

УДК 523.4

А. П. Видьмаченко, В. Н. Крушевская, Ю. Г. Кузнецова

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680, Киев, ГСП, ул. Академика Заболотного 27

### Изменение отражательной способности внесолнечной планеты-гиганта при ее обращении вокруг центральной звезды

*В течение последних семи лет внесолнечные планеты-гиганты (ВПГ) были обнаружены вокруг 65 ярких звезд (типичный блеск  $4^m$ — $8^m$ ). Почти вся информация о них получена из точных измерений радиальных скоростей. Для ВПГ возле звезды HD 209458 известно отношение «масса—радиус»:  $R/M = 1.55/0.69(R_{Ю}/M_{Ю}) = 2.25(R_{Ю}/M_{Ю})$ . Используя это отношение, мы оценили звездные величины ВПГ возле 65 звезд. Полученные значения визуальных величины ВПГ находятся в пределах  $25.1^m$ — $12.8^m$ . Для 21 звезды это составляет 0.003—0.047 % потока от центральной звезды. Поэтому такие системы можно попытаться зарегистрировать с помощью фотометрических наблюдений. Наиболее предпочтительны для этого планетные системы возле звезд  $\tau$  Boo, HD 121504, HD 217107, HD 187123, HD 209458, HD 83443, HD 75289, 51 Peg и HD 46375.*

*ЗМІНИ ВІДБИВНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОЗАСОНЯЧНОЇ ПЛАНЕТИ-ГІГАНТА ПРИ ЇЇ ОБЕРТАННІ НАВКОЛО ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЗІРКИ, Видьмаченко А. П., Крушевська В. М., Кузнецова Ю. Г. — Протягом останніх семи років позасонячні планети-гіганти (ППГ) були виявлені навколо 65 яскравих зірок (типовий блиск  $4^m$ — $8^m$ ). Майже всю інформацію про них отримано з точних вимірювань радіальних швидкостей. Для ППГ біля зірки HD 209458 відоме значення відношення «маса—радіус»:  $R/M = 1.55/0.69(R_{Ю}/M_{Ю}) = 2.25(R_{Ю}/M_{Ю})$ . Використовуючи це значення, ми оцінили зоряні величини ППГ біля 65 зірок. Отримані значення візуальної величини ППГ лежать у межах  $25.1^m$ — $12.8^m$ . Для 21 зірки це становить 0.003—0.047 % потоку від центральної зірки. Тому такі системи можна спробувати зареєструвати за допомогою фотометричних спостережень. Найпридатніші для таких спостережень планетні системи розміщені біля зірок  $\tau$  Boo, HD 121504, HD 217107, HD 187123, HD 209458, HD 83443, HD 75289, 51 Peg і HD 46375.*

*BRIGHTNESS VARIATIONS OF AN EXTRASOLAR GIANT PLANET ROTATING AROUND ITS CENTRAL STAR, by Vid'machenko A. P., Krushevskaya V. N., Kuznetsova Yu. G. — Extrasolar giant planets (EGPs) were discovered around 65 stars (visual magnitude  $4^m$ — $8^m$ ) in the last seven years. Almost all information on them was derived from precise measurements of radial velocities. The mass-radius ratio for EGP orbiting the star HD 209458 is known to be  $R/M = 1.55/0.69(R_J/M_J) = 2.25(R_J/M_J)$ . This ratio*

enabled us to estimate magnitudes of EGPs around 65 stars. These magnitudes lie between 25.1<sup>m</sup> and 12.8<sup>m</sup>. The planet's contribution is 0.003—0.047 % of the star radiation for 21 stars. Therefore, the systems of this kind can be accessible for photometric observations. The planets orbiting the stars  $\tau$  Boo, HD 121504, HD 217107, HD 187123, HD 209458, HD 83443, HD 75289, 51 Peg, and HD 46375 are most suitable for these observations.

#### МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАНЕТ ВОЗЛЕ ЗВЕЗД

К середине 1990 гг. прошлого столетия основными методами, используемыми для обнаружения планет возле ближайших к Солнцу звезд, предполагались следующие [31]: получение прямых изображений, метод радиальных скоростей, астрометрическое обнаружение, фотометрический метод или метод покрытий (транзита). Рассмотрим их детальнее.

Метод прямого обнаружения основан на факте, что в оптическом диапазоне планеты практически не имеют собственного излучения [35] и лишь отражают свет центральных звезд. Поэтому этим методом могут быть обнаружены только планеты с чрезвычайно большими линейными размерами. Главная проблема при реализации такой методики заключается в том, что звезда является намного более яркой, чем планета. Если принять, что  $L_3$  — яркость звезды,  $A$  — альbedo планеты,  $R_{\text{пл}}$  — ее радиус,  $\Delta$  — расстояние планеты от звезды и  $\Phi(t)$  — орбитальный фазовый фактор, то яркость планеты  $L_{\text{пл}}$  может быть определена из выражения

$$L_{\text{пл}} = (AL_3/8)(R_{\text{пл}}/\Delta)^2 \cdot \Phi(t), \quad (1)$$

где  $\Phi(t) = 1 - \sin i \sin(2\pi t/P)$ ,  $i$  — угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости,  $P$  — орбитальный период планеты. Однако, например, для Юпитера отношение яркостей  $L_{\text{пл}}/L_3$  очень мало и приблизительно равно  $2.5 \cdot 10^{-9}$  [31].

Метод радиальных скоростей, или доплеровский метод измерения смещения спектральных линий звезды. На сегодняшний день подавляющее большинство экзопланет обнаружено благодаря применению именно этой методики [3, 10, 11, 18, 25—28, 31, 34—36], базирующейся на измерении радиальных скоростей перемещения звезд. Радиальная скорость является составляющей пекулярной скорости звезды. Она равна скорости ее смещения по линии, соединяющей звезду и наблюдателя. Наличие периодической кеплеровской составляющей в изменении звездного спектра, наложенной на радиальную составляющую скорости, указывает на возможное наличие возле невидимого спутника звезды. Это вызвано тем, что наличие гравитационно связанной со звездой планеты будет перемещать центр звезды данной системы относительно центра масс (барицентра). Так как звезда намного массивней планеты, то и ее смещение вокруг барицентра будет значительно меньшим. Из-за огромных различий в световых потоках от звезды и планеты наземные поиски преимущественно полагаются именно на не прямое обнаружение планет, использующее свет звезды для измерения гравитационного влияния планеты на звезду.

