

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Лазовик Ярослав Александрович

**Приливная диссипация и орбитальная
эволюция в системах «звезда-планета»**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Попов Сергей Борисович**
доктор физико-математических
наук, профессор РАН

Официальные оппоненты: **Ламзин Сергей Анатольевич**
доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории новых фотометрических методов
ГАИШ МГУ

Иванов Павел Борисович

доктор физико-математических наук, главный научный
сотрудник отдела теоретической астрофизики и космо-
логии Астрокосмического центра Физического института
имени П.Н.Лебедева РАН (АКЦ ФИАН)

Ипатов Сергей Иванович

доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории термодинамики и математическо-
го моделирования природных процессов Института геохи-
мии и аналитической химии имени В.И.Вернадского
(ГЕОХИ РАН)

Защита состоится 23 мая 2024 г. на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский пр., д. 13, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д.27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2995>.

Автореферат разослан 18 апреля 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность, история и степень разработанности темы

Открытие первого горячего юпитера 51 Peg b в 1995 году положило начало концептуально новому направлению исследований. Десятилетия работы позволили научному миру существенно расширить знания в области популяций экзопланет. Рост наблюдательных данных стимулировал фундаментальные исследования, которые в конечном итоге привели к разработке метода синтеза популяции планет, предназначенного для согласования теории и наблюдений [1; 2].

Основной задачей популяционного синтеза является моделирование образования и последующей эволюции совокупности экзопланет. Эта задача не является тривиальной, поскольку выборка наблюдаемых экзопланет крайне неоднородна и состоит из объектов, отличающихся как на количественном (характерные диапазоны масс, орбитальных радиусов, плотностей и других характеристик планет очень велики и простираются на много порядков величины), так и на качественном уровне (многие физические процессы, характерные для газовых планет-гигантов, не подходят для описания эволюции каменных планет). Более того, само определение планеты до сих пор остается темой спекуляций и дискуссий. Так, например, до сих пор не до конца ясным является вопрос, как провести разграничение между юпитерами и коричневыми карликами. Не существует единого мнения и относительно того, как массивные планеты образуются. Господствующей теорией является аккреционный сценарий, согласно которому ядра планет формируются из пыли, содержащейся в пылевом диске [3]. В случае газовых планет-гигантов эти ядра формируются менее чем за 3 млн лет, до диссипации газового протопланетного диска, в результате чего за фазой аккреции пылинок, каменной гальки и/или планетезималей следует аккреция газовой оболочки. У этой гипотезы существует ряд сложностей, так как образование крупных объектов из пыли затруднено из-за наличия сразу нескольких барьеров, связанных с радиальной миграцией, отражением и фрагментацией образованных из пыли камней, а также электростатического барьера. В связи с этим еще одним возможным механизмом образования планет принято считать прямой гравитационный коллапс неоднородностей газового диска [4]. Данный сценарий позволяет объяснить наличие массивных юпитеров на больших орбитальных расстояниях, а так-

же значительное число одиночных юпитеров и одиночных двойных юпитеров в молодых звездных скопления. Существуют отдельные реализации метода популяционного синтеза, в которых гравитационная неустойчивость диска рассматривается в качестве механизма формирования холодных юпитеров.

Стоит отметить, что приведенное выше описание является лишь отражением наиболее общих тенденций в изучении экзопланет. Исследования, проведенные в последнее время, позволили рассмотреть отдельные процессы и их роль в формировании экзопланетных популяций. Дальнейшее развитие представлений о природе экзопланет и уточнение моделей должны привести к возможности напрямую сопоставлять наблюдаемые и синтетические популяции и прогнозировать будущий рост числа обнаруженных экзопланет.

Для того, чтобы приблизиться к достижению поставленных целей, в модели популяционного синтеза необходимо включить процессы, влияющие на динамику экзопланет после диссипации протопланетного диска. Принято считать, что одним из самых эффективных механизмов в этом контексте является приливное взаимодействие. Присутствие внешнего гравитационного источника вызывает крупномасштабные, а также динамические волнообразные возмущения внутри объекта, которым может быть звезда или планета. Энергия таких деформаций диссипирует под действием различных факторов, что приводит к перераспределению углового момента в системе с последующей миграцией. Первая теория приливного взаимодействия была представлена в статье [5]. В вышеупомянутом исследовании возмущенное приливами тело рассматривалась в виде двух симметричных балджей, находящихся в гидростатическом равновесии. Из-за трения эти балджи оказываются смещенными относительно линии, соединяющей центр рассматриваемого объекта и его компонента, что создает ненулевой результирующий момент силы. Данная модель, модель постоянного смещения, была исследована и уточнена в работах [6], [7] и [8]. Соответствующий тип приливов называется равновесным, или квазистационарным. В значительной части исследований приливное взаимодействие параметризуется согласно модели постоянного смещения, в которой темпы диссипации либо фиксируются исходя из заведомых ожиданий, либо подбираются для достижения соответствия с данными наблюдений. Однако такой подход обладает рядом очевидных недостатков. Во-первых, он не затрагивает физику процессов, лежащих в основе затухания приливов. Вследствие

этого принятые оценки темпов диссипации зачастую не являются обоснованными и при детальном рассмотрении механизмов диссипации оказываются лежащими вне допустимых пределов. Так, например, наиболее важным механизмом затухания квазистационарных приливов принято считать взаимодействие приливных потоков с турбулентными конвективными течениями, приводящим к появлению эффективной вязкости в среде [9—11]. В то же время в недавних гидродинамических симуляциях было показано, что в случае, когда скорость приливов выше скорости конвективных движений, вязкость, а значит, и эффективность диссипации, существенно снижена [12; 13], что приводит к низким оценкам скорости миграции, которые не могут объяснить многие наблюдаемые явления. Во-вторых, в модели постоянного смещения никак не учитывается влияние угловой скорости вращения объекта и особенностей его внутреннего строения на характер затухания, поэтому отсутствует возможность отследить, как приливное взаимодействие меняется в течение жизни системы. В связи с этим подобный подход позволяет получить лишь наиболее общую и не всегда точную информацию о том, как эволюционируют орбитальные параметры экзопланет. Требуется усовершенствовать модель, что невозможно сделать, не исследовав физику приливов более подробно.

Заметный шаг вперед был сделан в работах [10; 11; 14], где впервые были рассмотрены волнообразные возмущения, или динамические приливы. Последующие исследования привели к значительному прогрессу в понимании механизмов, лежащих в основе динамики приливов. В конвективной зоне динамические приливы существуют в виде инерциальных волн, возникающих под действием силы Кориолиса и диссипирующих в результате взаимодействия с конвективными потоками. Считается, что диссипация инерциальных волн особенно важна на ранней стадии эволюции системы. Под действием затухания инерциальных волн происходит циркуляризация орбит [15], спин-орбитальная синхронизация [16] и выравнивание спин-орбитального наклона [17]. Важно отметить, что в звезде или планете одновременно могут распространяться волны с разными частотами, и диссипация каждой моды зависит от большого количества факторов. В случае, когда частота какой-либо моды оказывается близкой к собственной частоте колебаний звезды, происходит резонанс, при котором начинают работать нелинейные эффекты и темпы диссипации резко увеличиваются. Поскольку спектр собственных ча-

стот может быть плотным, с вычислительной зрения оказывается крайне затруднительным моделировать орбитальную эволюцию, оценивая диссипацию каждой моды, а в случае изучения динамики целой популяций планет это и вовсе становится невозможным. Для преодоления этих сложностей в работе [18] был предложен формализм, заключающийся в усреднении темпов диссипации по частоте приливного возмущения (в настоящей работе этот формализм будет называться формализмом частотного усреднения). Впоследствии формализм частотного усреднения был применен в работе [19] для расчета скорости диссипации на основе упрощенной однородной двухслойной звездной модели с лучистым ядром и конвективной оболочкой. Используя тот же подход, Адриан Баркер [20] вывел калибровки эффективности затухания для более сложной, неоднородной модели звезды. Для возбуждения инерциальных волн необходимо, чтобы частота приливного возмущения была меньше удвоенной частоты вращения звезды, поэтому инерциальные волны не могут быть ответственны за миграцию планет вокруг медленно вращающихся звезд, находящихся на стадии главной последовательности (ГП).

