

УДК 524.386-87

ОБ АНОМАЛИЯХ В ПОТЕМНЕНИИ К КРАЮ ДИСКОВ ЗВЕЗД, ЗАТМЕВАЕМЫХ ЭКЗОПЛАНЕТАМИ

© 2015 г. М. К. Абубекеров*, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 26.03.2014 г.; принята в печать 09.07.2014 г.

В рамках гипотезы корректности модели звездной атмосферы исследована возможность объяснения расхождения между наблюдаемыми и теоретическими коэффициентами потемнения к краю диска звезды влиянием протяженной несферической атмосферы экзопланеты.

DOI: 10.7868/S0004629915010016

1. ВВЕДЕНИЕ

Детальный анализ высокоточной многоцветной кривой блеска двойной системы с экзопланетой HD 209458, выполненный Соуворзом [1], показал расхождение между наблюдаемыми коэффициентами потемнения к краю и их теоретическими значениями, полученными из модели звездных атмосфер. Проведенное Кларе [2] более детальное исследование расхождения между эмпирическими и теоретическими коэффициентами потемнения к краю, наблюдаемое у звезды HD 209458, показало, что данное расхождение не удастся преодолеть даже при достаточно широком варьировании параметров модели звездных атмосфер. Отметим, что звезда HD 209458 названа Кларе [2] “вызовом для теории звездных атмосфер”. В работе [3] нами была предпринята очередная попытка преодолеть наблюдаемое расхождение эмпирических и теоретических значений коэффициентов потемнения к краю. Мы показали, что даже при использовании метода доверительных областей для оценки “внешних” ошибок искомых параметров не удастся преодолеть расхождение между эмпирическими и теоретическими значениями коэффициентов потемнения к краю для звезды HD 209458 [3].

Возможно, расхождение между теоретическими и эмпирическими коэффициентами потемнения к краю связано с использованием слишком простой модели. Модель двух сферических звезд, по видимому, не способна учесть эффекты взаимодействия материнской звезды и планеты.

Гипотеза о важности учета эффектов взаимодействия материнской звезды и экзопланеты подтверждается новыми наблюдательными данными.

Например, исследование транзитной кривой блеска двойной системы с экзопланетой WASP-12b в близком УФ-диапазоне показало, что глубина затмения значительно глубже и шире по сравнению с фотометрической транзитной кривой блеска видимого диапазона [4], что свидетельствует о деформации планетной магнитосферы и атмосферы под действием звездного ветра [5, 6]. Система WASP-12b состоит из родительской звезды позднего спектрального класса с температурой поверхности 6300 К и массой $1.35 M_{\odot}$ и находящейся на расстоянии 0.0229 а.е. экзопланеты с массой $1.4 M_J$ (M_J — масса Юпитера) и орбитальным периодом 1.09^d, что по параметрам достаточно близко к исследуемым нами двойным системам HD 209458 и HD 189733. Возможность деформации магнитосферы и атмосферы экзопланеты под действием звездного ветра материнской звезды также подтверждается трехмерным газодинамическим моделированием поведения атмосферы горячего Юпитера в системе WASP-12b, находящегося вблизи родительской звезды [7]. Система WASP-12b похожа на двойные системы HD 209458 и HD 189733.

Согласно трехмерному газодинамическому моделированию [7, 8] атмосфера экзопланеты HD 209458b возмущена звездным ветром. Ввиду сравнительно высокой температуры атмосферы планеты, с ее поверхности происходит столь сильное истечение массы, что планета представляет собой планету-комету (планету с кометным хвостом [9, 10]). Одна из причин столь сильного возмущения атмосферы экзопланеты со стороны звездного ветра материнской звезды — это слабое магнитное поле экзопланеты, не способное противостоять звездному ветру.

