциала, причем в общем случае зависимого от времени, но так как масса оболочки на много порядков меньше массы планеты, мы можем использовать приближение потенциала Роша. В модели не рассчитываются процессы радиационного нагрева и охлаждения газа, температура атмосферы задавалась в качестве параметра из работ других авторов и использовалась в модели в качестве внутреннего граничного условия. Мы также не учитываем магнитные поля в задаче, так как, принимая во внимание, что магнитный момент моделируемой планеты HD 209458b на порядок меньше, чем у Юпитера

[14–16], именно газодинамический отток играет главную роль при формировании оболочки данного горячего юпитера [17, 18]. При расчетах течение описывается трехмерной системой уравнений газовой динамики в гравитационном поле, замыкаемой уравнением состояния идеального нейтрального одноатомного газа.

В параграфе 1.3 «Параметры экзопланеты HD 209458b» описываются граничные условия, используемые в данной модели. Во всех главах представленной диссертации в качестве типичного горячего юпитера рассматривается планета HD 209458b. Она представляет собой транзитную экзопланету с фотометрическим радиусом  $R_{\rm pl} = 1.38 R_{\rm Jup}$  и массой  $M_{\rm pl} = 0.69 M_{\rm Jup}$ , обращающуюся вокруг звезды G0 главной последовательности на расстоянии 0.047 а.е. с орбитальным периодом 3.52 дня [19]. Это один из наиболее подробно исследованных горячих юпитеров [11, 13, 20]. Так как параметры звездного ветра родительской звезды не известны, то они приняты равными солнечным. На внешних границах, где газ звездного ветра втекает в вычислительную область, были заданы постоянные граничные условия, там, где вытекает — условия свободного вытекания. В главе 3, в которой моделируется воздействие КВМ на оболочку горячего юпитера, параметры звездного ветра является временно-переменными и описываются подробно в соответствующей главе.

В параграфе 1.4 «Численная модель» кратко описывается численная модель и параметры расчетов. Вычисления проводились на неравномерной прямоугольной сетке, сгущенной к центру экзопланеты таким образом, чтобы размер ячеек на фотометрическом радиусе планеты был меньше, чем шкала высот моделируемой атмосферы. Далее кратко описывается численная TVD-схема Роу, используемая для газодинамических кодов со сверхзвуковыми течениями. Эта явная схема повышенного порядка аппроксимации обладает малой численной вязкостью в областях гладкого решения, но не приводит к размыванию ударных волн.

Глава 2 «Темпы потери массы экзопланетами типа горячий юпитер с газовыми оболочками различных видов»: Согласно результатам расчетов газодинамики воздействия звездного ветра на атмосферы экзопланет, у горячих юпитеров могут формироваться газовые оболочки трех типов: замкнутые, квазизамкнутые и открытые [11]. Тип формирующейся оболочки зависит от положения точки лобового столкновения (точки, в которой динамическое давление ветра уравновешивает давление атмосферы) относительно границ полости Роша. Для планет, атмосферы которых целиком лежат внутри полости Роша, формируется замкнутая оболочка. Если точка лобового столкновения лежит вне полости Роша, то начинается отток вещества атмосферы через точки Лагранжа  $L_1$  и  $L_2,$  при этом могут формироваться квазизамкнутые (если динамическое давление звездного ветра останавливает отток из  $L_1)$  и открытые газовые оболочки.

Оценки темпов потери массы, ранее полученные для одномерных моделей, используемых для исследования температурных профилей атмосферы, являются лишь грубой оценкой сверху, так как они не учитывают пространственной геометрии потенциала Роша, взаимодействия со звездным ветром и т.д. В данной главе в рамках трехмерной модели и с учетом взаимодействия со звездным ветром для всех трех типов оболочек исследована газодинамическая структура их истечения и вычислены темпы потери массы, на основе которых можно сделать выводы об их эволюционном статусе.