Доминирующий механизм быстрой миграции может быть связан с диссипацией гравитационных волн в зоне лучистого переноса [21]. Процессы, лежащие в основе диссипации гравитационных волн, зависят от амплитуды первичных волн. Возможны три различных режима: линейный, умеренно нелинейный и сильно нелинейный. При линейном режиме, для которого характерны низкие амплитуды, диссипация связана с излучением энергии, запасенной в волнах. При умеренно нелинейном режиме становятся важными процессы возникновения дочерних мод, имеющих более короткие длины волн и характеризующихся более быстрыми темпами затухания. В отличие от линейного режима, в умеренно нелинейном режиме родительская волна успевает отразиться и вернуться к месту своего возникновения, являясь, таким образом, стоячей волной. При сильно нелинейном режиме гравитационные волны, распространяясь от границы ядра и оболочки внутрь звезды, увеличивают свою амплитуду до критических значений, в результате чего в центре происходит опрокидывание, приводящее к высвобождению всей накопленной энергии, которая эффективно поглощается средой. Это наиболее эффективный механизм затухания гравитационных волн.

Рассуждая о приливном взаимодействии, нельзя не сказать, что для понимания того, как эволюционируют планеты, важно уметь оценивать диссипацию не только в звездах, но и в планетах. Диссипация приливов в планетах особенно важна на раннем этапе жизни системы. Она приводит к циркуляризации и синхронизации, а также к разрушению резонансных цепочек планет. Аналогично звездам, в газовых планетах-гигантах есть свои зоны лучистого и конвективного переноса, а значит существует много общего между диссипацией в звездах и планетах. Важным отличием газовых планет от звезд является возможное наличие твердого ядра, в котором имеет место неупругая диссипация. Кроме того, для планет характерны более высокие темпы вращения, а, следовательно, и более значимая роль диссипации инерциальных волн. Амплитуда волн в планетах выше, поэтому планетные приливы чаще подвержены нелинейным эффектам.

Помимо приливного взаимодействия, есть и другие силы, влияющие на динамику системы «звезда-планета». Относительное движение между планетой и намагниченным окружающим ветром приводит к появлению магнитных сил. В зависимости от конфигурации системы и напряженности магнитного поля (звездного и планетного), взаимодействие может быть либо униполярным, либо диполярным. Первая попытка рассмотреть оба режима магнитного взаимодействия в рамках одной модели была предпринята в исследовании Антуана Стругарека и др. [22]

Кроме того, в процессе своей эволюции планета может терять вещество. Стимулировать этот процесс может энергия, выделяющаяся при сжатии ядра или энергия звезды. Близкие к своим звездам планеты подвержены сильному излучению со стороны родительской звезды и нагреваются до высоких температур, что приводит к фотоиспарению. Потеря вещества также может привести к миграции и существенной перестройке орбитальной архитектуры экзопланетного населения. Будучи эффективным для суперземель и субнептунов, фотоиспарение не может значительно изменить массу горячих юпитеров, хотя гидродинамическое моделирование показало, что газовые гиганты с массой меньше массы Юпитера, вероятно, будут подвержены тепловому истечению [23; 24]. Горячие юпитеры теряют массу и во время переполнения полости Роша, что приводит к превращению гиганта в планету с меньшей массой. Этот так называемый сценарий стабильной аккреции был исследован в

работах [25; 26]. Потеря вещества сказывается не только на индивидуальных системах, но и на общих свойствах распределения наблюдаемых планет. Так, фотоиспарение является причиной долины радиусов, отделяющей каменные планеты от планет, имеющих газовую оболочку [27]. Также фотоиспарение и, возможно, стабильная аккреция влияют на образование пустыни нептонов [28].

Калибровки вышеупомянутых механизмов должны быть подтверждены эмпирическими оценками. Существует несколько способов извлечь информацию о взаимодействии звезды и планеты из наблюдений. Наиболее простым из них является определение скорости миграции через измерение смещения времени транзита. Во-вторых, магнитное и приливное взаимодействия влияют на внешние слои звезды, что приводит к изменению звездной активности. В-третьих, приливное взаимодействие деформирует форму планет. Отклонение от идеальной сферической формы может повлиять на оценки плотности, полученные на основе наблюдений транзитов. Говоря о плотности, нельзя не упомянуть, что выделяемая при диссипации энергия идет на нагрев планеты, что, в свою очередь, означает ее расширение. Систематическое уменьшение средней плотности при усилении приливно-взаимодействия также может быть обнаружено в наблюдениях, хотя есть и другие механизмы, обуславливающие дополнительное расширение, например, омическая диссипация. В-четвертых, обмен угловым моментом, вызванный миграцией планет, может привести к увеличению скорости вращения звезды, а значит и к смещению реального возраста относительно гирохронологических оценок и аномалиям в распределении периода вращения молодых звездных скоплений. Выпадение планет может сопровождаться ярким оптическим или/и ультрафиолетовым/рентгеновским транзиентом, как показано в исследовании [29]. Такие события могут быть обнаружены даже на расстоянии в мегапарсеки, что делает их потенциально полезным инструментом для проверки моделей взаимодействия звезды и планеты. Энергии, выделяющейся при выпадении массивной планеты на звезду, находящейся на поздней стадии эволюции, может быть достаточно для сбрасывания ее своей оболочки. Наконец, поглощение планеты может привести к существенному и продолжительному увеличению содержания тяжелых элементов в атмосфере звезды, что также можно

обнаружить, сопоставляя спектры родительских звезд и их компонентов в кратных системах.

Целью настоящей работы является моделирование орбитальной эволюции горячих юпитеров под действием приливных и магнитных сил и потери вещества. Для этого мы применяем приливной формализм из работы Баркера (2020) [20], далее B20, к эволюционным моделям звезд, рассчитанным с помощью кода MESA [30–34]. В нашей модели учтена диссипация равновесных приливов, инерциальных и гравитационных волн. Полученные оценки скорости диссипации используются для построения орбитальных треков горячих юпитеров с различными массами и начальными положениями. Разработанный алгоритм использован для анализа динамики популяции горячих юпитеров методом популяционного синтеза. Проведено сравнение результатов моделирования с наблюдаемым распределением экзопланет. Изучено влияние планетных приливов на подавление эксцентриситетов горячих юпитеров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Реализовать алгоритм для расчета эффективности диссипации звездных приливов согласно работе B20;
2. Разработать модель миграции планеты, включив в нее все рассматриваемые виды взаимодействий (приливные и магнитные взаимодействия, а также фотоиспарение, стабильную аккрецию и магнитное торможение звезды);
3. Исследовать влияние различных параметров данной модели на характер миграции планеты (например, начальной массы и положения планеты, начальной скорости вращения, массы и показателя металличности звезды, напряженности магнитного поля планеты и других), выявить основные закономерности;
4. Используя полученные результаты, провести моделирование эволюции экзопланетной популяции с целью сопоставить нашу картину эволюции синтетической выборки планет со статистикой наблюдений;

5. Расширить использование формализма B20 на случай планетных моделей, выявить, как эффективность диссипации различных видов планетных приливов меняется с возрастом и массой планеты;
6. Выяснить, способна ли диссипация тех или иных планетных приливов в нашей модели объяснить циркуляризацию горячих юпитеров.

Методология и методы исследования

Теоретико-методологической базой диссертации являются работы [18; 20] (приливная диссипация), [35–37] (магнитное взаимодействие), [38; 39] (фотоиспарение), [25; 26] (стабильная аккреция) и [40; 41] (закон торможения). Построение эволюционных моделей звезд и планет осуществляется при помощи кода MESA [30–34]. Профили звездного ветра вычисляются при помощи кода starAML [42].

