

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ НА  
ПЕРЕМЕННОСТЬ ЗВЕЗДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е.В.РУБАН, А.А.АРХАРОВ

Поступила 21 июня 2012

Принята к печати 12 сентября 2012

Исследовано влияние горячих юпитеров на переменность излучения 14 ярких звезд, имеющих планеты и представленных в Пулковском спектрофотометрическом каталоге (ПСК) и фотометрическом каталоге Hipparcos. Спектральный диапазон исследования: 320 + 1080 нм. Фотометрические величины: *U*, *V*. По результатам фотометрических наблюдений обнаружена микропеременность звезды  $\tau$  Boo в полосах *U* и *V* с амплитудами  $\sim 0^m.018$  и  $\sim 0^m.020$  и периодами  $\sim 3.4d$  и  $\sim 3.2d$ , соответственно. Исходя из совпадения периодов переменности с периодом обращения планеты  $\tau$  Boo b вокруг звезды, было сделано предположение, что микропеременность связана с обращением планеты. Обнаружена также микропеременность звезды 51 Peg в полосе *V* с амплитудой  $0^m.023$ , практически совпадающей с величиной падения блеска при прохождении планеты по диску звезды, но с периодом 11.6d, в 3 раза превышающем период обращения планеты, 4.2d. По-видимому, планета 51 Peg b проходит по диску звезды в каждом третьем обороте по орбите. Это может свидетельствовать о наличии в системе звезда-планета дополнительного тела (другой планеты?), возмущающего планетную орбиту. По результатам спектрофотометрических наблюдений влияния даже самых горячих юпитеров обнаружено не было.

Ключевые слова: *звезды с планетами, микропеременность*

1. *Введение.* В связи с обнаружением планет у многократно наблюдаемых звезд, появилась возможность исследовать их влияние на результаты спектрофотометрических и фотометрических наблюдений. Влияние планеты может проявиться либо в наложении излучения планеты на излучение звезды, либо в частичном затмении звезды при прохождении планеты по звездному диску. Это влияние будет обнаруживаться в нетепловом распределении энергии в спектре суммарного излучения звезды и планеты и в микропеременности суммарного излучения, связанной с разным вкладом планеты в зависимости от ее положения на орбите. При больших (несколько лет) периодах обращения планеты для выявления этих эффектов нужны многолетние и однородные ряды наблюдений. При коротких периодах (несколько дней) микропеременность может быть выявлена по рядам фотометрических наблюдений или обнаружена по увеличению разброса результатов спектрофотометрических наблюдений за интервал времени, сравнимый с периодом обращения планеты.

Задача поиска влияния планет сложна тем, что при малых относительных размерах планет производимые ими эффекты очень малы. Кроме того, они зависят не только от размеров планет, но и от их температуры и

расстояний до своих звезд и Солнца. Чтобы иметь возможность выбора планет с наиболее благоприятными условиями для поиска создаваемых ими эффектов, мы использовали обширные и однородные наблюдательные материалы, которые представлены в Пулковской базе спектрофотометрических данных (ПБСД), послужившей основой для создания Пулковского спектрофотометрического каталога (ПСК [1,2]), и в каталоге Hipparcos [3]. Спектральный диапазон исследования: 320 + 1080 нм. Фотометрические величины:  $B, V$ .

При выборе звезд за основу был взят список звезд, имеющийся в ПБСД. Из него были отобраны звезды с планетами. Влияние горячих гигантских планет на спектры материнских звезд было рассмотрено в первую очередь. Очевидно, что, если оно незначимо, то незначимо и влияние более холодных и малых планет. Для звезд, имеющих планеты с короткими периодами обращения, была исследована возможная периодичность микропеременности их блеска из-за неоднократного прохождения планеты по диску звезды.

2. *Список звезд и планет.* Из всего списка звезд (693 звезды) ПБСД лишь у 14 звезд оказались планеты. Список этих звезд приведен в

Таблица 1

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЗВЕЗД

$n$	HD	$BS = HR$	Название	$V$ mag	$Sp$	$r$ , пк	$M / M_{\odot}$	$R_s / R_{\odot}$	$T_{\text{eff}}$ K	$k (N_i)$
1	12929	617	$\alpha$ Ari	2.01	K2III	20.2	1.5	17.7	4650°	2(7),10(10)
2	22049	1084	$\epsilon$ Eri+	3.72	K2V	3.2	0.84°	0.735°	5122°	1(4)
3	28305	1409	$\epsilon$ Tau	3.53	K0III	45	2.7	12.3	4900	1(3)
4	39060	2020	$\beta$ Pic+	3.85	A6V	19.3	1.75°	1.53°	8073°	1(4)
5	62509	2990	$\beta$ Gem	1.16	K0III	10.34	2	11.0	4670	6(5),9(1) 11(28),12(10) 13(41),16(3) 17(8)
6	89484	4057	$\gamma$ l Leo	2.01	K0III	38.5	1.2	42.6	4600°	4(6),13(4) 14(7),15(1)
7	120136	5185	$\tau$ Boo	4.50	F7V	15.6	1.34	1.42	6390	7(6),17(4)
8	136726	5714	11 UMi	5.02	K4III	119.5	1.8	45	4100°	7(6),17(4)
9	137759	5744	$\iota$ Dra	3.29	K0III	31.5	1.8	11.99	4500	5(8),16(5) 17(2),19(1)
10	163917	6698	$\nu$ Oph	3.32	K0III	46.8	2.7	10.0°	4800	1(5)
11	170693	6945	42 Dra	4.82	K1III	97.3	0.98	36	4450°	9(6),20(4)
12	216956	8728	$\alpha$ PsA+	1.17	A3V	7.7	2.00°	1.832°	8751°	1(230),4(17) 5(23),7(3) 9(7),16(10) 17(11),19(14)
13	217014	8729	51 Peg	5.45	G2IV	14.7	1.05	1.02	5790	2(3)
14	222404	8974	$\gamma$ Cep	3.21	K1IV	13.79	1.59	5.0	4890	4(5),5(1),11(5)

Примечание:

- \* - звезда находится в газопылевом диске.
- - данные [6].
- ~ - данные [7].