В параграфе 2.1 «Параметры модели» приводятся параметры четырех моделей атмосфер и описывается метод расчета темпа потери массы. Для этого в расчетной области задавались поверхности, охватывающие все элементы течения: потоки из  $L_1$  и  $L_2$ , а также завихренный след, образующийся за планетой. Для корректного определения потока массы, теряемого атмосферой, из полученной величины вычитался поток массы невозмущенного звездного ветра.

В параграфе 2.2 «Результаты» приводятся результаты расчетов. Замкнутая атмосфера (модель 1) не имеет выраженных истечений из окрестностей точек Лагранжа, а в разреженном следе за планетой виден завихренный поток вещества. Для данной модели незначительная потеря массы атмосферой проходит по следующему сценарию: часть газа покидает атмосферу в направлении подветренной разреженной области за планетой и далее медленно сносится ветром от планеты. Отметим, что для данного случая плотность потоков вещества из атмосферы планеты меньше, чем плотность потока ветра, поэтому возможно указать лишь верхнюю оценку темпа потери масс.

Для замкнутой атмосферы с истечением из точки L<sub>2</sub> (модель 2), в отличие от предыдущей модели, оболочка заполняет свою полость Роша почти полностью. В отсутствие звездного ветра при увеличении шкалы высот в атмосфере истечение из точки Лагранжа L<sub>1</sub> должно начинаться раньше (так как величина потенциала в точке L<sub>1</sub> меньше, чем в L<sub>2</sub>), но в данной системе этому истечению препятствует давление звездного ветра. Темп потери массы для случая замкнутой атмосферы (модели 1 и 2) составляет  $\dot{M} \leq 1 \cdot 10^9$  г/с.

Для квазизам<br/>кнутой атмосферы (модель 3) из точки Лагранжа  $\rm L_1$ сформировалось ис<br/>течение вещества, которое останавливается динами-

ческим давлением звездного ветра на расстоянии нескольких планетных радиусов. В данном случае отошедшая ударная волна представляет собой комплекс из двух ударных волн, одна из которых формируется непосредственно перед планетой, а другая – перед истечением из точки  $L_1$ . Поскольку струя останавливается звездным ветром, вещество, выбрасываемое через окрестность точки Лагранжа  $L_1$ , либо возвращается обратно в атмосферу, либо сносится потоком ветра далее, в направлении точки  $L_2$ . Для данной модели квазизамкнутой газовой оболочки оценка темпа потери масс составляет  $\dot{M} \simeq 3 \cdot 10^9 \, {\rm r/c}$ .

В открытой атмосфере (модель 4) образуются два мощных истечения из точек Лагранжа L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub>, при этом поток из L<sub>1</sub> не может быть остановлен динамическим давлением звездного ветра. Как и в модели 3, отошедшая ударная волна состоит из комплекса двух ударных волн. В данном случае решение зависит от времени, и описанная картина относится к случаю, когда ТЛС находится в счетной области. Отметим, что в данной модели основная потеря вещества атмосферой происходит из окрестности внутренней точки Лагранжа: поток массы из L<sub>1</sub> составляет  $\dot{M}_{L_1} \simeq 17 \cdot 10^9 \, \text{г/c}$ , поток массы из L<sub>2</sub> составляет  $\dot{M}_{L_2} \simeq 14 \cdot 10^9 \, \text{г/c}$ . Суммарный темп потери массы атмосферы для данного случая составляет  $\dot{M} \simeq 3 \cdot 10^{10} \, \text{г/c}$ .

Результаты, полученные в данном исследовании, опубликованы в работе [A1]. По результатам, описанным в Главе 2, выносится положение на защиту.

Глава 3 «Влияние корональных выбросов массы на темп потери массы атмосферами горячих юпитеров»: Наблюдения и результаты моделирования оболочек горячих юпитеров показали, что их близость к родительской звезде приводит к формированию расширенной оболочки, часть которой находится за пределами полости Роша. Поскольку эта часть оболочки гравитационно слабо связана с планетой, возмущения звездного ветра могут привести к сильным изменениям структуры оболочки планеты и ее темпа потери массы.

