

## РОДИТЕЛЬСКИЕ ЗВЕЗДЫ ПЛАНЕТ НА ДИАГРАММЕ ГЕРЦШПРУНГА–РАССЕЛА

© 2021 г. А. А. Арсентьева<sup>1</sup>, И. И. Шевченко<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 09.06.2021 г.

После доработки 17.07.2021 г.; принята к публикации 05.08.2021 г.

Проведенный нами статистический анализ (на основе тестов Колмогорова–Смирнова) распределений масс и радиусов планет у звезд разных классов обнаруживает их существенные различия в зависимости от класса родительских звезд. Эти различия могут быть объяснены (1) долговременной динамической эволюцией планетных систем, (2) долговременной физической эволюцией родительских звезд, (3) исходными различиями в структуре систем. Тесты Колмогорова–Смирнова показывают на высоком уровне значимости, что в процессе перехода звезды с главной последовательности на ветвь красных гигантов имеет место дезинтеграция ее планетной системы, по меньшей мере частичная. Приведены оценки характерного времени динамической дезинтеграции для различных архитектур планетных систем. Из сопоставления оценок характерных времен физической и динамической эволюции мы заключили, что дезинтеграция внутренних областей планетных систем носит в основном физический (поглощение звездной атмосферой), а не динамический (распад в рамках задачи N тел) характер. Что же касается внешних частей планетных систем, то их дезинтеграция может носить как чисто динамический (собственная дезинтеграция, тесные сближения со звездами-соседями), так и смешанный физико-динамический характер (а именно, физическое уничтожение внутренней составляющей системы может инициировать динамический распад внешней части).

*Ключевые слова:* планетные системы, экзопланеты, диаграмма Герцшпрунга–Рассела, задача N тел, дезинтеграция планетных систем, динамический хаос, вековые резонансы, резонансы средних движений.

DOI: 10.31857/S0320010821080015

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе мы проводим статистический анализ (на основе теста Колмогорова–Смирнова) распределений масс и радиусов планет у звезд разных классов. Данный анализ важен для определения характерных времен динамической и физической эволюции (времен частичной или полной дезинтеграции) планетных систем у одиночных звезд исходно разных масс и разной металличности, поскольку различия наблюдаемых распределений могут быть обусловлены долговременной динамической эволюцией планетных систем, долговременной физической эволюцией родительских звезд, а также, разумеется, и исходными различиями в структуре систем.

Анализ расположения родительских звезд планет на диаграмме Герцшпрунга–Рассела ранее проводили Хаули и Райд (2003) (см. рис. 3 в их работе) и Фишер и Валенти (2005) (см. рис. 11 и

12 в их работе). В частности, для звезд, имеющих планеты, была выявлена тенденция располагаться в верхней части главной последовательности (ГП); чем выше металличность звезды, тем больше вероятность обнаружения у нее планеты. При проведении статистического анализа Хаули и Райд (2003) использовали данные The Extrasolar Planets Encyclopaedia (exoplanet.eu); Фишер и Валенти (2005) — данные о 1040 системах, наблюдавшихся в Обсерватории Кек, Ликской обсерватории и Англо-австралийской обсерватории в рамках California&Carnegie и Англо-австралийского проектов поиска планет.

В настоящем исследовании при анализе планетных систем звезд разных классов нас прежде всего интересуют характерные времена дезинтеграции. Исходя из аналогии с предполагаемыми долговременными процессами дезинтеграции в Солнечной системе (Ласкар, 1989, 2008; Литвик, Ву, 2011; Батыгин, Лафлин, 2015; Батыгин и др., 2015), мы рассматриваем отдельно процессы дезинтеграции

\* Электронный адрес: i.shevchenko@spbu.ru

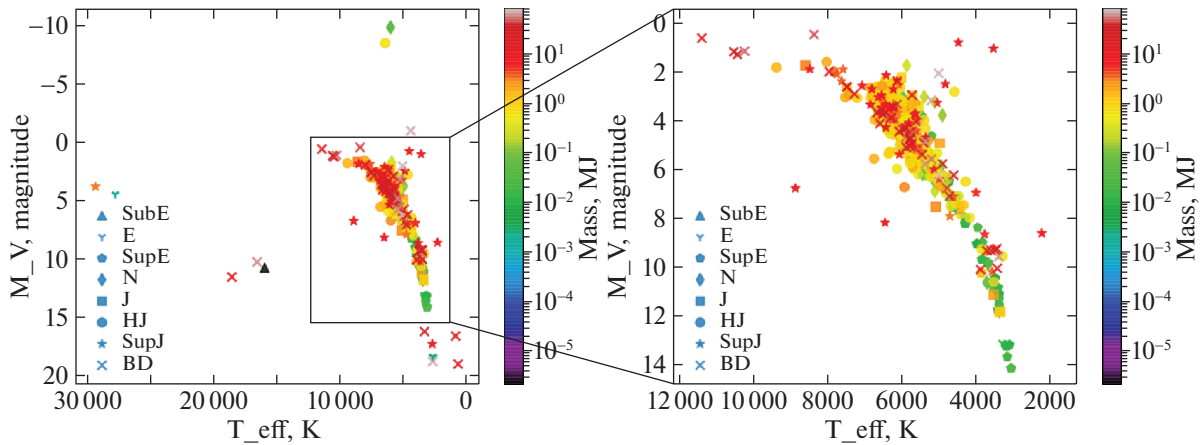


Рис. 1. Зависимость “эффективная температура—абсолютная звездная величина в полосе V” для звезд с планетами (610 планет). Цветом градуирована масса планеты (в единицах массы Юпитера) в логарифмическом масштабе.

внутренней планетной системы (образуемой планетами Земной группы) и внешней планетной системы (образуемой планетами-гигантами). Причины распада для этих двух компонентов системы могут носить совершенно различный как физический, так и динамический характер.

При анализе статистики систем мы используем базу данных exoplanet.eu (Шнайдер и др., 2011). Отметим, что сейчас также популярна база данных об экзопланетах, поддерживаемая в Кал-Техе (CIT). Функциональность и полнота обеих баз (exoplanet.eu и CIT) сопоставимы, но база exoplanet.eu имеет более давнюю историю разработки, поэтому проще сравнивать результаты с выводами более ранних работ. Кроме того, достоинствами базы exoplanet.eu являются удобная навигация по сайту, поддержка различных языков, а также высокая оперативность работы команды сайта.