В настоящем исследовании мы также используем различные калибровки из публикаций других авторов. Эволюция угловой скорости вращения звезды моделируется согласно параметрам торможения из [43]. Зависимость радиуса планеты от массы и величины падающего потока излучения задана на основе работ [25] и [44]. Эффективность фотоиспарения вычисляется согласно [24]. Величина напряженности магнитного поля планеты вычисляется двумя методами, представленными в работах [45] и [46], соответственно. Физические параметры, определяющие условия в основании короны звезды, мы задаем на основе калибровки из [47]. Светимость звезды в XUV-диапазоне вычисляется при помощи соотношений из [48]. Время начала отсчета наших симуляций фиксируется на основе калибровок времени диссипации протопланетного диска из [49].

При проведении популяционного синтеза экзопланет в работе (a1) из списка публикаций по теме диссертации массу звезды мы выбираем на основе начальной функции распределения масс из [50]. Начальный период вращения звезды определяется согласно распределению периодов вращения звезд скопления NGC 2362 [51]. Результаты наших симуляций мы сопоставляем со статистикой обнаруженных планет из NASA Exoplanet Archive (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. 12—15 % горячих юпитеров вокруг звезд с массой в пределах диапазона $[0.95; 1.05] M_{\odot}$ были поглощены или потеряли достаточно вещества, чтобы выйти из диапазона масс юпитеров ($[0.3; 10] M_J$).
2. Опрокидывание внутренних гравитационных приливных волн существенно повышает вероятность выпадения планеты или заполнения ею полости Роша в системах, состоящих из горячих юпитеров, обращающихся вокруг звезд с малой начальной угловой скоростью вращения. Для планет в системах с быстрым ротатором (начальный период вращения меньше 4.5 сут) диссипация инерциальных волн является ключевым механизмом миграции.
3. Если диссипация динамических приливов в солнеподобной звезде на стадии ГП невозможна или неэффективна, магнитное взаимодействие преобладает над миграцией под действием квазистационарных приливов. Диссипация квазистационарных приливов начинает доминировать после окончания ГП за счет увеличения толщины конвективной оболочки.
4. Диссипация инерциальных волн в планетах способна объяснить распределение эксцентриситетов наблюдаемых газовых экзопланет. Найдена корреляция между рассчитанным нами временем циркуляризации и полученным на основе наблюдений эксцентриситетом.
5. Миграция с достаточной для обнаружения за десятилетний цикл наблюдений скоростью может быть обнаружена в 0.20—0.25 % систем с горячими юпитерами.

Научная новизна:

1. Спектр рассматриваемых в настоящей работе механизмов не имеет аналогов в литературе. Мы показали, что каждый из учтенных процессов (диссипация квазистационарных приливов, инерциальных и гравитационных волн, магнитное взаимодействие, фотоиспарение и стабильная аккреция) на определенном этапе орбитальной эволюции способен давать доминирующий вклад в динамику системы;
2. Впервые был исследован фактор диссипации гравитационных волн в контексте орбитальной эволюции экзопланет в широком диапазоне параметров. Изучена относительная роль гравитационных

волн в жизни планет в зависимости от совокупности различных параметров, связанных со звездой и планетой;

3. Использован оригинальный подход к учету различных процессов потери вещества, позволяющий моделировать как фотоиспарение, так и стабильную аккрецию;
4. Разработанная модель миграции основана на наиболее современных калибровках и параметризациях используемых физических величин (планетного радиуса, напряженности магнитного поля звезды и планеты, параметров звездного ветра);
5. Впервые в рамках одной работы реализован на практике единый формализм для расчета темпов диссипации планетных и звездных приливов.

Практическая значимость работы связана со стремительным ростом наблюдательной статистики. Увеличение количества открытых экзопланет позволит выявить новые закономерности распределения их характеристик. Данные закономерности необходимо будет объяснить в рамках модели миграции. Таким образом, наша модель может дать важную информацию о природе экзопланетных популяций от момента образования первых планет в Галактике и до современной эпохи. Кроме того, дальнейшие наблюдения за открытыми транзитными системами позволят выявить новые случаи смещения времени транзита, что приведет к уточнению теории приливов. Орбитальная эволюция системы завершается приливным разрушением планеты или ее прямым попаданием на поверхность звезды. Оба этих возможных события сопровождаются значительным выделением энергии, что можно обнаружить при помощи современных телескопов. Поиск подобных событий может оказаться еще одним способом проверить наши результаты и отдельные положения нашей модели.

Разработанный алгоритм для расчета эффективности приливной диссипации достаточно прост и может быть использован в дальнейших исследованиях, посвященных миграции экзопланет. Реализация единого формализма для оценки темпов приливного взаимодействия в звездах и планетах - важный шаг в контексте моделирования орбитальной эволюции. Одним из возможных путей усовершенствования алгоритма станет учет умеренно нелинейного режима диссипации гравитационных волн. При помощи полученной модели мы

планируем изучить миграцию планет у проэволюционировавших звезд с целью установить критерий выживаемости, а также провести более полные и детальные исследования методом популяционного синтеза.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятого формализма приливной диссипации из работы B20[20]. Магнитное взаимодействие калибруется согласно модели дипольного взаимодействия из работы [37]. Темпы фотоиспарения получены на основе исследований [24; 39]. Модели звезды построены при помощи кода MESA [30–34], профили звездного ветра построены при помощи кода starAML [42]. Темпы магнитного торможения звезды заданы согласно закону торможения из [40; 41] с параметрами, уточненными в [43]. Каждый из изучаемых процессов в отдельности дает тот вклад, который был предсказан авторами соответствующего исследования. Результаты нашего моделирования были применены для исследования эволюции популяции горячих юпитеров. По итогам работы нам удалось воспроизвести многие из наблюдаемых особенностей распределения горячих экзопланет. Полученные орбитальные треки находятся в соответствии с результатами других авторов. Так, нам удалось воспроизвести характерное перемещение планеты на границе области диссипации инерциальных волн, обнаруженное в работах [52; 53]. Мы получили схожую с результатами [47] картину миграции планет в системах с быстро вращающейся звездой. Наши образцы эволюции систем, подверженных перетеканию вещества через полость Роша, частично воспроизводят треки Вальсекки и др. [26]. Полученные нами темпы циркуляризации систем объясняют наблюдаемое распределение эксцентриситетов горячих юпитеров. Оцененные темпы диссипации планетных приливов подтверждаются астрометрическими наблюдениями Юпитера, Сатурна и их спутников [54; 55].

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих мероприятиях:

1. Международная конференция по астрофизике «Идеи С.Б. Пикельнера и С.А. Каплана и современная астрофизика», Москва, ГАИШ МГУ, Россия, 8-12 февраля 2021 («Орбитальная эволюция в системах “звезда – экзопланета”»);

2. XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2021», МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 12-23 апреля 2021 («Миграция горячих юпитеров под действием приливов»);
3. Всероссийская астрономическая конференция «ВАК-2021») «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, ГАИШ МГУ, Россия, 23-28 августа 2021 («Выпадение горячих юпитеров под действием приливной диссипации»);
4. PLATO Mission Conference 2021, Онлайн, Франция, 11-15 октября 2021 («Estimation of hot Jupiter tidal infall rate in the Galaxy», стендовый доклад);
5. Исследования звезд с экзопланетами-2021, Симеизская обсерватория Института астрономии РАН, Россия, 25-29 октября 2021 («Моделирование приливной миграции горячих юпитеров»);
6. XVII SOCHIAS Meeting, Онлайн, Чили, 17-21 января 2022 («Tidal migration of hot Jupiters»);
7. Семинар АКЦ ФИАН, ноябрь 2021 («Моделирование приливной миграции горячих юпитеров»);
8. Семинар АКЦ ФИАН, декабрь 2022 («Динамика горячих юпитеров: приливное и магнитное взаимодействие и потеря вещества»);
9. Семинар отдела релятивистской астрофизики ГАИШ МГУ, май 2023 («Моделирование орбитальной эволюции горячих юпитеров»).