Даже неактивные звезды позднего типа, такие как Солнце, обладают звездным ветром, который может испытывать резкие временные изменения. Основные возмущения солнечного ветра обусловлены выбросами вещества из солнечной короны, так называемыми корональными выбросами массы. В случае Солнца КВМ характеризуются массой плазмы  $\approx 10^{15}$  г, средней суммарной энергией около  $\approx 10^{31}$  эрг и скоростями выброса, варьирующимися в диапазоне 20–3000 км/с, со средним значением порядка 500 км/с [21, 22]. Как средняя скорость, так и частота солнечных КВМ изменяются в зависимости от цикла магнитной активности, и для Солнца составляет от ~0.5 в день во время солнечного минимума до ~4 в день во время максимума [22]. Усредняя по полному солнечному циклу, КВМ взаимодействуют с магнитосферой Земли примерно два раза в месяц [23], поэтому для исследования эволюции горячих юпитеров важно исследовать воздействие КВМ на оболочки их атмосфер.

В данной главе приводится исследование влияния резких изменений параметров звездного ветра — корональных выбросов массы (KBM) — на оболочку типичного горячего юпитера HD 209458b. Рассматривается набор из трех KBM, характеризующихся различными скоростями распространения и плотностями, при этом их параметры соответствуют типичным KBM, наблюдаемым для Солнца.

В параграфе 3.1 «Особенности модели, учитывающей КВМ» описываются параметры задачи и физические упрощения, принятые в данной модели. Так же, как и в предыдущей главе, мы моделируем систему HD 209458b, вращающуюся вокруг солнечноподобной родительской звезды. Параметры атмосферы были заданы для квазизамкнутой оболочки, при этом магнитное поле планеты и звездного ветра не учитывалось. В параграфе 3.2 «Параметры КВМ» описана структура и приведены параметры моделей КВМ. В рамках данной главы будут рассмотрены три КВМ с различными скоростями распространения: быстрый, средний и медленный. КВМ обычно состоит из трех фаз: переднего фронта, который представляет собой плотную плазму между ударной волной и магнитными силовыми трубками, фазы низкой плотности («void»), содержащей магнитные силовые трубки, и ядра с более высокой плотностью, которое часто ассоциируется с волокном или протуберанцем, извергающимся вместе с КВМ (см., например, [24, 25]).

В параграфе 3.3 «Результаты» приведены результаты, полученные при моделировании взаимодействий между быстрым, средним и медленным КВМ и оболочкой HD 209458b. Приход переднего фронта КВМ, который имеет более высокое динамическое давление по сравнению со стационарным ветром ( $\rho_1 v_1^2 / \rho_{st} v_{st}^2 \approx 9 \times 10^3$ ), сопровождается распространением ударной волны по вычислительной области. Столкновение фронта КВМ с оболочкой планеты нарушает структуру потока из точки L<sub>1</sub> и сдвигает вихревой поток за планетой, сформированный при стационарном ветре. В течение следующей фазы плотность ветра падает на порядок по сравнению с первой, но его динамическое давление все еще намного выше, чем у стационарного ветра ( $\rho_2 v_2^2 / \rho_{st} v_{st}^2 \approx 8 \times 10^2$ ). В течение второй фазы КВМ полностью разрушает струи из точек Лагранжа L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub>, отток из точки L<sub>1</sub> прекращается, а струя из точки L<sub>2</sub> движется по направлению ветра. Во время третьей фазы, когда динамическое давление снова увеличивается ( $\rho_3 v_3^2 / \rho_{st} v_{st}^2 \approx 3.6 \times 10^3$ ), атмосфера поджимается и ее размер уменьшается, но структура течения качественно не меняется.