табл.1. Содержание столбцов:  $n$  - номер по порядку;  $HD$  - номер звезды по каталогу  $HD$ ;  $BS \equiv HR$  - номер по каталогу ярких звезд [4]; Название;  $V$  - величина,  $mag$ ;  $Sp$  - спектральный класс;  $r_p$  - расстояние в парсеках,  $pk$ ;  $M/M_{\odot}$  - масса в единицах солнечных масс;  $R_p/R_{\odot}$  - радиус в единицах солнечного радиуса;  $T_{eff}$  - эффективная температура в градусах Кельвинах,  $K$ . Данные, помеченные "\*", взяты из каталога [5], "\*\*\*" - из [6], остальные - из [1,2,7,8]. (О содержании последнего столбца см. ниже).

Как известно [1,2], в ПБСД хранится материал многолетних спектrophотометрических наблюдений в виде сезонных каталогов. Номера сезонных каталогов,  $k$ , согласно [9], для звезд табл.1 приведены в табл.2. В ней же даны годы наблюдений в каждом сезоне ("b" и "e" - первая и вторая

Таблица 2

### НОМЕРА СЕЗОНОВ, ГОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДИАПАЗОНЫ

$k$	Годы	$\lambda\lambda$ , $nm$	$k$	Годы	$\lambda\lambda$ , $nm$
1	1971-1973	325-737.5	12	1985	510-1080
2	1974-1977	"	13	1986	"
4	1985-1986	"	14	1986-1987	480-1102.5
5	1987	"	15	1987b	487.5-1107.5
6	1988	"	16	1987e	510-1080
7	1989b	"	17	1988	"
9	1990-1991	"	19	1989	"
10	1983	510-1080	20	1990	485-1105
11	1984	"	22	1971-1991	325-1080

половины года, соответственно) и спектральный диапазон,  $\lambda\lambda$ , в  $nm$ . Номером  $k = 22$  обозначен сводный каталог, в котором представлены средневзвешенные результаты нескольких сезонов. Сезоны,  $k$ , в которых наблюдалась каждая конкретная звезда, приведены в последнем столбце табл.1, в скобках дано количество наблюдений звезды за сезон,  $N_k$ .

Длительность сезона определялась неизменностью места наблюдений, телескопа, спектрального диапазона и регистрирующей аппаратуры. Занесение данных в сезонный каталог,  $k$ , происходило следующим образом. Результаты наблюдений, полученные во всех длинах волн,  $\lambda$ , спектрального диапазона с шагом 2.5  $nm$ , освобождались от влияния земной атмосферы и после учета спектральной чувствительности инструмента представлялись в виде абсолютизированных квазимонохроматических освещенностей от звезды на внешней границе земной атмосферы,  $E(\lambda)$  в  $эрг\cdot см^{-2}\cdot с^{-1}\cdot см^{-1}$ . В течение сезона

звезда, как правило, наблюдалась несколько раз в разные ночи вблизи кульминации. Выраженные в звездных величинах,  $m(\lambda) = -2.5 \log E(\lambda)$ , результаты усреднялись по числу наблюдений звезды за сезон. Усредненные величины,  $m_k(\lambda)$ , а также их среднеквадратичные (стандартные) ошибки,  $S_k(\lambda)$ , заносились в текущий (сезонный) каталог  $k$  в ПБСД.

В табл.3 приведен список планет рассматриваемых звезд. В ней для каждой звезды даны: номер по порядку,  $n$ ; номер звезды,  $BS \equiv HR$ ; название планеты; произведение массы планеты на синус угла,  $i$ , между лучом зрения и осью планетной орбиты,  $M \sin i$ , в единицах массы Юпитера,  $M_j$ ; период обращения планеты вокруг общего со звездой центра масс,  $p$ , в сутках,  $d$ ; большая полуось орбиты,  $a$ , в астрономических единицах,  $AU$ ; эксцентриситет,

Таблица 3

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАНЕТ

$n$	$BS \equiv HR$	Планета	$M \sin i / M_j$	$p / d$	$a / AU$	$e$	$T / K$	$T_{pl} / K$	$\lambda_{max} / \mu m$ $r = b$	Год
1	617	$\alpha$ Aps b	1.8	380.8	1.2	0.25	1060	1070	2.70	2011
2	1084	$\epsilon$ Eri b+	1.55	2502	3.39	0.702	160	190	15.04	2000 2010
3	1409	$\epsilon$ Tau b	7.6	594.9	1.93	0.151	890	900	3.24	2007
4	2020	$\beta$ Pic b+	8	7300	9.55	<0.2	220	220	13.02	2008 2011
5	2990	HD 62509 b	2.9	589.6	1.69	0.02	730	730	3.98	2006
6	4057	$\gamma$ l Leo b	8.78	428.5	1.19	0.144	1520	1530	1.90	2009 2011
7	5185	$\tau$ Boo b	3.9	3.314	0.046	0.018	2340	2340	1.24	1996 2009
8	5714	11 UMi b	10.5	516.2	1.54	0.08	1170	1170	2.47	2009
9	5744	HIP 75458 b	8.82	510.7	1.275	0.713	970	1160	2.50	2002 2011
10	6698	$\nu$ Oph b	22.3	536	1.8	0.13	770	775	3.74	2004 2011
		$\nu$ Oph c	24.5	3169	5.88	0.18	430	430	6.74	2010 2011
11	6945	42 Dra b	3.88	479.1	1.19	0.38	1230	1280	2.26	2009
12	8728	Fomalhaut b+	<3	320000	115	0.11	75	76	38.38	2008 2011
13	8729	51 Peg b	0.468	4.231	0.052	0	1950	1950	1.48	1995 2010
14	8974	$\gamma$ Cep b	1.85	903.3	2.05	0.049	520	520	5.62	2003 2011

Примечание: + - звезда находится в газопылевом диске.