Личный вклад

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Автор принимал активное участие в постановке целей и задач, разработке модели, и получении на основе нее результатов, приведенных в настоящей работе. Статьи (a1) и (a2) опубликованы без соавторов. В работе (a3) автор модифицировал алгоритм для расчета темпов приливной диссипации, что позволило применить его к газовым планетам. Анализ и интерпретация полученных результатов были осуществлены совместно с Адрианом Баркером.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации: 141 страница текста с 29 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 274 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность и практическая значимость диссертационной работы, дается краткий обзор современных представлений об основных взаимодействиях в системах «звезда–планета» и их влиянии на архитектуру экзопланетных популяций, формулируются цели настоящего исследования, приводится перечень положений, выносимых на защиту.

Первая глава посвящена описанию теоретико-методологической базы, на основе которой мы моделируем орбитальную эволюцию систем «звезда–планета» в настоящей работе. В **разделе 1.1** описан процесс получения звездных моделей, приведена выбранная параметризация эволюции вращения для случая изолированной звезды. В **разделе 1.2** указана информация, касающаяся используемой нами параметризации радиуса планеты. **Раздел 1.3** посвящен моделированию приливного взаимодействия, с разделением на квазистационарные приливы (**подраздел 1.3.1**), инерциальные волны (**подраздел 1.3.2**) и гравитационные волны (**подраздел 1.3.3**). Гравитационное поле возмущающего тела (в данном случае планеты) приводит к появлению возмущений на поверхности и внутри звезды. Энергия подобных деформаций диссипирует под действием различных механизмов), что приводит к миграции планеты. Каждый из типов приливов характеризуется своим приливным фактором Q' , который определяется отношением максимальной энергии приливных возмущений к количеству энергии, потерянной за один приливной цикл. Зная приливной фактор Q' , можно оценить темпы миграции планеты под действием приливов. Меньшим значениям Q' соответствует более интенсивная миграция. В **разделе 1.4** описано моделирование магнитного взаимодействия, при этом особое внимание уделяется расчету величины напряженности магнитного поля планеты в зависимости от ее возраста и массы. Перемещение планеты в замагниченной среде приводит к возникновению возмущений магнитного поля. Эти возмущения распространяются в виде альвеновских волн к магнитным полюсам звезды, перенося угловой момент и энергию, что также, как и в случае приливов, приводит к изменению орбитальной полуоси. **Раздел 1.5** посвящен механизмам потери вещества, реализованным в наших симуляциях, а именно фотоиспарению (**подраздел 1.5.1**) и стабильной аккреции при заполнении полости Роша (**подраздел 1.5.2**). Фотоиспарение реализовано в рамках двух режимов. При малых значениях

падающего со стороны родительской звезды потока излучения вся энергия идет на совершение работы. Соответствующий режим называется энергоограниченным. Рост падающего потока приводит к увеличению относительного вклада процессов ионизации и рекомбинации, при этом значительная часть энергии переизлучается, что существенно снижает эффективность фотоиспарения. Такой режим называется рекомбинационно-ограниченным.

Вторая глава посвящена моделированию орбитальных треков планеты в зависимости от совокупности различных параметров, в том числе ее начальной массы и положения. В **разделе 2.1** мы приводим характерные примеры симуляций, при которых планета на определенном этапе заполняет полость Роша. На рисунке 1 изображен один из таких примеров, соответствующий системе, состоящей из горячего юпитера с начальной массой 2 массы Юпитера и умеренно вращающейся звезды солнечной массы. Верхняя панель иллюстрирует динамику изменения массы планеты M_{pl} . Средняя панель отображает положение планеты в единицах орбитального периода. Синяя сплошная линия соответствует орбитальному периоду планеты P_{orb} . Черной сплошной и штриховой линиями показаны период синхронизации ($P_{orb} = P_{rot}$; P_{rot} – период вращения звезды) и граница диапазона возбуждения инерциальных волн ($P_{orb} = \frac{1}{2}P_{rot}$) в случае изолированной звезды. Синей пунктирной и штриховой линиями показаны период синхронизации и граница возбуждения инерциальных волн в данной системе. Оранжевая штрих-пунктирная линия соответствует орбитальному периоду, при котором происходит столкновение планеты со звездой P_{col} . Красная сплошная линия показывает период Роша P_R , при достижении которого планета заполняет полость Роша. Черными крестами отмечены начало и конец фазы заполнения полости Роша. Черным кругом отмечено начало диссипации гравитационных волн. Нижняя панель показывает изменение шкал времени потери массы и миграции под действием различных процессов. Красная сплошная и черная штриховая линии обозначают шкалу времени потери массы в результате стабильной аккреции и фотоиспарения. Обращаем внимание, что кривая, отображающая общие темпы потери массы, соответствует нижней из двух последних кривых в каждый момент времени. Зеленая пунктирная и фиолетовая штрих-пунктирная линии соответствуют шкале времени миграции, вызванной приливным и магнитным взаимодействиями.

До начала ГП (НГП) у родительской звезды планета активно мигрирует, сначала под действием диссипации инерциальных волн, а потом в результате магнитного взаимодействия. В тот момент, когда орбитальный период планеты становится равным $P_{\text{orb}} = \frac{1}{2}P_{\text{rot}}$, планета оказывается на границе области возбуждения инерциальных волн (изображенной синей штриховой линией), разделяющей зону быстрой миграции (под действием инерциальных волн) и зону медленной миграции (под действием квазистационарных приливов). В последующее время до НГП горячий юпитер мигрирует вблизи орбитального периода $P_{\text{orb}} = \frac{1}{2}P_{\text{rot}}$. Ниже этой границы инерциальные волны не возбуждаются, что не позволяет планете уйти ниже соответствующего орбитального радиуса, поскольку раскрутка звезды протекает интенсивнее миграции юпитера. При нахождении планеты за этим радиусом инерциальные волны быстро доставляют ее к границе собственного возбуждения, что вызывает такое поведение планеты на ранней стадии своей эволюции. Незадолго до НГП, когда звездное сжатие прекращается, и раскрутка звезды сменяется торможением, планета входит в область, где магнитное взаимодействие дает основной вклад в миграцию, позволяя достичь предела Роша в течение нескольких десятков миллионов лет. Перед началом фазы заполнения полости Роша, ограниченной черными крестами, планета не теряет массу, поскольку ее гравитационный потенциал предотвращает тепловые потери вещества. В первые 200 млн лет после начала перетекания вещества горячий юпитер удаляется от родительской звезды, поскольку при потере вещества радиус планеты меняется незначительно. Миграция наружу прекращается, когда радиус планеты начинает уменьшаться при $M_{\text{pl}} \sim 0.5 M_{\text{J}}$, при этом стабильная аккреция продолжается почти 1 млрд лет; за это время планета теряет большую часть своей газовой оболочки и достигает нижней границы диапазона масс юпитеров. К моменту окончания стабильной аккреции скорость перетекания вещества значительно снижается в результате уменьшения массы и радиуса планеты, а также ослабления магнитного взаимодействия, стремящегося сократить орбитальное расстояние. Несмотря на то, что по мере уменьшения светимости звезды в коротковолновом диапазоне скорость фотоиспарения также имеет тенденцию к замедлению, тепловое истечение, начинает преобладать над потерями, связанным с заполнением полости Роша. Это показано на нижней панели, где сопоставляются временные шкалы, связан-

ные с динамикой соответствующей системы. Планета перестает заполнять полость Роша, мигрирует наружу и в конечном итоге становится горячим нептунем, который остается устойчивым до конца ГП. Быстрое расширение проэволюционировавшей звезды и сопутствующее повышение эффективности диссипации равновесных приливов приводят к поглощению планеты при $P_{\text{orb}} = P_{\text{col}}$ (орбитальный период, при котором происходит столкновение, P_{col} показан оранжевой штрихпунктирной линией). Как видно из рисунка 1 и приведенного выше описания, каждое из рассмотренных взаимодействий в определенный момент начинает играть ключевую роль, и отсутствие того или иного механизма в существенной степени изменило бы характер планетной эволюции.