В параграфе 3.4 «Обсуждение» на основе полученных результатов делаются оценки влияния КВМ на эволюцию горячих юпитеров. Интегрируя потоки через поверхность, окружающую оболочку планеты, получено, что общая потеря массы атмосферы примерно одинакова для всех трех рассмотренных KBM и составляет  $\approx 10^{15}$  г. Тот результат, что потерянная масса приблизительно одинакова для всех трех КВМ является ожидаемым, поскольку продолжительность каждого КВМ обратно пропорциональна скорости его распространения. Поэтому можно заключить, что для КВМ, попадающих в диапазон рассмотренных параметров, общая потеря массы примерно одинакова. Так как при распространении КВМ их угол приблизительно сохраняется, для оценки можно предположить, что за один год горячие юпитеры взаимодействуют с КВМ, как и Земля, ~23 раза [23]. В соответствии с этим потеря массы планеты из-за воздействия КВМ за 1 млрд. лет составляет около 2×10<sup>25</sup> г. В периоды без КВМ темп потери массы составляет около 3×10<sup>9</sup> г/с (глава 2), что за 1 млрд. лет означает полную потерю массы около 9×10<sup>25</sup> г. Из этого следует, что масса, потерянная при стационарном ветре из-за высокоэнергетичного звездного излучения, и масса, потерянная из-за столкновений с КВМ, совпадают по порядку величины, и в эволюционных моделях должны учитываться оба механизма.

Результаты данной работы опубликованы в работах [A2–A4]. По результатам, описанным в Главе 3, выносится положение на защиту.

Глава 4 «Влияние радиативного давления на газодинамику атмосферы горячего юпитера HD 209458b»: Близкие экзопланеты подвержены экстремальному излучению их родительских звезд. Фотометрические наблюдения данных планет выявили сильное поглощение в линии Лайман-альфа, что указывает на существование вокруг планеты водородной оболочки, имеющей размеры больше соответствующей полости Роша. На примере горячего юпитера HD 209458b в работах [11, 12] показано, что стабильная структура этой оболочки поддерживается балансом между переполнением полости Роша и динамическим давлением звездного ветра.

В работе [13] высказано предположение, что давление излучения родительской звезды может существенно влиять на динамику и стабильность оболочек горячих юпитеров. Действительно, для солнечноподобных звезд отношение сил радиативного давления и гравитации, действующих на одиночный атом водорода в основном состоянии, близко к единице. Но для того чтобы сделать окончательный вывод о влиянии радиативного давления на газодинамику оболочек горячих юпитеров, необходимо рассмотреть все физические условия, определяющие величину этой силы: степень ионизации, интенсивность линии Ly- $\alpha$  и поглощение звездного излучения в оболочке. С помощью трехмерного газодинамического моделирования в данной главе исследуется влияние радиативного давления в линии Лайман-альфа на оболочку горячего юпитера HD 209458b.

В параграфе 4.1 «Модель с учетом радиативного давления» приводится описание используемой модели излучения. Анализ влияния других источников поглощения показал, что оно незначительно по сравнению с линией Лайман-альфа. Действительно, интенсивность других линий серии Лаймана для солнечноподобных звезд намного слабее, чем интенсивность линии Ly- $\alpha$ . С учетом заселенностей уровней в газе оболочки и соотношения интенсивностей линий легко показать, что влияние радиативного давления в линии H<sub> $\alpha$ </sub> для оптически тонкого газа будет пренебрежимо мало по сравнения с Ly- $\alpha$ ; остальные линии серии Бальмера имеют меньшие силы осциллятора. Другие источники поглощения излучения также пренебрежимо малы для исследуемой оболочки: интенсивность ионизующего излучения водорода (свободно-связанный переход) меньше интенсивности линии Лайман-альфа, свободно-свободное поглощение не оказывает никакого влияния при таких низких температурах. Другие эффекты рассмотрены в параграфе 4.3.