При перемещении звезды к наблюдателю весь ее спектр будет смещен в синюю сторону (так называемое синее смещение). Эквивалентное этому смещению значение радиальной скорости принято называть отрицательным. Если же звезда удаляется от нас, тогда спектр звезды будет смещен в красную часть (красное смещение) и значение скорости будет положительным. Таким образом, наблюдая сдвиг спектральных деталей, можно определить направление перемещения звезды. При условии, что вокруг звезды обращается одна или несколько планет, ее местоположение в пространстве

будет испытывать определенное смещение относительно центра масс всей системы. Смещение будет тем большим, чем больше масса планетного тела. Полученный на Земле спектр такой звезды с невидимым массивным спутником показал бы периодический сдвиг то в красную, то в синюю часть.

Таким образом, гравитационное влияние планетных тел вокруг звезды должно оказывать влияние на радиальную составляющую скорости звезды. Однако такие возмущения доплеровской скорости очень малы, и поэтому их чрезвычайно трудно обнаружить без специализированного спектрометра, позволяющего обнаружить крошечные доплеровские смещения линейчатого спектра звезды [13, 15, 17, 29, 34, 37]. К примеру, если бы мы смогли наблюдать спектр Солнца из его ближайших окрестностей, то за 11.86 земных лет нам пришлось бы регистрировать периодическое изменение радиальной скорости перемещения Солнца с амплитудой всего лишь около 12.5 м/с, которое вызвано обращением Юпитера вокруг Солнца.

В предположении круговых орбит наблюдаемый радиальный компонент скорости звезды вокруг барицентра системы представляется выражением [14]

$$V_* = (M_{\text{пл0}} \cdot \sin i / M_{\text{зв}} + M_{\text{пл0}}) [G(M_{\text{зв}} + M_{\text{пл0}}) / a]^{1/2} \quad (2)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная. Записав орбитальный период как

$$P^2 = 4\pi^2 a^3 / [G(M_{\text{зв}} + M_{\text{пл0}})], \quad (3)$$

и подставив (3) в (2), получим

$$V_* = (2\pi G / P)^{1/3} [M_{\text{пл0}} \sin i / (M_{\text{зв}} + M_{\text{пл0}})^{2/3}]. \quad (4)$$

Здесь наблюдаемыми величинами являются  $V_*$  и  $P$ , по которым можно вычислить значение  $M_{\text{пл0}} \sin i$ , дающее нижнюю границу массы планеты. В более общем случае нужно учитывать еще и эксцентриситет орбиты  $e$ . Обозначив через  $\mu$  обратную безразмерную массу планеты  $M_{\text{зв}} / M_{\text{пл}}$ , получим [3]

$$V_* = (2\pi G M_{\text{зв}} / P)^{1/3} \sin i / [\mu(1 + 1/\mu)^{2/3} (1 - e^2)^{1/2}]. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что значение  $V_*$  не зависит от расстояния до звезды. Так что этот метод намного эффективнее, чем рассматриваемый ниже астрометрический, где преимущество при наблюдениях отдается очень близким к нам звездам.

В тех случаях, когда известен угол наклона орбиты, можно использовать наблюдения доплеровских скоростей для определения точной массы экзопланеты. А вместе с проведением фотометрических наблюдений появляется возможность предсказать момент времени очередного прохождения планеты по диску звезды. Такие дополнительные данные необходимы для подтверждения возможного открытия планеты и для определения ее орбитального периода. Знание массы и радиуса планеты позволяет вычислить ее среднюю плотность и некоторые другие физические параметры.

**Астрометрический** метод основан на точном астрометрическом контроле за небольшим видимым смещением звезды возле барицентра системы [3, 16, 21, 31, 38]. То есть, и этот метод является непрямым. Движение одной планеты вокруг звезды по круговой орбите заставляет звезду двигаться по некоторой траектории в обратном направлении вокруг барицентра системы «звезда + планета». Если это движение спроектировать на небесную сферу, то орбита звезды окажется эллиптической с большой полуосью

$$\theta = M_{\text{пл}} a / (d M_{\text{зв}}), \quad (6)$$

где  $\theta$  выражена в секундах дуги, большая полуось  $a$  дана в астрономических

единицах,  $M_{\text{пл}}$  — масса планеты и  $M_{\text{зв}}$  — масса звезды, выраженные в данном случае в массах Солнца,  $d$  — расстояние в парсеках от наблюдателя до звезды. Как видно, значение  $\theta$  пропорционально массе планеты и ее орбитальному радиусу и обратно пропорционально расстоянию до звезды. Например, при наблюдении Солнечной системы с расстояния 10 пк наличие Юпитера проявилось бы в периодическом смещении положения Солнца с максимальной амплитудой  $\theta = 500$  мкс дуги и периодом 11.86 лет, Земли — с амплитудой меньше 0.3 мкс дуги и периодом 1 год. В настоящее время астрометрическая погрешность подобных измерений составляет несколько миллисекунд дуги для ближайших к нам звезд [16].

Астрометрическая методика особенно чувствительна к относительно длинным орбитальным периодам ( $P > 1$  земного года). Поэтому астрометрические измерения удачно дополняют измерения, выполненные с помощью метода радиальных скоростей, которым удобнее исследовать планеты, находящиеся на небольших расстояниях от центральных звезд (т. е., с небольшим значением орбитального периода). К тому же рассматриваемый метод можно применять и к горячим, и к быстро вращающимся звездам, для которых метод радиальной скорости ограничен. Еще одно преимущество перед доплеровским методом, в котором вычисляется лишь нижний предел истинной массы ( $M_{\text{пл0}} \sin i$ ), проявляется в возможности по формуле (3) определить истинную массу планеты  $M_{\text{пл0}}$ , при условии, что  $M_{\text{зв}}$  определяется по спектральному классу звезды, большая полуось — по ее спектроскопии, а  $d$  — по параллаксу [38].

**Метод транзита.** Во время прохождения планеты по диску звезды должно наблюдаться ослабление потока света от звезды [6, 12, 22, 23]. Продолжительность уменьшения яркости может составлять от нескольких часов до суток в зависимости от расстояния планеты до звезды. Амплитуда ослабления должна зависеть от относительных размеров планеты и звезды. Чтобы зафиксировать это явление, необходимо выполнение трех условий.

1. Орбитальная плоскость должна быть точно перпендикулярной к картинной плоскости для земного наблюдателя. Вероятность случайной геометрической ориентации равна

$$P_G = R_{\text{зв}}/a. \quad (7)$$

Для Юпитера она составляет 0.1 %, а для Земли — 0.5 %. Поскольку звезду необходимо непрерывно наблюдать в течение по крайней мере одного периода обращения планеты, то метод транзита малоэффективен для больших  $a$  и благоприятным для малых.

