

УДК 524.3:523.4

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКЗОПЛАНЕТ ПО МАССАМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА РОДИТЕЛЬСКИХ ЗВЕЗД

© 2020 г. В. И. Ананьева^a, А. Е. Иванова^{a, *}, А. А. Векстерн^a, А. В. Тавров^{a, b},
О. И. Кораблев^a, Ж.-Л. Берто^{a, c}

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bМосковский физико-технический институт ГУ, Москва, Россия

^cЛаборатория атмосферных и космических исследований, Гюйанкур, Франция

*e-mail: cf.i.a.e@gmail.com

Поступила в редакцию 24.09.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 20.11.2019 г.

Исследованы распределения по массам трех групп экзопланет: транзитных планет, открытых телескопом им. Кеплера, транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами и спутником CoRoT, и планет, обнаруженных методом лучевых скоростей у близких красных карликов (М). Рассмотрены распределения по массам транзитных планет “Кеплера” в зависимости от спектрального класса родительских звезд (F, G, K). Приняв во внимание наиболее значимые факторы наблюдательной селекции, различные для каждой группы планет, показано, что распределения экзопланет по массам могут быть описаны универсальным степенным законом с показателем степени близким к -2 : $dN/dm \propto m^{-2}$. Статистически значимого различия для планет, обращающихся вокруг звезд с различными спектральными классами (F, G, K, M) не обнаружено.

Ключевые слова: экзопланеты, распределения по массам, транзиты, наблюдательная селекция

DOI: 10.31857/S0320930X20030019

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени накопленные сведения о ~ 4000 экзопланет позволяют исследовать статистические закономерности распространенности планет по их основным физическим свойствам, например, массе, размеру, плотности, орбите и т.д. В частности, статистическое распределение экзопланет по массам важно для оценки распространенности в Галактике планет различных типов, например, планет земного типа в зоне обитания. Кроме того, оно полезно для верификации моделей планетообразования: модели планетообразования должны аккуратно воспроизводить наблюдаемые распределения экзопланет. Однако для построения статистического распределения экзопланет по массам следует учитывать факторы наблюдательной селекции. Неучет наблюдательной селекции существенно искажает получаемые статистические распределения. Факторы наблюдательной селекции достаточно разнообразны и отличаются для разных методов обнаружения экзопланет, для различных наблюдательных программ, в частности, полученных различными наземными транзитными наблюдательными программами и космическим телескопом им. Кеплера.

НАБЛЮДАЕМОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МАССАМ ТРАНЗИТНЫХ ЭКЗОПЛАНЕТ

За последнюю четверть века было проведено несколько исследований распределения экзопланет по массам. Магсу и др. (2005) проанализировали 104 экзопланеты из 152, открытых на тот момент методом лучевых скоростей (в дальнейшем — RV-метод). Они отобрали планеты, обнаруженные в наблюдательных программах, выполненных в Ликской обсерватории и обсерватории им. Кека, имеющих одинаковую инструментальную точность измерения лучевых скоростей — 3 м/с. Было показано, что распределение выбранных экзопланет по проективным массам можно аппроксимировать степенным законом $dN(m)/dm \propto m^{-1.0}$. Butler и др. (2006), изучив 167 планет, открытых RV-методом, получили похожий закон $dN(m)/dm \propto m^{-1.1}$. Cumming и др. (2008) рассмотрели 182 планеты и, учтя “степень полноты обзора” (completeness of the survey), получили следующую зависимость количества планет от проективной массы и орбитального периода:

$$\partial N / (\partial \ln(m) \partial \ln(P)) \propto m^{-0.31} P^{0.26},$$

что соответствует степенному закону гистограммы $dN/dm \propto m^{-1.31}$. Howard и др. (2010), проведя однородные наблюдения 166 GK-звезд с помощью спектрографа HIRES, имеющего инструментальную точность 1 м/с, и построив “функцию полноты обзора”, получили следующее распределение:

$$dN/d \lg m = 0.39m^{-0.48},$$

что соответствует степенному закону гистограммы $dN/dm \propto m^{-1.48}$.

Отметим, что во всех вышеприведенных случаях рассматривались планеты, обнаруженные RV-методом, у которых из наблюдений определяется не истинная (физическая) масса m , а так называемая проективная, или минимальная масса, т.е. произведение $m \cdot \sin i$, где i — наклонение орбиты планеты к лучу зрения. В подавляющем большинстве случаев наклонение i неизвестно. При малых углах наклона (когда орбита планеты видна практически *плашмя*) истинная масса планеты может превышать проективную в несколько (а иногда и в несколько десятков) раз. Поэтому распределение планет по проективным массам в общем случае может отличаться от распределения по истинным массам. Однако для степенного закона $dN/dm \propto m^{-1.0 \dots -2.0}$ это различие не является значительным (Ho, Turner, 2011). Например, в случае, если распределение по истинным массам следует степенному закону с показателем степени -2 , среднее значение $\sin i$ составляет 0.860, и истинные массы (в среднем) больше проективных на 16%.

В случае транзитной конфигурации, когда планета с точки зрения земного наблюдателя периодически проходит по диску своей звезды, ориентация орбиты относительно луча зрения известна, и можно определить не только проективную, но и истинную массу планеты. Рассматривая распределение по массам планет с транзитами, мы избавляемся от фактора “ $\sin i$ ”, т.е. от неопределенностей, связанных с неизвестным наклоном планетных орбит.

Для построения распределения планет с транзитами по массам мы отдельно рассмотрели экзопланеты, открытые на “Кеплере”, и в наземных наблюдательных программах (SuperWASP, HATNet, KELT, XO, TrES и др.), так как наблюдательная селекция различна для наземных и космических программ наблюдения. Данные об экзопланетах были взяты из NASA Exoplanet Archive (2019).

Мы сгруппировали планеты с транзитами, обнаруженные на CoRoT, вместе с планетами, обнаруженными наземными обзорами транзитов, а не с планетами, наблюдавшимися на “Кеплере”, по следующей причине. Небольшая апертура CoRoT (27 см) и ограниченная наблюдательная стратегия (наблюдала преимущественно тусклые звезды

14–16 звездной величины) привели к низкой эффективности этого инструмента в поисках планет за пределами размерного класса гигантов — из 28 опубликованных планет, обнаруженных на CoRoT, только пять имеют радиусы меньше 0.7 радиусов Юпитера.

На рис. 1 показаны распределения по массам планет с транзитами двух групп, открытых на “Кеплере” (планет “Кеплера”) и групп планет, обнаруженных наземными обзорами транзитов и на CoRoT. Зеленой линией показано распределение планет “Кеплера”, построенное без учета погрешностей в определении масс планет, красной линией — это же распределение, сглаженное с помощью “окна” (KDE) с гауссовым профилем в случае равенства верхней и нижней погрешностей (методика сглаживания описана в (Jorissen и др., 2001) и, более подробно, в (Ананьева и др., 2019), и с профилем скошенного нормального распределения в случае их неравенства. Синей линией показано распределение по массам планет с транзитами, открытых в наземных наблюдательных программах и на CoRoT, построенное без учета погрешностей масс, черной линией — то же распределение, сглаженное с помощью KDE.

В отсутствие какой-либо наблюдательной селекции распределение планет с транзитами, открытыми различными инструментами, должны выглядеть одинаково, однако это явно не так. В настоящей работе мы предложим метод учета наблюдательной селекции, приводящий распределения к подобному виду, который аппроксимируется степенным законом с показателем степени -2 : $dN/dm \propto m^{-2}$.