Экзопланеты разделяем по типам следующим образом (Гауди и Сигер, 2005, Стевенс и Гауди, 2013): (1) субземли — планеты с массой меньше 0.1 массы Земли, (2) земли — от 0.1 до 2 масс Земли, (3) сверхземли — от 2 до 10 масс Земли, (4) нептуну — от 10 до 100 масс Земли, (5) юпитеры — от 100 до 1000 масс Земли, (6) сверх-юпитеры — от 1000 до 4000 масс Земли, (7) коричневые карлики — больше 4000 масс Земли. Горячими юпитерами традиционно называем юпитеры, чья большая полуось орбиты меньше 0.1 а.е. или же орбитальный период меньше 10 сут.

### БАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ

Рассмотрим зависимости параметров экзопланет от параметров их родительских звезд. Для построения диаграмм используем только те экзопланеты, для которых известны отображаемые

на диаграммах параметры, согласно базе данных exoplanet.eu (Шнайдер и др., 2011). Используемые далее выборки построены на основе этой базы данных. В случае юпитеров потребуем еще знание больших полуосей орбит (или же орбитальных периодов), чтобы иметь возможность идентифицировать горячие юпитеры.

На рис. 1 представлена построенная нами для звезд выборки диаграмма Герцшпрунга—Рассела — зависимость “эффективная температура — абсолютная звездная величина в полосе V”. Типы планет обозначены символами, значения которых указаны в поле рисунка. Помимо звезд ГП, на диаграмме присутствуют белые карлики, субгиганты и красные гиганты. Масса планеты градуирована в цветовой шкале. Из графика следует, что в направлении вверх по ГП массы планет в среднем растут, т.е. они коррелируют с массой звезды; данная корреляция известна, она выявлена Фишером и Валенти (2005).

На рис. 2 по осям отложены масса и радиус планеты. Из графика следует, что изначально обе величины растут вместе до некоторых пороговых значений, дальше (после перехода от ледяных гигантов к газовым) радиус при увеличении массы остается примерно постоянным (т.е. соответственно растет плотность). Данная особенность зависимости “масса—радиус” выявлена уже давно и имеет теоретическое объяснение; см. Вейсс и др. (2013).

Построим диаграмму Герцшпрунга—Рассела для планет, у которых известны эффективная температура и абсолютная звездная величина их родительских звезд. Таких планет 1335 (рис. 3). На рис. 3 приведены все системы из базы данных, для которых известны температура и абсолютная звездная величина родительской звезды. В сравнении с рис. 1 здесь дополнительно требуется знание

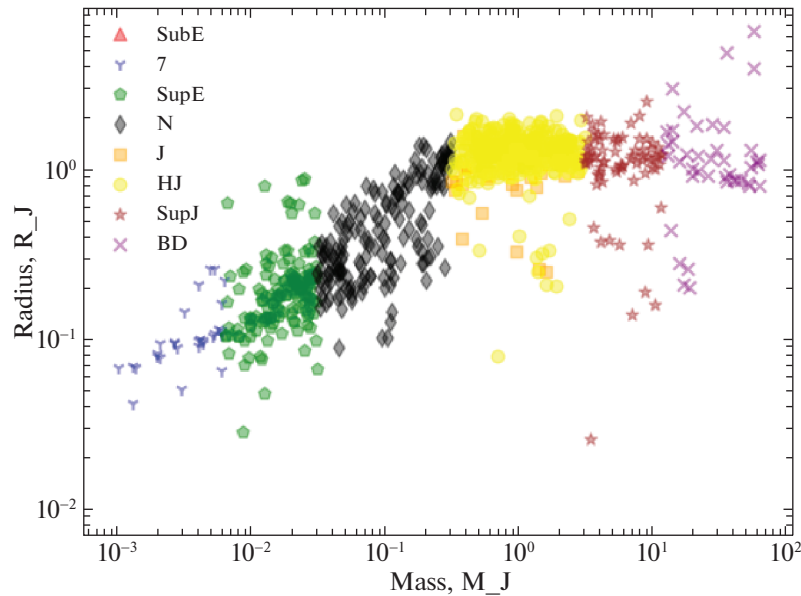


Рис. 2. Зависимость “масса–радиус” для экзопланет (864 планеты); масса и радиус даны в единицах массы и радиуса Юпитера.

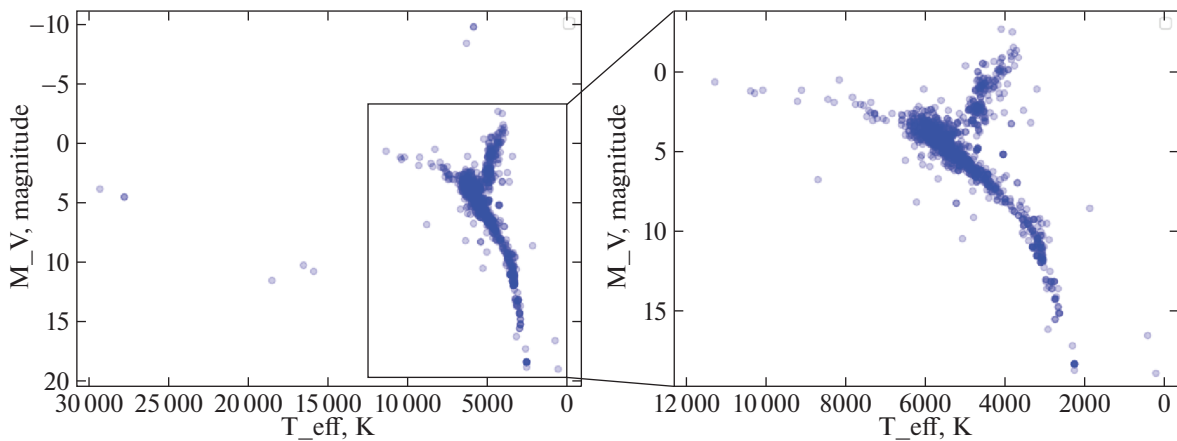


Рис. 3. Зависимость “эффективная температура–абсолютная звездная величина в полосе V” для звезд с планетами (1335 планет).

массы планеты для определения ее типа, поэтому выборка в данном случае получается меньше.

