

ПОИСК ПЛАНЕТ ЗАТМЕННЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

© 2012 г. А. В. Тутуков^{1*}, А. И. Богомазов^{2**}

¹Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 11.04.2012 г.; принята в печать 13.04.2012 г.

Приведен список затменных двойных звезд, которые могут обладать планетными системами. Отмечается, что поиск планетных систем в двойных звездах облегчается в случае затменных двойных звезд. Наличие затмений сильно увеличивает вероятность попадания наблюдателя в орбитальную плоскость системы, поскольку естественно ожидать, что протопланетные диски и планеты расположены в той же плоскости, либо близко от нее. Для обнаружения планет транзитным методом в системах из приведенного списка достаточна аппаратура, доступная широкому кругу профессиональных наблюдателей, а также любителям астрономии.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2011 г. по фотометрическим наблюдениям, проведенным орбитальным телескопом “Кеплер”¹, впервые² транзитным методом была открыта планета в затменно-переменной двойной звездной системе [3]. Эта двойная состоит из компонент с массами $0.69M_{\odot}$ и $0.2M_{\odot}$ с орбитальным периодом 41 день. Планета³ сравнима по размерам и массе с Сатурном, ее орбитальный период составляет 229 дней. Орбитальные плоскости всех трех тел совпадают в пределах 0.5° . Во время главного затмения (звезда А, более массивная, частично затмевается звездой Б) поток оптического излучения от системы падает на 13%. Во время вторичного затмения (звезда Б, менее массивная, полностью затмевается звездой А) поток падает на 1.6%. Кроме того, было обнаружено несколько “третичных” затмений, во время которых поток от системы падал на 1.7%. Эти затмения интерпретировались как прохождение третьего тела по диску звезды А.

*E-mail: atutukov@inasan.ru

**E-mail: a78b@yandex.ru

¹Орбитальный телескоп “Кеплер” постоянно следит за оптическим блеском приблизительно 155 тыс. звезд в поле зрения около 105 кв. град. в созвездиях Лебедя и Лиры (см., например, [1]).

²Несколько кандидатов в планеты были открыты в системах с полярами методом тайминга затмений (см., например, [2]).

³Планета получила название Кеплер-16; она находится в системе звезды номер 12644769 из каталога “Kepler Input Catalogue” [3].

Впоследствии были обнаружены также “четвертичные” затмения, во время которых поток от системы падал на 0.1%, что совпадало с затмениями третьим телом звезды Б. Третьим телом могла быть либо планета, либо звезда, затмевающая звезду А по касательной траектории. Решающий аргумент в пользу того, что третье тело — это планета, был получен методом тайминга затмений. Третье тело благодаря своему присутствию изменяет положение центра масс двойной звезды и вносит возмущения в параметры орбиты каждой из звезд. Величина гравитационного воздействия и, соответственно, изменения времени затмений зависят от массы третьего тела. Масса этого тела оказалась меньше массы Юпитера [3]. Также было проведено моделирование гравитационного взаимодействия всех трех тел, были обнаружены вариации параметров орбиты с характерной временной шкалой 40 лет. Изменение наклона орбиты планеты по отношению к лучу зрения может составлять 0.2° , ввиду чего затмения центральных звезд планетой с Земли видны только 40% времени (усредненно на промежутках времени около 500 лет). В частности, в начале 2018 г. должны прекратиться прохождения планеты по диску звезды А (вновь они должны начаться приблизительно в 2042 г.), а прохождения планеты по диску звезды В уже прекращаются и должны прекратиться приблизительно на 35 лет в мае 2014 г. [3].

Исследование планетных систем около двойных звезд имеет очень большое значение для понимания процессов звездообразования и планетообразования и их связи (см., например, недавние работы

[4, 5]⁴), а также позволяет составить представление о структуре поверхности звездного диска и свойствах планетных атмосфер [ссылки между ссылками 5 и 6]. Поиск планет в затменных двойных системах представляется перспективным, поскольку затменность повышает вероятность попадания наблюдателя в плоскость орбиты потенциальных планет, хотя и не может гарантировать совпадение плоскости орбиты планеты и плоскости орбит звезд друг относительно друга в подобной паре⁵.

Цель данной работы — привести список затменных переменных звезд для поиска связанных с ними планетных систем. Вероятность открытия планеты в подобной системе повышена по сравнению со случайно выбранной звездой, так как мы находимся в плоскости орбиты затменной двойной звезды. Существование планет в двойных системах, состоящих из звезд главной последовательности, подтверждено открытием планеты Кеплер-16, а совпадение плоскостей орбит звезд и планеты в этой системе дает надежду на то, что похожие двойные системы с планетами могут быть найдены среди других затменно-переменных звезд.

В работе [8, табл. 1] показано влияние планеты с размером и массой, равной размеру и массе Юпитера, на лучевую скорость и яркость (при затмениях) звезд различных масс. Из таблицы видно, что максимальное изменение блеска для звезд с массами, равными массе Солнца, составляет 0.01^m , увеличиваясь до 1^m при уменьшении масс затмеваемых звезд до $0.1M_{\odot}$. Карлики поздних спектральных классов, таким образом, являются наиболее удобными кандидатами для поиска планет транзитным методом.

Относительно недавно на одном из телескопов системы телескопов-роботов “Мастер” были проведены тестовые наблюдения с целью определить пригодность данной системы для поиска

экзопланет [9]. Наблюдалось прохождение планеты TrES-2 по диску родительской звезды, и было продемонстрировано, что система телескопов-роботов способна строить кривые блеска с точностью, по крайней мере, не хуже 0.005^m . Следовательно, система, подобная системе “Мастер”, способна открыть транзитным методом планету рядом со звездой, масса которой равна массе Солнца, и тем более около оранжевого или красного карлика при достаточной видимой яркости последнего.