УЧЕТ ФАКТОРОВ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПО МАССАМ ПЛАНЕТ, ОТКРЫТЫХ КОСМИЧЕСКИМ ТЕЛЕСКОПОМ ИМ. КЕПЛера

Учет разной доли планет с измеренной массой относительно общего количества планет “Кеплера”

К февралю 2019 г. были подтверждены 2564 планеты с транзитами, открытые на “Кеплере”, но только у 210 из них была измерена масса. Доля планет “Кеплера” с измеренной массой относительно общего количества планет “Кеплера” близка к единице в размерной области планет-гигантов (для планет с радиусами 1–2 радиусов Юпитера) и падает ниже 0.1 для планет с радиусами меньше 0.3 радиусов Юпитера. С одной стороны, это вызвано тем, что массы планет-гигантов легче измерить RV-методом, чем массы более легких планет (нептунов и суперземель), а с другой — планет-гигантов гораздо меньше по количеству, чем планет меньших размеров. Поэтому наблюдаемое рас-

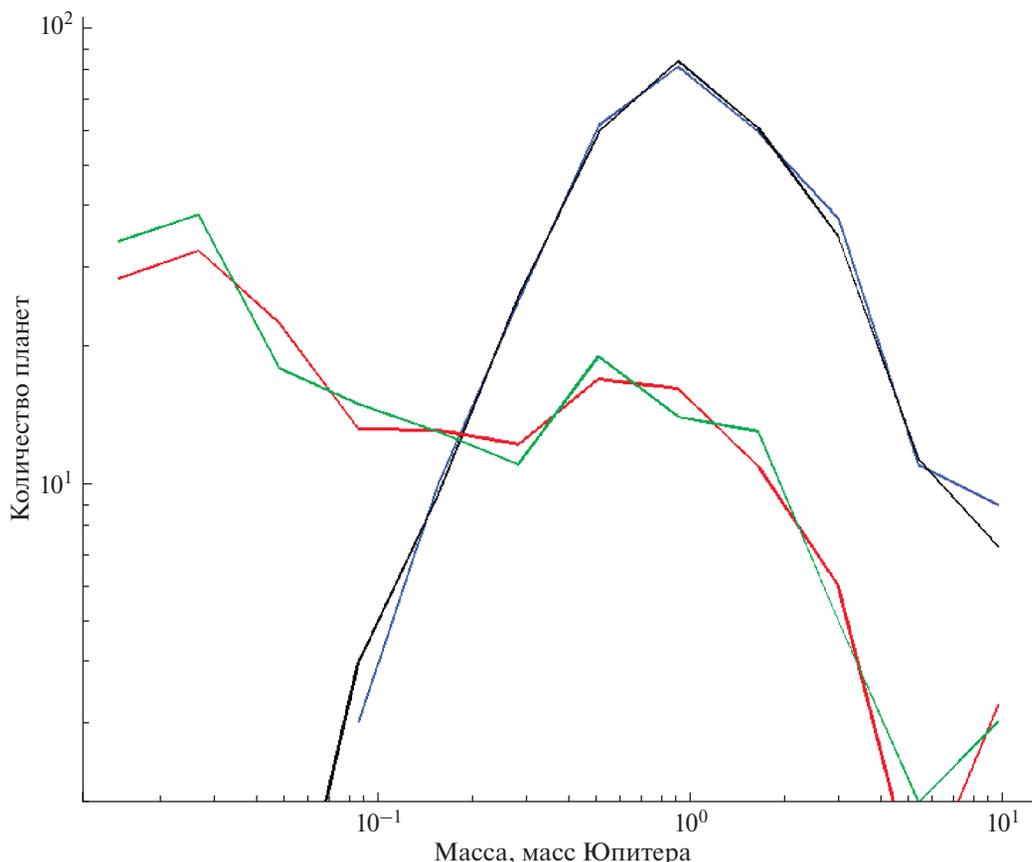


Рис. 1. Распределения экзопланет с транзитами по массам, полученные из NASA Exoplanet Archive (2019). Зеленой линией показано распределение планет “Кеплера”, построенное без учета погрешностей в определении масс планет, красной линией – это же распределение, сглаженное окном KDE. Синей линией показано распределение по массам планет с транзитами, открытых в наземных наблюдательных программах и на CoRoT, построенное без учета погрешностей масс, черной линией – то же распределение, сглаженное с помощью KDE.

пределение планет “Кеплера” по массам (см. рис. 1, красная линия) резко отличается от истинного распределения, которое мы имели бы, если бы измерили массы всех планет “Кеплера”.

Чтобы учесть этот фактор, интервал планетных радиусов от 0.08 до 2 радиусов (см. рис. 2) Юпитера был разбит на 12 интервалов, равных в логарифмическом масштабе. Число интервалов было выбрано по правилу Стёрджиса (Sturges, 1926) по формуле

$$n = 1 + [3.322 \lg N], \quad (1)$$

где n – оптимальное количество интервалов, N – число планет (2564).

Для каждого интервала в гистограмме распределения планет “Кеплера” по радиусам мы определили долю планет с измеренной массой и назвали эту величину “коэффициентом измеренности массы” k . Зависимость коэффициента измеренности массы от радиуса для планет “Кеплера” представлена на рис. 3. Коэффициент k близок к единице в области планет-гигантов и падает ниже 0.1

для планет с радиусами меньше 0.3 радиусов Юпитера.

Объясним коррекцию распределения по массам с учетом коэффициента k . Для 210 планет “Кеплера” известны и радиус, и масса. Чтобы перейти от распределения планет “Кеплера” по радиусам к распределению по массам, мы рассматриваем каждую планету “Кеплера” с измеренной массой со статистическим весом, обратным коэффициенту измеренности массы в том интервале, куда попадает ее радиус. Например, радиусы в диапазоне 0.179–0.234 радиусов Юпитера имеют 605 планет “Кеплера”, из них массы измерены у 26. Строя распределение планет “Кеплера” по массам, каждую из этих 26 планет мы берем со статистическим весом $605/26 = 23.27$.

Скорректированное таким образом массовое распределение планет “Кеплера” показано красной линией на рис. 4.

Скорректированное с учетом наблюдательной селекции распределение в первом приближении следует прямой линии в логарифмическом масштабе,

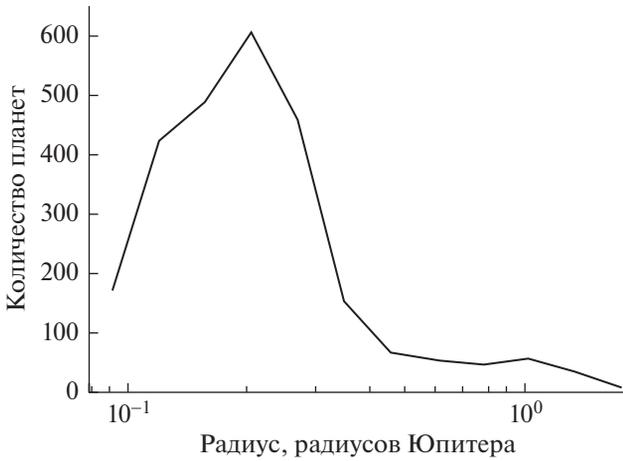


Рис. 2. Распределение планет “Кеплера” с транзитами по радиусам в области от 0.08 до 2 радиусов Юпитера.

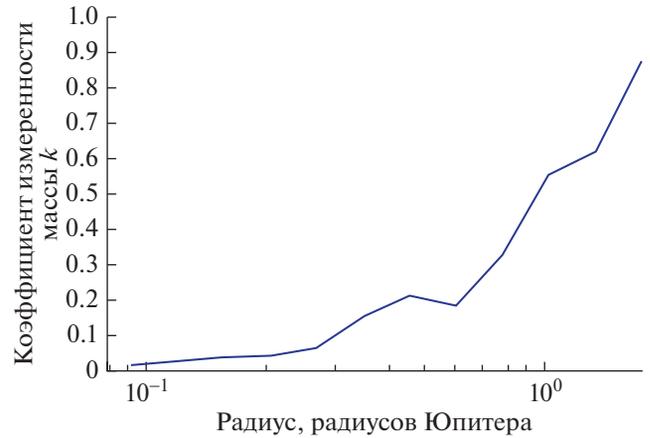


Рис. 3. Зависимость коэффициента измеренности массы k от радиуса для планет “Кеплера”.

следовательно, эту зависимость можно аппроксимировать степенным законом. Методом наименьших квадратов был вычислен показатель степени, который имеет значение -1.9 ($dN/dm \propto m^{-1.90 \pm 0.06}$). Стандартное отклонение значения показателя степени было вычислено по формуле стандартной ошибки коэффициента регрессии. Мы исключили из рассмотрения крайнюю левую точку, так как она принадлежит области, в которой данные на “Кеплере” становятся неполными (Petigura и др., 2013).