е. В последнем столбце приведены год обнаружения планеты (первое число) и год его подтверждения (второе число). Все перечисленные данные взяты из [7], температуры планеты,  $T_{pl}$ ,  $T'_{pl}$ , и длина волны максимума излучения,  $\lambda_{max}$ , определены в настоящей работе (см. ниже).

Как известно, излучение планеты имеет две составляющих: отраженное излучение и тепловое. Первая составляющая зависит от альbedo планеты, вторая - от температуры. Принятый на Земле световой сигнал в обоих случаях зависит от размера планеты и ее расстояний от материнской звезды и Земли. Очевидно, что при малых размерах планеты и больших расстояниях световой сигнал очень мал. Мы провели оценку отраженного излучения для 3-х больших планет из табл.3: самого близкого к Солнцу гиганта  $\epsilon$  Eri b ( $r_s = 3.2$  пк), а также для двух самых близких к своим звездам юпитеров  $\tau$  Boo b ( $a = 0.046$ ) и 51 Peg b ( $a = 0.052$ ).

Если звезда излучает как абсолютно черное тело с температурой  $T_{eff}$ , то освещенность планеты от звезды в длине волны  $\lambda$ ,  $E_{spl\lambda}(T_{eff})$ , можно выразить через функцию Планка  $B_\lambda(T_{eff})$ :

$$E_{spl\lambda}(T_{eff}) = (R_s/r_{pl})^2 \pi B_\lambda(T_{eff}), \quad (1)$$

где  $R_s = 6.96 \cdot 10^{10} R_\odot$  см, а  $r_{pl}$  - расстояние от звезды до планеты. В качестве  $r_{pl}$  мы будем принимать большую полуось ее орбиты:  $r_{pl} \approx a \cdot 1.496 \cdot 10^{13}$  см. Строго говоря, большая полуось есть расстояние планеты не до звезды, а до центра масс в апоастре, но из-за малой относительной массы планеты центр масс практически совпадает со звездой.

Долю отраженного планетой света мы оценили, принимая нормальное падение звездного излучения и используя альbedo Юпитера,  $A \approx 0.7$ . Освещенность на Земле,  $E_{pl\lambda}$ , от отраженного излучения планеты выразится как

$$E_{pl\lambda} = 0.7 E_{spl\lambda}(T_{eff}) (R_{pl}/r_s)^2, \quad (2)$$

где  $R_{pl}$  - радиус планеты, а в качестве расстояния от планеты до Земли использовали  $r_s$  - расстояние от звезды до Солнца (расстояние планеты от звезды и расстояние Земли от Солнца в данном случае пренебрежимо малы, и ими можно пренебречь). Радиус планеты,  $R_{pl}$ , можно оценить из отношения масс планеты и Юпитера, предполагая равенство их плотностей. Тогда отношение масс, приведенное в столбце 4 табл.3, будет равно отношению  $(R_{pl}/R_J)^3$ , где  $R_J$  - радиус Юпитера. Из этого отношения находится  $R_{pl}$ :

$$R_{pl} = R_J \cdot \sqrt[3]{M \sin i / M_J}. \quad (3)$$

Оценив все основные параметры, легко оценить отношение освещенностей от планеты и звезды на Земле,  $E_{pl}/E_s(T_{eff})$ . Отношение одинаково для всех длин волн. Для трех отобранных выше планет оно равно:  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  ( $\tau$  Boo b),  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$  (51 Peg b) и  $\sim 2 \cdot 10^{-8}$  ( $\epsilon$  Eri b). Как видно, освещенности

даже от самых близких юпитеров из табл.3 пренебрежимо малы.

Заметим, что для планеты  $\epsilon$  Eri b, которая движется по орбите с большим эксцентриситетом, освещенность от звезды в периастре будет почти в 2 раза больше. Доля отраженного излучения возрастет во столько же раз (см. формулу (2)), но освещенность на Земле останется по-прежнему очень слабой, чтобы ее можно было заметить на фоне звездного излучения.

Заметим также, что радиус, определенный по формуле (3), может быть, в зависимости от угла наклона орбиты, меньше истинного радиуса планеты, так как  $M \sin i \leq M$ . При углах наклона, меньших  $5^\circ$ , масса планеты,  $M$ , становится более чем в 10 раз больше  $M \sin i$ , а освещенность от планеты увеличивается, соответственно, более чем в 4 раза. Но для рассматриваемых планет освещенность и в этих случаях остается слишком слабой. Можно оценить, что для больших ( $\sim 30 M_J$ ) планет, находящихся на расстояниях  $\leq 0.01$  а.е. от своих звезд, расположенных близко ( $\sim 1$  пк) к Солнцу, отношение освещенностей может быть  $\geq 0.01$ . Такой сигнал уже можно выявить статистически по широко представленным результатам фотометрических и спектрофотометрических наблюдений.

Рассмотрим теперь вторую составляющую излучения планеты - тепловую. Тепловое излучение планеты характеризуется температурой  $T_{pl}$ . Ее максимальное значение можно оценить исходя из предположения, что планета, лишенная атмосферы, поглощает все падающее звездное излучение (при его нормальном падении) с эффективной температурой  $T_{eff}$ , нагревается и переизлучает его по формуле Планка с температурой  $T_{pl}$ . Температура  $T_{pl}$  вычисляется по известной формуле:  $T_{pl} = T_{eff} \sqrt{R_s / r_{pl}}$ . Ниже мы исследуем результаты спектрофотометрических наблюдений материнских звезд горячих планет с целью поиска эффекта присутствия планеты.