Любители астрономии также могут принимать посильное участие в исследовании внесолнечных планет. Вплоть до настоящего времени открыть планету в системе другой звезды могли только профессиональные наблюдатели. В то же время уже открытые планетные системы могут оказаться доступными для дальнейшего изучения любителями⁶. Наблюдения любителей могут быть важными, так как профессиональным наблюдателям нередко бывает достаточно трудно найти наблюдательное время для длительного непрерывного изучения одного объекта. Предлагаемый в нашей работе список затменных двойных звезд может быть использован, в том числе, и любителями астрономии для возможного открытия новых планет.

2. ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ ПЛАНЕТЫ

2.1. Образование планетных систем

В настоящее время надежно установлено, что звезды образуются в результате коллапса газово-пылевых облаков, в ходе которого размеры последних уменьшаются в 10^7 – 10^8 раз. В силу сохранения углового момента вращение облаков в ходе коллапса ускоряется, достигая, как правило, критического. Это обеспечивает кратность большинства наблюдаемых звезд [12]. Изучение молодых тесных двойных звезд установило, что большая полуось наиболее тесных из них ограничена нижним пределом $a/R_{\odot} > 6(M_1/M_{\odot})^{1/3}$, где M_1 — масса первичной компоненты [12]. Эта величина большой полуоси отвечает удельному моменту $l \approx 2 \times 10^{18} ((M_1 + M_2)/M_{\odot})^{2/3} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$. Оценки показали, что удельный угловой момент одиночных звезд главной последовательности, вращающихся со скоростью, меньшей критической, не превышает $2 \times 10^{17} M/M_{\odot}$. Очевидно, что протозвезды с удельными угловыми моментами, меньшими моментов самых тесных молодых двойных звезд, но большими удельных моментов одиночных молодых

⁴Физические вопросы образования планетных систем и философские вопросы развития цивилизаций в этих системах рассматривались еще в 80-х гг. прошлого века, например, в работе [6].

⁵См., например, работу [7], в которой рассмотрена возможная эволюция системы Кеплер-16, а также ссылки в этой работе. Планетная система, как и сама двойная звезда, могла возникнуть как из одного протозвездного диска, так и в результате динамического взаимодействия в родительском звездном скоплении. В последнем случае плоскость орбиты планеты необязательно окажется в плоскости орбиты двойной звезды даже после длительной эволюции системы. Тем не менее в случае системы Кеплер-16 сценарий возникновения системы, состоящей из двух звезд и, по крайней мере, одной планеты, из одного диска предпочтителен [7]. В то же время необходимо помнить, что открытие именно такой системы может быть эффектом селекции, поскольку транзитным методом нельзя было бы найти планету около затменной двойной звезды, если плоскость ее орбиты существенно не совпадала бы с плоскостью орбиты двойной звездной системы.

⁶Любители астрономии могут как непосредственно наблюдать прохождения экзопланет по дискам наблюдаемых ими светил [10], так и принимать участие в обработке кривых блеска, полученных профессиональными наблюдателями [11].

звезд (со скоростями вращения, меньшими критических для них), должны превращаться в звезды с планетными системами [8]. Известное эмпирическое распределение двойных звезд по большим полуосям их орбит $dN = 0.2d \lg(a/R_\odot)$ [12] и, следовательно, по удельным угловым моментам $dN = 0.4d \lg l$ позволяет установить, что до 30%–40% всех одиночных звезд солнечного типа могут обладать планетами [8].

Около половины молодых звезд оказались имеющими вокруг себя пылевые диски [13]. Эти звезды могут со временем иметь и планетные системы вокруг себя за счет коагуляции пыли. Важно, что 5 кандидатов в планеты найдены в тесных двойных звездах [14]. Это означает, что наличие звездного спутника не препятствует образованию планетной системы около звезды. В последнее время стало ясно, что планеты могут возникать и в ходе эволюции тесных двойных звезд [4, 15]. Наличие аккреционно-декреционного диска в этих системах обеспечивается, как обычно, избытком углового момента [16]. Однако эволюция этого диска при наличии вращающегося компонента остается пока неизученной, а возможность формирования планетных систем в таких дисках — неясной. Наблюдательное исследование возможности образования и существования планетных систем в двойных звездах и их свойств необходимо для прогресса в этом вопросе.

Знание минимального момента, необходимого для формирования планетной системы, позволяет оценить соотношение между характерными величинами массы и большой полуоси орбиты планеты, аккумулирующей избыточный угловой момент: $M\sqrt{GMa} = 2 \times 10^{17} \text{ г см}^2\text{с}^{-1}$, где M — масса планеты, a — большая полуось ее кеплеровской орбиты, G — постоянная гравитации. Последнее условие может быть переписано как

$$\frac{a}{R_\odot} > 4400 \frac{m_J}{M_\odot}, \quad (1)$$

где m_J — масса Юпитера. Эта величина большой полуоси орбиты планеты отвечает орбитальному периоду $\sim 100 \frac{M}{M_\odot} \left(\frac{m_J}{m}\right)^3$ лет. Очевидно, что большинство известных до настоящего времени планет имеют меньшие орбитальные периоды. Таким образом, либо эти системы обладают другими более далекими планетами, либо часть вещества протопланетного диска была потеряна в ходе его эволюции. Действительно, 115 обнаруженных “Кеплером” планетных систем имеют по крайней мере две планеты, 45 — три планеты, 8 — четыре планеты, и две системы имеют соответственно 5 и 6 планет [17]. Наличие многих планет во внесолнечных планетных системах, вероятно, является типичным, и лишь эффекты наблюдательной селекции

препятствуют их обнаружению. А само наличие планет — следствие большой вязкости протопланетного диска, ведущей к его существенному расширению.