2. Продолжительность транзита должна быть достаточно большой. Ее значение находят по формуле

$$D_T = (P/\pi)(R_{\text{зв}}/a). \quad (8)$$

Для Юпитера  $D_T$  равно 25 ч, а для Земли — 13 ч.

3. Фотометрическая точность  $\eta$  проведенных наблюдений должна быть выше, чем глубина затемнения

$$\Delta F/F = (R_p/R_{\text{зв}})^2. \quad (9)$$

Для планет с радиусами Юпитера и Земли  $\Delta F/F$  равно 1 % и 0.01 % соответственно. При наземных наблюдениях в лучшем случае достигается точность 0.03 %, а в космосе фотометрическая точность ограничена только фотонным шумом и шумом звездной активности. Фотонный шум может быть уменьшен до значения 0.001 % при наблюдении звезды пятой звездной величины на 1-м телескопе с экспозицией 1 мин. А шум звездной активности достигает значения порядка 0.01 % с часовой экспозицией.

Поэтому, используя метод транзита, юпитероподобные планеты можно обнаружить и с земной поверхности, а планеты, подобные Земле, лучше наблюдать из космоса [19]. Вычисления значений  $\eta$  и времени между двумя последовательными прохождениями дадут оценку радиуса планеты и расстояние планеты от звезды, а значит и температуру на ее видимой поверхности.

К концу 1990-х гг. было разработано еще несколько наблюдательных подходов к обнаружению ВПГ и к определению физических характеристик их атмосфер. Они включают спектральное исследование звезд с предполагаемыми планетами с изучением особенностей спектров прошедшего через частично прозрачную планетную атмосферу излучения звезды в течение транзита планеты по ее диску [7, 8, 32, 33, 36], а также проведение ИК-наблюдений [9, 36, 39].

Так, авторы работы [12] предложили так называемую «прямую» технику обнаружения ВПГ. В их случае с помощью спектрометра должен регистрироваться результирующий спектр излучения от планеты и от звезды. Дальше из предположения, что излучение изотропное и что отраженный спектр планеты есть точная копия звездного спектра в участке длин волн  $\lambda\lambda$  466.8—498.7 нм авторы [12] пытались обнаружить вклад планеты. На двух телескопах наблюдалась система  $\tau$  Boo. Эта звезда — одна из самых ярких ( $4.5^m$ ) и горячих (F7 V) родительских звезд, а ее планета имеет одну из самых маленьких главных полуосей. Такие три свойства делают  $\tau$  Boo многообещающим объектом для использования предложенной техники. Однако ее предварительные исследования пока не дали положительного результата.

Второй подход основывается на необходимости наблюдать спектр звезды, частично «переработанный» в планетной атмосфере в момент прохождения планеты по диску звезды. При этом звездный поток будет проходить через оптически тонкую лимбовую часть атмосферы планеты. Теоретические исследования показывают, что спектральные особенности поглощения планетной атмосферой могут иметь значения  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  от среднего уровня спектра звезды [12, 33]. Успешные наблюдения по такой методике дадут возможность построить вертикальную модель облаков на планете и могут дать важную методику спектральной диагностики, например, метана  $\text{CH}_4$ , который является хорошим температурным индикатором для верхних слоев планетной атмосферы.

Третья разработанная методика базируется на использовании Кекского ИК-интерферометра, позволяющего применить дифференциальный способ обнаружения и получения характеристик ВПГ непосредственно из наблюдаемого спектра. Данный подход основан на наличии различия между относительно гладким ИК-спектром звезды и спектром планеты с сильными водными и, возможно, с метановыми полосами поглощения в ИК-спектре экзопланет.

В работах [5, 20, 24, 30] представлен еще один новый метод обнаружения и исследования планетных тел возле звезд Галактики и Магеллановых Облаков, использующий методику гравитационного линзирования. Если приведенные выше подходы в настоящее время применимы только к звездам в пределах нескольких десятков парсек от Солнца, то гравитационное микролинзирование имеет потенциал обнаруживать планетные системы на расстояниях до нескольких килопарсек.

Ниже мы приводим обоснование возможности реализации метода исследования экзопланет с применением методики фотометрических наблюдений со счетом фотонов на умеренных и даже на малых телескопах с одно- или двухканальным фотометром.

## НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ

Свет центральной звезды, отраженный от атмосфер внесолнечных планет гигантов, формируясь на разных высотах в разных длинах волн, содержит информацию о физических условиях, химическом составе планетных атмосфер и их облачных слоев. Ожидается, что атмосферы ВПГ состоят главным образом из молекул водорода, гелия, воды, метана, других гидрокарбонатных соединений. Поэтому в отраженном свете на основной спектр центральной звезды должны накладываться линии и полосы поглощения этих молекул, расположенных преимущественно в красном и ИК-диапазонах. Известно, что относительные интенсивности молекулярных линий и полос обеспечивают диагностику основных атмосферных составляющих, температуры и ее вертикальной структуры. Успешное использование такой диагностики требует спектральных наблюдений с отношением «сигнал/шум» более 1000 и разрешением  $\Delta\lambda \leq 10$  нм. Выполнение таких требований является вполне реальным для спектроэлектрофотометра с фотоэлектронным умножителем, работающим по методу счета фотонов [1].

Первый околозвездный объект с массой около массы Юпитера был обнаружен приблизительно семь лет назад [25, 34]. С тех пор к ноябрю 2001 г. различными методами найдено более 70 ВПГ возле 65 звезд (таблица) с массами 0.21—11 масс  $M_{Ю}$ , большими полуосями орбит 0.038—8 а. е. [10, 22, 28, 34]. Эти объекты названы «планетами», несмотря на то, что они по некоторым характеристикам существенно отличаются от планет Солнечной системы [34], прежде всего обнаруженные массивные планеты очень близко находятся от центральных звезд и имеют (в подавляющем большинстве) высокоэксцентриситетные орбиты.