Также в **разделе 2.1** затронут важный сценарий, при котором заполнение полости происходит до начала ГП, что приводит к крайне интенсивному перетеканию вещества и превращению юпитера в горячий нептун или даже каменную планету без газовой оболочки.

В последующих разделах **второй главы** мы исследуем влияние различных факторов на судьбу горячего юпитера: начального орбитального расстояния и массы планеты (**раздел 2.2**), начальной угловой скорости вращения звезды (**раздел 2.3**), доли возвращаемого на планету углового момента со стороны истекаемого вещества (**раздел 2.4**), величины напряженности магнитного поля планеты (**раздел 2.5**), параметризации предела Роша (**раздел 2.6**) и, наконец, массы (**раздел 2.7**) и показателя металличности (**раздел 2.8**) звезды.

В **третьей главе** мы используем полученные данные для изучения эволюции горячих юпитеров методом популяционного синтеза. **Раздел 3.1** посвящен калибровке функции распределения начального периода вращения звезды. В **разделе 3.2** мы исследуем динамику простой модели популяции, в которой все планеты имеют одинаковый возраст и наблюдаемы все зависимости от орбитального расстояния. На примере этой модели мы формулируем общие принципы, на основе которых эволюционирует выборка горячих юпитеров. Далее, в **разделе 3.3**, мы переходим к изучению более сложных моделей с целью воспроизвести характерные особенности распределения наблюдаемых планет на диаграмме «масса–орбитальный период». На рисунке 2 эти планеты отмечены красными кругами, а цветом нанесена нормирован-

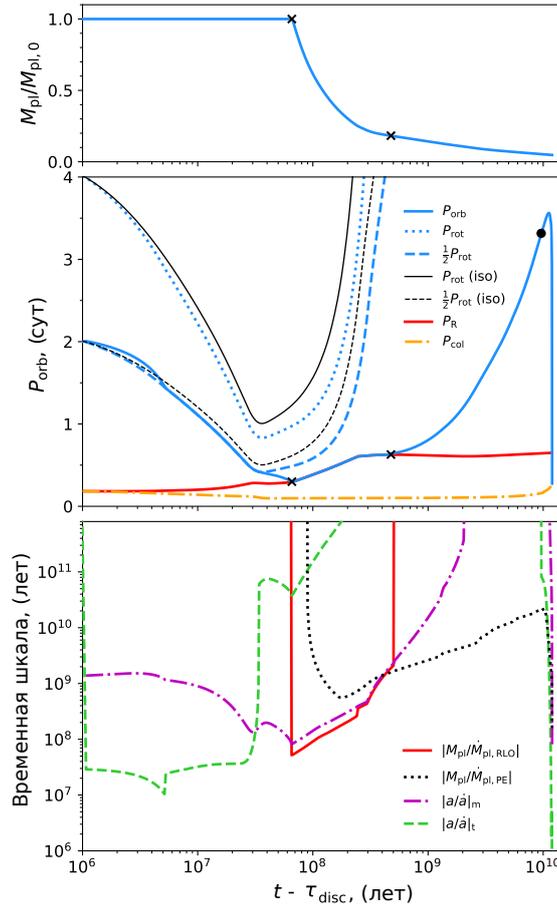


Рис. 1 — Эволюция горячего юпитера с $M_{pl,0} = 2 M_J$ вокруг звезды солнечной массы с $P_{rot,0} = 4.5$ сут. Верхняя панель: масса планеты. Средняя панель: орбитальный период планеты. Нижняя панель: шкалы времени миграции и потери массы. Подробности указаны в тексте.

ная плотность распределения транзитных планет, соответствующая наиболее удачной модели синтетической популяции (модели 2). Изображенная на рисунке 2 синтетическая популяция успешно воспроизводит высокое число обнаруженных планет-гигантов с периодом 3 сут, а также верхнюю и левую-нижнюю границу распределения наблюдаемой выборки горячих юпитеров, обращающихся вокруг солнцеподобных звезд. Кроме того, модель позволяет предположить, что некоторые из наблюдаемых горячих нептун, находящиеся ниже штрих-пунктирной линии на диаграмме, могут быть остатками горячих юпитеров, прошедших через фазу стабильной аккреции. Согласно нашим расчетам, 12–15 % горячих юпитеров, обращающихся вокруг звезд с массой в пределах диапазона от 0.95 до 1.05 масс Солнца, были поглощены или потеряли достаточно вещества, чтобы выйти из диапазона масс юпитеров. При этом миграция с достаточной для обнаружения за десятилетний

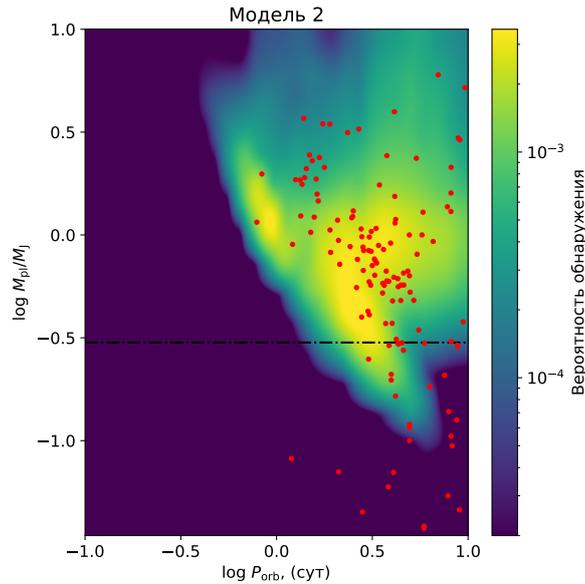


Рис. 2 — Синтетическая популяция, соответствующая наилучшей модели (модели 2), на диаграмме «масса–орбитальный период». Цвета иллюстрируют плотность распределение синтетических планет. Красные точки – наблюдаемые объекты из каталога NASA Exoplanet Archive (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>). Штрихпунктирная линия – граница диапазона масс горячих юпитеров.

цикл наблюдений скоростью может быть обнаружена в 0.20–0.25 % систем с горячими юпитерами.

В **четвертой главе** мы применяем используемый нами ранее формализм из работы B20 для оценки темпов приливной диссипации в газовых оболочках планет-гигантов. В **разделе 4.1** описана процедура получения моделей планет при помощи кода MESA. Значения приливных факторов для трех типов приливов в зависимости от величины периода возмущений приведены в **разделе 4.2**. Показано, что диссипация квазистационарных приливов в планетах, как и в случае звезд, имеет низкую эффективность. Поскольку структура газовых оболочек в рассматриваемых моделях может быть на качественном уровне описана политропами Лейне-Эмдена, темпы диссипации инерциальных волн хорошо согласуются со значениями, полученными в B20 для политропных моделей. В **разделе 4.3** содержится информация, касающаяся зависимости приливных факторов от возраста и массы планеты. Согласно нашим результатам, диссипация инерциальных волн в планетах является наиболее эффективной практически во всех рассматриваемых случаях. С увеличением массы планеты эффективность затухания динамических