Размер протопланетного диска значительно превышает размер аккреционного диска, образующегося при указанных выше величинах удельного углового момента $2 \times 10^{17} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$, обеспечивающих его формирование. Интересно, что планеты, образование протопланетных аккреционно-декреционных дисков для формирования которых необходимо, возникают фактически во внешних, чисто декреционных частях этих дисков. Образование декреционной, протяженной части диска — необходимое следствие избытка углового момента в протозвездном и протопланетном облаке. Образование планет в протяженных декреционных дисках объясняет появление планет с большими полуосями до 100 а.е. [18, 19].

2.2. Поиск экзопланет

Поиск планетных систем является очень сложной и был вплоть до последнего времени недоступной задачей. Большое отношение масс и размеров центральной звезды и даже массивной планеты с массой и радиусом порядка массы и радиуса Юпитера осложняют как спектральные, так и фотометрические методы поиска такой планеты около звезды с массой и размером порядка солнечных. Характерная амплитуда лучевых скоростей центральной звезды $\Delta v \simeq 3 \times 10^6 \frac{m}{M} a^{-\frac{1}{2}} \text{ см с}^{-1}$, где m — масса планеты, M — масса центральной звезды, a — большая полуось орбиты планеты в а.е. [8]. При минимальных наблюдаемых на сегодня $a \approx 0.02$ а.е. [20], $M = M_\odot$ и $m = 10^{-3} M_\odot$ имеем $\Delta v = 200 \text{ м с}^{-1}$, а при характерных $a = 1$ а.е. [20] — только 30 м с^{-1} . А глубина затмений, создаваемых при подходящей ориентации орбиты планеты, не превосходит 0.01^m для центральной звезды с массой порядка солнечной и планеты с размерами порядка юпитерианских [8]. Глубина затмений быстро растет с уменьшением массы центральной звезды главной последовательности до 1^m , однако, если учесть, что при уменьшении массы звезды быстро падает ее видимая яркость, то звезды с массой порядка солнечной остаются наилучшими объектами для поиска внесолнечных планетных систем [21]. Действительно, большинство обнаруженных на сегодня планет принадлежат таким звездам, и обнаружены они затменным методом.

Обнаружение первой внесолнечной планеты около звезды 51 Пегаса [22] открыло постоянно пополняемый мир планет, который на сегодня

насчитывает более 1000 членов [23]. Число затменных кандидатов миссии “Кеплер” достигает 1235 [24] в момент написания этой работы и продолжает быстро расти⁷. Обнаружение внесолнечных планет оживило интерес к их поиску и поиску причин их образования и эволюции. Если в 1994 г. в новостях астрофизики (препринты *astro-ph*) появилось только три работы, посвященные планетам, то в 2010 г. таких работ было 301. Орбитальные периоды известных внесолнечных планет заключены в пределах 2 дня – 20 лет, а массы – от 0.01 до 10 масс Юпитера [25]. Интересно, что для внесолнечных планет, обнаруженных на сегодня, характерны высокие значения орбитальных эксцентриситетов, достигающих до 0.2 даже для планет с орбитальными периодами всего в несколько дней и до 0.9 для планет с периодами около года [25]. Это объясняется, вероятно, эффектами наблюдательной селекции, поскольку современным методам обнаружения планет доступны только наиболее массивные из них. А взаимодействие планет с массой около 10 масс Юпитера и с радиусами, близкими к радиусу Юпитера, способно придать значительный эксцентриситет даже орбитам планет с большими полуосями $\sim 10R_{\odot}$, что соответствует орбитальному периоду ~ 3 дней.

Наблюдаемое распределение планет с большими полуосями 0.05–0.5 а.е. близко к $dN \sim \frac{1}{a}$ [24, рис. 5]. Оно пока практически совпадает с функцией, которая описывает эффект очевидной наблюдательной селекции, учитывающей вероятность затмения планетой родительской звезды $\sim \frac{r}{a}$, где r – радиус звезды. Это означает, что распределение внесолнечных массивных планет, обнаруживаемых “Кеплером”, близко к плоскому: $\frac{dN}{d \lg a} \simeq \text{const}$.

Характерные массы обнаруживаемых планет на сегодня составляют 10^{-5} – $10^{-2}M_{\odot}$ [26]. А массы красных карликов-спутников G-звезд превышают $\sim 0.1M_{\odot}$. Спутники с массами 0.01–0.1 M_{\odot} , т.е. коричневые карлики, редки [27]. Вероятные причины этого – отсутствие условий фрагментации протозвездных облаков на столь малые фрагменты в совокупности с достаточно большой вязкостью маломассивного протопланетного декреционного диска, исключающего формирование тел с массами порядка масс коричневых карликов. Однако в последнее время коричневые карлики с массами 0.02–0.08 M_{\odot} были найдены в молодых звездных скоплениях путем специально поставленной программы их поиска [28, 29]. Они являются яркими,

только будучи молодыми, что осложняет обнаружение старых коричневых карликов.

Большинство обнаруженных на сегодня планетных систем имеет по одной близкой к звезде планете. Близость обуславливается наблюдательной селекцией, облегчающей обнаружение именно таких планет. Легко показать, что столь близкие планеты имеют очень малый угловой момент, и они не способны решить проблему избытка углового момента звезды. Естественно ожидать, что число планет в этих планетных системах не ограничивается одной, а существуют и более удаленные планеты, обнаружение которых осложняется малой вероятностью затмений ими своих центральных звезд и большими орбитальными периодами. Поэтому к настоящему времени обнаружено только несколько планетных систем с двумя планетами, две – с тремя [30–32], одна с четырьмя [33] и одна с пятью [34]⁸.