До недавнего времени все, что было известно относительно этих планет, следовало из точных измерений радиальных скоростей по высокоточной спектроскопии. Дальше по хорошо изученным характеристикам центральной звезды и по значению периода обращения ВПГ определялся нижний предел массы планеты

$$M_{пл} = M_{пл0} \sin i, \quad (10)$$

(с точностью до синуса угла наклона орбиты ВПГ к картинной плоскости), главная полуось и долгота периастра. Ситуация кардинально изменилась с открытием транзита компаньона звезды HD 209458 по ее диску, когда удалось обнаружить периодическое уменьшение потока излучения от звезды почти на 1.6 %. Сопоставление изменений фотометрических наблюдательных данных со временем при прохождении планеты по диску дало точное значение радиуса планеты  $R_{пл}$ , ее массу  $M_{пл}$  и угол  $i$  наклона орбиты [12, 22, 23, 26]. Полученные значения ( $R_{пл} = (1.55 \pm 0.10)R_{Ю}$ ,  $M_{пл} = (0.69 \pm \pm 0.07)M_{Ю}$ ,  $i = 85.9^\circ \pm 0.5^\circ$ ) согласуются с водородно-гелиевыми моделями газовых планет с эффективными температурами 900—1600 К, освещенных центральной звездой [8, 29, 32].

В предположении беспорядочности ориентации планет на орбитах возле звезд вероятность наблюдения транзитов планет по дискам звезд по разным оценкам составляет 10 % [12, 35]. Ограничения по точности фотометрии, продолжительности и непрерывности охвата возможных кандидатов указывают на то, что большинство ВПГ, которые могут быть обнаружены в следующие несколько лет по их транзитам, должны иметь размеры Юпитера, орбиты с коротким периодом обращения (а значит, и близко располагаться к своим звездам) и будут иметь поверхностные температуры 900—2000 К. Такие высокие температуры на «видимой» поверхности, относительно небольшие массы и наличие водорода в качестве основной атмосферной

Некоторые параметры звезд и планет возле них

Звезда	$\alpha$	$\delta$	$S_p$	$m_{\text{взв*}}$	$m_{\text{абс*}}$	Период, сут	$\frac{M_{\text{пл}}}{M_{\text{Ю}}}$	$\Delta$ , а. е.	$L$ , ПК	$m_{\text{пл}}$	$N$
$\epsilon$ Eri	03 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> 57 <sup>s</sup>	-09°27'29"	K2 V	3.73 <sup>m</sup>	6.19 <sup>m</sup>	2502.1	1.2	3.3	3.22	22 <sup>m</sup> 18	0.04
Lal 21185	11 03 20.19	35 58 12	M2 V	7.49	10.47	2118.5	0.9	2	2.53	25.05	0.09
14 Her	16 10 23.59	43 49 18	K0.5	6.67	5.38	1650	3.3	2.5	18.15	23.79	0.14
16 Cyg	19 41 51.8	50 31 03	G2.5V	6.2	4.12	804	1.5	1.72	26.07	23.07	0.17
47 UMa	10 59 29.30	40 25 46	G0.5	5.05	4.4	1088.4	2.8	2.11	13.49	21.91	0.17
HD 50554	06 54 42.85	24 14 45	F8	6.84	4.38	1279	4.9	2.38	31.03	23.56	0.20
HD 106252	12 13 29.50	10 02 32	G0	7.41	4.54	1500	6.8	2.61	37.44	24.09	0.21
HD 190228	20 03 00.77	28 18 25	G5 IV	7.3	3.33	1127	4.99	2.31	62.11	23.94	0.22
$\mu$ Ara	17 44 08.70	-51 50 03	G3IV-V	5.15	4.23	743	1.97	1.65	15.3	21.74	0.23
HR 5568	14 57 28	-21 24 56	K4 V	5.74	6.85	400	0.75	1	6.01	21.94	0.32
HD 10697	01 44 55.82	20 04 59	G5 IV	6.29	3.91	1083	6.59	2	30	22.42	0.35
$\epsilon$ Ret	04 16 29.03	-59 18 08	K2IVa	4.44	3.14	426	1.43	1.18	18.2	20.53	0.36
HD 213240	22 31 00.49	-49 25 58	G4 IV	6.81	3.76	759	3.7	1.6	40.75	22.87	0.37
HD 19994	03 12 46.44	-01 11 46	F8 V	5.07	3.32	454	2	1.3	22.38	21.12	0.37
HD 82943	09 34 50.74	-12 07 45	G0	6.54	4.35	444.6	1.63	1.16	27.46	22.50	0.41
HD 177830	19 05 20.77	25 55 145	K0	7.17	3.32	391	1.28	1	59	22.98	0.47
$\iota$ Hor	02 42 33.47	-50 48 01	G0 V	5.4	4.45	320	2.26	1.2	15.52	21.20	0.47
HD 82943	09 34 50.74	-12 07 47	G0	6.54	4.35	442.6	2.24	1.16	27.46	22.27	0.50
HD 210277	22 09 29.49	-07 32 33	G0	6.63	4.92	437	2.2	1.10	22.02	22.25	0.56
HD 222582	23 41 51.53	-05 59 09	G V	7.7	4.58	576	5.4	1.35	42	23.11	0.68
$\nu$ And	01 36 49	41 24 39	F8 V	4.09	3.08	4.6171	0.72	0.68	15.95	19.48	0.69
HD 141937	15 52 17.49	-18 26 10	G2/G3V	7.25	4.63	658.8	9.7	1.49	33.46	22.46	0.82
HD 134987	15 13 28.67	-25 18 34	G5 V	6.45	4.46	260	1.58	0.78	25	21.57	0.89
HD 92788	10 42 48.53	-02 11 01	G V	7.31	4.76	341.7	3.86	0.97	32.32	22.25	1.05
Aldebaran	04 35 55.24	16 30 34	K5 III	0.86	-0.9	653.8	11	1.35	22.52	15.76	1.08
HD 8574	01 25 12.35	28 34 02	F8	7.12	3.9	228.8	2.2	0.76	44.15	21.94	1.17
79 Cet	02 35 19.93	-03 33 38	G5 IV	6.78	4.01	75.82	0.22	0.35	35.89	21.60	1.16
HD 37124	05 37 02.49	20 43 51	G4IV-V	7.68	5.09	155	1.04	0.59	33	22.48	1.20
HD 169830	18 27 49.48	-29 49 00	F8 V	5.9	3.1	230.4	2.96	0.82	36.32	20.68	1.22
HD 28185	04 26 26.27	-10 33 02	G5	7.8	4.81	385	5.4	1	39.56	22.56	1.24
HD 12661	02 04 34.29	25 24 51	K0	7.44	4.6	264.5	2.83	0.79	37	22.16	1.28