Температура планеты во время ее движения по эллиптической орбите меняется. Максимальную температуру,  $T_{pl}^*$ , планета имеет в самой близкой к звезде точке орбиты. Чтобы оценить ее, мы предположили, что эта точка находится на расстоянии, равном малой полуоси,  $b = a \sqrt{1 - e^2}$ . Вычисленная в ней температура,  $T_{pl}^*$ , приведена в табл.3. Из всех планет, помещенных в таблицу, наибольшее различие температур ( $\Delta T_{pl} \approx 200$  K) в выбранных точках орбиты наблюдается у горячей планеты HIP 75458 b ( $n=9$ , табл.3), обращающейся по орбите с наибольшим эксцентриситетом ( $e=0.713$ ). При большом изменении температуры при движении планеты по орбите суммарное излучение планеты и звезды будет меняться, что может сказаться на разбросе результатов спектрофотометрических наблюдений. Ниже мы проверим это для данной звезды (см. раздел 4б).

Различие температур в разных точках орбиты зависит не только от эксцентриситета, но и от общей удаленности планеты от звезды. Так, у более удаленной, а значит и более холодной планеты  $\epsilon$  Eri b ( $n=2$ , табл.3),

орбита которой имеет примерно такой же эксцентриситет ( $e=0.702$ ), что и планета HIP 75458 b, различие температур составляет всего 30 К. Такое различие температур обнаружить по результатам спектрофотометрических наблюдений очень трудно.

Значительную роль в поиске светового сигнала от планеты играет спектральный диапазон излучения планеты. Его можно оценить по длине волны максимального излучения,  $\lambda_{max}$ , которая связана с температурой  $T$  законом смещения Вина:  $\lambda_{max} = 0.290/T$  см. Поскольку для диапазона наших исследований наиболее существенны короткие волны, то в табл.3 приведены длины волн максимального излучения,  $\lambda_{max}$ , полученные для большей температуры,  $T = T'_{pl}$ . Отличия  $\lambda_{max}$  от  $\lambda'_{max}$  незначительные: максимальные смещения длины волны составляют  $\sim 2.8$  мкм ( $n=2$ ) и 0.5 мкм ( $n=9$ ). В остальных случаях смещения длины волны при движении планеты по орбите не превышают 0.1 мкм. В спектре планеты  $\epsilon$  Eri b ( $n=2$ , табл.3) длина волны максимума излучения,  $\lambda'_{max}$  (15.04 мкм), находится далеко в инфракрасной области. В спектре HIP 75458 b ( $n=9$ , табл.3) она ( $\lambda'_{max} = 2.5$  мкм) ближе к исследуемому диапазону. Результаты спектрофотометрических наблюдений родительской звезды,  $\iota$  Dra (BS 5744), этой планеты мы также рассмотрим ниже (см. раздел 4б).

Кроме переменности при движении по орбите, излучение горячей планеты, накладываясь на излучение звезды, может исказить распределение энергии в ее спектре. Самые горячие ( $T_{pl} \approx 2000$  К) и самые близкие к своим звездам ( $a \approx 0.05$  а.е.) юпитеры из табл.3 обращаются вокруг звезд BS 5185 ( $\tau$  Boo,  $n=7$ , табл.1) и BS 8729 (51 Peg,  $n=13$ , табл.1). Звезды похожи на Солнце по массам ( $M \sin i/M_{\odot} \approx 1.1 + 1.3$ ), размерам ( $R/R_{\odot} \approx 1.3$ ) и температурам ( $\sim 6000$  К), см. табл.1. Однако их планеты в 10 раз ближе к звездам, чем Меркурий к Солнцу, в 3 раза горячее и в тысячи и десятки тысяч раз массивнее ближайшей к Солнцу планеты. Длины волн максимального излучения этих планет (см. табл.3) близки к рассматриваемому диапазону спектра. Ниже (см. разделы 4а, 4в) мы рассмотрим, влияет ли их излучение на спектры материнских звезд.

Поскольку обе горячие планеты имеют самые короткие орбитальные периоды, то мы попытаемся найти для родительских звезд этих планет периодические изменения блеска, связанные с быстрым обращением вокруг них планет (см. раздел 3).

**3. Звезды с короткопериодическими юпитерами.** Самые близкие юпитеры в табл.3 имеют следующие периоды обращения по орбите:  $\sim 3d$  ( $\tau$  Boo b) и  $\sim 4d$  (51 Peg b) (см. табл.3). Чтобы выявить эти периоды по результатам фотометрических наблюдений  $Vt$  и  $Bt$  [3], нами были построены спектры мощности для обеих материнских звезд.

Для звезды  $\tau$  Boo (BS 5185) спектры мощности и фазовые кривые

приведены на рис.1. На рис.1а и 1с показаны спектры мощности,  $10^5 PW$ , вычисленные для рядов  $Vt$  (а) и  $Bt$  (с). По осям абсцисс отложены частоты,  $\nu$ , обратные периоду (в сутках,  $d$ ). Максимальные по высоте пики, отмеченные на рисунках штриховыми линиями, соответствуют периодам  $p \approx 3.36 d$  ( $Vt$ ) и  $p \approx 3.21 d$  ( $Bt$ ) и превышают уровень шума в 4.56 раз на рис.1а и в 3.21 раза на рис.1с.