В предложенной модели пренебрегается процессом переизлучения. Это вызвано необходимостью упрощения модели и может быть сделано без существенной потери точности. Действительно, после поглощения фотона избыточная энергия будет переизлучена, при этом направление нового фотона является произвольным с центральносимметричным распределением, и поэтому он не вносит вклад в передачу импульса. Но в случае непрозрачного газа переизлучение фотона будет происходить до тех пор, пока многократно переизлученный фотон не покинет оболочку в направлении, противоположном падению. Поэтому, опуская учет данного процесса, мы недооцениваем вычисленное давление излучения в непрозрачных областях оболочки на коэффициент меньше, чем 2.

В параграфе 4.1.1 «Особенности газодинамической модели» приводятся использовавшиеся газодинамические уравнения с учетом силы давления излучения. В параграфе 4.1.2 «Фотоионизация» описывается принятая при расчетах модель нестационарной ионизации, основанная на расчете скоростей реакций. При этом учитываются рекомбинация, столкновительная ионизация и фотоионизация. Столкновительная ионизация, обусловленная неупругими столкновениями нейтральных атомов и электронов, значительно менее эффективна, чем фотоионизация, так как температура в оболочке ( $\sim 10^4$  K) намного меньше энергии ионизации атома ( $\sim 10^5$  K). Тем не менее, в области за планетой эффективность фотоионизации равна нулю, поэтому в данной области темп ионизации определяется столкновениями. Таким образом, за исключением области за планетой, ионизация определяется балансом между фотоионизацией и столкновительной рекомбинацией.

В параграфе 4.1.3 «Радиативное давление» описывается численная реализация решения уравнения переноса. Учет процесса самопоглощения необходим в данной задаче, так как оболочка непрозрачна в линии Лайман-альфа: звездное излучение поглощается «внешними» слоями, расположенными близко к звезде, и не проникает во «внутренние» слои, расположенные дальше от звезды. Для расчета поля излучения мы используем подход с трассировкой лучами. Чтобы вычислить интенсивность, которая достигает каждой конкретной вычислительной ячейки, уравнение переноса излучения интегрируется вдоль луча от поверхности звезды до данной ячейки, используя известные коэффициенты непрозрачности для ячеек, лежащих на пути. Затем вычисляется поглощенная энергия и, соответственно, сила давления излучения, действующая в данной ячейке. В параграфе 4.1.4 «Профиль линии Ly- $\alpha$ звезды HD 209458» приводится профиль линии Лайман-альфа родительской звезды горячего юпитера HD 209458b, взятый из работы [13]. Также описывается учет допплеровского сдвига при поглощении, так как газ в ячейке может иметь радиальную скорость относительно звезды.

В параграфе 4.2 «Результаты и обсуждение» приводятся результаты моделирования. Показано, что учет давления излучения почти не меняет структуру течения в системе. Для численной оценки влияния данного эффекта были проведены дополнительные расчеты с увеличенными интенсивностями линии Лайман-альфа и ионизующего излучения в 10 и 100 раз. По результатам расчетов показано, что при увеличении интенсивностей в 10 раз давление излучения начинает подавлять отток из точки  $L_1$ , и струя становится немного короче, чем в случае без давления излучения, но глобальная структура течения в системе качественно не меняется. В случае 100-кратных интенсивностей давление излучения полностью подавляет отток из точки  $L_1$ , что потенциально меняет наблюдательные характеристики этой системы. В этом случае радиативное давление оказывает значительное влияние на решение, несмотря на то, что при такой интенсивности ионизующего излучения доля нейтраль-

ного водорода в струе из  $L_1$  составляет всего  $10^{-4}$ .

В параграфе 4.3 «Влияние других источников поглощения» подробно рассматривается влияние двух источников поглощения: томсоновского рассеяния на электронах и поглощения на отрицательных ионах водорода. В параграфе 4.3.1 «Рассеяние Томсона на электронах» и 4.3.2 «Поглощение на отрицательных ионах водорода» подробно показывается, что данные эффекты пренебрежимо малы для исследуемой задачи, так как оболочка имеет слишком малую колонковую плотность, чтобы набрать значительную оптическую толщину для данных источников поглощения.