Окончание таблицы

Звезда	$\alpha$	$\delta$	$S_p$	$m_{\text{впз*}}$	$m_{\text{абс*}}$	Период, сут.	$\frac{M_{\text{пл}}}{M_{\text{Ю}}}$	$\Delta, \text{ а. е.}$	$L, \text{ ПК}$	$m_{\text{пл}}$	$N$
HD 52265	07 00 18.04	-05 22 02	G0 V	6.3	4.06	119.1	1.07	0.48	28.07	20.65	1.80
HD 89744	10 22 10.56	41 13 46	F7 V	5.74	2.73	256	7.2	0.88	40	20.02	1.93
GJ 3021	00 16 12.68	-79 51 04	G6 V	6.59	5.36	133.82	3.32	0.49	17.62	20.16	3.72
HD 80606	09 22 37.57	50 36 13	G5	9.06	5.23	111.78	3.41	0.44	58.38	22.37	4.71
$\psi$ 2Pav	20 40 02.64	-60 32 40	F8 V	5.12	3.13	42.5	0.69	0.25	25.03	18.37	5.00
HD 74156	08 42 25.11	04 34 42	G0	7.61	3.56	51.61	1.56	0.28	64.56	20.48	7.08
70 Vir	13 28 26.54	13 47 12	G5 V	4.97	3.08	116.6	6.6	0.43	23.93	17.76	7.60
$\rho$ CBor	16 01 03.39	33 18 51	G2 V	5.41	4.29	39.645	1.5	0.23	16.72	17.91	9.97
HD 6434	01 04 40.15	-39 29 18	G3 IV	7.72	4.69	22.09	0.48	0.15	40.32	20.12	10.9
Gliese876	22 53 13.4	-14 15 13	M4 V	10.17	11.8	61.02	2.07	0.21	4.72	22.24	14.7
HD 192263	20 13 59.85	-00 52 01	K2 V	7.79	6.3	23.87	0.76	0.15	19.9	19.86	14.7
HD 168443	18 20 04.11	-09 35 34	G5	6.92	4.32	57.9	5.04	0.28	33.04	18.94	15.4
HD 108147	12 25 46.27	-64 01 19	F9G05	6.99	4.06	1088	0.34	0.10	38.57	18.71	20.3
HD 38529	05 46 34.91	01 10 06	G4	5.94	2.8	14.32	0.77	0.13	42.43	17.65	20.6
HD 114762	13 12 21.73	17 31 01	F9 V	7.3	4.91	84.03	11	0.3	30.06	18.94	22.0
HD 168746	18 21 49.78	-11 55 21	G5	7.95	4.78	6.4	0.24	0.07	43.12	19.08	35.2
HD 195019	20 28 17.28	18 46 12	G3IV-V	6.91	5.4	18.3	3.43	0.14	20.03	17.73	46.6
55 Cancri	08 52 37.60	28 20 02	G8 V	5.95	5.3	14.648	1.9	0.11	13.49	16.68	50.8
HD 130322	14 47 32.73	-00 16 53	K0 V	8.04	5.67	10.724	1.08	0.09	29.76	18.69	54.6
Gliese 86	02 10 14.42	-50 50 00	K1 V	6.17	5.77	15.83	3.6	0.11	12.02	16.44	77.9
HD 46375	06 33 12.62	05 27 47	K1 IV	7.94	5.32	3.024	0.25	0.04	33.44	18.00	94.3
51 Peg	22 57 27.98	20 46 08	G2.5V	5.49	4.94	4.2293	0.47	0.05	12.88	15.52	96.9
HD 75289	08 47 40.38	-41 44 12	G0 V	6.35	4.04	3.5096	0.42	0.05	28.94	16.28	107
HD 83443	09 37 11.82	-43 16 20	K0 V	8.2	5.01	2.986	0.35	0.04	43.54	17.85	137
HD 209458	22 03 10.7	18 53 04	G0 V	7.65	4.29	3.524	0.69	0.05	47.08	17.27	141
HD 187123	19 46 57.45	34 25 16	G5	7.9	4.4	3.097	0.52	0.04	50.06	17.47	147
HD 217107	22 58 15.45	-02 23 42	G8 IV	6.16	3.32	7.11	1.28	0.04	37.02	14.98	295
HD 121504	13 57 17.23	-56 02 24	G2 V	7.54	1.87	64.6	0.89	0.32	13.61	16.14	363
$\tau$ Boo	13 47 17.34	17 27 22	F7 V	4.5	3.25	3.3128	3.87	0.05	17.79	12.82	467



составляющей подразумевают довольно большие значения атмосферных масштабов высоты. Измерения, которые следует выполнять для исследования отраженного от планеты излучения, являются дифференциальными во времени и в разных длинах волн.

Опыт наших фотометрических наблюдений с одно- и двуканальным фотометром [1] указывает на возможность уверенно зарегистрировать не только общее падение блеска системы «звезда—планета» при транзите планеты по диску ( $\Delta I/I \approx 1.6\%$ ), но и относительные изменения яркости от небесных объектов с амплитудами несколько тысячных долей процента от основного потока излучения, вызванные орбитальным движением ВПГ. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы исследовать возможность регистрации относительных яркостных изменений, вызванных изменением вклада отраженного от ВПГ света в суммарный поток излучения от центральной звезды и планеты при движении планеты по орбите вокруг центрального светила:

$$F_{\text{от}} = F_{\text{пл}}(\lambda, t) / [F_{\text{пл}}(\lambda, t) + F_{\text{зв}}(\lambda, t)]. \quad (11)$$

#### КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ

Для планеты, близко расположенной к центральной звезде, орбитальный период довольно мал. Так, например, для планетной системы HD 209458 он составляет около 100 ч, а орбитальный радиус — 0.048 а. е. При подобных параметрах продолжительность прохождения планеты по диску звезды составляет около 3 ч и столько же — закрыто диском звезды. Приходящее к наблюдателю излучение от системы «звезда + планета» состоит из излучения самой звезды, собственного, преимущественно теплового излучения планеты и света звезды, рассеянного планетной атмосферой. Изменения наблюдаемого на Земле потока могут происходить при вариациях любого из перечисленных компонентов. Кроме того, изменения непосредственного потока от звезды могут иметь место при собственных колебаниях ее атмосферы и как результат покрытия диска звезды планетой. Возможное относительное уменьшение блеска из-за покрытия может составлять 0.2—2 % для разных значений радиусов планет и звезд.

Собственное излучение планеты при температурах 900—2000 К и при размерах, сравнимых с линейными размерами Юпитера, вносит незначительный относительный вклад в суммарный поток ( $10^{-6}$  и менее) практически во всех длинах волн. Наблюдаемый интегральный блеск самой планеты также не остается постоянным. Это вызвано рядом факторов, от которых зависит блеск небесного объекта, лишенного собственного свечения и светящегося преимущественно за счет отраженного от центральной звезды света.