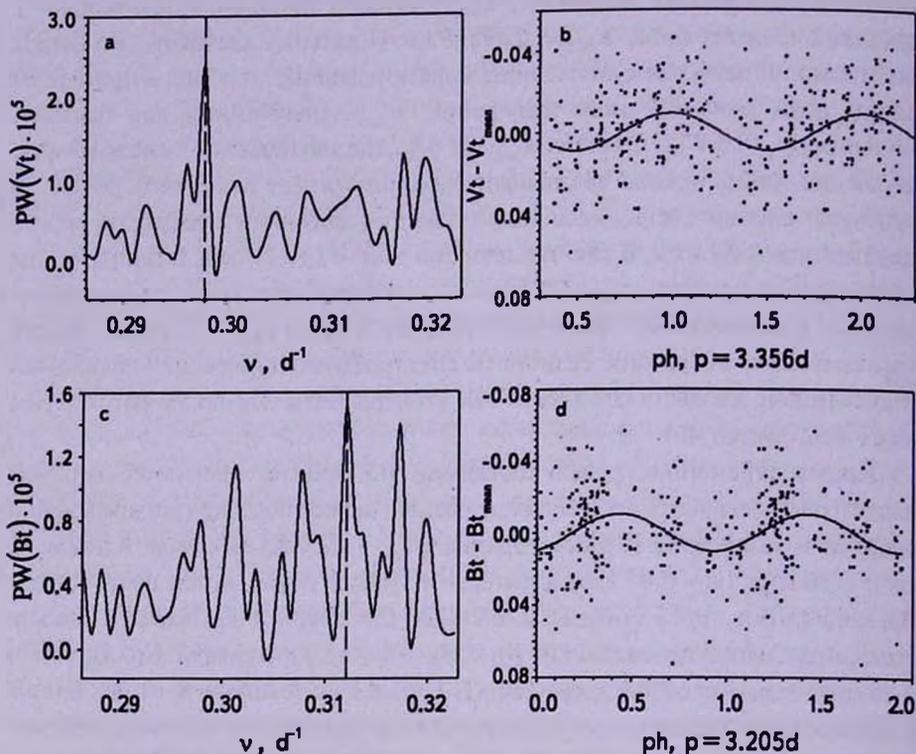


Рис.1. Спектры мощности для звезды  $\tau$  Boo:  $PW(Vt) \cdot 10^5$  (а),  $PW(Bt) \cdot 10^5$  (б),  $\nu$  - частота в  $d^{-1}$  и фазовые кривые:  $Vt - Vt_{mean}$  (с),  $Bt - Bt_{mean}$  (д),  $ph$  - фаза,  $p$  - период.

После свертки с найденными периодами всех результатов наблюдений (количество наблюдений - 168) по фазам в один цикл, построены фазовые кривые на рис.1б и 1д (для наглядности циклы повторены дважды). По осям абсцисс отложены значения фаз,  $ph$ , а по осям ординат - разности  $Vt - Vt_{mean}$  и  $Bt - Bt_{mean}$ , где  $Vt_{mean}$  и  $Bt_{mean}$  - средние величины в рядах наблюдений  $Vt$  и  $Bt$ . Через точки построения проведены кривые приближенной регрессии (синусоиды). Амплитуды переменности:  $\sim 0^m.018$  в полосе  $Vt$ ,  $\sim 0^m.020$  в полосе  $Bt$ . (Заметим, что аппроксимация синусоидой применена нами только для определения амплитуды переменности, равной удвоенной амплитуде синусоиды; для описания формы кривой эта аппроксимация является довольно грубой.) Для оценки силы связи между наблюдаемыми величинами и фазами

вычислены дисперсии величин от регрессионных кривых и определены корреляционные отношения  $\theta$  (см. [10,11]). (Используемые здесь и далее статистические величины, формулы и таблицы квантилей взяты из книги Пустыльника [11].) Корреляционные отношения,  $\theta$ , равны 0.505 для  $Vt$  и 0.402 для  $Bt$ . Полученные значения значимы с доверительной вероятностью  $> 99.9\%$  [11].

Используя данные табл.1 и 3, мы оценили площадь максимального покрытия диска звезды BS 5185 при прохождении планеты. Она составляет  $\sim 0.013$  от площади всего диска. На такую же величину должен уменьшаться в любой длине волны поток излучения (в звездных величинах), идущий от звезды во время частичного затмения планетой. Полученные амплитуды переменности в полосах  $Vt$  и  $Bt$  несколько больше этой величины, но периоды переменности,  $\sim 3.2 + 3.4 d$ , практически совпадают с периодом обращения планеты  $\tau_{\text{Boo b}}$  по орбите ( $p = 3.314 d$ , см. табл.3). Учитывая неопределенность в оценке радиуса планеты (из-за неопределенности массы и плотности планеты, см. раздел 2), можно считать, что расхождения связаны с грубостью этой оценки и переменность обусловлена обращением планеты вокруг звезды.

Звезда 51 Peg (BS 8729) исследовалась нами ранее [10] как многократно наблюдавшаяся стандартная звезда. Не останавливаясь подробно на этом исследовании, отметим, что по результатам фотометрических наблюдений в полосах  $Vt$  и  $Bt$  была получена переменность звезды только в полосе  $Bt$  с амплитудой  $0^m.023$  и периодом  $11.6 d$  [10]. Полученный период примерно в 3 раза превысил период обращения планеты 51 Peg b ( $p \approx 4.2 d$ , см. табл.3). (Периоды обращения планеты, полученные разными авторами, несколько различаются:  $p \approx 4.2 d$  [12] и  $p \approx 3.5 d$  [13]). В то же время амплитуда переменности,  $0^m.023$ , полученная в [10], практически совпала с величиной падения блеска на  $0^m.017$  при прохождении планеты по диску звезды [13]. Оценка отношения площадей дисков планеты и звезды дает  $\sim 0,006$ , что так же, как для BS 5185, меньше величины падения блеска. Расхождение можно объяснить несколько заниженным значением радиуса планеты при оценке отношения площадей.