Приведенные результаты опубликованы в работе [A5]. По результатам, описанным в Главе 4, выносятся два положения на защиту.

В Заключении суммированы основные результаты работы. Представлена информация по апробации результатов и научным публикациям по результатам исследований. Обсуждаются перспективы дальнейшей разработки темы.

# Итоги исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Соискателем проведено комплексное исследование ряда физических процессов, влияющих на газодинамику горячих юпитеров. Следует выделить следующие полученные в рамках представленной диссертации итоги:

- 1. На основе результатов трехмерного численного моделирования вычислены темпы потери масс для атмосфер горячих юпитеров различных видов.
- 2. Показано, что квазизамкнутые оболочки являются долгоживущими объектами, с темпами потери массы сравнимыми с классическими замкнутыми оболочками.
- Проведено моделирование влияния нестационарности звездного ветра корональных выбросов массы на газодинамику горячих юпитеров.
- Исследован темп потери массы квазизамкнутой оболочки горячего юпитера HD 209458b при взаимодействии с KBM; показано, что он сносит значительную часть оболочки, находящуюся вне полости Роша.
- Показано, что, с учетом солнечной частоты выбросов KBM, они вносят значительный вклад в общий темп потери массы, который необходимо учитывать при расчетах эволюции планет с малыми орбитами.
- Проанализированы основные источники поглощения излучения родительской звезды солнечного типа в оболочке горячего юпитера HD 209458b.
- 7. Реализован расчет нестационарной ионизации на основе решения уравнения баланса.
- 8. Выявлено, что радиативное давление не вносит существенного вклада в газодинамику квазизамкнутой оболочки HD 209458b. Показано, что для того, чтобы радиативное давление существенно влияло на исследуемую систему, интенсивность линии Лайман-альфа должна быть на два порядка выше наблюдаемой.

 Оценено, что давление излучения могло значительно влиять на газодинамику горячего юпитера HD 209458b на ранних стадиях эволюции системы, когда интенсивность родительской звезды в УФ диапазоне была выше.

Важнейшим итогом работы также является разработка вычислительного комплекса, позволяющего моделировать атмосферы горячих юпитеров и других близких планет. Среди актуальных задач, для решения которых можно использовать разработанный код, следует отметить:

- 1. Исследование динамики водородных оболочек горячих нептунов. Одна из экзопланет данного типа, GJ 436b, аналогично горячим юпитерам, показывает увеличенное поглощение в линии Лайманальфа, а также имеет «хвост» из водорода [26].
- Влияние УФ вспышек родительских звезд на динамику атмосфер горячих юпитеров. Данный эффект, предположительно, приводит к значительному раздуванию оболочки, которая затем сносится звездным ветром и, возможно, давлением излучения.
- Моделирование динамики атмосфер близких планет с молодыми родительскими звездами, с более высокой интенсивностью в УФ диапазоне и большей частотой выбросов KBM.
- 4. Исследование динамики оболочки горячего юпитера на орбите со значительным эксцентриситетом. Одна из наиболее популярных теорий миграции данных планет предполагает, что при их миграции они некоторое время находятся на орбитах с большим эксцентриситетом.

Выше приведен только ограниченный список задач, которые могут быть решены на основе вычислительного комплекса, разработанного в рамках представленной диссертационной работы. На самом деле круг задач, требующих решения в рамках моделирования первичных атмосфер близких экзопланет, значительно шире, и результаты, полученные в данной работе, послужат основой для дальнейшего исследования рассмотренной темы.