Изменения блеска планеты происходят вследствие движения вокруг звезды и изменения геометрии ее видимости из Земли. Согласно работе В. В. Шаронова [4] основными из этих факторов являются следующие:

1) изменение расстояния планеты от звезды  $\Delta$ , что сопровождается изменением звездной освещенности на самой планете по закону обратных квадратов;

2) изменение расстояния  $L$  планеты от земного наблюдателя, что также изменяет яркость светила обратно пропорционально квадрату этого расстояния;

3) изменения фазы планеты  $\alpha$ , т. е. угла, под которым из планеты видны Земля и центральное светило. При изменении фазы с уменьшением видимой из Земли площади освещенной части диска уменьшается и блеск планеты; с фазой изменяется не только площадь видимого серпа, но и яркость его поверхности по некоторому закону  $\Psi(\alpha)$ ;

4) изменение угла  $D$  между направлением на наблюдателя и плоскостью экватора планеты из-за значительного сжатия массивной быстро вращающейся планеты-гиганта. С изменением угла  $D$  может изменяться и средняя яркость диска из-за возможного значительного широтного различия яркости на экваторе и на полюсах.

При практической обработке фотометрических наблюдений используется следующее выражение для звездной величины планеты:

$$V_{\text{пл}} = -2.5 \lg \pi G R_{\text{пл}}^2 E_{\text{зв}} + 5 \lg L \cdot \Delta - 2.5 \lg \Psi(\alpha), \quad (12)$$

где  $G$  — некоторый коэффициент пропорциональности,  $R_{\text{пл}}$  — значение радиуса в случае сферической планеты,  $E_{\text{зв}}$  — значение освещенности, создаваемое центральной звездой на расстоянии в 1 а. е.

Первый член этого равенства

$$g = -2.5 \lg \pi G R_{\text{пл}}^2 E_{\text{зв}} \quad (13)$$

представляет собой *абсолютную звездную величину планеты*, т. е. звездную величину планеты для наблюдателя, находящегося в центре центральной звезды при условии, что радиус-вектор планеты равен 1 а. е. Иначе говоря,  $g$  есть звездная величина планеты при  $\alpha = 0^\circ$  и  $L = \Delta = 1$  а. е. Второй член в уравнении (12) приводит величину  $g$  к истинным расстояниям планеты от Земли и центральной звезды. Третий член формулы (12) описывает изменение звездной величины планеты с фазовым углом.

#### ОЦЕНКА ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Точные расчеты изменения рассеянного планетой света при ее движении по орбите довольно громоздки [32, 33]. Однако для оценки порядка величины вполне достаточно рассмотреть различие между рассеянным светом от Ламбертовской сферы, освещенной звездой. При фазовом угле  $\alpha \approx 0$  планета обращена к наблюдателю полностью освещенным полушарием, а при фазе  $\alpha = 180^\circ$  — темным. При условии, что орбита планеты расположена перпендикулярно к картинной плоскости, в первом случае планета будет некоторое время закрыта диском звезды, а во втором — проходит по диску. Это позволяет зарегистрировать яркостные эффекты от покрытия звезды планетой. После выхода планеты из-за звезды и до момента начала ее прохождения по звездному диску мы будем наблюдать суммарный световой поток от звезды и от планеты. По оценкам [34] для фазового угла  $\alpha = 180^\circ$

$$F_{\text{пл}} / (F_{\text{зв}} + F_{\text{пл}}) \leq 10^{-7}. \quad (14)$$

Ясно, что для  $\alpha \approx 0^\circ$  это отношение может быть намного большим. Особенно сильное отличие должно иметь место при значительных размерах планеты и ее близком расположении к центральному светилу. Как видно из ряда оценок [12, 22, 23, 26, 28], соотношение между массой и радиусом ВПГ заметно отличается от юпитерианского. Так, например, для звезды HD 209458  $R_{\text{пл}} \approx 1.55 R_{\text{Ю}}$ ,  $M_{\text{пл}} \approx 0.69 M_{\text{Ю}}$ , и соответствующее отношение равно

$$R_{\text{пл}} / M_{\text{пл}} = 2.25 R_{\text{Ю}} / M_{\text{Ю}}. \quad (15)$$

Поскольку это практически единственная сегодня оценка значения линейных размеров ВПГ, то при дальнейших расчетах мы будем учитывать взаимосвязь их масс и радиусов с учетом соотношения (15). Следует подчеркнуть, что в приведенной выше таблице указаны только нижние

пределы значения массы ВПГ (см. формулу (10)). Поэтому результаты расчетов по формуле (12) (одиннадцатая графа таблицы) также представляют собой нижний предел видимого блеска планеты. При расчетах мы исходили из данных о физических параметрах Юпитера [1, 2, 4, 36] (его визуальной и абсолютной звездной величинах, геометрических размерах, массе, альбедо и т. п.) и переносили его на соответствующие расстояния от земного наблюдателя и от центральной звезды (графы 9, 10 в таблице) с учетом геометрии видимости планетного диска, различия абсолютного блеска звезды и Солнца и соотношения (6).

Анализ полученных данных показывает, что для 65 из обнаруженных возле ближайших к Солнцу звезд (до 62 пк) внесолнечные планеты гиганты представляют собой объекты с видимой звездной величиной от  $25.1^m$  до  $12.8^m$  (с учетом поправки (10)). И если бы эти планеты не были бы так близко расположены возле своих центральных звезд, то большинство из них вполне могли бы быть зарегистрированы из прямых снимков, полученных на современных телескопах. Однако, поскольку отраженный от ВПГ свет практически сливается со светом звезды, в большинстве случаев имеется только возможность попытаться зарегистрировать эти небольшие добавки  $\Delta m$  к блеску звезды.

Подавляющее число звезд с открытыми планетами имеют визуальные звездные величины  $V_{зв} = 4...8^m$  (рис. 1, а и пятая графа таблицы) и доступны для проведения фотометрических наблюдений с помощью фотозлектронных умножителей с использованием режима счета фотонов даже на небольших телескопах. На рис. 2 мы представили некоторую идеализированную картину возможного изменения количества фотонов  $N$  от «звезды + планеты» при условии, что в системе с параметрами типа  $\tau$  Boo ее более холодный спутник с массой около  $0.7M_{Ю}$  обращается вокруг центральной звезды по орбите, плоскость которой перпендикулярна к картинной плоскости для земного наблюдателя. Если от звезды регистрируется поток  $N = 10^6$  фотонов, то в момент выхода планеты из-за диска звезды суммарный поток должен увеличиться на 470 фотонов. При периоде обращения 100 ч время нахождения планеты за диском звезды (см. депрессии при фазах  $P_0 \approx 0...7^\circ$  и  $P_0 \approx 353...360^\circ$ ) и время прохождения планеты по диску звезды (депрессия при фазах  $P_0 \approx 173...187^\circ$ ) составляет около 3 ч.