Таким образом, для обеих звезд были обнаружены периодические изменения блеска с амплитудами  $\sim 0^m.02$  в полосах  $Vt$  и  $Bt$  для  $\tau_{\text{Boo}}$  и в полосе  $Bt$  для 51 Peg.

4. *Звезды с горячими юпитерами.* Как отмечалось во *Введении*, влияние горячих планет на результаты спектрофотометрических наблюдений может проявиться, с одной стороны, на изменении распределения энергии в спектрах звезд, с другой - на увеличении разброса результатов наблюдений.

На рис.2а представлена наблюдаемая последовательность спектроэнергетических кривых для звезд разных температур,  $T_{\text{эф}}$  близких температурам

$\tau$  Воо (BS 5185) и 51 Peg (BS 8729). Все кривые, кроме кривой BS 5185, получены в одном сезоне,  $k=2$ . Кривая BS 5185 построена по данным сводного каталога,  $k=22$ . В скобках даны номера сезонов,  $k$ , и количество наблюдений,  $N_x$ . По вертикальной оси отложены квазимонохроматические величины в длине волны  $\lambda$  относительно величин в длине волны 555 нм:  $m_\lambda - m_{555}$ . По горизонтальной оси отложены длины волн,  $\lambda$  в нм. Внизу на "усах" приведены ошибки наблюдений: для звезды BS 5185 (1),

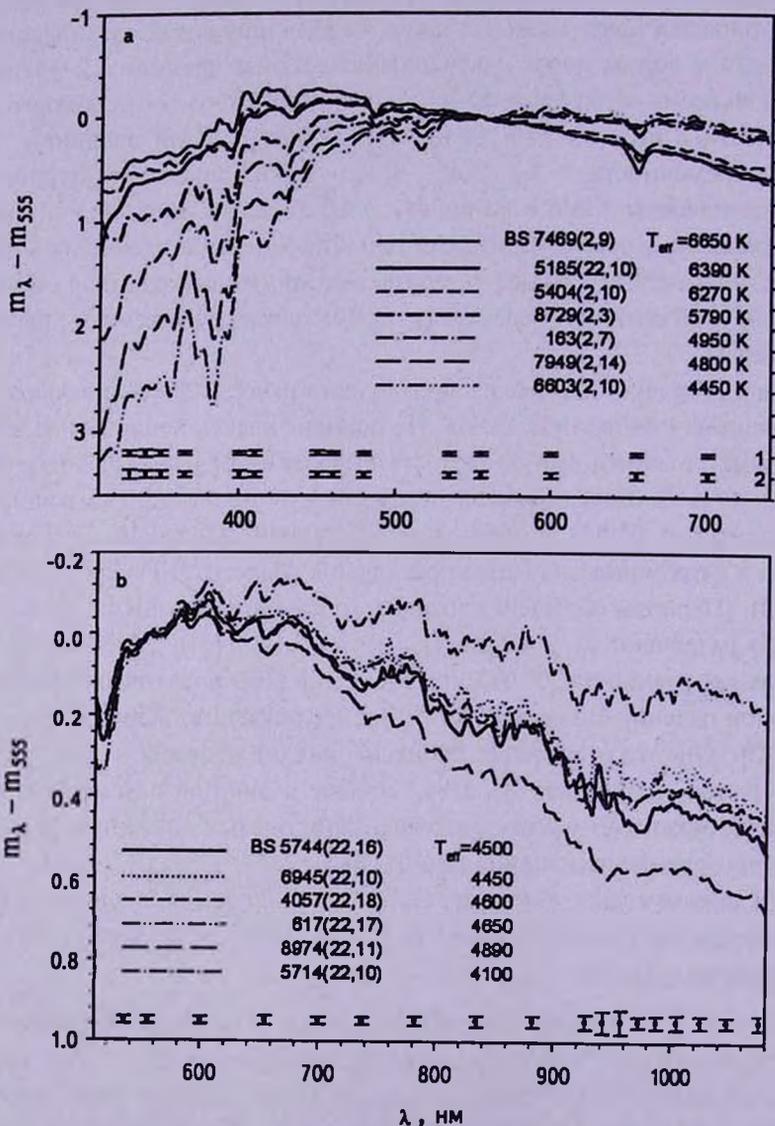


Рис.2.  $m_\lambda - m_{555}$  для звезд с номерами BS и температурами  $T_{\text{eff}}$  4450 - 6650 K (а) и 4100 - 4890 K (b); в скобках -  $k$ ,  $N_x$ ; на "усах" - ошибки BS 5185 (а,1), BS 8729 (а,2) и BS 5744 (b).

$\pm \sqrt{S_{\lambda}^2(5185) + S_{555}^2(5185)}$ , и для звезды BS 8729 (2),  $\pm \sqrt{S_{\lambda}^2(8729) + S_{555}^2(8729)}$ .

На рис.2b представлена в увеличенном масштабе длинноволновая ( $\lambda > 500$  нм) область спектра. На нем нанесены спектроэнергетические кривые для звезды  $\tau$  Dra (BS 5744) и других звезд близких температур. Все кривые на рис.2b построены по данным сводного каталога ( $k=22$  [1,2]), нормированным в длине волны 555 нм. На "усах" внизу рисунка даны ошибки для звезды BS 5744:  $\pm \sqrt{S_{\lambda}^2(5744) + S_{555}^2(5744)}$ .

(Для звезд, не вошедших в табл.1, температуры на рис.2а и 2b взяты из каталога [5]).

Рассмотрим далее каждую звезду.

4а. Звезда BS 5185 ( $\tau$  Boo). Представленное на рис.2а распределение энергии в спектре звезды BS 5185 показало, что излучение горячей планеты не повлияло на кривую энергии звезды, которая "вписалась" в спектральную последовательность спектроэнергетических кривых для звезд разных температур.