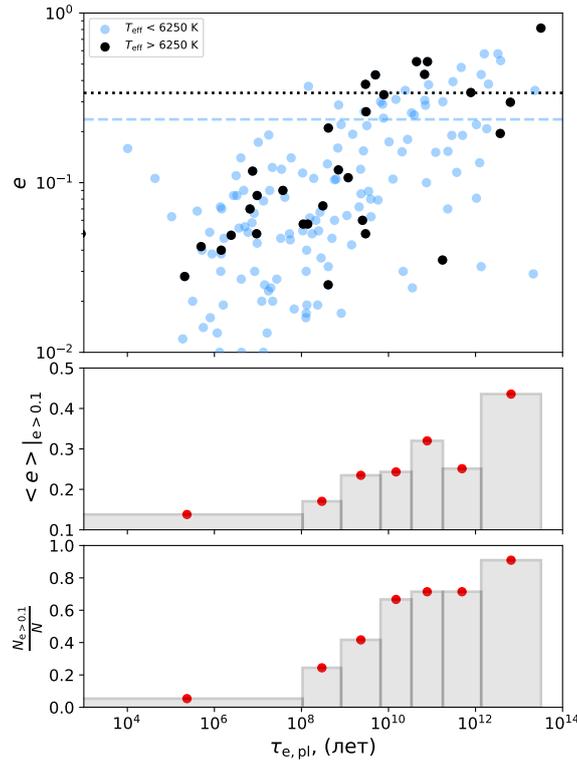


Рис. 3 — Верхняя панель: распределение эксцентриситетов наблюдаемых горячих и теплых юпитеров в зависимости от времени циркуляризации, вычисленного при помощи оценок темпов диссипации инерциальных волн. Гистограмма на средней панели: распределение среднего эксцентриситета планет с $e > 0.1$ (т.н. планеты с некруговыми орбитами). Гистограмма на нижней панели: распределение доли планет с некруговыми орбитами по отношению к общему числу планет в каждом интервале.

приливов снижается, что особенно заметно для гравитационных волн, для которых значение приливного фактора повышается на 6 порядков при переходе от наименее массивной из исследуемых моделей к наиболее массивной (от 0.1 до 10 M_J). С возрастом диссипация инерциальных волн замедляется даже при фиксированном значении периода вращения, в то время как для гравитационных волн зависимость диссипации от возраста не является ярко выраженной. В **разделе 4.4** мы исследуем, как изменяются приливные факторы при переходе от модели горячего юпитера к модели холодного юпитера. Изменение величины падающего потока излучения влияет на положение и число зон лучистого переноса, что сказывается на темпах диссипации гравитационных волн, причем для моделей холодных планет ожидается менее интенсивная диссипация. **Раздел 4.5** посвящен изучению роли инерциальных волн в распределении эксцентриситетов горячих и теплых юпитеров. Ис-

пользуя полученные оценки приливного фактора, мы посчитали время циркуляризации для выборки наблюдаемых планет. Эти планеты отмечены на диаграмме «эксцентриситет–время циркуляризации» на верхней панели рисунка 3. Заметна корреляция эксцентриситета e и времени циркуляризации $\tau_{e,pl}$, это также следует из гистограмм, изображенных на средней и нижней панелях, на которых показаны доля систем с некруговыми орбитами (некруговыми мы считаем такие орбиты, у которых эксцентриситет превышает 0.1) и средний эксцентриситет в них. Заслуживает внимания тот факт, что большинство систем с временем циркуляризации меньше 100 млн лет имеет круговые орбиты. При этом средний эксцентриситет начинает заметно увеличиваться в тот момент, когда шкала времени затухания эксцентриситета становится по порядку равной 1 млрд лет, то есть сопоставимой со средним возрастом систем с горячими юпитерами. Все эти особенности говорят о существенной роли диссипации инерциальных волн в контексте формирования архитектуры популяции горячих и теплых юпитеров. С другой стороны, ни квазистационарные приливы, ни гравитационные волны не способны дать достаточные для объяснения статистики наблюдений темпы затухания эксцентриситета.

Пятая глава посвящена обсуждению итогов работы в контексте исследований в области наблюдения экзопланет, популяционного синтеза, а также моделирования индивидуальных систем, выполненных другими авторами.

В **заключении** приведены основные результаты исследования, перечислены основные неопределенности, связанные как с описанием отдельных взаимодействий, так и с моделированием эволюции планетных популяций, изложены основные направления для будущей работы.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 печатных изданиях, 3 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

- (a1) Tidal migration of hot Jupiters: introducing the impact of gravity wave dissipation / Lazovik Y.A. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 508, Issue 3, pp.3408-3426 (2021). Web of Science JIF2022: 4.8. Личный вклад автора: 100%. Объем: 2.28 печатных листов.

- (a2) Unravelling the evolution of hot Jupiter systems under the effect of tidal and magnetic interactions and mass-loss / Lazovik Y.A. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 520, Issue 3, pp.3749-3766 (2023). Web of Science JIF2022: 4.8. Личный вклад автора: 100%. Объем: 2.16 печатных листов.
- (a3) Tidal dissipation in rotating and evolving giant planets with application to exoplanet systems / Lazovik Y.A., Barker A.J., de Vries N.B., Astoul A.// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 527, Issue 3, pp.8245-8256 (2024). Web of Science JIF2022: 4.8. Личный вклад автора: 80%. Объем: 1.44 печатных листов.

Список литературы

1. *Ida S., Lin D. N. C.* Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. I. A Desert in the Mass and Semimajor Axis Distributions of Extrasolar Planets // *ApJ*. — 2004. — Март. — Т. 604, № 1. — С. 388—413. — DOI: [10.1086/381724](https://doi.org/10.1086/381724). — arXiv: [astro-ph/0312144](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0312144) [[astro-ph](#)].
2. *Mordasini C., Alibert Y., Benz W.* Extrasolar planet population synthesis. I. Method, formation tracks, and mass-distance distribution // *A&A*. — 2009. — Июль. — Т. 501, № 3. — С. 1139—1160. — DOI: [10.1051/0004-6361/200810301](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810301). — arXiv: [0904.2524](https://arxiv.org/abs/0904.2524) [[astro-ph.EP](#)].
3. Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas / J. B. Pollack [и др.] // *Icarus*. — 1996. — Ноябрь. — Т. 124, № 1. — С. 62—85. — DOI: [10.1006/icar.1996.0190](https://doi.org/10.1006/icar.1996.0190).
4. *Boss A. P.* Giant planet formation by gravitational instability. // *Science*. — 1997. — Янв. — Т. 276. — С. 1836—1839. — DOI: [10.1126/science.276.5320.1836](https://doi.org/10.1126/science.276.5320.1836).
5. *Darwin G. H.* On the Bodily Tides of Viscous and Semi-Elastic Spheroids, and on the Ocean Tides upon a Yielding Nucleus // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*. — 1879. — Янв. — Т. 170. — С. 1—35.

6. *Alexander M. E.* The Weak Friction Approximation and Tidal Evolution in Close Binary Systems // *Ap&SS*. — 1973. — Август. — Т. 23, № 2. — С. 459—510. — DOI: [10.1007/BF00645172](https://doi.org/10.1007/BF00645172).
7. *Hut P.* Tidal evolution in close binary systems. // *A&A*. — 1981. — Июнь. — Т. 99. — С. 126—140.
8. *Eggleton P. P., Kiseleva L. G., Hut P.* The Equilibrium Tide Model for Tidal Friction // *ApJ*. — 1998. — Май. — Т. 499, № 2. — С. 853—870. — DOI: [10.1086/305670](https://doi.org/10.1086/305670). — arXiv: [astro-ph/9801246](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9801246) [[astro-ph](#)].
9. *Zahn J. P.* Les marées dans une étoile double serrée // *Annales d'Astrophysique*. — 1966. — Февр. — Т. 29. — С. 313.
10. *Zahn J. .-.P.* Reprint of 1977A&A...57..383Z. Tidal friction in close binary stars. // *A&A*. — 1977. — Май. — Т. 500. — С. 121—132.
11. *Zahn J. .-.P.* Tidal evolution of close binary stars. I - Revisiting the theory of the equilibrium tide // *A&A*. — 1989. — Август. — Т. 220, № 1—2. — С. 112—116.
12. *Ogilvie G. I., Lesur G.* On the interaction between tides and convection // *MNRAS*. — 2012. — Май. — Т. 422, № 3. — С. 1975—1987. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.20630.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20630.x). — arXiv: [1201.5020](https://arxiv.org/abs/1201.5020) [[astro-ph.SR](#)].
13. *Vidal J., Barker A. J.* Efficiency of tidal dissipation in slowly rotating fully convective stars or planets // *MNRAS*. — 2020. — Окт. — Т. 497, № 4. — С. 4472—4485. — DOI: [10.1093/mnras/staa2239](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2239). — arXiv: [2007.13392](https://arxiv.org/abs/2007.13392) [[astro-ph.SR](#)].
14. *Zahn J. .-.P.* The dynamical tide in close binaries. // *A&A*. — 1975. — Июль. — Т. 41. — С. 329—344.
15. *Barker A. J.* Tidal Dissipation Due to Inertial Waves Can Explain the Circularization Periods of Solar-type Binaries // *ApJ*. — 2022. — Март. — Т. 927, № 2. — С. L36. — DOI: [10.3847/2041-8213/ac5b63](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5b63). — arXiv: [2203.03950](https://arxiv.org/abs/2203.03950) [[astro-ph.SR](#)].
16. *Ogilvie G. I., Lin D. N. C.* Tidal Dissipation in Rotating Solar-Type Stars // *ApJ*. — 2007. — Июнь. — Т. 661, № 2. — С. 1180—1191. — DOI: [10.1086/515435](https://doi.org/10.1086/515435). — arXiv: [astro-ph/0702492](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0702492) [[astro-ph](#)].