2.3. Эволюция планетных систем

В ходе эволюции планетных систем со многими планетами последние могут гравитационно взаимодействовать друг с другом, приобретая при этом значительные скорости. Их величина может

достигать предела $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$, где m и r – масса

и радиус планеты соответственно. Важно, что эти скорости могут превосходить величину локальной орбитальной скорости планеты на ее орбите во-

круг центральной звезды $\sqrt{\frac{GM}{a}}$, где M – масса центральной звезды и a – большая полуось орбиты планеты. Планета при этом покидает свою планетную систему. Для звезды с массой и радиусом порядка массы и радиуса Юпитера эта скорость составляет порядка 30–40 км с⁻¹, а большая полуось орбиты – порядка 1 а.е. В итоге в Галактике неизбежно возникает поле “свободных” планет, число которых может быть сопоставимо с числом звезд. Толщина планетного диска Галактики исходя из их характерной пространственной скорости может составлять ≈ 1500 пк. Обнаружение этих планет представляется на сегодня особенно сложной задачей. Возможно, что использование эффекта микролинзирования [35] будет продуктивно для их поиска.

Распространенность эффективного взаимодействия планет между собой объясняет еще одно свойство обнаруживаемых на сегодня внесолнечных планетных систем. Их орбиты имеют высокий

⁷К моменту чтения авторами корректуры статьи это количество выросло до более, чем 2300.

⁸Данные телескопа “Кеплер” обновляются очень быстро, поэтому количество планет раходится в приводимых в настоящей работе ссылок на статьи, вышедшие даже приблизительно в одно и то же время.

эксцентриситет, достигающий до ~ 0.9 [36]. Средний эксцентриситет составляет при этом ~ 0.2 . Это значительно выше эксцентриситетов большинства орбит планет Солнечной системы. Очевидная причина высоких эксцентриситетов внесолнечных планет — их большие массы, которые при гравитационном взаимодействии планет между собой способны существенно изменить их орбитальные скорости. А последние — результат наблюдательной селекции.

Высокие эксцентриситеты орбит наблюдаемых внесолнечных планет, появляющиеся в результате их взаимодействия, значительно осложняют поиск других планет в системах, где планеты обнаружены методом затмений. Причина проста. Взаимодействия планет в родительских системах не только создают заметные эксцентриситеты орбит этих планет, но и изменяют наклоны орбит планет около центральных звезд. В итоге планетные орбиты оказываются некомпланарными. Это затрудняет и часто исключает обнаружение других планет в системах с планетами, найденными затменным методом.

Минимальные орбитальные периоды внесолнечных планет достигают величины 1–3 дня [36]. Эта величина при солнечной массе центральной звезды соответствует большой полуоси орбиты 5–9 солнечных радиусов. Такое ограничение на величину большой полуоси может быть связано либо с испарением планетообразующей пыли на более близких к звезде расстояниях, либо с ограничением на размеры планеты с массой порядка массы Юпитера, накладываемым ее полостью Роша. Чернотельная температура планеты на расстоянии $5R_{\odot}$ от звезды со светимостью, равной светимости Солнца, составляет около 2500 К. Минимальное расстояние планеты с массой и радиусом, равными массе и радиусу Юпитера, от звезды с массой, равной массе Солнца, позволяющее избежать заполнения этой планетой своей полости Роша, составляющей ~ 3 солнечных радиуса. Последняя величина действительно близка к наблюдаемому минимальному расстоянию планеты от своей звезды. Причиной появления столь близких к своим звездам планет может быть их диффузия в протопланетном диске [37]. Диффузия эффективна и для столь близких планет вследствие их больших масс и высоких параболических скоростей.

Очевидно, что звезды, обладающие планетными системами, за время жизни Вселенной эволюционируют, если их масса превышает $\approx 0.8M_{\odot}$. В ходе этой эволюции они расширяются, становясь гигантами и сверхгигантами с радиусом $\sim 1000R_{\odot}$. Планеты погружаются в оболочку этих гигантов. Формализм общих оболочек [12] позволяет оценить радиусы орбит выживших планет уже вокруг вырожденных карликов. Если принять массу звезды

равной массе Солнца, радиус — равным $1000R_{\odot}$, массу углеродно-кислородного вырожденного ядра — $\sim 0.6M_{\odot}$, то большая полуось орбиты планеты около карлика будет $0.6 \frac{m_p}{m_J} R_{\odot}$. Радиусы планет с массами 1– $10M_J$ составляют $\sim 0.1R_{\odot}$ [38].

Поэтому при $a > 0.25 \left(\frac{m_p}{m_J} \right)^{1/3}$ планета не будет заполнять свою полость Роша в паре с карликом. Следовательно, при $m_p \gtrsim 0.5M_J$ система планета–карлик будет разделенной с орбитальным периодом порядка $\sim 1.5 \left(\frac{m_p}{m_J} \right)^{1.5}$ ч.

Вырожденные карлики с планетами в роли спутников могут быть сравнительно легко обнаружены. Конечно, пока остается неясной возможность выживания планет на стадии общей оболочки, когда они на какое-то время оказываются погруженными в горячую оболочку красного сверхгиганта [39]. Другим сценарием появления планеты около вырожденного карлика может быть эволюция катаклизмических двойных [4]. Эти обстоятельства и наличие пыли около вырожденных карликов [40] делают поиск планет около вырожденных карликов актуальным⁹. Примером планетной системы, прошедшей фазу общей оболочки, является звезда горизонтальной ветви HIP 13044 [41], находящаяся на стадии горения гелия в ее ядре. Большая полуось орбиты планеты около этой звезды $\approx 30R_{\odot}$.