* E-mail: marat.abubekеров@gmail.com

Таблица 1. Результаты интерпретации наблюдаемых кривых блеска из работы [16] двойной системы с экзопланетой HD 209458 в рамках квадратичного закона потемнения к краю при фиксированных коэффициентах потемнения (ошибка параметров получена в рамках метода дифференциальных поправок; ошибка приведена на уровне 1σ ; в двух последних столбцах даны приведенные значения хи-квадрат и соответствующие уровни значимости α)

$\lambda, \text{\AA}$	r_s	$\sigma(r_s)$	r_p	$\sigma(r_p)$	r_p/r_s	$\sigma(r_p/r_s)$	i	$\sigma(i)$	χ_{red}^2	α
3201	0.1131	0.00053	0.01385	0.000062	0.12239	0.0046	86.71°	0.035	1.07	0.16
3750	0.1102	0.00028	0.01323	0.000030	0.12003	0.0026	87.17	0.022	1.10	0.07
4300	0.1112	0.00018	0.01335	0.000019	0.12003	0.0016	87.04	0.013	1.19	0.00
4849	0.1109	0.00016	0.01326	0.000018	0.11958	0.0014	87.11	0.013	1.30	0.00
5398	0.1117	0.00016	0.01341	0.000018	0.12005	0.0014	87.00	0.013	1.20	0.00
5802	0.1122	0.00015	0.01356	0.000016	0.12092	0.0013	86.89	0.012	1.46	0.00
6779	0.1123	0.00014	0.01350	0.000015	0.12019	0.0012	86.89	0.012	1.46	0.00
7755	0.1112	0.00016	0.01336	0.000019	0.12010	0.0014	86.98	0.015	1.32	0.00
8732	0.1119	0.00020	0.01347	0.000024	0.12043	0.0018	86.91	0.018	1.20	0.00
9708	0.1107	0.00030	0.01339	0.000035	0.12096	0.0027	87.04	0.028	1.23	0.00

Примечание. Близость уровня значимости α к нулю связана с тем, что коэффициенты в квадратичном законе потемнения к краю зафиксированы.

В наших прежних работах [3, 11–14] мы предполагали, что планета — сферическое тело с резким краем. В свете новых идей [4, 10] такая идеализированная модель является слишком упрощенной. Не исключено, что обнаруженное отличие наблюдаемых коэффициентов потемнения к краю от теоретических для звезд HD 209458 и HD 189733 связано не с недостатками моделей тонких звездных атмосфер, а с применением слишком идеализированной модели экзопланеты при анализе затмений звезд.

Для того чтобы исследовать этот вопрос, мы в данной работе при интерпретации затмений экзопланетами звезд HD 209458 и HD 189733 фиксируем коэффициенты потемнения к краю звезд. За значения коэффициентов потемнения к краю звезд HD 209458 и HD 189733 приняты результаты новейших теоретических расчетов Кларе [15] с помощью модели PHOENIX. Будем искать в рамках сферической модели компонент на круговой орбите следующие геометрические параметры двойной системы как функцию длины волны λ : наклонение орбиты i , относительный радиус экзопланеты r_p и относительный радиус звезды r_s . Параметр i и, в значительной мере, параметр r_s не должны зависеть от длины волны λ . В то же время радиус экзопланеты r_p при наличии у нее заметной атмосферы может существенно зависеть от λ . Если же зависимость от длины волны λ будет выявлена и для параметров i и r_s , то это будет свидетельством несовершенства нашей модели затменной системы, вызванного неучетом протяженной атмосферы

у экзопланеты, “кометного хвоста”, связанного с нею и т.п.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В настоящей работе рассмотрены наблюдаемые кривые блеска двойных систем HD 209458 и HD 189733. Двойные звездные системы HD 209458 и HD 189733 близки по параметрам. Несмотря на это у HD 189733 наблюдается удовлетворительное согласие эмпирических и теоретических коэффициентов потемнения к краю, в то время как у HD 209458 такое согласие отсутствует.

В качестве наблюдательного материала для двойной системы HD 209458 использовались многоцветные кривые блеска, полученные на Космическом телескопе имени Хаббла (HST) с 3 мая по 6 июля 2003 г. [16]. Центральные длины волн транзитных кривых блеска составляют $\lambda = 3201, 3750, 4300, 4849, 5398, 5802, 6779, 7755, 8732, 9708 \text{ \AA}$. Каждая из кривых включает в себя по ~ 500 индивидуальных значений блеска двойной системы HD 209458. Среднеквадратичная ошибка индивидуального измерения колеблется от 1.79×10^{-4} до 6.09×10^{-4} (по отношению к глубине затмения это составляет от $\sim 10^{-2}$ до $\sim 3 \times 10^{-2}$). Более детальная информация о наблюдательных данных и способе их обработки содержится в [16]. Наблюдаемые транзитные кривые блеска HD 209458 представлены на рис. 1.