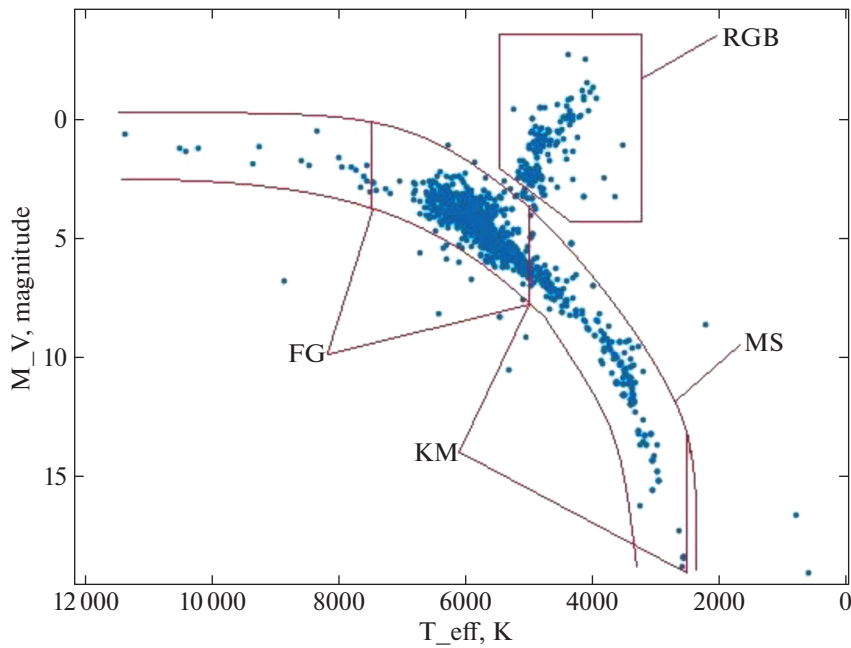
Как и следовало ожидать, подавляющее большинство звезд выборки (~90%) принадлежит ГП, почти все остальные — звезды-гиганты и белые карлики. На рис. 3 большинство родительских звезд на ГП принадлежит не классу M и даже не классу K, а классам F и G, хотя, как известно, красные карлики, безотносительно к наличию у них планет, в Галактике наиболее многочисленны. Причиной данного различия может быть наблюдательная селекция, имеющая место из-за трудностей обнаружения планет у неярких звезд.

На рис. 4 показано распределение родительских звезд по эффективной температуре и звездной величине в полосе V. Распределение показано для

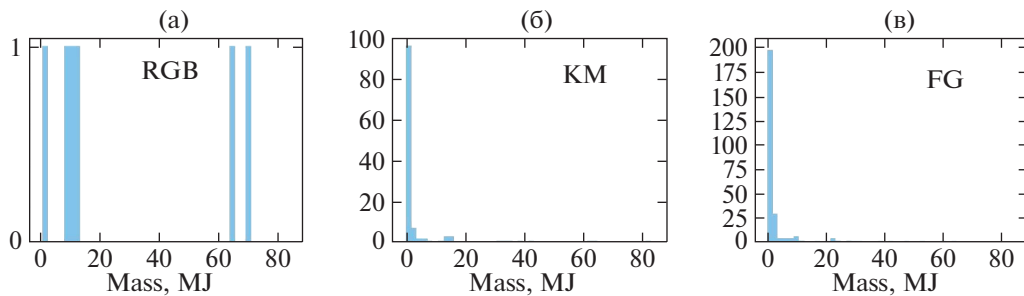
той же выборки, что и на рис. 3, но отмечены области родительских звезд трех типов: ветвь красных гигантов и две области ГП, соответствующие спектральным классам F–G и K–M.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО МАССАМ, РАДИУСАМ И ВОЗРАСТАМ

На рис. 5 на всех панелях по горизонтальным осям отложена масса планеты (в единицах массы Юпитера), по вертикальным — количество планет соответствующей массы. На рис. 5а отображены планеты звезд ветви красных гигантов. Их количество невелико, и судить об их распределении сложно. На рис. 5б отображены планеты звезд ГП классов K–M. На рис. 5в представлены планеты



**Рис. 4.** То же, что на рис. 3, но с выделением части классов родительских звезд: MS — главная последовательность (ГП), RGB — ветвь красных гигантов (звезды со 158 планетами), FG — звезды ГП классов F и G (с 434 планетами), KM — звезды ГП классов K и M (с 274 планетами).



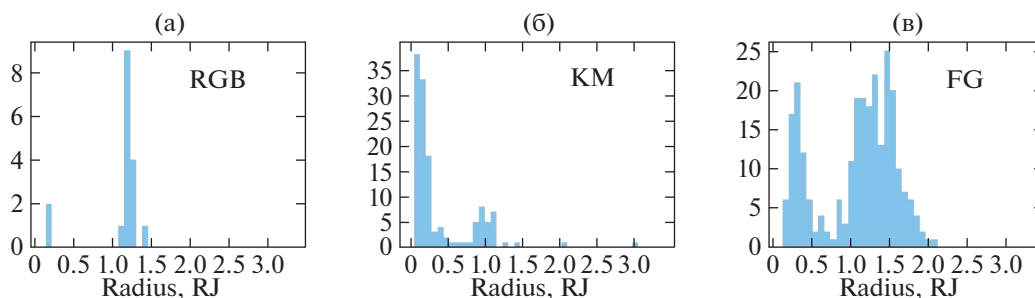
**Рис. 5.** Распределение планет по массе (масса в единицах массы Юпитера): (а) — 6 планет красных гигантов, (б) — 123 планеты звезд ГП классов K–M, (в) — 264 планеты звезд ГП классов F–G. Вертикальная ось — количество планет соответствующей массы.

звезд ГП классов F–G. На рис. 5б,в имеется резкий пик, отвечающий планетам относительно малой массы.

На рис. 6 на всех панелях по горизонтальной оси отложен радиус планеты (в единицах радиуса Юпитера), по вертикальной — количество планет соответствующего радиуса. На рис. 6а представлены планеты звезд ветви красных гигантов. Распределение имеет пик в области ~1.2 радиуса Юпитера. На рис. 6б отображены планеты звезд ГП классов K–M. Основной пик распределения расположен в области ~0.2, меньший пик — в области ~1 (в радиусах Юпитера). На рис. 6в представлены планеты звезд ГП классов F–G. Распределение, очевидно, является бимодальным, с пиками при ~0.2 и ~1.5 (в радиусах Юпитера). Отметим, что используемая выборка определяется знанием раз-

меров выявленных планет у звезд заданного типа; наблюдательная селекция может дать перевес в сторону планет с большим размером. Однако объяснение бимодальности не столь очевидно. Вопрос о том, может ли таким образом проявляться переход от каменных планет к газовым гигантам, требует отдельного рассмотрения.

Отношения количеств “крупных” и “меньших” планет для каждого из распределений показано в табл. 1. Разделение произведено по минимуму наблюдаемого распределения. Значения этих отношений различаются для разных классов звезд; но “крупных” планет обычно меньше, чем “меньших”. Отметим, что оценки, приведенные в табл. 1, как и далее в табл. 2 и 3, получены для выборок по классам звезд, отображенных на рис. 4; берутся



**Рис. 6.** Распределение планет по физическому радиусу (радиус в единицах радиуса Юпитера): (а) — 17 планет красных гигантов, (б) — 131 планета звезд ГП классов К–М, (в) — 258 планет звезд ГП классов F–G. Вертикальная ось — количество планет соответствующего радиуса.