Для проверки статистической гипотезы о следовании скорректированного распределения планет “Кеплера” степенному закону с показателем степени -1.9 был применен критерий Колмогорова–Смирнова с уровнем значимости $\alpha = 0.05$. Критерий показал, что при выбранном уровне значимости скорректированное распределение действительно следует степенному закону.

Учет геометрической вероятности транзитной конфигурации

Следуя Petigura и др. (2013), мы рассмотрели еще один фактор наблюдательной селекции, связанный с разной геометрической вероятностью транзитной конфигурации при разных расстояниях между планетой и звездой. Метод транзитов обнаруживает лишь планеты, с точки зрения земного наблюдателя, проходящие по диску своей звезды, т.е. планеты, для которых наклонение орбит попадает в узкий диапазон вблизи 90° . Подавляющее большинство планет не демонстрируют транзитов.

Поскольку геометрическая вероятность транзитной конфигурации обратно пропорциональна расстоянию между планетой и звездой (2), метод транзитов наиболее эффективен для поиска более близких к звезде планет.

Априори не ясно, зависит ли распределение планет по массам от большой полуоси орбиты, другими словами, является ли распределение планет по массам одинаковым в различных частях планетных систем. В Солнечной системе, например, планеты земного типа расположены внутри снеговой линии, а планеты-гиганты – вне ее. Если распределение планет по массам зависит от расстояния между планетой и звездой, наблюдаемое распределение планет с транзитами будет отличаться от истинного распределения.

Если геометрическая вероятность транзитной конфигурации для экзопланеты составляет величину p ($p \ll 1$), и мы обнаружили такую планету, это означает, что в среднем таких планет должно

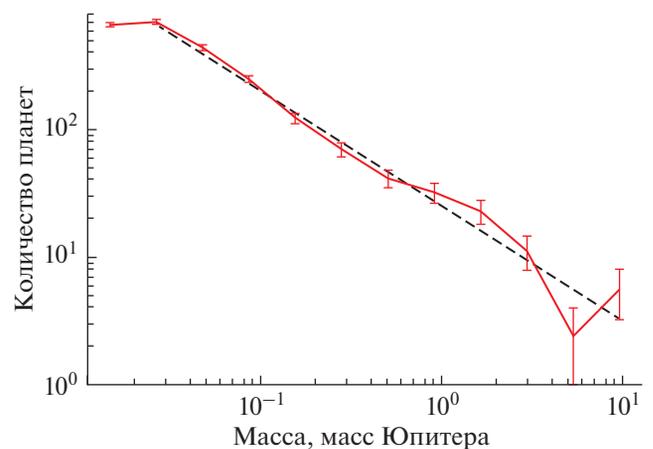


Рис. 4. Скорректированное (с помощью коэффициента измеренности массы k) распределение по массам планет “Кеплера” с транзитами (красная линия). Вертикальными отрезками показаны статистические погрешности по Пуассону. Черной линией показана аппроксимация степенным законом $dN/dm \propto m^{-1.9}$.

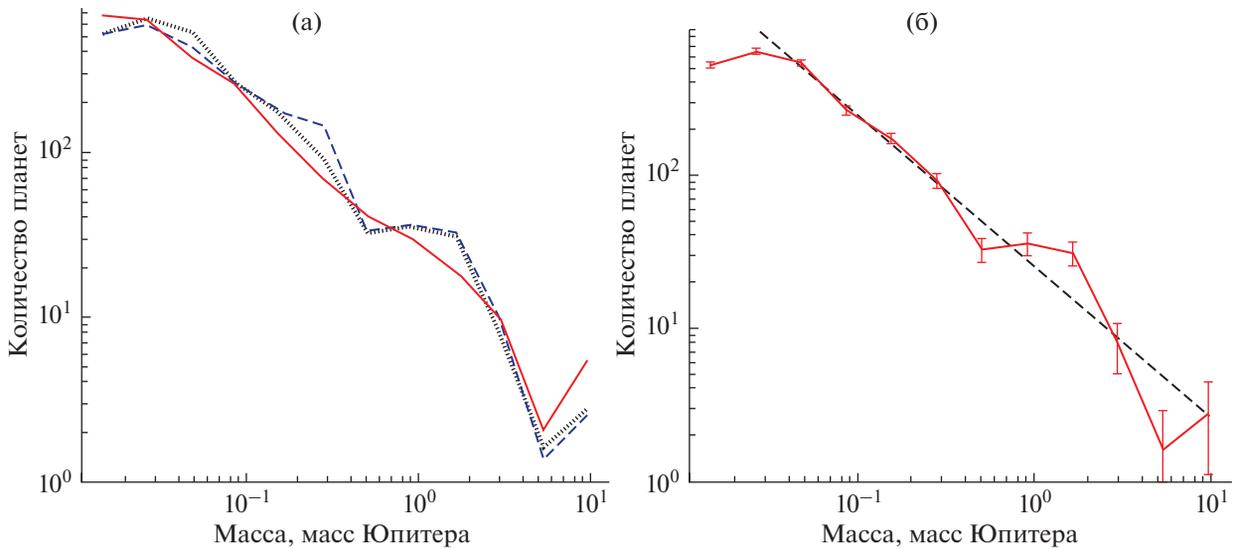


Рис. 5. (а). Распределение планет “Кеплера” по массам без учета (красная линия) и с учетом (синяя пунктирная линия) геометрической вероятности транзитной конфигурации. Черной точечной линией показано распределение планет “Кеплера” по массам с учетом геометрической вероятности транзитной конфигурации после исключения планет Kepler-34b, Kepler-16b и Kepler-1647b. (б). Распределение планет “Кеплера” по массам, построенного с учетом геометрической вероятности транзитной конфигурации (красная сплошная линия), и аппроксимация степенным законом $dN/dm \propto m^{-1.99}$ (черная пунктирная линия). Вертикальными отрезками показаны статистические погрешности по Пуассону.

быть $1/p$, причем подавляющее большинство из них не будут демонстрировать транзиты.

Согласно Winn (2014) геометрическая вероятность транзитной конфигурации:

$$p = \left(\frac{r_* \pm r}{a} \right) \left(\frac{1 + e \sin \omega}{1 - e^2} \right), \quad (2)$$

где r_* , r – радиус родительской звезды и радиус планеты соответственно; a – большая полуось орбиты планеты; e – эксцентриситет орбиты планеты; ω – угол перигентра восходящего узла; “ \pm ” – описывает случай скользящего транзита (“ $+$ ”) или игнорирует его (“ $-$ ”).

Если радиус планеты намного меньше радиуса звезды ($r \ll r_*$), а эксцентриситет орбиты близок к нулю ($e \approx 0$), уравнение (2) сводится к

$$p = r_*/a. \quad (3)$$

Чтобы учесть наличие планет без транзитов, мы построили новое распределение, рассмотрев каждую планету с транзитами со статистическим весом k_1 , обратно пропорциональным геометрической вероятности ее транзитной конфигурации:

$$k_1 = 1/p = a/r_*.$$

Полученное распределение было нормировано так, чтобы общее количество планет осталось неизменным.

Результат представлен на рис. 5а синей пунктирной линией.

На первый взгляд, учет геометрической вероятности транзитной конфигурации более отличает распределение планет по массам от степенного закона. Однако, если рассмотреть распределение планет “Кеплера” в зависимости от обратной вероятности транзитной конфигурации $k_1 = a/r_*$, то окажется, что новые осцилляции на графике вызваны в значительной степени влиянием трех планет с наименьшими значениями вероятности транзитной конфигурации, а значит – с наибольшим статистическим весом (Kepler-34b, Kepler-16b и Kepler-1647b) (рис. 6), которые вносят в гистограмму непропорционально большой вклад (и, возможно, являются статистическим выбросом). Исключив из рассмотрения эти три планеты, мы получили распределение, представленное на рис. 5а черной точечной линией.

Распределение планет “Кеплера” по массам, построенное с учетом геометрической вероятности транзитной конфигурации, было аппроксимировано степенной функцией (рис. 5б). Методом наименьших квадратов был вычислен показатель степени, который имеет значение -1.99 ± 0.08 ($dN/dm \propto m^{-1.99 \pm 0.08}$).