# Публикации по теме диссертации

# Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] Черенков А.А., Бисикало Д.В., Кайгородов П.В. Темпы потери массы экзопланетами типа «горячий юпитер» с газовыми оболочками различных видов // Астрономический журнал. — 2014. — Т. 91. — С. 775–784.
- [A2] Бисикало Д.В., Черенков А.А. О влиянии корональных выбросов массы на газодинамику атмосферы экзопланеты типа «горячий юпитер» // Астрономический журнал. — 2016. — Т. 93. — С. 139–148.
- [A3] Cherenkov A. A., Kaigorodov P. V., Bisikalo D. V. Gas dynamic modeling of the CME propagation through the envelope of a hot Jupiter-type exoplanet // Journal of Physics: Conference Series / Astronum-2015 Proceedings. — 2016. — Vol. 719. — P. 012010.
- [A4] Cherenkov A. A., Bisikalo D. V., Fossati L., Möstl C. Influence of Coronal Mass Ejections on the Mass-Loss Rates of hot-Jupiters // The Astrophysical Journal. - 2017. - Vol. 846. - P. 31.
- [A5] Cherenkov A. A., Bisikalo D. V., Kosovichev A. G. Influence of stellar radiation pressure on the flow structure in envelope of hot-Jupiter HD 209458b // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Vol. 475. — P. 605–613.

#### Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] Bisikalo D. V., Cherenkov A. A., Kaigorodov P. V. The estimate of hot Jupiter mass loss rate in the interaction with CME from a solar type star // Solar and Stellar Flares and Their Effects on Planets / Ed. by A. G. Kosovichev, S. L. Hawley & P. Heinzel: Proceedings IAU Symposium. - 2016. - Vol. 320. - P. 224-229.
- [B2] Черенков А. А., Бисикало Д. В. О влиянии корональных выбросов массы на газодинамику атмосферы экзопланеты типа «горячий юпитер» // Сборник трудов 45-й студенческой научной конференции «Физика космоса». — 2016. — С. 234.

[B3] Черенков А. А., Бисикало Д. В. Влияние давления излучения на газодинамику атмосфер экзопланет типа «горячий юпитер» // Сборник трудов 46-й студенческой научной конференции «Физика космоса». — 2017. — С. 225.

# Цитируемая литература

- 1. Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etangs A., Désert J.-M. et al. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b // Nature. - 2003. - Vol. 422. - P. 143-146.
- Ben-Jaffel L. Exoplanet HD 209458b: Inflated Hydrogen Atmosphere but No Sign of Evaporation // Astrophys. J. Lett. — 2007. — Vol. 671. — P. L61–L64.
- Vidal-Madjar A., Désert J.-M., Lecavelier des Etangs A. et al. Detection of Oxygen and Carbon in the Hydrodynamically Escaping Atmosphere of the Extrasolar Planet HD 209458b // Astrophys. J. Lett. — 2004. — Vol. 604. — P. L69–L72.
- 4. Ben-Jaffel L., Sona Hosseini S. On the Existence of Energetic Atoms in the Upper Atmosphere of Exoplanet HD209458b // Astrophys. J. 2010. Vol. 709. P. 1284–1296.
- Linsky J. L., Yang H., France K. et al. Observations of Mass Loss from the Transiting Exoplanet HD 209458b // Astrophys. J. - 2010. --Vol. 717. - P. 1291-1299.
- Lecavelier Des Etangs A., Ehrenreich D., Vidal-Madjar A. et al. Evaporation of the planet HD 189733b observed in H I Lyman-α // Astron. and Astrophys. - 2010. - Vol. 514. - P. A72.
- Vidal-Madjar A., Huitson C. M., Bourrier V. et al. Magnesium in the atmosphere of the planet HD 209458 b: observations of the thermosphere-exosphere transition region // Astron. and Astrophys. - 2013. - Vol. 560. - P. A54.
- 8. Bourrier V., Lecavelier des Etangs A., Dupuy H. et al. Atmospheric escape from HD 189733b observed in H I Lyman- $\alpha$ : detailed analysis of HST/STIS September 2011 observations // Astron. and Astrophys. 2013. Vol. 551. P. A63.