подвыборки с известными значениями масс и радиусов планет.

Результаты тестов Колмогорова–Смирнова для распределений планет по массам приведены в табл. 2, по радиусам — в табл. 3 (описание методики для проведения тестов см. в статье Стефенса, 1974). Параметр  $D$  (тестовая статистика) определяется как максимум модуля разности ку-

**Таблица 1.** Отношение количеств “крупных” и “меньших” планет

Классы звезд	По массам	По радиусам
RGB	0.500	6.50
F–G	0.073	2.69
K–M	0.696	0.31

**Таблица 2.** Результаты теста Колмогорова–Смирнова для распределений планет по массам

Пара	$D$	$p$
RGB–FG	0.7424	$8.197 \times 10^{-4}$
RGB–KM	0.7236	$1.618 \times 10^{-3}$
FG–KM	0.4359	$7.327 \times 10^{-15}$

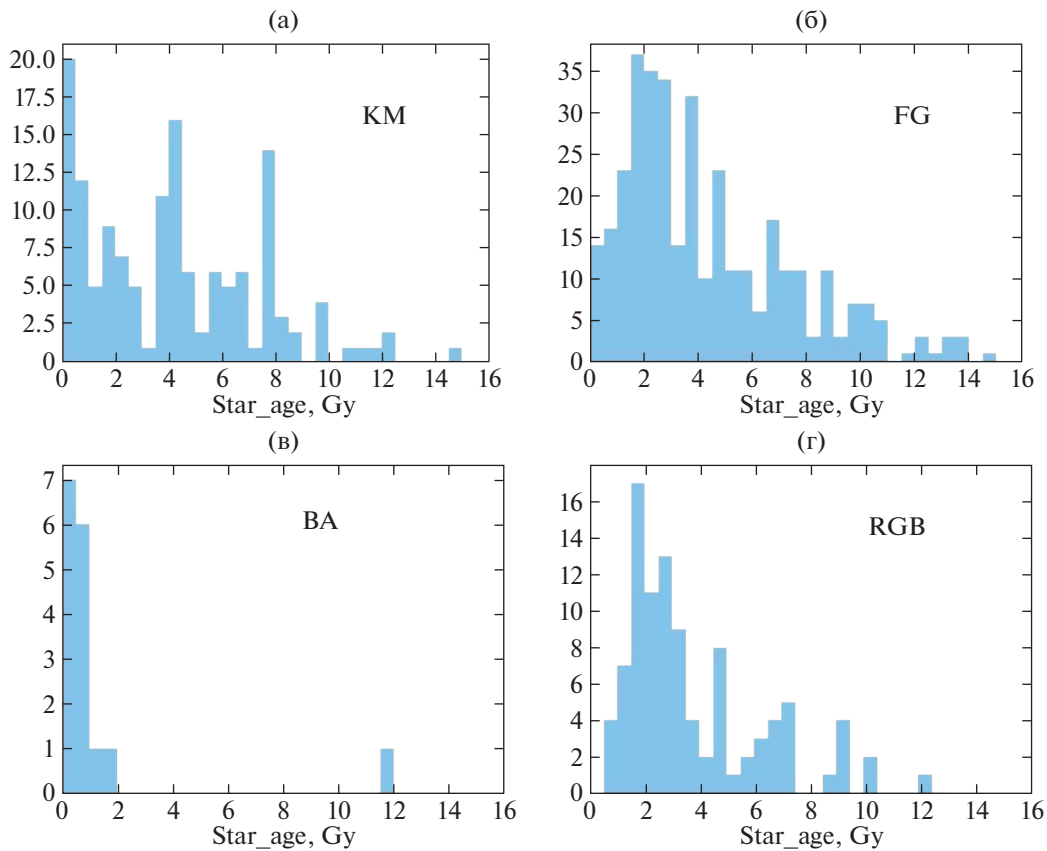
**Таблица 3.** Результаты теста Колмогорова–Смирнова для распределений планет по радиусам

Пара	$D$	$p$
RGB–FG	0.3390	$3.871 \times 10^{-2}$
RGB–KM	0.7984	$1.656 \times 10^{-10}$
FG–KM	0.5293	0.0

мулятивных распределений рассматриваемых нами выборок, нормированный на единицу. Значение  $p$  является вероятностью того, что сравниваемые распределения одинаковы. Если вычисленное значение  $D$  меньше некоторого порогового значения, или же вычисленное значение  $p$  больше некоторого порогового значения, гипотеза одинаковых распределений не может быть отвергнута. В качестве порогового значения (критерия значимости) берем стандартное значение 0.05. Как следует из табл. 2, нулевая гипотеза (равенство распределений) неверна ни для одной из рассмотренных нами пар распределений.

Характерные времена пребывания звезд на ГП, в зависимости от начального спектрального класса звезды, приведены в табл. 4. Времена пребывания звезд в областях на рис. 4 (хвост ГП включает спектральные классы В–А) указаны в табл. 5. Распределения принадлежащих этим областям звезд по возрастам приведены на рис. 7; при этом оценки возрастов взяты из каталога exoplanet.eu. В целом имеется соответствие между возрастными и спектральными классами представленных звезд.

Светимость и температура звезд, вышедших на ГП, зависят от начальной массы звезды; время пребывания звезды на ГП определяется ее дальнейшей эволюцией. Эволюция звезд и ее начальные условия определяют наблюдаемое распределение звезд по спектральным классам (Ледрю, 2001). На ГП большинство звезд имеют класс М; среди белых карликов преобладает класс А, среди звезд-гигантов преобладает класс К. Времена пребывания на ГП для звезд разных спектральных классов (от О до М) охватывают диапазон от миллионов до десятков триллионов лет (Саларис, Кассизи, 2005; Иванов, 2018). Когда запас водорода исчерпан, последующая фаза горения гелия (на стадии красного гиганта), как известно, длится несколько миллионов лет. На стадии красного гиганта вся внутренняя планетная система (пример внутренней системы — система скальных планет в Солнечной системе, от Меркурия до Марса) может быть поглощена



**Рис. 7.** Распределение родительских звезд по возрасту (возраст в млрд лет): (а) — 141 звезда ГП классов К–М, (б) — 353 звезды ГП классов F–G, (в) — 16 звезд ГП классов В–А, (г) — 98 красных гигантов. Вертикальная ось — количество звезд соответствующего возраста.