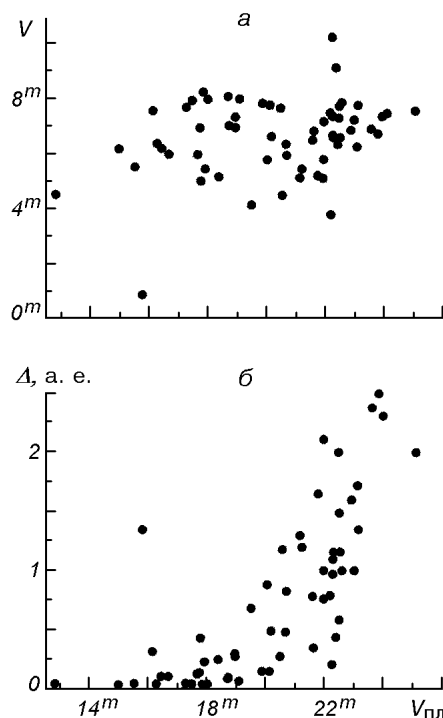


Рис. 1. Зависимость видимой величины внесолнечной планеты-гиганта от видимой величины звезды (а) и от среднего ее расстояния до центральной звезды (б)

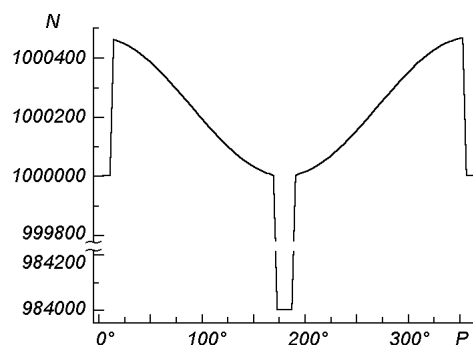


Рис. 2. Относительное изменение блеска системы «звезда + планета» при условии центрального прохождения планеты по диску звезды

### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ВПГ

Используя выражения (12), (15) и данные таблицы (графы 5—11) мы для 65 звезд с планетами оценили относительный вклад интегрального блеска от ближайшей к звезде ВПГ. В 12-й графе таблицы приводится число фотонов от планеты при условии, что от центральной звезды наблюдатель регистрирует  $10^6$  фотонов. Строки этой таблицы расположены по возрастанию этой величины, так что в последних строках оказались реальные кандидаты для регистрации не только центрального минимума (см. рис. 2), но и наиболее перспективные объекты для поиска и обнаружения орбитального изменения блеска ВПГ, то есть для получения фазовых кривых блеска планетных атмосфер.

На рис. 3 представлены звезды (в координатах «видимая звездная величина планеты  $V_{пл}$  — относительное количество фотонов от планеты  $N_{пл}$ »), для которых наземные фотометрические наблюдения со счетом фотонов на умеренных и даже на малых телескопах с одноканальными фотометрами вполне позволяют зарегистрировать относительное изменение блеска от ВПГ. Для некоторых звезд мы показали также относительные добавки блеска от планет в звездных величинах  $\Delta m$ . Всего таких звезд девять. Еще 5—12 звезд являются кандидатами для возможного изучения фотометрических свойств планет с помощью двухканальных фотометров.

Поскольку предположительно спектр ВПГ, как и спектр Юпитера [2, 9, 23, 33, 36] должен также иметь ряд особенностей (полосы поглощения метана ( $\lambda\lambda$  619, 725, 861, 886 нм), аммиака, воды и др. [9, 32, 33]), то с помощью широкополосных фильтров, центрированных на разные избранные

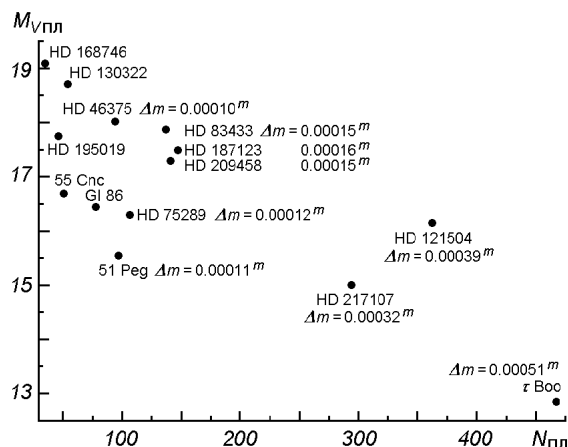


Рис. 3. Относительное количество фотонов от планет вокруг звезд, для которых наземные фотометрические наблюдения со счетом фотонов могут позволить зарегистрировать изменение блеска от внесолнечных планет-гигантов

длины волн, можно будет также получить общую характеристику изменения альbedo планет по спектру.

По нашему мнению, для исследования внесолнечных планет-гигантов перспективной является широко применявшаяся ранее для изучения планет Солнечной системы фотометрическая методика с помощью двухканального или многоканального фотометра. Работая с таким прибором, один из каналов которого исследует свет от системы «звезда + планета» в непрерывном участке спектра, а другой центрирован на очень мощную полосу поглощения атмосферы планеты (например  $\lambda$  886 нм), мы во втором случае получим практически «чистое» излучение от звезды. В первом же случае (например, в  $\lambda \approx 580$  или 680 нм, где альbedo диска Юпитера максимальное [2, 36]) мы должны зафиксировать четкую фотометрическую фазовую кривую ВПГ. Относительные изменения яркости небесных объектов будут иметь амплитуды несколько единиц в  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  от основного потока излучения. Некоторые особенности хода фазовой кривой могут позволить произвести ее реконструкцию, и при некоторых предположениях можно будет оценить наклон орбиты ВПГ вокруг центральной звезды даже при отсутствии наблюдаемого «транзита» планеты по диску.