Применив критерий Колмогорова–Смирнова для сравнения распределений планет “Кеплера”, полученных с учетом и без учета вероятности транзитной конфигурации (красная сплошная и черная пунктирная линии на рис. 5а), мы обнаружили, что на уровне значимости $\alpha = 0.05$ оба распределения статистически различны. Это свиде-

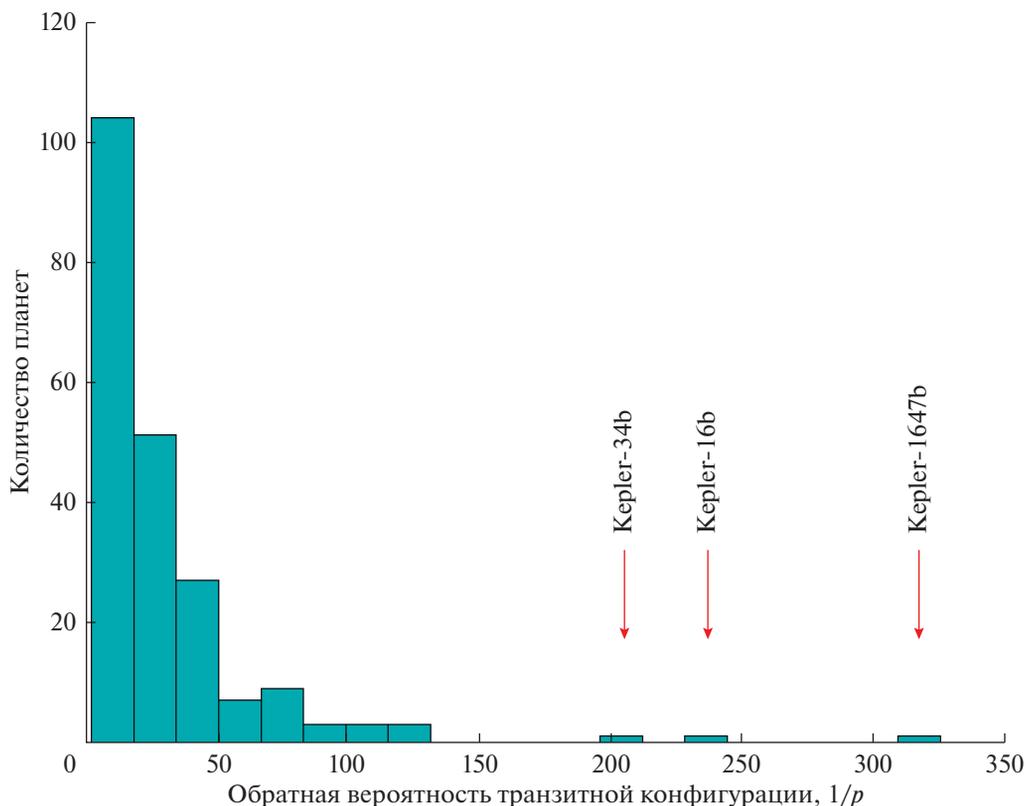


Рис. 6. Распределение планет “Кеплера” с измеренной массой в зависимости от обратной вероятности транзитной конфигурации $k_1 = 1/p$.

тельствует в пользу того, что распределение планет по массам действительно зависит от величины большой полуоси орбиты.

УЧЕТ ФАКТОРОВ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПО МАССАМ ПЛАНЕТ, ОТКРЫТЫХ В НАЗЕМНЫХ ПРОГРАММАХ НАБЛЮДЕНИЙ ТРАНЗИТОВ НА CoRoT

Наземные программы наблюдений транзитов, такие, как SuperWASP, HATNet, HAT-South, KELT, XO, QES и др. ведут поиск планет с помощью фотометрических наблюдений автоматическими широкоугольными телескопами небольшой апертуры (обычно 10–40 см). Наблюдения сквозь турбулентную земную атмосферу ограничивают точность единичного фотометрического замера величиной 0.1–0.3%, что затрудняет обнаружение планет за пределами размерного класса гигантов, т.е. планет с радиусами менее 0.7–0.8 радиусов Юпитера (у солнцеподобных звезд). Наземные программы наблюдений транзитов оптимизированы под поиск горячих юпитеров, поэтому подавляющее большинство открытых в них планет относится именно к этому типу.

Размеры планет-гигантов практически не зависят от их массы – и планеты с массой Сатурна (0.3 масс Юпитера), и планеты с массой ~10 масс Юпитера имеют приблизительно одинаковые радиусы, близкие к радиусу Юпитера. Исключение составляют планеты, расположенные очень близко к своей звезде и нагретые звездным излучением до температур свыше 1000–1200 К. Сильный нагрев приводит к “разбуханию” планетных атмосфер и увеличению видимого радиуса планет с транзитами, иногда до 1.5–2 радиусов Юпитера, такие планеты называют “раздутыми” (inflated).

Поскольку наземные программы наблюдений транзитов не эффективны в поисках планет с радиусами менее 0.7–0.8 радиусов Юпитера, распределение по массам планет с транзитами не искажено наблюдательной селекцией только в области планет-гигантов. Транзиты планет меньшего размера (нептунов и суперземель) детектируются плохо (замываются звездными мерцаниями), поэтому из трех сотен планет с транзитами, открытых в наземных обзорах, только 14 имеют радиусы меньше 0.7 радиусов Юпитера (HAT-P-11b, HAT-P-26b, HATS-7b, WASP-156b, 55 Cnc e, GJ 1214b, LHS 1140b, c, и планеты системы TRAPPIST-1).

Чтобы сравнить распределение по массам планет с транзитами, открытых в наземных наблюдатель-

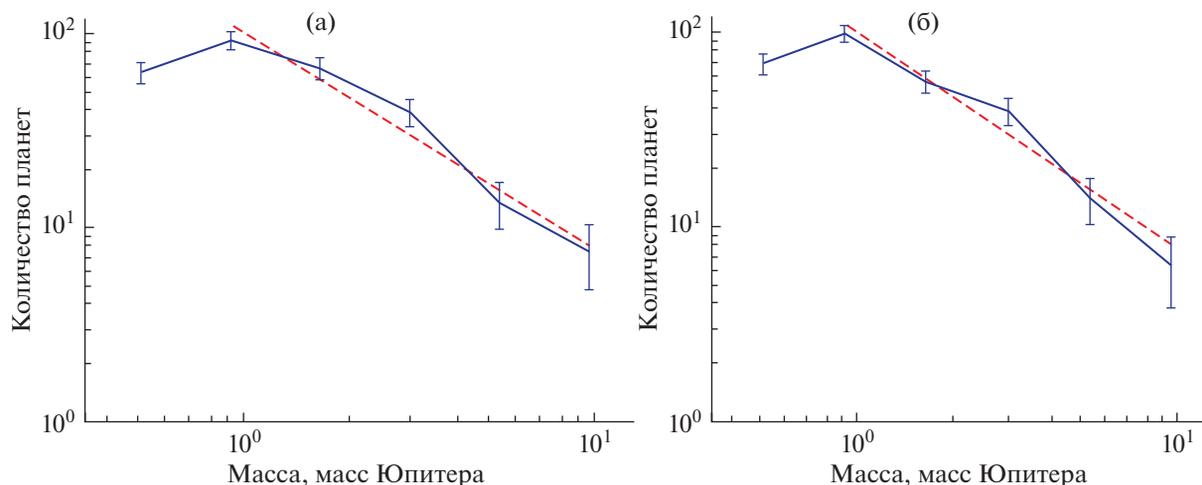


Рис. 7. (а). Распределение по массам транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами и спутником CoRoT (сплошная синяя линия). Синими отрезками показаны статистические погрешности по Пуассону. Красной пунктирной линией показан степенной закон с показателем степени -2.12 . (б). Распределение по массам транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами и спутником CoRoT, скорректированное с учетом геометрической вероятности транзитной конфигурации (синяя линия). Вертикальными отрезками показаны статистические погрешности по Пуассону. Красной пунктирной линией показан степенной закон с показателем степени -2.17 .