расширяющейся атмосферой родительской звезды и дезинтегрирована (Шредер, Смит, 2008). Поэтому характерное время частичной дезинтеграции системы в данном случае не превышает по порядку величины характерное время, которое требуется звезде для выхода на ветвь красных гигантов, а время существования внутренней системы — возраста звезды при сходе с ГП. Характерные времена пребывания звезд на ГП, в зависимости от начального спектрального класса звезды, приведены в табл. 4.

### ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

В целом сценарии динамического распада планетных систем могут иметь разнообразный характер (Шевченко, 2020). Но ограниченное время жизни планет может иметь и физическую причину. В нашей системе Солнце, как известно, находится на полпути своей эволюции на ГП. Его возраст составляет около 4.5 млрд лет; осталось около 5 млрд лет до эпохи, когда Солнце покинет ГП и станет красным гигантом (Рибас, 2010). Это превращение будет иметь фатальные последствия для внутренней области Солнечной системы, так

как атмосфера красного гиганта частично поглотит эту зону, возможно, включая орбиту Земли. Более того, светимость Солнца возрастет в сотни раз,

**Таблица 4.** Характерные времена пребывания звезд на ГП

Спектральный класс	Время пребывания на ГП, лет
О	$<10^6$
В	$10^7$
А	$10^8$
F	$10^9$
G	$10^{10}$
К	$10^{11}$
М	$>10^{11}$

**Таблица 5.** Времена пребывания звезд внутри избранных областей диаграммы Герцшпрунга–Рассела

Область	К–М	F–G	В–А	RGB
Время пребывания, лет	$\gtrsim 10^{11}$	$10^9–10^{10}$	$10^8$	$10^6$

катастрофически затрагивая даже те планеты, которые не будут поглощены солнечной атмосферой.

С другой стороны, существует вероятность того, что эта область (включая зону потенциальной обитаемости), когда наступит эпоха красного гиганта, уже будет очищена от планет. Прежде всего это касается судьбы Меркурия: он может покинуть систему первым, согласно данным численных экспериментов Ласкара (1994, 2008) и Ласкара и Гастино (2009). Ласкар и Гастино (2009) путем численного интегрирования системы на космогонических шкалах времени (миллиарды лет) показали, что существуют будущие взаимно-столкновительные траектории Венеры, Земли и Марса. Таким образом, в результате тесных сближений вся внутренняя часть Солнечной системы может быть дезинтегрирована на шкале времени в несколько миллиардов лет.

В системах, включающих горячие юпитеры и нептуну, физическая дезинтеграция внутренней подсистемы (в данном случае планет-гигантов) может протекать много быстрее из-за приливного сжатия орбит; например, оставшееся время жизни планеты-сверхгиганта горячего юпитера WASP-12b до его поглощения родительской звездой оценивается всего в  $\sim 3$  млн лет (Тернер и др., 2021).

В системах с архитектурой, подобной строению Солнечной системы (с внутренней подсистемой относительно не крупных скальных планет), распад внутренней подсистемы может носить чисто динамический характер, обусловленный перекрытием вековых резонансов (Ласкар, 1989; Литвик, Ву, 2011; Батыгин и др., 2015). Вековые резонансы представляют собой резонансы между скоростями изменения долготы перицентра или долготы восходящего узла планеты со скоростями орбитальной прецессии другого, возмущающего, тела.

Накачка эксцентриситета орбиты Меркурия до критического значения, влекущего пересечения его орбиты с орбитой Венеры, может произойти из-за вхождения планеты в вековой резонанс с Юпитером (Ласкар, 2008). Согласно аналитической модели вековых резонансов, предложенной Батыгиным и др. (2015) для описания хаоса в движении Меркурия, характерное время динамического распада внутренней системы (характерное время хаотической диффузии Меркурия по эксцентриситету) составляет  $\sim 10^8 - 10^9$  лет, что на один-два порядка меньше, чем следует из численного интегрирования уравнений движения в полной задаче. Последнее объясняется, скорее всего, упрощенным характером модели, см. статью Батыгина и др. (2015).

Сценарий внутреннего распада, обусловленного перекрытием вековых резонансов с внешними планетами, может быть адекватным для многих

планетных систем, в которых относительно малые (скальные) планеты находятся во внутренней области системы, а планеты-гиганты — во внешней части, как это имеет место в нашей Солнечной системе. Вековые резонансы планеты с двумя внешними планетами-гигантами могут взаимодействовать и перекрываться в той или иной степени в зависимости от значений параметров системы (Литвик, Ву, 2011). Медленный распад системы инициируется при вхождении планет в область хаоса в зоне перекрытия вековых резонансов в фазовом пространстве (Литвик, Ву, 2011). Литвик и Ву (2011) нашли, что вековые взаимодействия между планетами даже при малых их эксцентриситетах и наклонах приводят к хаосу, который не может быть описан линейной вековой теорией. Модель Литвика и Ву основана на разложении гамильтониана задачи до четвертого порядка по эксцентриситетам и наклонам и до первого порядка по отношениям больших полуосей. Исходя из расположения и ширины резонансов в фазовом пространстве, можно оценить степень их взаимодействия или перекрытия. Анализ взаимодействия резонансов в фундаментальных моделях позволяет получить оценки размеров областей хаоса в фазовом пространстве, ляпуновских времен и характерных времен хаотической диффузии — времен распада системы (о методике оценок см. Шевченко, 2008, 2020).

Оценим масштаб времени для высвобождения планет за счет перекрытия вековых резонансов в системе. За характерное время хаотической диффузии орбиты планеты примем время, за которое ее эксцентриситет изменяется на  $\sim 1$ . В качестве модели взаимодействия вековых резонансов примем модель Литвика и Ву (2011) (в плоской постановке задачи). Оценим характерное время  $T_d$  хаотической диффузии орбиты планеты, находящейся в перекрывающихся резонансах с двумя внешними планетами с существенно большими массами и с параметрами орбит Юпитера и Сатурна.

Таким образом, большие полуоси орбит “Юпитера” и “Сатурна” (далее без кавычек) суть  $a_J = 7.778 \times 10^{13}$  см и  $a_S = 1.427 \times 10^{14}$  см, эксцентриситеты орбит  $e_J = 0.048$  и  $e_S = 0.055$ . Орбиту пробной планеты полагаем исходно круговой, ее большая полуось  $a_{pl} = 5 \times 10^{13}$  см.

За скорости прецессии линий апсид внешних планет примем реальные фундаментальные частоты для Юпитера и Сатурна:  $g_J = 9.63 \times 10^{-4} / 360 \times 2\pi = 0.0000168$  рад/год,  $g_S = 6.10 \times 10^{-3} / 360 \times 2\pi = 0.000106$  рад/год; см. раздел 7.3 и формулу (7.38) в книге Мюррея и Дермотта (2009).