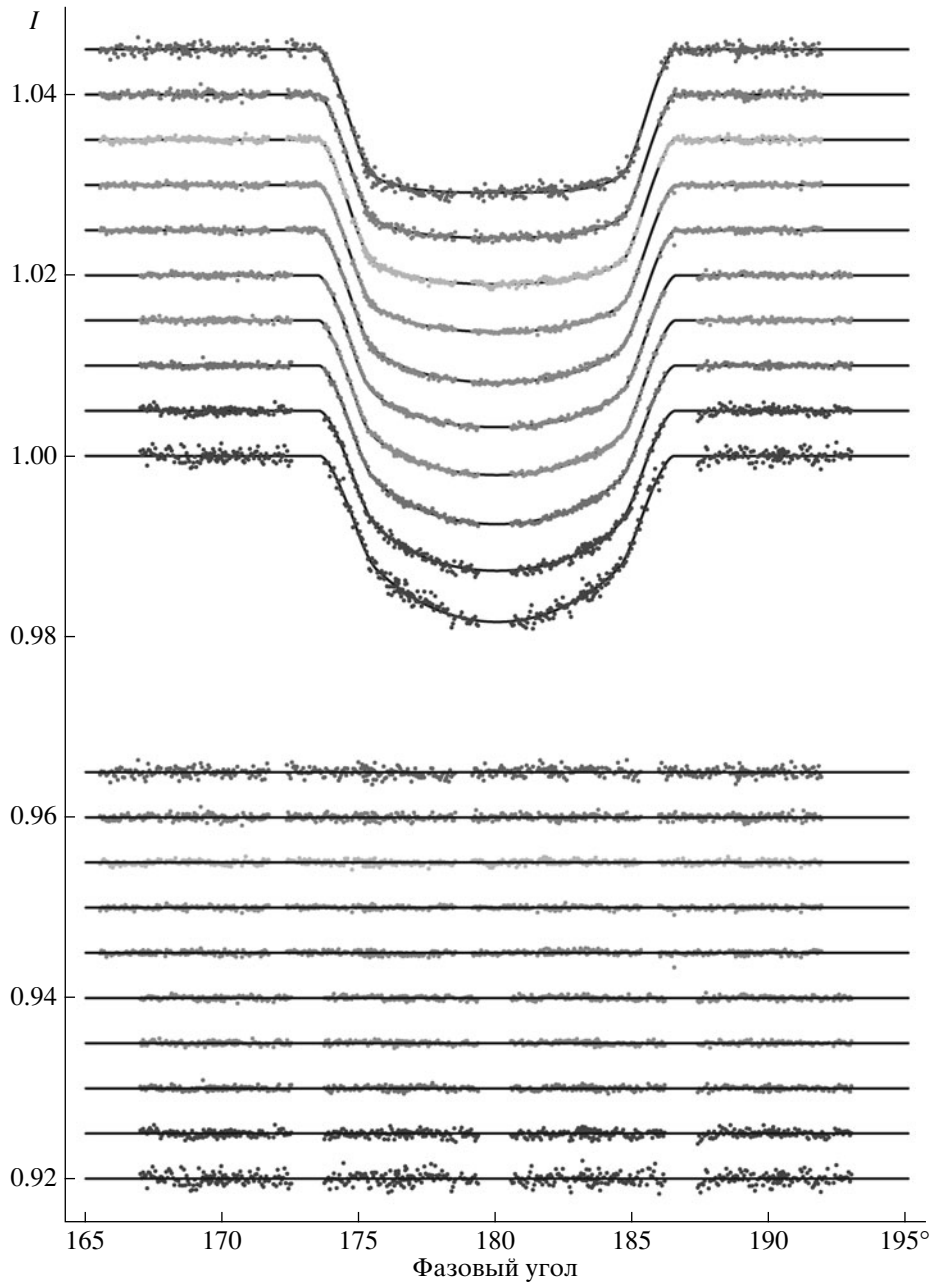


Рис. 1. Наблюдаемые кривые блеска двойной системы с экзопланетой HD 209458 из работы [16], построенные для длин волн (снизу вверх) 3201, 3750 4300, 4849 5398, 5802, 6779, 7755, 8732 и 9708 Å. Внизу указаны соответствующие распределения невязок. Сплошные линии — теоретические кривые, полученные в рамках модели с нелинейным (квадратичным) потемнением к краю и фиксированными коэффициентами потемнения, взятыми из работы [15].