ных программах и на CoRoT, с распределением по массам планет “Кеплера”, мы рассмотрели планеты, открытые в наземных наблюдательных программах, с массами в диапазоне от 0.378 до 13 масс Юпитера, таких планет оказалось 288. Мы разбили этот диапазон на 6 интервалов, с тем, чтобы границы интервалов совпадали с границами интервалов в распределении планет “Кеплера”. Как и в предыдущем случае, мы исключили из рассмотрения крайнюю левую точку, где возможна неполнота данных, и аппроксимировали полученное распределение степенным законом. Показатель степени был вычислен методом наименьших квадратов. Распределение по массам планет с транзитами, открытых в наземных наблюдательных программах, с хорошей точностью следует степенному закону с показателем степени -2.12 ± 0.12 (рис. 7а). Как и в случае с планетами “Кеплера”, погрешность показателя степени была вычислена по формуле стандартной ошибки коэффициента регрессии.

Хотя значения геометрической вероятности транзитной конфигурации для планет, обнаруженных в наземных транзитных наблюдательных программах, варьируются не так сильно, как для планет “Кеплера”, мы учли этот фактор согласно методике, описанной в разделе “Учет геометрической вероятности транзитной конфигурации”. Мы аппроксимировали полученное распределение степенной функцией, исключив крайнюю левую точку. Показатель степени был вычислен методом наименьших квадратов и составил -2.17 ± 0.12 . Скорректированное распределение и результат аппроксимации представлены на рис. 7б.

Применение критерия Колмогорова–Смирнова с уровнем значимости $\alpha = 0.05$ показало, что распределение по массам планет с транзитом, обнаруженных в наземных программах наблюдений и на CoRoT, следует степенному закону как без учета, так и с учетом вероятности транзитной конфигурации. Этот же критерий показал, что оба варианта распределения являются статистически схожими. Другими словами, для планет, обнаруженных в наземных программах наблюдений и на CoRoT, зависимость массового распределения от величины большой полуоси орбиты не проявляется. Возможно, это связано с тем, что подавляющее большинство планет с транзитом удалено от своих звезд не далее, чем на 20 звездных радиусов (в Солнечной системе это соответствует расстоянию <0.1 а. е.).

ЗАВИСИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНЕТ ПО МАССАМ ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА РОДИТЕЛЬСКИХ ЗВЕЗД (FGK)

До сих пор мы анализировали распределения планет с транзитами по массам, игнорируя свойства родительских звезд. Однако свойства планетных систем существенно зависят от свойств родительских звезд, в частности, распространенность планет-гигантов растет с ростом массы и металличности звезд (Udry и др., 2005, Perryman, 2011), а распространенность планет малых масс, напротив, увеличивается с уменьшением массы и металличности родительских звезд (Brewer и др., 2018). Распределения планет по массам для звезд разных спектральных классов, возможно, различны.

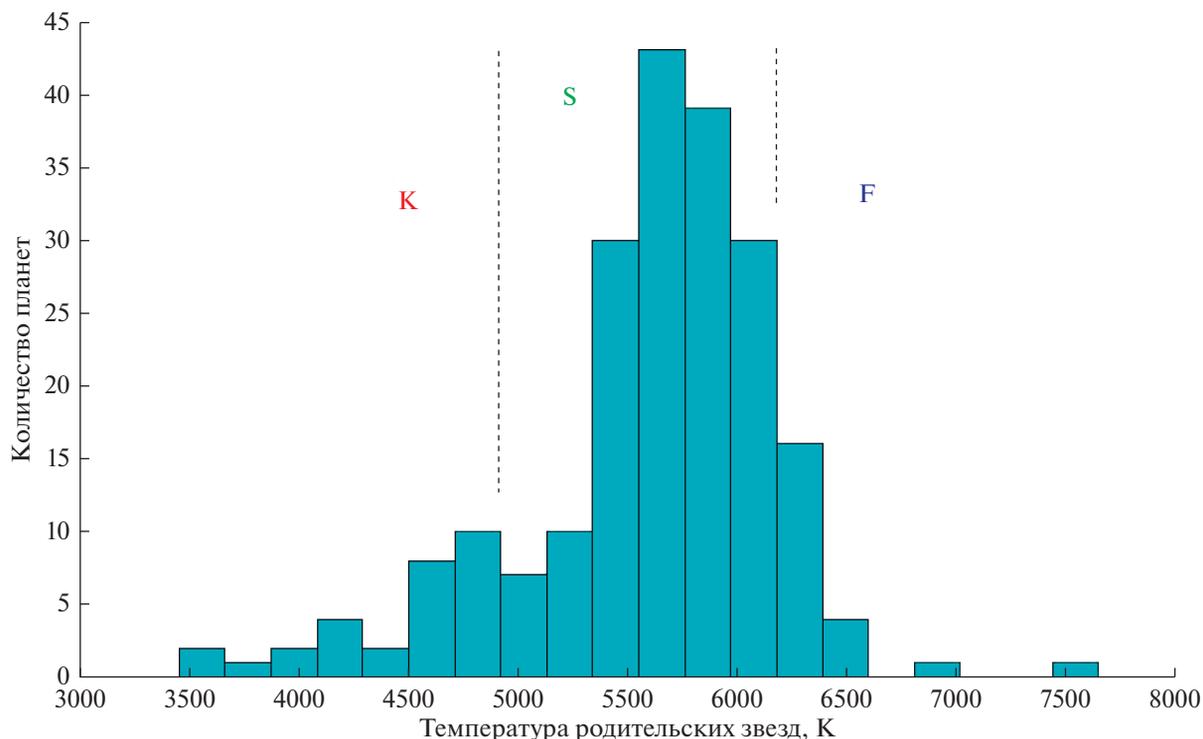


Рис. 8. Распределение по эффективным температурам родительских звезд планет “Кеплера” с транзитами с измеренной массой. Показано разделение планет на группы в зависимости от эффективной температуры родительских звезд: в группу К входят планеты у звезд холоднее 5000 К, в группу S – планеты у звезд с температурой от 5000 до 6200 К, в группу F – планеты у звезд горячее 6200 К.

На рис. 8 представлено распределение по эффективным температурам родительских звезд планет “Кеплера” с транзитами с измеренной массой.

Подавляющее большинство родительских звезд программы наблюдения на космическом телескопе им. Кеплера имеют эффективные температуры от 5400 до 6200 К, т.е. являются солнцеподобными. Это не случайно – именно солнцеподобные звезды были отобраны программой наблюдения “Кеплера” в качестве основных целей миссии. Тем не менее на “Кеплере” наблюдали и некоторое число звезд других спектральных классов.

Мы разделили планеты “Кеплера” с транзитами на три группы в зависимости от эффективной температуры их родительских звезд: в группу К вошли планеты, вращающиеся вокруг звезд с эффективной температурой ниже 5000 К, в группу S – планеты, чьи родительские звезды имеют эффективные температуры от 5000 до 6200 К (в эту группу попадают звезды примерно от спектрального класса от F8 до K2), и в группу F – планеты горячих звезд с эффективными температурами свыше 6200 К. В группу К вошла 531 планета, из которых масса была измерена у 33, в группу S – 1856 планет, масса измерена у 157, в группу F – 177 планет, масса измерена у 20 (рис. 8).

Мы удалили из группы К планету Kepler-432b с массой 5.41 (+0.32; –0.18) масс Юпитера, поскольку родительская звезда Kepler-432 является не звездой главной последовательности, а красным гигантом (при массе 1.32 солнечных масс ее радиус достигает 4.06 солнечных радиусов). Находясь на главной последовательности, эта звезда имела спектральный класс F. Таким образом, в группе К остались 32 планеты.

Мы применили к каждой группе процедуру, описанную в разделе “Учет разной доли планет...”, уменьшив количество интервалов разбиения с 12 до 6 (по правилу Стёрджиса для 32 планет), что проиллюстрировано на рис. 9–10.

Из-за малого количества планет в группах F и K соответствующие распределения не выглядят гладкими, однако, как показывает проведенный тест Колмогорова–Смирнова, они следуют степенному закону. Аппроксимировав найденные распределения степенным законом, мы вычислили показатели степени и их стандартные отклонения согласно методике, описанной в разделе “Учет разной доли планет...”. Для группы К показатель степени оказался равным -2.08 ± 0.24 ($dN/dm \propto m^{-2.08 \pm 0.24}$), для группы S: -1.97 ± 0.11 ($dN/dm \propto m^{-1.97 \pm 0.11}$), для группы F: -1.41 ± 0.10 ($dN/dm \propto m^{-1.41 \pm 0.10}$) (см. рис. 10).