2.4. Эффекты селекции при поиске экзопланет

До последнего времени планеты обнаруживались около одиночных звезд. Таким образом, они были продуктом коллапса облаков с угловыми моментами, превосходящими моменты, аккумулируемые одиночными звездами главной последовательности, но недостаточными для образования двойных звезд. Возможность образования планет в двойных звездных системах до последнего времени оставалась открытой. Наличие спутника может, в принципе, приводить к эффекту “разрядки” — механизму для уменьшения массы аккреционного диска до пределов, недостаточных для образования планет. Обнаружение планеты Кеплер-16 показало, что возможность формирования планет в двойных звездных системах не исключается.

Важное значение для планетологии имеет обнаружение планеты около компоненты центральной

⁹Например, планета обнаружена около неактивной в настоящий момент времени катаклизмической переменной QS Vir [ссылка, которую нужно поместить между ссылками 40 и 41 в имеющейся версии файла]. Затменных катаклизмических переменных известно довольно много, их изучению посвящен проект “Eclipsing Dwarf Novae Project”.

двойной звездной системы HD 132563 [42]. Две звезды солнечной массы в этой системе разделены расстоянием ≈ 400 а.е. Одна из компонент имеет планету с орбитальным периодом 1544 дня ($a = 2.6$ а.е.), а другая компонента — спектроскопическая двойная с орбитальным периодом, большим ~ 15 лет ($a \gtrsim 7$ а.е.). Предварительный анализ показал, что частота встречаемости планет около компонент широких двойных и тройных систем близка к частоте встречаемости планет около одиночных звезд [42]. Это важное обстоятельство позволяет теперь утверждать, что практически все звезды имеют планетные системы, ибо ранее было установлено, что практически все звезды кратные [12, 43]. Таким образом, компоненты широких двойных систем в плане образования планет неотличимы от одиночных звезд [44]. То же самое относится и к тесным двойным звездам. Фактически планеты являются продуктами гравитационной конденсации части вещества остатков аккреционно-декреционных дисков, образование которых сопровождает процесс формирования практически всех звезд. Причина образования последних — большой угловой момент исходных газо-пылевых облаков.

Основная часть обнаруженных до настоящего времени планет имеет в качестве центральной звезды звезду главной последовательности с массой порядка массы Солнца. Это является результатом эффекта наблюдаемой селекции и, возможно, отсутствия планет около звезд с массами, заметно превосходящими солнечную массу. Однако у долгоживущих звезд с массой, меньшей солнечной, планеты известны. К числу таких звезд может быть отнесен M-карлик GJ 1214 с массой $\sim 0.16M_{\odot}$ [45]. Малые размеры центральной звезды ($0.2R_{\odot}$) позволили обнаружить столь небольшую планету путем затмений. Кроме того, планеты с массами $4-5M_J$ были обнаружены около гигантов спектрального класса K [46]. Орбитальные периоды этих планет ≈ 700 дней. Эти планеты были найдены спектральным методом.

3. ВОЗМОЖНЫЕ КАНДИДАТЫ В СИСТЕМЫ С ЭКЗОПЛАНЕТАМИ

Открытие¹⁰ планеты Кеплер-16 дает наблюдательное основание для поисков планет в системах двойных звезд. Затменно-переменные двойные звезды могут представлять особый интерес, поскольку плоскость орбиты в подобных системах параллельна или почти параллельна лучу зрения. Поэтому вероятность того, что планета (если она

существует в данной системе) может быть обнаружена транзитным методом, значительно повышается по сравнению со звездой, выбранной случайным образом.

Для поиска затменно-переменных звезд-кандидатов для наблюдений прохождений планет по дискам компонент мы использовали каталог затменно-переменных звезд [47]. Этот каталог представляет собой выборку затменно-переменных звезд из общего каталога переменных звезд [48]. Мы выбирали затменно-переменные звезды главной последовательности поздних спектральных классов (G–M). В таблице приведен результат выборки из каталога [47]. Мы также даем ниже краткое описание этих звезд.

HP Aur. По результатам высокоточных фотоэлектрических измерений, проведенных в 2002–2003 гг., в работе [49] были уточнены значения параметров этой системы (известной в течение нескольких десятков лет): радиусы компонент $R_1 = 1.05R_{\odot}$ и $R_2 = 0.82R_{\odot}$, их светимости $L_1 = 1.1L_{\odot}$ и $L_2 = 0.46L_{\odot}$, спектральные классы — G2V+G8V. Было также найдено третье тело с массой $M_3 \sin^3 i_3 = 0.17M_{\odot}$ и орбитальным периодом $P_3 = 13.7$ лет, эксцентриситет орбиты этого тела равен 0.7, большая полуось $a_3 \sin^3 i_3 = 7$ а.е., возраст системы оценен в 9.5 млрд. лет.

HS Aur. Система изучалась значительно меньше, чем HP Aur.

AD Boo. В одной из последних работ [50] по данной системе подтверждены основные выводы более ранних ее исследований. AD Boo состоит из двух компонент спектральных классов F6 и G0, светимость обеих компонент превышает светимость Солнца и, следовательно, эта звезда — одна из самых трудных для открытия планеты в нашем списке.

GU Boo. Система открыта недавно [51], и она не содержится в каталоге [47]. Это очень тесная (орбитальный период $\approx 0.49^d$) двойная звезда, состоящая из двух красных карликов; очень похожа на YY Gem.

SV Cam. Эта двойная звезда использовалась для исследования пятен на поверхности компонент (см., например, работу [52]).

AY Cam. Система, возраст которой составляет более половины времени жизни компонент на стадии главной последовательности [53]. Светимость обеих звезд приблизительно в 10 раз превышает светимость Солнца, что усложняет поиск планет, вращающихся вокруг этой звезды.