Скорость прецессии линии апсид пробной планеты дается выражением

$$\gamma = 0.75 \mu_J \alpha^3 (Gm_{\text{Sun}}/a_{pl}^3)^{1/2} \quad (1)$$

(см. п. 3.1 и формулу (15) в статье Литвика, Ву, 2011). Здесь  $m_{\text{Sun}}$  — масса родительской звезды,  $\mu_J$  — масса главной возмущающей планеты (Юпитера) в единицах массы центральной звезды. Пусть  $m_{\text{Sun}} = 2 \times 10^{33}$  г (равна массе Солнца),  $\mu_J = 0.001$  (как у реального Юпитера). Имеем  $\gamma = 0.000205$  рад/год.

Безразмерные параметры модели Литвика и Ву (2011) определяются как

$$\Delta_J = (\gamma - g_1)/\gamma, \quad \Delta_S = (\gamma - g_2)/\gamma, \quad (2)$$

$$\varepsilon_J = 1.25e_J, \quad \varepsilon_S = 1.25(a_S/a_J)e_S,$$

где  $g_1 = g_J$ ,  $g_2 = g_S$  (см. п. 3.2, формулы (24), (27) и рис. 2 в статье Литвика, Ву, 2011). Эти параметры в рассматриваемом случае принимают численные значения  $\Delta_J = 0.918$ ,  $\Delta_S = 0.482$ ,  $\varepsilon_J = 0.06$ ,  $\varepsilon_S = 0.126$ . Также определим параметр  $\alpha$ , равный отношению больших полуосей пробной планеты и Юпитера:  $\alpha = a_{\text{pl}}/a_J$ . Имеем  $\alpha = 0.643$ .

Расстояние между взаимодействующими резонансами по частоте суть  $\Omega = g_2 - g_1$ . Полуширина нелинейного резонанса по частоте равна  $2\omega_0$ , где  $\omega_0$  — частота малых колебаний на резонансе (см. Чириков, 1979), вычисляемая по формуле

$$\omega_0 = 2\varepsilon_J^{1/2}(2\Delta_J)^{1/4} \quad (3)$$

(Литвик, Ву, 2011). Введем параметр адиабатичности  $\lambda = \Omega/\omega_0$ , характеризующий степень перекрытия резонансов (Шевченко, 2020). Находим  $\Omega = 0.0000897$  рад/год,  $\omega_0 = 0.570$  рад/год,  $\lambda = 0.000157$ . Также введем обозначение  $\varepsilon = \varepsilon_J = 0.06$ .

Согласно Шевченко (2011, 2020), в мультиплете, состоящем из минимального числа (двух) перекрывающихся резонансов, характерное время хаотической диффузии составляет

$$T_d = \frac{4\lambda}{W^2|\Omega|} \ln \frac{32e}{\lambda W}, \quad (4)$$

где

$$W = 4\pi\varepsilon\lambda^2 \exp(\pi\lambda/2)/\sinh(\pi\lambda) \quad (5)$$

(подробнее см. Шевченко (2020), п. 4.2, формула (4.14)). Отсюда находим  $W = 0.0000377$  и  $T_d \approx 1.2 \times 10^{11}$  лет. Таким образом,  $T_d$  оказывается чрезвычайно большим, на порядок превосходя современный возраст Вселенной.

Рассмотрим теперь модель с такими же параметрами  $e_J = 0.048$ ,  $e_S = 0.055$ ,  $\varepsilon_J = 0.06$ ,  $\varepsilon_S = 0.126$ .  $\varepsilon = 0.06$ ,  $\alpha = 0.643$ ,  $\gamma = 0.000205$ , но с другими скоростями прецессий орбит внешних планет, а именно  $g_1 = 0.85\gamma = 0.000175$  рад/год,  $g_2 = 0.92\gamma = 0.000189$  рад/год. Данные  $g_1$  и  $g_2$  соответствуют модели, представленной на рис. 2 в статье Литвика и Ву (2011). Тогда находим

$\Delta_J = 0.15$ ,  $\Delta_S = 0.08$ ,  $\Omega = 0.0000144$ ,  $\omega_0 = 0.363$ ,  $\lambda = 0.0000397$ . Отсюда  $W = 0.00000952$  и  $T_d \approx 3.2 \times 10^{12}$  лет, что еще на порядок больше по сравнению с предыдущей моделью.

Мы видим, что в обоих рассмотренных нами модельных случаях процесса распада за счет перекрытия вековых резонансов характерное время динамической дезинтеграции оказывается на один–два порядка больше современного возраста Вселенной, поэтому данный процесс едва ли может конкурировать с процессами физической дезинтеграции внутренних областей планетных систем при сходе родительских звезд с ГП.

Обсудим теперь масштабы времени динамической дезинтеграции для внешних областей планетных систем, имея в виду как внешние подсистемы планет-гигантов, сходные с таковой в Солнечной системе, так и любые иные типы периферийных подсистем.

Согласно Мюррею и Хольману (1999), в нашей Солнечной системе собственная долговременная динамическая дезинтеграция внешней подсистемы планет-гигантов обусловлена перекрытием субрезонансов в мультиплетах, соответствующих трехтельным резонансам средних движений, прежде всего резонансу 3J–5S–7U между Юпитером, Сатурном и Ураном. При этом характерное время собственной динамической дезинтеграции (характерное время хаотической диффузии орбиты Урана по эксцентриситету) оценивается в  $\sim 10^{17}$ – $10^{18}$  лет.

Как показали Цинк и др. (2020), время дезинтеграции внешней подсистемы за счет тесных сближений со звездами-соседями может составлять всего  $\sim 10^{10}$ – $10^{11}$  лет, что много (на 7–8 порядков) меньше времени собственной дезинтеграции. Цинк и др. (2020) описали будущую судьбу планет-гигантов Солнечной системы (Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна) после того, как Солнце покинет ГП. К этому времени Солнце потеряет около половины своей массы, вследствие чего орбиты планет-гигантов расширятся; ширина резонансов средних движений также увеличится, что может в итоге привести к вхождению планет-гигантов в резонансные конфигурации. Увеличившаяся в размерах система становится более восприимчивой к межзвездным взаимодействиям. Близкие прохождения соседних звезд возмущают планетную систему, что в конечном итоге приводит ко входу системы в области хаоса (обусловленные перекрытием резонансов средних движений низких порядков) в фазовом пространстве и к последующему выбросу планет из системы.