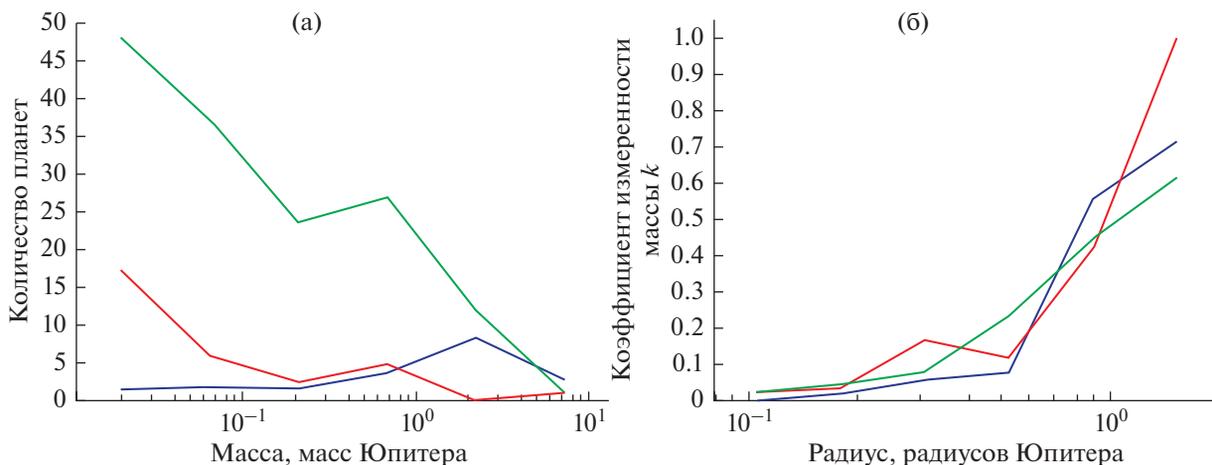


Рис. 9. (а). Распределения по массам планет “Кеплера”, построенные отдельно для групп спектральных классов родительских звезд К (красная линия), S (зеленая линия) и F (синяя линия), без учета эффектов наблюдательной селекции (в частности, коэффициента измеренности масс). (б). Зависимость коэффициента измеренности массы k от радиуса для планет “Кеплера” из каждой группы: К (красная линия), S (зеленая линия) и F (синяя линия).

Если показатели степени в распределениях планет “Кеплера” из групп К и S согласуются друг с другом, в пределах погрешностей приблизительно равны -2 , то распределение планет из группы F заметно от них отличается. Чтобы определить, является ли это различие объективным, или оно представляет собой следствие неучтенной ранее наблюдательной селекции, мы рассмотрели распределение планет “Кеплера” из групп F, K и S по радиусам (всех планет, а не только тех, у кого была измерена масса).

На рис. 11а представлены распределения по радиусам планет “Кеплера” с транзитами из групп F, K и S. Для наглядности мы нормировали эти распределения на количество планет в каждой группе, результат представлен на рис. 11б.

Сравнение распределений планет из групп F, K и S по радиусам демонстрирует явный дефицит планет небольших размеров в группе F в сравнении с группами K и S. Если максимум в распределении планет из групп K и S приходится на планеты с радиусом 2 радиуса Земли, то в распределении планет из группы F – на планеты с радиусом 3 радиуса Земли. Это может быть связано с тем, что звезды главной последовательности спектрального класса F в среднем 1.3–1.5 раза больше, чем звезды спектрального класса G, и в 1.7–2 раза больше, чем звезды спектрального класса K (Агемян, 1981). При заданной глубине транзита радиусы планет с транзитами у звезд спектрального класса F пропорционально больше, чем радиусы планет у звезд спектральных классов G и K.

Изучение эффективности автоматических алгоритмов, отыскивающих сигналы транзитов в кривых блеска целевых звезд “Кеплера”, предпринималось неоднократно (Christiansen и др.,

2015; 2016). Эффективность поискового алгоритма SOC версии 9.2 увеличивается от 0 до ~90% для отношения сигнал/шум (MES) от 6 до 12 для орбитальных периодов короче 50 земных сут, и существенно падает для планет с орбитальными периодами свыше 150 земных сут. Поскольку при постоянном уровне шума величина MES пропорциональна глубине транзита (Tenenbaum и др., 2013), неполнота данных “Кеплера” для звезд F-класса становится существенной при больших радиусах планет с транзитами.

Чтобы подтвердить гипотезу о том, что распределения планет “Кеплера” у звезд F-группы искажены наблюдательной селекцией, мы рас-

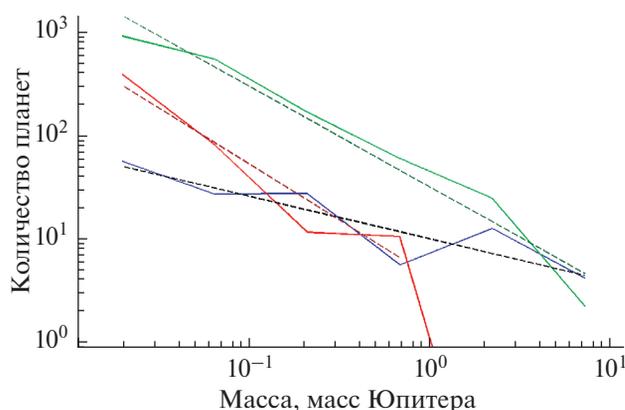


Рис. 10. Распределение по массам планет “Кеплера” из групп F (синим), K (красным) и S (зеленым) после учета коэффициентов измеренности массы k . Пунктирными линиями показаны аппроксимирующие их степенные зависимости с показателем степени -1.41 (черным), -2.08 (темно-красным) и -1.97 (темно-зеленым).

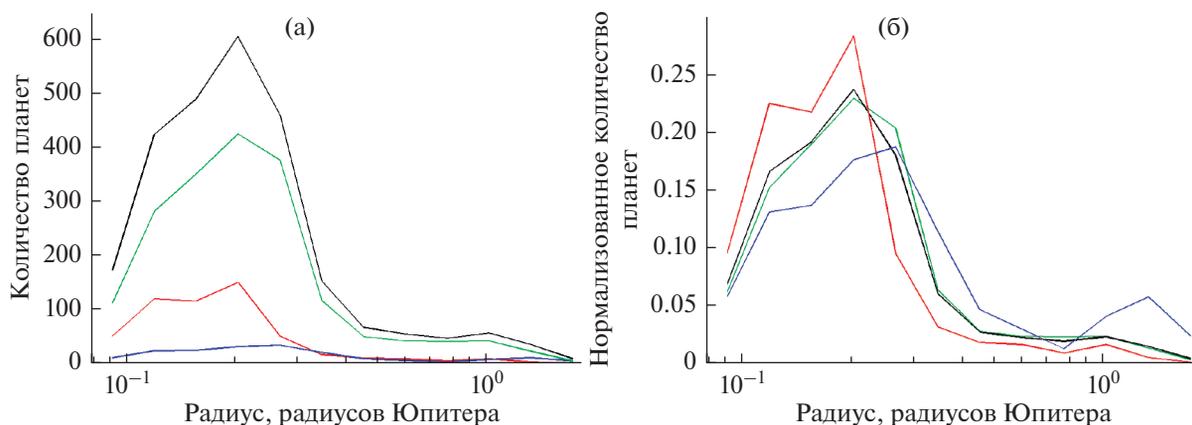


Рис. 11. (а). Распределения по радиусам планет “Кеплера” с транзитами групп F (177 планет, синяя линия), K (531 планета, красная линия) и S (1856 планет, зеленая линия). Черным цветом показано суммарное распределение (2564 планеты). (б). То же, что и на рис. 11а, но распределения нормированы на количество планет в каждой группе.

смотрели планеты у звезд горячее 6200 К, обнаруженные наземными транзитными наблюдательными программами и спутником CoRoT. Таких планет оказалось 85. Ниже представлено распределение этих планет по массам. (Количество интервалов разбиения было определено по правилу Стёрджиса — для 85 планет оно равно 7.)