CM Dra. Эта двойная звезда состоит из двух красных карликов и изучена довольно хорошо (см., например, недавние исследования пятен компонент [54, 55]). Массы и радиусы компонент

¹⁰Позднее также были открыты планеты Кеплер-34 (AB) b и Кеплер-35 (AB) b, также обращающиеся вокруг двойных звезд [ссылка между ссылками 46 и 47].

Затменно-переменные звезды из каталога [47], находящиеся на главной последовательности и имеющие спектральные классы G–M

Название	m	P_{orb}	Спектральный класс	α	δ
HP Aur	10.85	1.4228 ^d	G0	05 ^h 10 ^m 21.783 ^s	+35°47'46.63''
HS Aur	10.70	9.8154	G8V + G8V	06 51 18.477	+47 40 24.17
AD Boo	9.80	1.0344	G0	14 35 12.780	+24 38 21.35
SV Cam	8.40	0.5931	G5V + G3V	06 41 19.079	+82 16 02.43
AY Cam	9.69	2.7350	G0	08 25 51.786	+77 13 06.85
CM Dra	12.87	1.2684	M4Ve	16 34 20.410	+57 09 43.94
YY Gem	8.91	0.8143	M1Ve + M1Ve	07 34 37.406	+31 52 09.79
UV Leo	8.90	0.6001	G0V + G2V	10 38 20.771	+14 16 03.66
FL Lyr	9.27	2.1782	G0V	19 12 04.862	+46 19 26.86
UX Men	8.80	4.1811	G1V + G1V	05 30 03.184	−76 14 55.35
EW Ori	9.90	6.9369	G0	05 20 09.147	+02 02 39.97
TY Pyx	6.85	3.1986	G5 + G5	08 59 42.722	−27 48 58.69

Примечание. Приведены звездная величина в максимуме блеска m и орбитальный период P_{orb} . Спектральный класс указан для главной звезды, либо для обеих звезд (если он известен).

системы $M_1 = 0.2310 \pm 0.0009M_{\odot}$, $M_2 = 0.2141 \pm 0.0010M_{\odot}$, $R_1 = 0.2534 \pm 0.0019R_{\odot}$, и $R_2 = 0.2396 \pm 0.0015R_{\odot}$. Эти значения были получены в результате обработки 30-летнего ряда наблюдений (в том числе с применением метода тайминга затмений), и они очень точны.

YY Gem. Одна из самых исследованных затменных двойных звезд — Кастор С. Кастор — кратная иерархическая звезда, состоящая из трех спектроскопических двойных звезд, компоненты которых являются двойными (см., например, [56]).

UV Leo. Система известна в течение нескольких десятков лет. В 80-х гг. 20 в. система испытала изменение орбитального периода [57, 58], природа которого до сих пор окончательно неясна. В работе [59] получены следующие параметры системы: температуры звезд $T_1 = 6000 \pm 100$ К и $T_2 = 5970 \pm 20$ К, массы $M_1 = 0.976 \pm 0.067M_{\odot}$ и $M_2 = 0.931 \pm 0.052M_{\odot}$, большая полуось $a = 3.716 \pm 0.048R_{\odot}$, радиусы $R_1 = 1.115 \pm 0.052R_{\odot}$ и $R_2 = 1.078 \pm 0.051R_{\odot}$. Также исследовалась активность компонент системы [60].

FL Lyr. Звезда известна в течение нескольких десятков лет и попадает в поле зрения телескопа “Кеплер” (см., например, [61]), ввиду чего поиск планет в ней другими наблюдателями не имеет смысла в период работы “Кеплера”. Однако в будущем подобные наблюдения могут иметь смысл, так как по аналогии с Кеплер-16 можно ожидать, что затмения звезд планетой также могут прекращаться на несколько десятков лет.

UX Men. Звезда южного неба. Известна в течение десятков лет, однако наблюдалась относительно мало.

EW Ori. Система состоит из звезд с массами $1.17M_{\odot}$ и $1.12M_{\odot}$, орбиты звезд имеют небольшой эксцентриситет ($e = 0.0785 \pm 0.002$). Возраст EW Ori составляет ≈ 2 млрд. лет [62].

TY Pyx. В этой системе исследовалась корональная активность компонент (см., например, [63]).

Помимо приводимых в таблице, в каталоге [47] содержится около 150 затменных двойных звезд главной последовательности со спектральными классами O–F. Поскольку звезды ранних спектральных классов очень яркие, мы не можем предложить их в качестве потенциальных кандидатов для поиска внесолнечных планет, так как затмение такой звезды планетой с размером, равным размеру Юпитера, вызовет уменьшение блеска звезды на величину $< 0.01^m$, что потребует достаточно сложной техники наблюдений. Однако эти звезды могут быть использованы для поиска тел звездных масс — например, как в системе HP Aur. Кроме того, мы хотели бы заметить, что спектральный класс большинства звезд в каталоге [47] не был определен. Это означает, что среди них также могут оказаться системы, состоящие из звезд главной последовательности поздних спектральных классов. Таким образом, изучение затменных двойных звезд может оказаться интересным также и с точки зрения поиска внесолнечных планет. Важно помнить, что орбита планеты Кеплер-16 испытывает значительные возмущения от гравитационного воздействия двойной звезды, вокруг которой она обращается, и затмения могут прекращаться на длительные промежутки времени. Следовательно,

даже если система была хорошо изучена и регулярно наблюдается в течение длительного промежутка времени, все равно остается ненулевая вероятность обнаружить планету в подобной системе, так как имеющиеся наблюдения могут приходиться как раз на такой промежуток времени, когда затмения отсутствуют.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы предлагаем список затменных двойных звезд, вероятность обнаружения планет в которых достаточно высока. Предлагаемые нами объекты подходят для изучения при помощи аппаратуры, доступной как широкому кругу профессиональных астрономов наблюдателей, так и любителям астрономии.