Планеты, не поглощенные родительской звездой, а выброшенные из системы, становятся “свободными планетами” (“free-floating planets”). Аналогичные процессы должны происходить и в планетных системах других звезд. Поэтому по ме-



ре старения Галактики число свободных планет в ней должно расти. Согласно современным оценкам (Мроз и др., 2017), в настоящую эпоху в Галактике на одну свободную планету приходится в среднем 4 звезды ГП.

Отметим, что дезинтеграция внешних областей планетных систем может носить смешанный физико-динамический характер, а именно, физическое уничтожение внутренней составляющей системы может инициировать динамический распад внешней подсистемы. В самом деле, уничтожение внутренней части обнуляет квадрупольный момент системы “звезда — внутренние планеты”, что резко меняет скорости апсидальной и узловой прецессий орбит внешних планет (о зависимости скорости прецессий от квадрупольного момента см., например, Мюррей, Дермотт, 2009). Это может вывести внешнюю подсистему из устойчивого состояния за счет (1) выхода из стабилизирующего резонанса средних движений (в случае исходно резонансной системы, такой, например, как TRAPPIST-1 или Kepler-90), (2) вхождения в хаотические области фазового пространства, ассоциированные с сепаратрисами резонансов средних движений (в системах как исходно резонансных, так и исходно нерезонансных), (3) захвата в вековые резонансы. Анализ этих возможностей выходит за рамки настоящего исследования; он будет проведен в дальнейшем.

Проведенные нами и описанные выше тесты Колмогорова—Смирнова показывают на высоком уровне значимости, что в процессе перехода звезды с ГП на ветвь красных гигантов имеет место дезинтеграция ее планетной системы, по меньшей мере частичная. С другой стороны, согласно табл. 4 и 5, для звезд классов O, B, A, F и G время пребывания на ГП существенно меньше характерного времени динамической дезинтеграции (если исходить из оценок последнего, полученных для Солнечной системы, а также из приведенных выше аналитических оценок). Характерное время эволюции на стадии красного гиганта еще много меньше. Поэтому можно с уверенностью сказать, что дезинтеграция внутренних компонент планетных систем носит в основном физический (поглощение звездной атмосферой), а не динамический (распад в рамках задачи N тел) характер.

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ОБИТАЕМОСТЬ

Одна из важнейших характеристик экзопланетных систем — наличие планет в зоне потенциальной обитаемости. Брайсон и др. (2021) на базе каталога кандидатов планет Kepler DR25 и параметров родительских звезд на основе данных

Gaia изучили частоту встречаемости скальных планет в зоне обитаемости у карликовых звезд ГП. (Под скальными здесь подразумеваются планеты с радиусами  $0.5R_{\oplus} \leq r \leq 1.5R_{\oplus}$ .) Границы зоны потенциальной обитаемости определены значениями потока излучения от звезды на поверхности планеты. Частота встречаемости определяется как приходящееся в среднем на одну звезду с температурой в диапазоне 4800–6300 К число скальных планет в зоне обитаемости. Заметим, что полнота и надежность использованных баз данных, а также частота встречаемости планет, зависят от значений эффективной температуры родительских звезд, поэтому выбор диапазона температур ограничен; анализ Брайсона и др. (2021) сосредоточен на солнцеподобных звездах. Брайсон и др. (2021) оценили данную частоту для карликовых звезд ГП и получили довольно высокие значения — от 0.37 до 0.6 для “консервативного” определения зоны обитаемости и от 0.58 до 0.88 для “оптимистичного” определения зоны обитаемости. С вероятностью 95% ближайший к нам карлик класса G или K со скальной планетой в зоне потенциальной обитаемости находится на расстоянии ближе ~6 пк от Солнца.

Вернемся к рис. 3 и выявим на нем планеты, находящиеся в зонах потенциальной обитаемости родительских звезд. Для вычисления внутреннего и внешнего радиусов зоны обитаемости используем формулы в модели Коппарату и др. (2013):

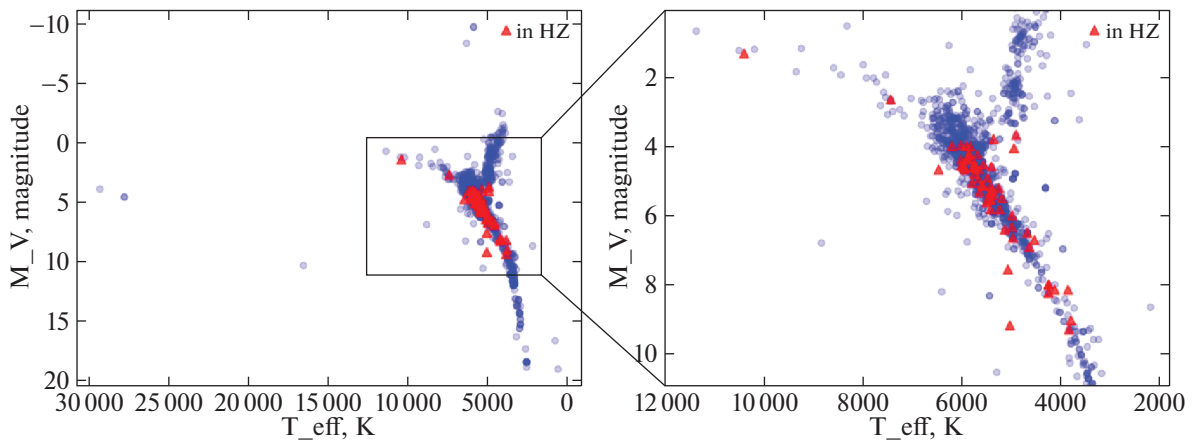
$$d_{\text{HZ}} = \left( \frac{L/L_{\odot}}{S_{\text{eff}}} \right)^{1/2} \text{ а. е.}, \quad (6)$$

где  $L$  и  $L_{\odot}$  — светимости звезды и Солнца соответственно,

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}\odot} + aT_{\star} + bT_{\star}^2 + cT_{\star}^3 + dT_{\star}^4, \quad (7)$$

где  $T_{\star} = T_{\text{eff}} - 5780$  К, а  $T_{\text{eff}}$  — эффективная температура звезды. Значения констант  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $S_{\text{eff}\odot}$  различны для внутренней и внешней границ зоны потенциальной обитаемости; они приведены в статье Коппарату и др. (2013).

Используя формулы (6) и (7), получаем диаграмму, представленную на рис. 8. Она включает 1276 объектов, из них звезд с планетами в зоне обитаемости оказывается 63. Из рис. 8 следует, что на ветви RGB звезды с планетами в зоне обитаемости практически отсутствуют, что неудивительно, поскольку, как определено выше, внутренние компоненты планетных систем у звезд на ветви RGB должны быть в основном дезинтегрированы.