17. *Barker A. J., Ogilvie G. I.* On the tidal evolution of Hot Jupiters on inclined orbits // MNRAS. — 2009. — Июнь. — Т. 395, № 4. — С. 2268–2287. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.14694.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14694.x). — arXiv: [0902.4563](https://arxiv.org/abs/0902.4563) [astro-ph.EP].
18. *Ogilvie G. I.* Tides in rotating barotropic fluid bodies: the contribution of inertial waves and the role of internal structure // MNRAS. — 2013. — Февр. — Т. 429, № 1. — С. 613–632. — DOI: [10.1093/mnras/sts362](https://doi.org/10.1093/mnras/sts362). — arXiv: [1211.0837](https://arxiv.org/abs/1211.0837) [astro-ph.EP].
19. *Mathis S.* Variation of tidal dissipation in the convective envelope of low-mass stars along their evolution // A&A. — 2015. — Авг. — Т. 580. — С. L3. — DOI: [10.1051/0004-6361/201526472](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526472). — arXiv: [1507.00165](https://arxiv.org/abs/1507.00165) [astro-ph.SR].
20. *Barker A. J.* Tidal dissipation in evolving low-mass and solar-type stars with predictions for planetary orbital decay // MNRAS. — 2020. — Окт. — Т. 498, № 2. — С. 2270–2294. — DOI: [10.1093/mnras/staa2405](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2405). — arXiv: [2008.03262](https://arxiv.org/abs/2008.03262) [astro-ph.EP].
21. *Barker A. J., Ogilvie G. I.* On internal wave breaking and tidal dissipation near the centre of a solar-type star // MNRAS. — 2010. — Июнь. — Т. 404, № 4. — С. 1849–1868. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16400.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16400.x). — arXiv: [1001.4009](https://arxiv.org/abs/1001.4009) [astro-ph.EP].
22. The Fate of Close-in Planets: Tidal or Magnetic Migration? / A. Strugarek [и др.] // ApJ. — 2017. — Окт. — Т. 847, № 2. — С. L16. — DOI: [10.3847/2041-8213/aa8d70](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa8d70). — arXiv: [1709.05784](https://arxiv.org/abs/1709.05784) [astro-ph.SR].
23. Energy-limited escape revised. The transition from strong planetary winds to stable thermospheres / M. Salz [и др.] // A&A. — 2016. — Янв. — Т. 585. — С. L2. — DOI: [10.1051/0004-6361/201527042](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527042). — arXiv: [1511.09348](https://arxiv.org/abs/1511.09348) [astro-ph.EP].
24. Irradiation-driven escape of primordial planetary atmospheres. I. The ATES photoionization hydrodynamics code / A. Caldiroli [и др.] // A&A. — 2021. — Нояб. — Т. 655. — A30. — DOI: [10.1051/0004-6361/202141497](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141497). — arXiv: [2106.10294](https://arxiv.org/abs/2106.10294) [astro-ph.EP].

25. *Valsecchi F., Rasio F. A., Steffen J. H.* From Hot Jupiters to Super-Earths via Roche Lobe Overflow // *ApJ*. — 2014. — Сент. — Т. 793, № 1. — С. L3. — DOI: [10.1088/2041-8205/793/1/L3](https://doi.org/10.1088/2041-8205/793/1/L3). — arXiv: [1408.3635](https://arxiv.org/abs/1408.3635) [[astro-ph.EP](#)].
26. Tidally-driven Roche-lobe Overflow of Hot Jupiters with MESA / F. Valsecchi [и др.] // *ApJ*. — 2015. — Ноябрь. — Т. 813, № 2. — С. 101. — DOI: [10.1088/0004-637X/813/2/101](https://doi.org/10.1088/0004-637X/813/2/101). — arXiv: [1506.05175](https://arxiv.org/abs/1506.05175) [[astro-ph.EP](#)].
27. *Owen J. E., Wu Y.* Kepler Planets: A Tale of Evaporation // *ApJ*. — 2013. — Окт. — Т. 775, № 2. — С. 105. — DOI: [10.1088/0004-637X/775/2/105](https://doi.org/10.1088/0004-637X/775/2/105). — arXiv: [1303.3899](https://arxiv.org/abs/1303.3899) [[astro-ph.EP](#)].
28. *Owen J. E., Lai D.* Photoevaporation and high-eccentricity migration created the sub-Jovian desert // *MNRAS*. — 2018. — Окт. — Т. 479, № 4. — С. 5012—5021. — DOI: [10.1093/mnras/sty1760](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1760). — arXiv: [1807.00012](https://arxiv.org/abs/1807.00012) [[astro-ph.EP](#)].
29. *Metzger B. D., Giannios D., Spiegel D. S.* Optical and X-ray transients from planet-star mergers // *MNRAS*. — 2012. — Окт. — Т. 425, № 4. — С. 2778—2798. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21444.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21444.x). — arXiv: [1204.0796](https://arxiv.org/abs/1204.0796) [[astro-ph.EP](#)].
30. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) / B. Paxton [и др.] // *ApJs*. — 2011. — Янв. — Т. 192, № 1. — С. 3. — DOI: [10.1088/0067-0049/192/1/3](https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/1/3). — arXiv: [1009.1622](https://arxiv.org/abs/1009.1622) [[astro-ph.SR](#)].
31. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Planets, Oscillations, Rotation, and Massive Stars / B. Paxton [и др.] // *ApJs*. — 2013. — Сент. — Т. 208, № 1. — С. 4. — DOI: [10.1088/0067-0049/208/1/4](https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/1/4). — arXiv: [1301.0319](https://arxiv.org/abs/1301.0319) [[astro-ph.SR](#)].
32. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Binaries, Pulsations, and Explosions / B. Paxton [и др.] // *ApJs*. — 2015. — Сент. — Т. 220, № 1. — С. 15. — DOI: [10.1088/0067-0049/220/1/15](https://doi.org/10.1088/0067-0049/220/1/15). — arXiv: [1506.03146](https://arxiv.org/abs/1506.03146) [[astro-ph.SR](#)].
33. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Convective Boundaries, Element Diffusion, and Massive Star Explosions / B. Paxton [и др.] // *ApJs*. — 2018. — Февр. — Т. 234, № 2. — С. 34. — DOI: [10.3847/1538-4365/aaa5a8](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aaa5a8). — arXiv: [1710.08424](https://arxiv.org/abs/1710.08424) [[astro-ph.SR](#)].

34. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Pulsating Variable Stars, Rotation, Convective Boundaries, and Energy Conservation / B. Paxton [и др.] // *ApJs*. — 2019. — Июль. — Т. 243, № 1. — С. 10. — DOI: [10.3847/1538-4365/ab2241](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab2241). — arXiv: [1903.01426](https://arxiv.org/abs/1903.01426) [[astro-ph.SR](#)].
35. On the Diversity of Magnetic Interactions in Close-in Star-Planet Systems / A. Strugarek [и др.] // *ApJ*. — 2014. — Ноябрь. — Т. 795, № 1. — С. 86. — DOI: [10.1088/0004-637X/795/1/86](https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/86). — arXiv: [1409.5268](https://arxiv.org/abs/1409.5268) [[astro-ph.EP](#)].
36. Magnetic Games between a Planet and Its Host Star: The Key Role of Topology / A. Strugarek [и др.] // *ApJ*. — 2015. — Дек. — Т. 815, № 2. — С. 111. — DOI: [10.1088/0004-637X/815/2/111](https://doi.org/10.1088/0004-637X/815/2/111). — arXiv: [1511.02837](https://arxiv.org/abs/1511.02837) [[astro-ph.EP](#)].
37. *Strugarek A.* Assessing Magnetic Torques and Energy Fluxes in Close-in Star-Planet Systems // *ApJ*. — 2016. — Дек. — Т. 833, № 2. — С. 140. — DOI: [10.3847/1538-4357/833/2/140](https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/140). — arXiv: [1610.05705](https://arxiv.org/abs/1610.05705) [[astro-ph.EP](#)].
38. Roche lobe effects on the atmospheric loss from “Hot Jupiters” / N. V. Erkaev [и др.] // *A&A*. — 2007. — Сент. — Т. 472, № 1. — С. 329–334. — DOI: [10.1051/0004-6361:20066929](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066929). — arXiv: [astro-ph/0612729](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0612729) [[astro-ph](#)].
39. *Murray-Clay R. A., Chiang E. I., Murray N.* Atmospheric Escape From Hot Jupiters // *ApJ*. — 2009. — Март. — Т. 693, № 1. — С. 23–42. — DOI: [10.1088/0004-637X/693/1/23](https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/23). — arXiv: [0811.0006](https://arxiv.org/abs/0811.0006) [[astro-ph](#)].
40. The Mass-dependence of Angular Momentum Evolution in Sun-like Stars / S. P. Matt [и др.] // *ApJ*. — 2015. — Янв. — Т. 799, № 2. — С. L23. — DOI: [10.1088/2041-8205/799/2/L23](https://doi.org/10.1088/2041-8205/799/2/L23). — arXiv: [1412.4786](https://arxiv.org/abs/1412.4786) [[astro-ph.SR](#)].
41. First grids of low-mass stellar models and isochrones with self-consistent treatment of rotation. From 0.2 to 1.5 M_{\odot} at seven metallicities from PMS to TAMS / L. Amard [и др.] // *A&A*. — 2019. — Ноябрь. — Т. 631. — A77. — DOI: [10.1051/0004-6361/201935160](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935160). — arXiv: [1905.08516](https://arxiv.org/abs/1905.08516) [[astro-ph.SR](#)].
42. The Effect of Magnetic Topology on Thermally Driven Wind: Toward a General Formulation of the Braking Law / V. Réville [и др.] // *ApJ*. —

2015. — ЯНВ. — Т. 798, № 2. — С. 116. — DOI: [10.1088/0004-637X/798/2/116](https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/2/116). — arXiv: [1410.8746](https://arxiv.org/abs/1410.8746) [astro-ph.SR].
43. MESA Models with Magnetic Braking / S. Gossage [и др.] // ApJ. — 2021. — Май. — Т. 912, № 1. — С. 65. — DOI: [10.3847/1538-4357/abebdf](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abebdf). — arXiv: [2011.02470](https://arxiv.org/abs/2011.02470) [astro-ph.SR].
44. Slow Cooling and Fast Reinflation for Hot Jupiters / D. P. Thorngren [и др.] // ApJ. — 2021. — Март. — Т. 909, № 1. — С. L16. — DOI: [10.3847/2041-8213/abe86d](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abe86d). — arXiv: [2101.05285](https://arxiv.org/abs/2101.05285) [astro-ph.EP].
45. *Hori Y.* The Linkage between the Core Mass and the Magnetic Field of an Extrasolar Giant Planet from Future Radio Observations // ApJ. — 2021. — Февр. — Т. 908, № 1. — С. 77. — DOI: [10.3847/1538-4357/abd8d1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abd8d1). — arXiv: [2101.10673](https://arxiv.org/abs/2101.10673) [astro-ph.EP].
46. *Yadav R. K., Thorngren D. P.* Estimating the Magnetic Field Strength in Hot Jupiters // ApJ. — 2017. — Ноябрь. — Т. 849, № 1. — С. L12. — DOI: [10.3847/2041-8213/aa93fd](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa93fd). — arXiv: [1709.05676](https://arxiv.org/abs/1709.05676) [astro-ph.EP].
47. Magnetic and tidal migration of close-in planets. Influence of secular evolution on their population / J. Ahuir [и др.] // A&A. — 2021. — Июнь. — Т. 650. — A126. — DOI: [10.1051/0004-6361/202040173](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040173). — arXiv: [2104.01004](https://arxiv.org/abs/2104.01004) [astro-ph.EP].
48. *Johnstone C. P., Bartel M., Güdel M.* The active lives of stars: A complete description of the rotation and XUV evolution of F, G, K, and M dwarfs // A&A. — 2021. — Май. — Т. 649. — A96. — DOI: [10.1051/0004-6361/202038407](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038407). — arXiv: [2009.07695](https://arxiv.org/abs/2009.07695) [astro-ph.SR].
49. The extreme ultraviolet and X-ray Sun in Time: High-energy evolutionary tracks of a solar-like star / L. Tu [и др.] // A&A. — 2015. — Май. — Т. 577. — С. L3. — DOI: [10.1051/0004-6361/201526146](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526146). — arXiv: [1504.04546](https://arxiv.org/abs/1504.04546) [astro-ph.SR].
50. *Kroupa P.* On the variation of the initial mass function // MNRAS. — 2001. — Апр. — Т. 322, № 2. — С. 231–246. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x). — arXiv: [astro-ph/0009005](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0009005) [astro-ph].

51. The Monitor project: rotation of low-mass stars in NGC 2362 - testing the disc regulation paradigm at 5 Myr / J. Irwin [и др.] // MNRAS. — 2008. — Февр. — Т. 384, № 2. — С. 675—686. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.12725.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12725.x). — arXiv: [0711.2398](https://arxiv.org/abs/0711.2398) [astro-ph].
52. Tidal dissipation in rotating low-mass stars and implications for the orbital evolution of close-in planets. I. From the PMS to the RGB at solar metallicity / F. Gallet [и др.] // A&A. — 2017. — Август. — Т. 604. — A112. — DOI: [10.1051/0004-6361/201730661](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730661). — arXiv: [1705.10164](https://arxiv.org/abs/1705.10164) [astro-ph.EP].
53. Tidal dissipation in rotating low-mass stars and implications for the orbital evolution of close-in massive planets. II. Effect of stellar metallicity / E. Bolmont [и др.] // A&A. — 2017. — Август. — Т. 604. — A113. — DOI: [10.1051/0004-6361/201730662](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730662). — arXiv: [1705.10167](https://arxiv.org/abs/1705.10167) [astro-ph.EP].
54. Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations / V. Lainey [и др.] // Nature. — 2009. — Июнь. — Т. 459, № 7249. — С. 957—959. — DOI: [10.1038/nature08108](https://doi.org/10.1038/nature08108).
55. New constraints on Saturn's interior from Cassini astrometric data / V. Lainey [и др.] // Icarus. — 2017. — Янв. — Т. 281. — С. 286—296. — DOI: [10.1016/j.icarus.2016.07.014](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.07.014). — arXiv: [1510.05870](https://arxiv.org/abs/1510.05870) [astro-ph.EP].