Обнаружение планет в нескольких двойных звездах (как около компонент, так и около тесных двойных звезд в целом) дает основание полагать, что двойственность, кратность звездных систем не исключает процесса планетообразования как около компонент этих систем, так и около систем в целом. Часть двойных звезд для земного наблюдателя являются затменными системами, т.е. мы находимся достаточно близко к плоскости их орбит, что позволяет их компонентам периодически затмевать друг друга. Если компоненты затменных двойных или сами эти системы обладают планетными системами, то планеты последних могут также, периодически проходя по диску родительских звезд, ослаблять блеск последних. Степень совпадения плоскостей орбит планет и двойных остается пока неизвестной. Поэтому “обязательность” затмений планетами неясна. Однако накопление информации о затмениях планетами компонент двойных позволит со временем оценить частоту образования планет в кратных звездных системах.

Примечание к статье

По теме данной работы авторами был сделан доклад на Общественном семинаре астрофизиков имени Я.Б. Зельдовича. В ходе обсуждения доклада сотрудник ГАИШ МГУ С.В. Антипин предложил в дополнение к нашему списку использовать в качестве кандидатов для поиска внесолнечных планет затменные двойные звезды с кривыми блеска типа EW [47, 48] с орбитальными периодами $\lesssim 0.5^d$ и глубиной минимума $\gtrsim 0.5^m$: затменные переменные с профилем кривой блеска типа EW должны быть звездами главной последовательности, малый период гарантирует выбор относительно небольших и неярких звезд, а значительная глубина затмений означает, что наблюдатель находится близко к плоскости орбиты наблюдаемой им двойной звезды. В каталоге [47] содержится несколько сотен систем с кривой блеска типа EW.

Среди них значительное количество звезд соответствует требуемым критериям по величине орбитального периода и по глубине затмения, довольно много систем ярче 10^m , доступных для наблюдения с относительно простой аппаратурой.

Если поиск экзопланет в затменных двойных будет проводиться с использованием автоматизации процесса наблюдений, то звезды с кривой блеска типа EW представляют собой группу очень перспективных объектов для поиска планетных систем, связанных с этими звездами. Важно, что предлагаемая группа объектов довольно многочисленна, и она относительно равномерно распределена по небу. Поэтому при автоматизированном поиске планет при помощи камер широкого поля системы, подобной системе “Мастер”, возможен выбор полей звезд, содержащих сразу несколько объектов нужного типа¹¹. В то же время мы хотели бы заметить, что двойная система из двух звезд главной последовательности с орбитальным периодом $\approx 0.5^d$ может состоять как из звезд спектральных классов G–M, так и звезд класса F или A. Таким образом, в наугад выбранной короткопериодической системе с кривой блеска типа EW без определения спектрального класса компоненты системы могут оказаться ярче Солнца и, соответственно, глубина затмений компонент планетой может оказаться слишком маленькой для обнаружения тела планетных размеров, поэтому первоочередное внимание должно быть уделено системам с известным спектральным классом.

Авторы выражают благодарность Д. В. Денисенко за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kepler. A Search for Habitable Planets* (NASA, Ames Research Center), <http://kepler.nasa.gov>.
2. *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*, <http://exoplanet.eu>.
3. L. R. Doyle, J. A. Carter, D. C. Fabrycky, *et al.*, *Science* **333**, 1602 (2011).
4. А. В. Тутуков, А. В. Федорова, *Астрон. журн.* (2012, в печати).
5. A. L. Kraus, M. J. Ireland, L. A. Hillenbrand, and F. Martinache, *Astrophys. J.* **745**, 19 (2011).
6. М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **87** (12), 1199–1220 (2010).
7. М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **88** (12), 1139–1163 (2011).
8. А. В. Тутуков, *Научн. информ. Астрон. совет АН СССР* **63**, 161 (1987).
9. J. Winn, S. Albrecht, J. Johnson, *et al.*, *Astrophys. J. (Letters)* **741**, L1 (2011).
10. А. В. Тутуков, *Астрон. журн.* **64**, 1264 (1987).

¹¹ Тем не менее рассмотрение вопроса о технической осуществимости предлагаемой задачи на конкретном устройстве не входит в цели настоящей работы.