Как и раньше, исключив крайнюю левую точку и аппроксимировав распределение степенным законом (рис. 12), мы получили показатель степени, равный -1.97 ± 0.17 : $dN/dm \propto m^{-1.97 \pm 0.17}$.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МАССАМ ПЛАНЕТ У ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА M

Планет с транзитами с измеренной массой, вращающихся вокруг звезд спектрального класса M,

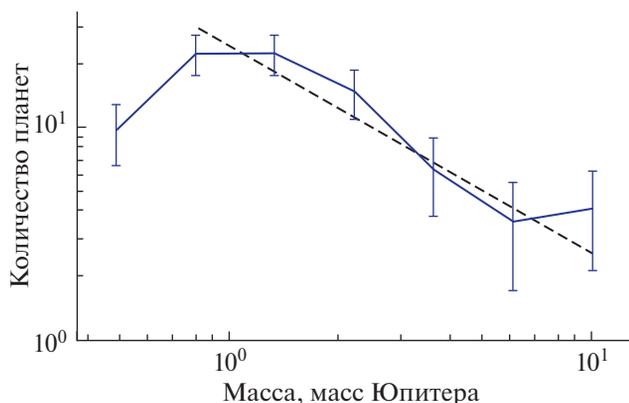


Рис. 12. Распределение планет с транзитами, обнаруженных в наземных программах наблюдений и на CoRoT, и вращающихся вокруг звезд горячее 6200 К, и аппроксимация степенным законом. Вертикальными отрезками показаны статистические погрешности по Пуассону. Черной пунктирной линией показан степенной закон с показателем степени -1.97 .

известно слишком мало для надежных статистических выводов. На 11 сентября 2019 г. по данным NASA Exoplanet Archive их было известно всего 23. Однако планет у красных карликов, обнаруженных RV-методом, известно гораздо больше.

В июле 2019 г. в архиве электронных препринтов была опубликована работа Tuomi и др. (2019), посвященная изучению распространенности планет различных типов у M-звезд в окрестностях Солнца. Авторы успешно объединили разнородные данные, полученные в различных программах наблюдений, ведущих поиск планет RV-методом с помощью спектрографов HIRES/Keck, PFS/Magellan, HARPS/ESO, UVES/VLT, а также AAT, APF, CORALIE, ELODIE, HARPN, HET, LICK и SOPHIE. Всего наблюдениями было охвачено 426 звезд, многие из которых наблюдались независимо несколькими научными коллективами. Исследователи искали в данных колебания лучевых скоростей родительских звезд, не коррелирующие с какими-либо маркерами звездной активности и не сопровождающиеся колебаниями блеска. Если обнаруженное RV-колебание сопровождалось хотя бы одним признаком, свидетельствующим о непланетной природе, оно исключалось из рассмотрения. В результате было обнаружено 118 кандидатов в планеты, большинство из которых уже было известно ранее.

Поскольку 118 кандидатов были обнаружены в программах наблюдений с различной чувствительностью и продолжительностью наблюдений, авторы учли факторы наблюдательной селекции, вызванные неоднородностью данных. Они рассмотрели экзопланеты в параметрическом пространстве “орбитальный период—проективная масса” (аналогично Ананьева и др., 2019), где рассмотрены массы планет в интервале от 1 до 1000 масс Земли, а орбитальные периоды — от 1 до 10^4

земных суток. Tuomi и др. (2019) разделили каждый рассмотренный диапазон на восемь интервалов, равных в логарифмическом масштабе (таким образом, все пространство параметров оказалось поделено на 64 отдельные области), и для каждой области вычислили вероятность обнаружения планеты имеющейся совокупностью наблюдательных программ, см. рис. 14 в работе Tuomi и др. (2019).

Вероятность обнаружения планеты менялась от 0.887 для планет с массами от 421.7 до 1000 масс Земли (т.е. от 1.33 до 3.15 масс Юпитера) и орбитальными периодами от 1 до 3.16 суток, до 0.001 для планет с массами от 1 до 2.37 масс Земли и орбитальными периодами от 100 до 316 сут. Для планет с массой менее 2.37 масс Земли и орбитальными периодами свыше 316 сут эта вероятность падала до нуля – амплитуда колебаний лучевой скорости звезды, наводимая такими планетами, оказывалась слишком малой, чтобы ее можно было зафиксировать имеющимися средствами.

Авторы построили наблюдаемые распределения 118 планетных кандидатов по массам (рис. 15 в работе Tuomi и др., 2019) без учета различий в вероятности обнаружить планету в разных областях параметрического пространства. Мы применили к их данным похожую методику, что и к планетам “Кеплера” – а именно каждую планету мы рассмотрели со статистическим весом, обратным вероятности обнаружения в данной области параметрического пространства. Результат представлен на рис. 13.

Мы исключили из рассмотрения крайнюю левую точку, где велика неполнота данных (для планет с массами 1–2.37 масс Земли и орбитальными периодами, превышающими 316 сут, вероятность обнаружения равна нулю). Мы аппроксимировали степенной зависимостью участок распределения, близкий к прямой в логарифмическом масштабе (на рис. 13 он показан синей пунктирной линией), и получили показатель степени, равный -2.10 ± 0.15 ($dN/dm \propto m^{-2.10 \pm 0.15}$). Если степенной зависимостью аппроксимировать всю полученную гистограмму (черная сплошная линия на рис. 13), то показатель степени окажется равным -1.87 ± 0.38 ($dN/dm \propto m^{-1.87 \pm 0.38}$).

Пик на гистограмме в области ~ 300 масс Земли обусловлен семью планетами, причем шесть из них имеют орбитальный период от 10^3 до 10^4 земных суток, и лишь у одной – GJ 876 c – орбитальный период составляет 30.23 сут. Как и статистически значимая разница между распределениями планет “Кеплера” с учетом и без учета вероятности транзитной конфигурации (раздел “Учет геометрической вероятности...”), это свидетельствует в пользу предположения, что распределение экзопланет по массам зависит от длины большой

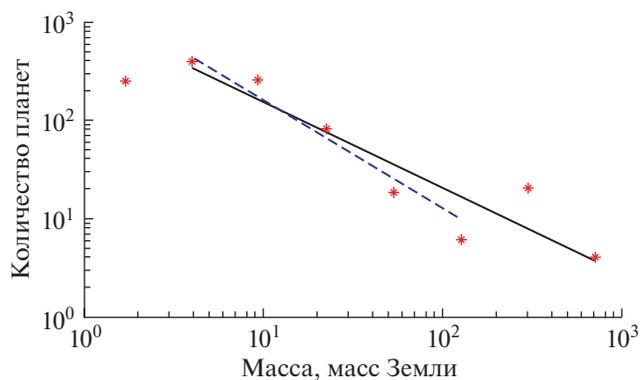


Рис. 13. Распределение по проективным массам (показано красными звездами) планет у М-звезд с учетом разной вероятности обнаружить планету в различных участках пространства параметров. Исключена крайняя левая точка, где данные не полны. Прямыми линиями показаны степенные зависимости с показателем степени -1.87 ± 0.38 (черная сплошная линия) и -2.10 ± 0.15 (синяя пунктирная линия).

полуоси орбиты (расстояния между планетой и звездой).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы проанализировали распределения по массам трех групп экзопланет: планет “Кеплера” с транзитами, планет с транзитами, обнаруженных в наземных программах наблюдений и на ИСЗ CoRoT, и планет, обнаруженных RV-методом у близких красных карликов (по результатам Tuomi и др., 2019). Приняв во внимание наиболее значимые факторы наблюдательной селекции, различные для каждой группы планет, мы нашли, что распределения масс могут быть описаны универсальным степенным законом с показателем степени -2 : $dN/dm \propto m^{-2}$.

Распределение планет “Кеплера”, построенное с учетом геометрической вероятности транзитной конфигурации и скорректированное с учетом разной доли планет с измеренной массой в зависимости от их радиуса, описывается степенным законом с показателем степени -1.99 ± 0.08 . Распределение планет с планет, обнаруженных в наземных программах наблюдений и на CoRoT, описывается степенным законом с показателем степени -2.17 ± 0.12 . Наконец, распределение планет, обнаруженных методом лучевых скоростей у близких красных карликов, описывается степенным законом с показателем степени -2.10 ± 0.15 . Достоверность следования распределений степенному закону была проверена с помощью критерия Колмогорова–Смирнова с уровнем значимости $\alpha = 0.05$.