В качестве наблюдательного материала для двойной системы HD 189733 использовались многоцветные кривые блеска, полученные 22, 26 мая и 14 июля 2006 г. на Космическом телескопе имени Хаббла (HST) [17]. В ходе наблюдений получены 10 затменных кривых блеска в диапазоне $\lambda = 5500\text{--}6000, 6000\text{--}6500, 6500\text{--}7000, 7000\text{--}7500, 7500\text{--}8000, 8000\text{--}8500, 8500\text{--}9000, 9000\text{--}9500, 9500\text{--}10000, 10000\text{--}10500$ Å. Более детальная

информация о наблюдательных данных содержится в работе [17]. Далее при анализе кривых блеска мы принимаем следующие центральные длины волн: $\lambda = 5750, 6250, 6750, 7250, 7750, 8250, 8750, 9250, 9750, 10250$ Å. Каждая кривая блеска включает в себя 675 индивидуальных значений блеска с точностью $\sim 5 \times 10^{-4}$ от нормированного внезатменного блеска. Наблюдаемые транзитные

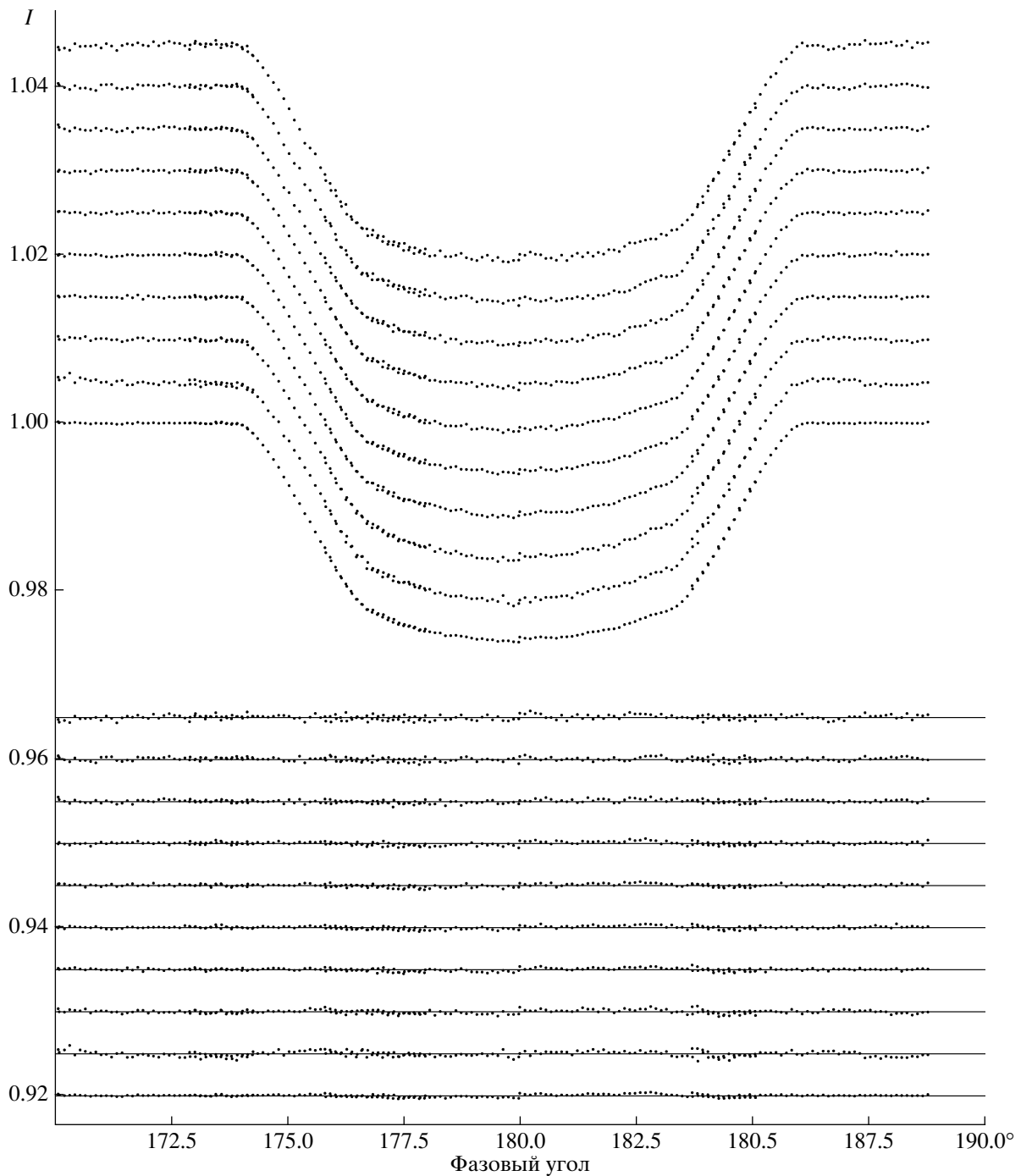


Рис. 2. Наблюдаемые кривые блеска HD 189733. Фильтры — $\lambda = 5500\text{--}10\,500$. Длина волны возрастает снизу вверх. Внизу приведены невязки для случая квадратичного закона потемнения при оптимальных значениях параметров и при фиксированных коэффициентах потемнения, взятых из работы [15].