11. К. И. Иванов, Е. С. Горбовской, С. А. Язев и др., в сб.: *Труды XI конференции молодых ученых "Гелио- и геофизические исследования" БШФФ-2009*, (Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2009), с. 244.
12. *Astronomy Online: Exoplanet: Amateur Detection*, <http://astronomyonline.org/Exoplanets/AmateurDetection.asp>.
13. *Planet Hunters*, <http://www.planethunters.org/>.
14. А. Г. Масевич, А. В. Тутуков, *Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М.: Наука, 1988).
15. А. В. Тутуков, *Астрон. журн.* **72**, 397 (1995).
16. G. Chauvin, H. Beust, A.-M. Lagrange, and A. Eggenberger, *Astron. and Astrophys.* **528**, A8 (2011).
17. A. Eggenberger, *EAS Publ. Ser.* **42**, 19 (2010).
18. А. В. Тутуков, Я. Н. Павлюченков, *Астрон. журн.* **81**, 881 (2004).
19. D. Latham, J. Rowe, S. Quinn, *et al.*, *Astrophys. J. (Letters)* **732**, L24 (2011).
20. A. Boss, *Astrophys. J.* **731**, 74 (2011).
21. J. Wright, O. Fakhouri, G. Marcy, *et al.*, *Publs Astron. Soc. Pacif.* **123**, 412 (2011).
22. J. Weingrill, e-Print arXiv:1109.6724 [astro-ph.SR] (2011).
23. А. Тутуков, *Астрон. журн.* **69**, 1275 (1992).
24. M. Mayor and D. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995).
25. M. Zhao, J. D. Monnier, X. Che, *et al.*, *Publs Astron. Soc. Pacif.* **123**, 964 (2011).
26. W. Borucki, D. Koch, G. Basri, *et al.*, *Astrophys. J.* **736**, 19 (2011).
27. Borucki, W. J., Koch, D. G., EGU General Assembly 2012, held 22-27 April, 2012 in Vienna, Austria., p. 6561 (2012).
28. C. Moutou, M. Mayor, G. Lo Curto, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **527**, A63 (2011).
29. J. Hartman, G. Bakos, G. Torres, *et al.*, *Astrophys. J.* **742**, 59 (2011).
30. J. Schneider, C. Dedieu, P. Le Sidaner, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **532**, A79 (2011).
31. A. Scholz, K. Muzic, V. Geers, *et al.*, *Astrophys. J.* **744**, 6 (2012).
32. K. Muzic, A. Scholz, C. Geers, *et al.*, *Astrophys. J.* **744**, 134 (2012).
33. D. Fischer, E. Gaidos, A. Howard, *et al.*, *Astrophys. J.* **745**, 21 (2012).
34. W. Cochran, D. Fabrycky, G. Torres, *et al.*, *Astrophys. J.* **197**, 7 (2011).
35. J. Steffen, N. Batalha, W. Borucki, *et al.*, *Astrophys. J.* **725**, 1226 (2010).
36. T. Forveille, X. Bonfils, X. Delfosse, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* (2012, в печати); e-Print arXiv:1109.2505 [astro-ph.SR] (2011).
37. K. von Braun, T. Boyajian, T. ten Brummelaar, *et al.*, *Astrophys. J.* **740**, 49 (2011).
38. T. Sumi, K. Kamiya, D. Bennett, *et al.*, *Nature* **473**, 349 (2011).
39. M. Mayor, M. Marmier, C. Lovis, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* (2012, в печати); e-Print arXiv:1109.2497 [astro-ph.SR] (2011).
40. A. Socrates, B. Katz, S. Dong, and S. Tremaine, *Astrophys. J.* **750** (2), 106 (2012); e-Print arXiv:1110.1644 [astro-ph] (2011).
41. S. Tremaine and S. Dong, *Astron. J.* **143**, 94 (2012); *Astron. J.* **143** (4), 94 (2012).
42. E. Villaver and M. Livio, *Astrophys. J.* **661**, 1192 (2011).
43. J. Farihi, *AIP Conf. Proc.* **1331**, 193 (2011).
44. S.-B. Qian, W.-P. Liao, L.-Y. Zhu, *et al.*, *MNRAS Lett.* **401**, p. L34 (2010).
45. E. Bear, N. Soker, and A. Harpaz, *Astrophys. J. (Letters)* **733**, L44 (2011).
46. S. Desidera, E. Carolo, R. Gratton, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **533**, A90 (2011).
47. Е. И. Попова, А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, *Письма в Астрон. журн.* **8**, 160 (1982).
48. G. Duchene, *Astrophys. J. (Letters)* **709**, L114 (2010).
49. Z. Berta, D. Charbonneau, J. Bean, *et al.*, *Astrophys. J.* **736**, 12 (2011).
50. William F. Welsh, Jerome A. Orosz, Joshua A. Carter, *et al.*, *Nature* **481** (7382), 475–479 (2012).
51. S. Gettel, A. Wolszczan, A. Niedzielski, *et al.*, *Astrophys. J.* **745**, 28 (2012).
52. O. Yu. Malkov, E. Oblak, E. A. Snegireva, and J. Torra, *Astron. and Astrophys.* **446**, 785 (2006).
53. N. N. Samus, O. V. Durlevich, E. V. Kazarovets, *et al.*, *GCVS – General Catalog of Variable Stars* (GCVS database), CDS Catalogues, B/gcvs, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/>.
54. В. С. Козырева, А. В. Кусакин, Х. Ф. Халиуллин, *Письма в Астрон. журн.* **31**, 131 (2005).
55. J. V. Clausen, G. Torres, H. Bruntt, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **487**, 1095 (2008).
56. M. Lopez-Morales and I. Ribas, *Astrophys. J.* **631**, 1120 (2005).
57. S. V. Jeffers, *Astrophys. and Space Sci.* **304**, 153 (2006).
58. R. Williams, J. Sowell, and W. Van Hamme, *Astron. J.* **128**, 1319 (2004).
59. J. C. Morales, I. Ribas, C. Jordi, *et al.*, *Astrophys. J.* **691**, 1400 (2009).
60. A. V. Kozhevnikova, M. A. Svechnikov, and V. P. Kozhevnikov, *Astrophysics* **52**, 512 (2009).
61. Ж. П. Аносова, В. В. Орлов, М. В. Чернышов, *Письма в Астрон. журн.* **15**, 554 (1989).
62. E. Wunder, *Inform. Bull. Var. Stars* **4179**, 1 (1995).
63. L. Snyder, *Inform. Bull. Var. Stars* **4624**, 1 (1998).
64. D. P. Kjurkchieva and D. V. Marchev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **381**, 663 (2007).
65. K. Conroy, S. Engle, R. Ballouz, and A. Prsa, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **42**, 282 (2010).
66. J. Molenda-Zakowicz, A. Frasca, D. W. Latham, and M. Jerzykiewicz, *Acta Astron.* **57**, 301 (2007).
67. J. V. Clausen, H. Bruntt, E. H. Olsen, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **511**, A22 (2010).
68. E. Franciosini, R. Pallavicini, and G. Tagliaferri, *Astron. and Astrophys.* **399**, 279 (2003).
69. O. Yu. Malkov, E. Oblak, E. A. Avvakumova, J. Torra, *Astron. Astrophys.* **465**, 549–556 (2007).