Мы проверили, не сказалось ли быстрое обращение ( $p \approx 3d$ ) планеты  $\tau$  Boo b на разбросе результатов наблюдений звезды.

Звезда наблюдалась в двух сезонах,  $k=7$  ( $N_7=6$ ) и  $k=17$  ( $N_{17}=4$ ). Дисперсия результатов наблюдений,  $N_k \cdot S_{k\lambda}^2$ , в каждом сезоне сравнивалась со случайной дисперсией,  $S_0^2$ , по критерию Фишера:

$$N_k \cdot S_{k\lambda}^2 / S_0^2 < F(N_k - 1, \infty). \quad (4)$$

В левой части неравенства (4) использовались отношения дисперсий, усредненные по длинам волн. Случайная дисперсия,  $S_0^2$ , была определена нами ранее [14] для групп сезонов в разных спектральных диапазонах. Числа степеней свободы для случайной дисперсии в группах следующие:  $f_I = 275$  ( $\lambda \lambda 325 + 737.5$  нм) и  $f_{II} = 143$  ( $\lambda \lambda 510 + 1080$  нм). Учитывая большие значения степеней свободы, при выборе квантилей Фишера мы использовали в обеих группах  $f \approx \infty$ . Отношение дисперсий результатов наблюдений звезды для сезона  $k=7$  приблизительно равно 1.3, квантиль Фишера  $F(5, \infty) = 2.2$ . Соответственно, для сезона  $k=17$  отношение дисперсий равно 1.2, квантиль Фишера  $F(3, \infty) = 2.6$ . Видно, что для обоих сезонов неравенство (4) выполнялось. Следовательно, дисперсия результатов наблюдений звезды определялась только случайными факторами, и быстрое обращение планеты вокруг звезды не отразилось на разбросе результатов.

Расхождение результатов между сезонами,  $m(17) - m(7)$ , составляло в среднем  $0^m.031$ . Для проверки значимости этого расхождения по критерию Стьюдента [11] была вычислена величина

$$T = \left[ S_{7,\lambda}^2 \cdot t_{95\%}(N_7 - 1) + S_{17,\lambda}^2 \cdot t_{95\%}(N_{17} - 1) \right] / \sqrt{S_{7,\lambda}^2 + S_{17,\lambda}^2}, \quad (5)$$

где  $t_{95\%}(N_k - 1)$  - квантиль Стьюдента, соответствующий степени свободы  $N_k - 1$  и доверительной вероятности 95%. Для результатов наблюдений звезды BS 5185  $t_{95\%}(5) = 2.57$  [11] в сезоне  $k = 7$  и  $t_{95\%}(3) = 3.18$  [11] в сезоне  $k = 17$ . Сосчитанное по формуле (5) критическое значение величины  $T$  равно 0<sup>m</sup>.053. Поскольку различие средних величин в сравниваемых сезонах меньше этого критического значения,  $m(17) - m(7) < T$ , то расхождение величин между сезонами незначимо с вероятностью >95%. Следовательно, на расхождение результатов между сезонами планета также не повлияла.

Таким образом, наличие горячей планеты у звезды  $\tau$  Boo (BS 5185) никак не отразилось на результатах ее спектрофотометрических наблюдений.

46. *Звезда BS 5744 (ι Dra)*. Рассмотрим влияние горячей планеты, HIP 75458 b ( $n = 9$ , табл.3), на результаты наблюдений звезды ι Dra, BS 5744, ( $n = 9$ , табл.1). Планета обращается по сильно вытянутой ( $e = 0.713$ ) орбите. Ее температура меняется при движении по орбите на  $\sim 200$  К. Наибольшая температура равна 1160 К. На рис.2b, на котором представлены кривые энергии BS 5744 и других звезд близких температур, видно, что, с учетом неопределенности температуры ( $\pm 100$  К [15]), представленные на рисунке кривые образуют температурную последовательность. Кривая BS 5744 от этой последовательности не отклоняется.

Обратим внимание на эмиссию в спектре звезды в районе водяной полосы, 920-930 нм. В этих же длинах волн наблюдалось сильное увеличение разброса данных (см. "усы" внизу рисунка). Проведенный нами ранее [16] дисперсионный анализ результатов наблюдений всех звезд ПБСД показал, что у звезды BS 5744 в 16-ом сезоне была обнаружена в этой области спектра реальная переменность световых потоков, значимо превышающая случайный разброс с вероятностью >95%. Амплитуда переменности составляла 0<sup>m</sup>.04. Однако эмиссия и переменность в ней относятся, скорее всего, к особенностям звезды и не связаны с планетой. Для уточнения требуются дополнительные исследования.

Период обращения планеты равен 520.7 d. При своем обращении по орбите планета, по-видимому, может частично затмевать звезду, проходя по ее диску. Согласно нашим оценкам, площадь диска звезды, закрываемая планетой во время затмения, составляет  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ -ую часть от площади всего диска. На такую же величину уменьшится поток звездного излучения, который слишком мал, чтобы его обнаружить.

Таким образом, наличие планеты HIP 75458 b у звезды BS 5744 осталось незамеченным во время спектрофотометрических и фотометрических наблюдений.

4в. *Звезда BS 8729 (51 Peg)*. Рассматривая рис.2а, можно заметить, что кривая BS 8729 в области длинных волн (>555 нм) "выбивается" из

температурной последовательности кривых: отклонение ее от нормального положения значительно превышает ошибки наблюдений, приведенные внизу рисунка.

Естественно предположить, что на спектр звезды оказывает влияние планета 51 Peg b. Не развивая здесь этот вопрос, отметим, что, как показали исследования, на наблюдаемые особенности спектра планета влияния не оказывает. Исследованию же распределения энергии в спектре звезды будет посвящена наша следующая работа.