- Fossati L., Haswell C. A., Froning C. S. et al. Metals in the Exosphere of the Highly Irradiated Planet WASP-12b // Astrophys. J. Lett. – 2010. – Vol. 714. – P. L222–L227.
- Bisikalo D. V., Kaygorodov P. V., Arakcheev A. S. On the Number of Hot Jupiters Having Extended Non-Spherical Envelopes // Living Together: Planets, Host Stars and Binaries / Ed. by S. M. Rucinski, G. Torres, M. Zejda: Astronomical Society of the Pacific Conference Series. - 2015. - Vol. 496. - P. 337.
- Бисикало Д. В., Кайгородов П. В., Ионов Д. Э., Шематович В. И. Типы газовых оболочек экзопланет, относящихся к классу "горячих юпитеров" // Астроном. журн. — 2013. — Т. 90. — С. 779–790.
- Bisikalo D., Kaygorodov P., Ionov D. et al. Three-dimensional Gas Dynamic Simulation of the Interaction between the Exoplanet WASP-12b and its Host Star // Astrophys. J. - 2013. - Vol. 764. -P. 19.
- 13. Bourrier V., Lecavelier des Etangs A. 3D model of hydrogen atmospheric escape from HD 209458b and HD 189733b: radiative blow-out and stellar wind interactions // Astron. and Astrophys. -2013. -Vol. 557. -P. A124.
- Kislyakova K. G., Holmström M., Lammer H. et al. Magnetic moment and plasma environment of HD 209458b as determined from Lyα observations // Science. - 2014. - Vol. 346. - P. 981-984.
- Grießmeier J.-M., Stadelmann A., Penz T. et al. The effect of tidal locking on the magnetospheric and atmospheric evolution of "Hot Jupiters" // Astron. and Astrophys. - 2004. - Vol. 425. - P. 753-762.
- Sánchez-Lavega A. The Magnetic Field in Giant Extrasolar Planets // Astrophys. J. Lett. - 2004. - Vol. 609. - P. L87-L90.
- Аракчеев А.С., Жилкин А.Г., Кайгородов П.В. и др. Ослабление потери массы горячим юпитером WASP-12b под действием собственного магнитного поля // Астроном. журн. — 2017. — Т. 94. — С. 927–937.
- Бисикало Д.В., Аракчеев А.С., Кайгородов П.В. Пульсации атмосфер горячих юпитеров, обладающих собственным магнитным полем // Астроном. журн. — 2017. — Т. 94. — С. 920–926.

- Schneider J., Dedieu C., Le Sidaner P. et al. Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database // Astron. and Astrophys. – 2011. – Vol. 532. – P. A79.
- Murray-Clay R. A., Chiang E. I., Murray N. Atmospheric Escape From Hot Jupiters // Astrophys. J. - 2009. - Vol. 693. - P. 23-42.
- Vourlidas A., Howard R. A., Esfandiari E. Comprehensive Analysis of Coronal Mass Ejection Mass and Energy Properties Over a Full Solar Cycle // Astrophys. J. - 2010. - Vol. 722. - P. 1522-1538.
- Webb D. F., Howard T. A. Coronal Mass Ejections: Observations // Living Rev. Sol. Phys. - 2012. - Vol. 9. - P. 3.
- Richardson I. G., Cane H. V. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties // Sol. Phys. - 2010. - Vol. 264. -P. 189-237.
- Möstl C., Farrugia C. J., Temmer M. et al. Linking Remote Imagery of a Coronal Mass Ejection to Its In Situ Signatures at 1 AU // Astrophys. J. Lett. - 2009. - Vol. 705. - P. L180-L185.
- Vourlidas A., Lynch B. J., Howard R. A., Li Y. How Many CMEs Have Flux Ropes? Deciphering the Signatures of Shocks, Flux Ropes, and Prominences in Coronagraph Observations of CMEs // Sol. Phys. - 2013. - Vol. 284. - P. 179-201.
- 26. Ehrenreich D., Bourrier V., Wheatley P. J. et al A giant cometlike cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b // Nature. - 2015. - Vol. 522. - P. 459-461.

#### Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, своим коллегам и соавторам за помощь и плодотворное сотрудничество. Особую благодарность автор выражает П. В. Кайгородову за неизменное внимание и помощь в работе.