1. Видьмаченко А. П. Изменение блеска небесных объектов при астрономических наблюдениях на горе Майданак // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 5.—С. 62—68.
2. Видьмаченко А. П., Неводовский П. В. Опытные наблюдения с охлаждаемой фотометрической головкой на базе фотоумножителя с InGaAs-фотокатодом // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 1.—С. 72—79.
3. Ксанфомалити Л. Ф. Поиск систем внесолнечных планет с помощью спектрального метода и астрометрии // Астрон. вестник.—1991.—33, № 6.—С. 547—552.
4. Шаронов В. В. Природа планет. — М.: Физматлит, 1958.—552 с.
5. Ashton C., Geraint L. Gravitational microlensing of planets: the influence of planetary phase and caustic orientation // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2001.—325, N 1.—P. 305—312.
6. Brown N. T. Transmission spectra as diagnostics of extrasolar giant planet atmospheres // Astrophys. J.—2001.—553, N 2.—P. 1006—1014.
7. Brown T., Charbonneau D., Gilliland R. et al. HST time-series photometry of the transiting planet of HD 209458 // Astrophys. J.—2001.—552, N 2.—P. 699—709.
8. Burrows A., Guillot T., Hubbard W. B., et al. On the radii of close-in giant planets // Astrophys. J. Lett.—2000.—534, N 1.—P. L97—L100.
9. Burrows A., Marley M. S., Sharp C. M. The near-infrared and optical spectra of methane dwarfs and brown dwarfs // Astrophys. J.—2000.—531, N 1.—P. 438—446.
10. Butler R. P., Marcy G. W., Williams E., et al. Three new “51 Pegasi-Type” planets // Astrophys. J. Lett.—1997.—474, N 2.—P. L115—L117.
11. Butler P., Tinney C., Marcy G., et al. Two new planets from the Anglo-Australian planet search // Astrophys. J.—2001.—555, N 1.—P. 410—418.
12. Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W., et al. Detection of planetary transits across a Sun-like star // Astrophys. J. Lett.—2000.—529, N 1.—P. L45—L48.
13. Chu Y.-H., Dunne B., Gruendl R., et al. A search for jovian planets around hot white dwarfs // Astrophys. J. Lett.—2000.—546, N 1.—P. L61—L64.
14. Cochran W. D., Hatzes A. P. Radial velocity searches for other planetary systems: Current status and future prospects // Astrophys. and Space Sci.—1996.—241, N 1.—P. 43—60.
15. Eisner J., Kulkarni S. Sensitivity of the radial velocity technique in detecting outer planets // Astrophys. J.—2001.—550, N 2.—P. 871—879.
16. Eisner J., Kulkarni S. Sensitivity of the astrometric technique in detecting outer planets // Astrophys. J.—2001.—561, N 2.—P. 1107—1114.
17. Endl M., Kuerstner, Els S., et al. The planet search program at the ESO Coudeline Echelle spectrometer. II. The alpha Centauri system: limits for planetary companions // Astron. and Astrophys.—2001.—374, N 2.—P. 675—683.
18. Fischer D., Marcy G., Butler P., et al. Planetary companions to HD 12661, HD 92788, Hd 38529 and variations in keplerian residuals of extrasolar planets // Astrophys. J.—2001.—551, N 2.—P. 1107—1114.
19. Frohlich C. Variability of the solar constant on time scales of minutes to years // J. Geophys. Rec.—1987.—92, N D1.—P. 796—800.
20. Han C., Chang H.-Y., An J.-H., et al. Properties of microlensing light curve anomalies induced

- by multiple planets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—328, N 3.—P. 986—995.
21. *Han I., Black D., Gatewood G.* Preliminary astrometric masses for proposed extrasolar planetary companions // *Astrophys. J. Lett.*—2001.—548, N 1.—P. L57—L59.
  22. *Henry G., Marcy G. W., Butler R. P., et al.* A transiting «51 Peg-like» planet // *Astrophys. J. Lett.*—2000.—529, N 1.—P. L41—L44.
  23. *Jha S., Charbonneau D., Garnavich P. M., et al.* Multicolor observations of a planetary transit of HD 209458 // *Astrophys. J. Lett.*—2000.—540, N 1.—P. L45—L48.
  24. *Lewis G.* Gravitational microlensing of stars with transiting planets // *Astron. and Astrophys.*—2001.—380, N 1.—P. 292—297.
  25. *Mayor M., Queloz D.* A Jupiter-mass companion to a solar-type star // *Nature.*—1995.—378, N 6555.—P. 355.
  26. *Mazeh T., Krymolowski Y., Rosenfeld G., et al.* The spectroscopic orbit of the planetary companion transiting HD 209458 // *Astrophys. J. Lett.*—2000.—532, N 1.—P. L55—L58.
  27. *Moutou C., Coustenis A., Schneider J., et al.* Search for spectroscopical signatures of transiting HD 209458b's exosphere // *Astron. and Astrophys.*—2001.—371, N 1.—P. 260—267.
  28. *Noyes R. W., Jha S., Korzennik S. G., et al.* The spectroscopic orbit of the planetary companion transiting HD 209458 // *Astrophys. J. Lett.*—1997.—483, N 2.—P. L111—L114.
  29. *Oetiker B., Duric N., McGraw J., et al.* A spectrophotometric technique for detecting companions of low-mass M stars // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2001.—113, N 784.—P. 703—709.
  30. *Peale S.* Probability of detecting a planetary companion during a microlensing event // *Astrophys. J.*—2001.—552, N 2.—P. 889—897.
  31. *Schneider J., Doyle L. R.* Ground based detection of terrestrial extrasolar planets by photometry: The case for CM Draconis // *Earth, Moon and Planets.*—1995.—71, N 1-2.—P. 153—173.
  32. *Seager S., Sasselov D. D.* Extrasolar giant planets under strong stellar irradiation // *Astrophys. J. Lett.*—1998.—502, N 2.—P. L157—L159.
  33. *Seager S., Sasselov D. D.* Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits // *Astrophys. J.*—2000.—537, N 2.—P. 916—921.
  34. *Stepinski T. F., Black D. C.* Statistics of low-mass companions to stars: implications for their origin // *Astron. and Astrophys.*—2000.—356, N 3.—P. 903—912.
  35. *Sudarsky D., Burrows A., Pinto P.* Albedo and reflection spectra of extrasolar giant planets // *Astrophys. J.*—2000.—538, N 2.—P. 885—903.
  36. *Tinney C., Butler P., Marcy G., et al.* First results from the Anglo-Australian planet search - A brown dwarf candidate and a 51 Peg-like planet // *Astrophys. J.*—2001.—551, N 1.—P. 507—509.
  37. *Torres G.* Substellar companion masses from minimal radial velocity or astrometric information: a Monte Carlo approach // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1999.—111, N 756.—P. 169—178.
  38. *Trilling D., Koerner D., Barnes J., et al.* Near-infrared coronagraphic imaging of the circumstellar disk around TW Hydrae // *Astrophys. J. Lett.*—2001.—552, N 2.—P. L151—L154.
  39. *Uist C.* Astrometric detection of sub-stellar companions with GAIA // *Astron. and Astrophys.*—2001.—370, N 2.—P. 672—679.

Поступила в редакцию 13.02.02