**Рис. 8.** Зависимость “эффективная температура—абсолютная звездная величина в полосе V” для звезд с планетами. Всего 1276 планет, 63 из них (выделенные красным цветом) находятся в зоне потенциальной обитаемости родительской звезды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы провели статистический анализ (на основе тестов Колмогорова—Смирнова) распределений масс и радиусов планет у звезд разных классов. Данный анализ обнаруживает их существенные различия в зависимости от класса родительских звезд. Мы провели сравнение распределений по массам и радиусам планет у родительских звезд разных классов и показали, что выборки не принадлежат одному распределению.

На диаграмме Герцшпрунга—Рассела нами выделены классы звезд, имеющих планеты в зоне потенциальной обитаемости. Определена относительная доля планет (в нашей выборке) в зонах обитаемости у родительских звезд на ГП и вне ее. В нашей выборке частота встречаемости подобных планет оказывается равной  $\approx 0.05$  на ГП и  $\approx 0.01$  на ветви красных гигантов (вне зависимости от типа планет). Существенное отличие данной оценки от приведенных выше оценок из работы Брайсона и др. (2021) обусловлено различием использованных выборок. У Брайсона и др. (2021) взята лишь малая область ГП, внутри которой и на нашем графике (рис. 8) наблюдается сгущение присутствия планет, находящихся в зоне обитаемости. Наша оценка основана на большей выборке, включающей области ГП, в которых планет в зоне обитаемости очень мало, потому оценка оказывается существенно ниже.

Проведенные нами тесты Колмогорова—Смирнова показывают на высоком уровне значимости, что в процессе перехода звезды с ГП на ветвь красных гигантов имеет место дезинтеграция ее планетной системы, по меньшей мере частичная.

Приведены оценки характерного времени динамической дезинтеграции для различных архитектур

планетных систем. Из сопоставления оценок характерных времен физической и динамической эволюции следует вывод, что дезинтеграция внутренних компонент планетных систем носит в основном физический (поглощение звездной атмосферой), а не динамический (распад в рамках задачи N тел) характер.

Что же касается внешних областей, то их дезинтеграция может носить как чисто динамический (собственная дезинтеграция, тесные сближения со звездами-соседями), так и смешанный физико-динамический характер; а именно, физическое уничтожение внутренней составляющей системы может инициировать динамический распад внешней части.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания. Работа поддержана в рамках гранта 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039) “Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет” Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин, Лафлин (K. Batygin and G. Laughlin), Proc. Nat. Acad. Sci. **112**, 4214 (2015).
2. Батыгин и др. (K. Batygin, A. Morbidelli, and M.J. Holman), Astrophys. J. **799**, 120 (2015).
3. Брайсон и др. (S. Bryson, M. Kunitomo, R.K. Kopparapu, J.L. Coughlin, W.J. Borucki, et al.), Astron. J. **161**, 36 (2021).
4. Вейсс и др. (L.M. Weiss, G.W. Marcy, J.F. Rowe, A.W. Howard, H. Isaacson, et al.), Astron. J. **768**, 14 (2013).
5. Гауди, Сигер (B.S. Gaudi and S. Seager), Astrophys. J. **623**, 472 (2005).
6. Иванов В.В., *Физика звезд* (СПб: Изд-во СПбГУ, 2018).

7. Коппарану и др. (R.K. Kopparapu, R. Ramirez, J.F. Kasting, V. Eymet, T.D. Robinson, et al.), *Astrophys. J.* **765**, 16 (2013).
8. Ласкар (J. Laskar), *Nature* **338**, 237 (1989).
9. Ласкар (J. Laskar), *Astron. Astrophys.* **L9**, 287 (1994).
10. Ласкар (J. Laskar), *Icarus* **196**, 1 (2008).
11. Ласкар, Гастино (J. Laskar and M. Gastineau), *Nature* **459**, 817 (2009).
12. Ледрю (G. Ledrew), *J. Royal Astron. Soc. Canada* **95**, 32 (2001).
13. Литвик, Ву (Y. Lithwick and Y. Wu), *Astrophys. J.* **739**, 31 (2011).
14. Мроз и др. (P. Mróz, A. Udalski, J. Skowron, R. Poleski, S. Kozłowski, et al.), *Nature* **548**, 183 (2017).
15. Мюррей К., Дермотт С., *Динамика Солнечной системы* (М.: Физматлит, 2009) [C.D. Murray, S.F. Dermott, *Solar System Dynamics* (Cambridge Univ. Press, 1999)].
16. Мюррей, Хольман (N. Murray and M. Holman), *Science* **283**, 1877 (1999).
17. Рибас (I. Ribas), *Solar and Stellar Variability – Impact on Earth and Planets*, Proc. IAU Symp. 264 (Ed. A.G. Kosovichev, A.H. Andrei, J.-P. Rozelot, Cambridge Univ. Press, p. 3, 2010).
18. Саларис, Кассизи (M. Salaris and S. Cassisi), *Evolution of Stars and Stellar Populations* (John Wiley & Sons, 2005).
19. Стевенс, Гауди (D.J. Stevens and B.S. Gaudi), *Publ. Astron. Soc. Pac.* **125**, 933 (2013).
20. Стефенс (M.A. Stephens), *J. Am. Stat. Assoc.* **69**, 730 (1974).
21. Тернер и др. (J.D. Turner, A. Ridden-Harper, and R. Jayawardhana), *Astron. J.* **161**, 72 (2021).
22. Фишер, Валенти (D.A. Fischer and J. Valenti), *Astrophys. J.* **622**, 1102 (2005).
23. Хаули, Райд (S.L. Hawley and I.N. Reid), *12th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun* (Ed. A. Brown, G.M. Harper, and T.R. Ayres, Univ. Colorado, 2003), p. 128.
24. Цинк и др. (J.K. Zink, K. Batygin, and F.C. Adams), *Astron. J.* **160**, 232 (2020).
25. Чириков (B.V. Chirikov), *Phys. Rep.* **52**, 263 (1979).
26. Шевченко (I.I. Shevchenko), *Phys. Lett. A* **372**, 808 (2008).
27. Шевченко (I.I. Shevchenko), *Astrophys. J.* **733**, 39 (2011).
28. Шевченко (I.I. Shevchenko), *Dynamical Chaos in Planetary Systems* (Springer Nature, 2020).
29. Шнайдер и др. (J. Schneider, C. Dedieu, P. Le Sidaner, R. Savalle, and I. Zolotukhin), *Astron. Astrophys.* **532**, A79 (2011).
30. Шредер, Смит (K.-P. Schröder and R.C. Smith), *MNRAS* **386**, 155 (2008).