Также мы рассмотрели распределения по массам планет “Кеплера” с транзитами в зависимо-

сти от спектрального класса родительских звезд. Никакого статистически значимого различия обнаружить не удалось. Распределение по массам планет “Кеплера”, вращающихся вокруг звезд холоднее 5000 К, аппроксимируется степенным законом с показателем степени -2.08 ± 0.24 . Распределение планет “Кеплера”, вращающихся вокруг звезд с температурой от 5000 до 6200 К (т.е. солнцеподобных) аппроксимируется степенным законом с показателем степени -1.97 ± 0.11 . Распределение планет “Кеплера” у звезд горячее 6200 К следует другому степенному закону -1.41 ± 0.10 , но предположительно показано, что это следствие наблюдательной селекции, связанной с большими размерами дисков F звезд и низкой эффективностью обнаружения “Кеплером” наиболее мелких транзитов. Распределение планет у звезд горячее 6200 К, обнаруженных в наземных программах наблюдений и на CoRoT, описывается степенным законом с показателем степени -1.97 ± 0.17 .

Вместе с тем, учет геометрической вероятности транзитной конфигурации для планет “Кеплера” приводит к статистически значимому отличию полученного распределения от распределения, построенного без учета этого фактора. Это свидетельствует в пользу гипотезы, что распределение планет по массам зависит от расстояния между планетой и звездой. Анализ распределения планет, обнаруженных RV-методом у близких красных карликов, приводит к тому же выводу — большинство планет-гигантов у этих звезд имеют орбитальные периоды от 10^3 до 10^4 земных суток. Возможно, за снеговой линией, в области, недоступной методу поиска планет по транзитам, доля планет-гигантов значительно выше, чем во внутренних частях планетных систем.

Работа была выполнена по гранту Министерства образования и науки Российской Федерации 14.W03.31.0017 и в части последнего раздела по гранту РФФИ 18-19-00452.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агекян Т.А. Звезды. Галактики. Метагалактика. М.: Наука, 1981.
- Ананьева В.И., Тавров А.В., Венкстерн А.А., Чурбанов Д.В., Шашкова И.А., Кораблев О.И., Берто Ж.-Л. Распределение экзопланет-гигантов по истинным и проективным массам. Учет наблюдательной селекции // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 2. С. 133–146.
- Иванова А.Е., Ананьева В.И., Венкстерн А.А., Шашкова И.А., Юдаев А.В., Тавров А.В., Кораблев О.И., Берто Ж.-Л., Распределение транзитных экзопланет по массам с учетом факторов наблюдательной селекции // Письма в Астрон. журн. 2019. Т. 45. № 10. С. 1–8. <https://doi.org/10.1134/S0320010819100048>
- Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов. М.: Финансы и статистика, 1983.
- Brewer J.M., Wang S., Fischer D.A., Foreman-Mackey D. Compact multi-planet systems are more common around metal poor hosts. 2018. <https://arxiv.org/pdf/1810.10009.pdf>
- Butler R.P., Wright J.T., Marcy G.W., Fischer D.A., Vogt S.S., Tinney C.G., Jones H.R.A., Carter B.D., Johnson J.A., McCarthy C., Penny A.J. Catalog of Nearby Exoplanets. 2006. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0607493.pdf>
- Christiansen J.L., Clarke B.D., Burke C.J., Seader Sh., Jenkins J.M., Twicken J.D., Smith J.C., Batalha N.M., Haas M.R., Thompson S.E., Campbell J.R., Sabale A., Uddin A.K. Measuring transit signal recovery in the Kepler pipeline II: Detection efficiency as calculated in one year of data // *Astrophys. J.* 2015. V. 810. Iss. 2. Article id. 95. 11 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/2/95>
- Christiansen J.L., Clarke B.D., Burke C.J., Jenkins J.M., Bryson S.T., Coughlin J.L., Mullally F., Thompson S.E., Twicken J.D., Batalha N.M., Haas M.R., Catanzarite J., Campbell J.R., Uddin A.K., Zamudio K., Smith J.C., Henze C.E. Measuring transit signal recovery in the Kepler pipeline. III. Completeness of the Q1–Q17 DR24 Planet Candidate Catalog with important caveats for occurrence rate calculations // *Astrophys. J.* 2016. V. 828:99. 8 p. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/828/2/99>
- Cumming A., Butler R.P., Marcy G.W., Vogt S.S., Wright J.T., Fischer D.A. The Keck planet search: Detectability and the minimum mass and orbital period distribution of extrasolar planets // *Proc. Astron. Soc. Pacific.* 2008. V. 120(867). P. 531–554. <https://doi.org/10.1086/588487>
- Ho S., Turner E.L. The Posterior distribution of $\sin(i)$ values for exoplanets with $Mt \sin(i)$ determined from radial velocity data // *Astrophys. J.* 2011. V. 739. 26 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/739/1/26>
- Howard A.W., Marcy G.W., Johnson J.A., Fischer D.A., Wright J.T., Isaacson H., Valenti J.A., Anderson J., Lin D.N.C., Ida S. The occurrence and mass distribution of close-in super-Earths, Neptunes, and Jupiters // *Science.* 2010. V. 330(6004). P. 653–655. <https://doi.org/10.1126/science.1194854>
- Jorissen, Mayor, Udry. The distribution of exoplanet masses // *Astron. and Astrophys.* 2001. V. 379. P. 992–998. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011373> https://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_density_estimation
- Marcy G., Butler R.P., Fischer D., Vogt S., Wright J.T., Tinney C.G., Jones H.R.A. Observed properties of exoplanets: Masses, orbits, and metallicities // *Progress Theor. Phys. Suppl.* 2005. V. 158. P. 24–42. DOI.org/10.1143/PTPS.158.24
- NASA Exoplanet Archive. 2019. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- Perryman M. The Exoplanet Handbook. 2011.
- Petigura E.A., Howard A.W., Marcy G.W. Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2013. V. 110(48). P. 19273–19278. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319909110>
- Sturges H. The choice of a class-interval // *J. Amer. Statist. Assoc.* 1926. V. 21. P. 65–66. (<https://vlgr.rane->

- pa.ru/pp/hmp/bks100tv1314/lect_TV07.pdf 25 апреля 2019).
- Tenenbaum P., Christiansen J.L., Jenkins J.M., Rowe J.F., Seader S., Caldwell D.A., Clarke B.D., Li J., Quintana E.V., Smith J.C., Stumpe M.C., Thompson S.E., Twicken J.D., Van Cleve J.* Detection of potential transit signals in the first three quarters of Kepler mission data // *Astrophys. J. Suppl.* 2012. V. 199:24. 15 p. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/199/1/24>
- Twicken J.D., Jenkins J.M., Seader S., Tenenbaum P., Smith J.C., Brownston L.S., Burke C.J., Catanzarite J.H., Clarke B.D., Cote M.T., Girouard F.R., Klaus T.C., Li J., McCauliff S.D., Morris R.L., Wohler B., Campbell J.R., Uddin A.K., Zamudio K.A., Sabale A., Bryson S.T., Caldwell D.A., Christiansen J.L., Coughlin J.L., Haas M.R., Henze C.E., Sanderfer D.T., Thompson S.E.* Detection of potential transit signals in 17 quarters of Kepler data: Results of the final Kepler mission transiting planet search (DR25) // *Astron. J.* 2016. V. 152:158. 25 p. <https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/6/158>
- Tuomi M., Jones H.R.A., Butler R.P., Arriagada P., Vogt S.S., Burt J., Laughlin G., Holden B., Shectman S.A., Crane J.D., Thompson I., Keiser S., Jenkins J.S., Berdiñas Z., Diaz M., Kiraga M., Barnes J.R.* Frequency of planets orbiting M dwarfs in the Solar neighbourhood. 2019. <https://arxiv.org/pdf/1906.04644.pdf>
- Udry, Fischer, Queloz.* A decade of radial-velocity discoveries of exoplanets. 2005. <https://www.lpi.usra.edu/books/PPV/8058.pdf>
- Winn J.N.* Transits and Occultations // *Exoplanets* / Ed. Seager S. Univ. Arizona Press, 2014. 526 p.