5. *Дискуссия.* Если обнаруженная нами переменность звезды BS 8729 в полосе *Vt* (см. раздел 3) связана с обращением вокруг нее планеты 51 Peg b, а период переменности в 3 раза превышает период обращения планеты, то планета проходит по диску звезды в каждом третьем обороте по орбите. Это может свидетельствовать о наличии в системе звезда-планета дополнительного тела (другой планеты?), возмущающего планетную орбиту.

Если периоды переменности и обращения планеты не связаны (свидетельство - отсутствие переменности в полосе *It*), то требуются дополнительные исследования для поиска причин переменности.

6. *Заключение.* Для решения поставленной задачи был составлен список из 14 звезд с планетами (табл.2 и 3), для которых имелись результаты спектрофотометрических наблюдений в ПБСД и фотометрических наблюдений в каталоге Hipparcos [3].

Для 3-х планет-гигантов,  $\tau$  Boo b, 51 Peg b и  $\epsilon$  Eri b, самых близких к Земле и к родительским звездам была проведена оценка освещенности на Земле от отраженного от них излучения. Отношения освещенностей от планет и собственных звезд составляли  $10^{-4} + 10^{-8}$ , что невозможно было заметить по результатам спектрофотометрических и фотометрических наблюдений.

По результатам фотометрических наблюдений была обнаружена микропеременность звезды  $\tau$  Boo (BS 5185) в полосах *Vt* и *It*, которая объяснялась обращением планеты  $\tau$  Boo b вокруг звезды.

По результатам фотометрических наблюдений в полосе *Vt* была обнаружена микропеременность звезды 51 Peg (BS 8729) с амплитудой, соответствующей прохождению планеты по диску, но с периодом в 3 раза большим периода обращения планеты. При этом в полосе *It* переменность с тем же периодом не была обнаружена.

Проведено исследование влияния теплового излучения самых горячих планет,  $\tau$  Boo b и 51 Peg b, на результаты спектрофотометрических наблюдений родительских звезд, BS 5185 и BS 8729. Влияния обнаружено не было.

Была обнаружена переменная эмиссия в спектре звезды  $\iota$  Dra (BS 5744) в области водяной полосы 920-930 нм. Разброс данных превышал

случайный разброс значимо с вероятностью  $>95\%$ . Требуется дополнительные исследования для выяснения природы этой эмиссии.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
Россия, e-mail: rubanc@mail.ru e-mail: arkadi@arharov.ru

## THE INFLUENCE OF THE HOT JUPITERS ON THE VARIABILITY OF A STAR RADIATION

E.V.RUBAN, A.A.ARKHAROV

The influence of the hot Jupiters on the radiation variability of the 14 bright stars which have planets has been investigated. The original data have been taken from the Pulkovo Spectrophotometric Catalog (PSK) in the spectral range  $320 + 1080$  nm and from Hipparcos Catalog (photometric magnitudes  $V_t$ ,  $B_t$ ). On the base of photometric observations the microvariability of the star  $\tau$  Boo was found in the bands  $V_t$  and  $B_t$  with amplitudes  $\sim 0^m.018$  и  $\sim 0^m.020$  and periods  $\sim 3.4d$  и  $\sim 3.2d$  correspondently. Taking into account the coincidence of the variation periods with the orbital period of planet  $\tau$  Boo b around the star it was supposed that microvariability is connected with planet orbital motion. Also the microvariability of the star 51 Peg in the band  $B_t$  was found with amplitude  $0^m.023$ . This value almost coincides with the value of the brightness decrease during the planet transit on the star disk but with the period of 11.6d, exceeding by factor 3 the planet orbital period, 4.2d. It seems the planet 51 Peg b crosses the star disk in every third orbit turn. It could indicate the presence of an additional body in the star-planet system (another planet?) which disturbs the planet orbit. On the base of spectrophotometric observations no influence of even the hottest Jupiters has been found.

Key words: *stars with planers: microvariability*

## ЛИТЕРАТУРА

1. G.A.Alekseeva, A.A.Arkharov, V.D.Galkin et al., Baltic Astronomy, 5, 603, 1996.
2. G.A.Alekseeva, A.A.Arkharov, V.D.Galkin et al., Baltic Astronomy, 6, 481, 1997.
3. The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200, ESA, 1997.
4. D.Hoffleit, C.Jascek, The Bright Star Catalogue, New-Haven, p.472, 1982.

5. *А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, В.Д.Галкин и др.*, Каталог спектральных, фотометрических, пространственных и физических характеристик 693 ярких звезд, деп. в ВИНТИ, №2327-В97, с.171, 1997.
6. *E.Di.Folco, F.Thevenin, P.Kervella et al.*, *Astron. Astrophys.*, 426, 601 2004.
7. Jean Schneider, *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*, <http://exoplanet.eu> 2011.
8. Exoplanet Data Explorer, <http://exoplanets.org/planets.shtml> 2011.
9. *Е.В.Рубан, Г.А.Алексеева, А.А.Архаров и др.*, Письма в Астрон. ж., 32, 672, 2006.
10. *Е.В.Рубан, А.А.Архаров*, *Астрофизика*, 53, 575, 2010.
11. *Е.И.Пустылыник*, Статистические методы анализа и обработки наблюдений, М., Наука, с.288, 1968.
12. *S.H.Pravdo, L.Angelini, S.A.Drake et al.*, *New Astronomy*, 1, 171, 1996.
13. *G.W.Henry, G.W.Marcy, R.P.Butler, S.S.Vogt*, *Astrophys. J.*, 529, L41, 2000.
14. *Е.В.Рубан, А.А.Архаров*, *Астрофизика*, 55, 65, 2012.
15. *Е.В.Рубан, А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Т.Ю.Пузакова*, *Астрофизика*, 50, 415, 2007.
16. *А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Е.В.Рубан*, *Изв. ГАО*, 215, 21, 2000.