кривые блеска двойной системы HD 189733 представлены на рис. 2.

Интерпретация транзитных кривых блеска выполнена в модели сферической звезды, затмеваемой сферической экзопланетой (классической модели двух сферических звезд) без эффектов взаимной близости компонент. Такая модель легко

реализуется на современных компьютерах и дает возможность выполнить большое число вариантов решения обратной задачи за сравнительно малое компьютерное время [11]. Используемые при интерпретации транзитных кривых блеска модель и алгоритм подробно изложены в работах [3, 11–14].

Поскольку на транзитной кривой блеска двой-

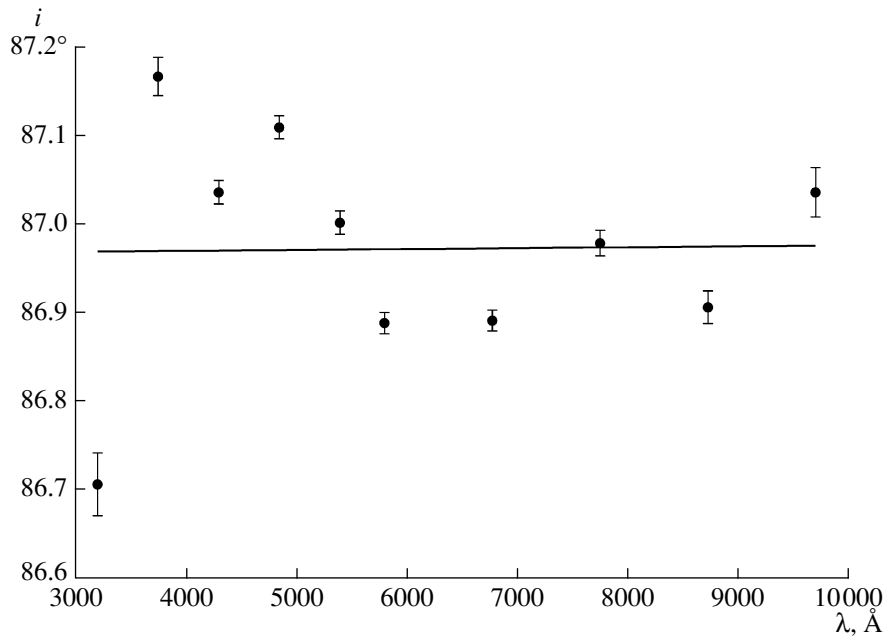


Рис. 3. Зависимость искомого параметра i от длины волны фотометрического фильтра, полученная при интерпретации транзитной кривой блеска двойной системы HD 209458 в предположении квадратичного закона потемнения звезды к краю при фиксированных значениях коэффициентов потемнения к краю. Значения коэффициентов потемнения к краю взяты из работы [15]. Сплошная прямая — МНК-аппроксимация.

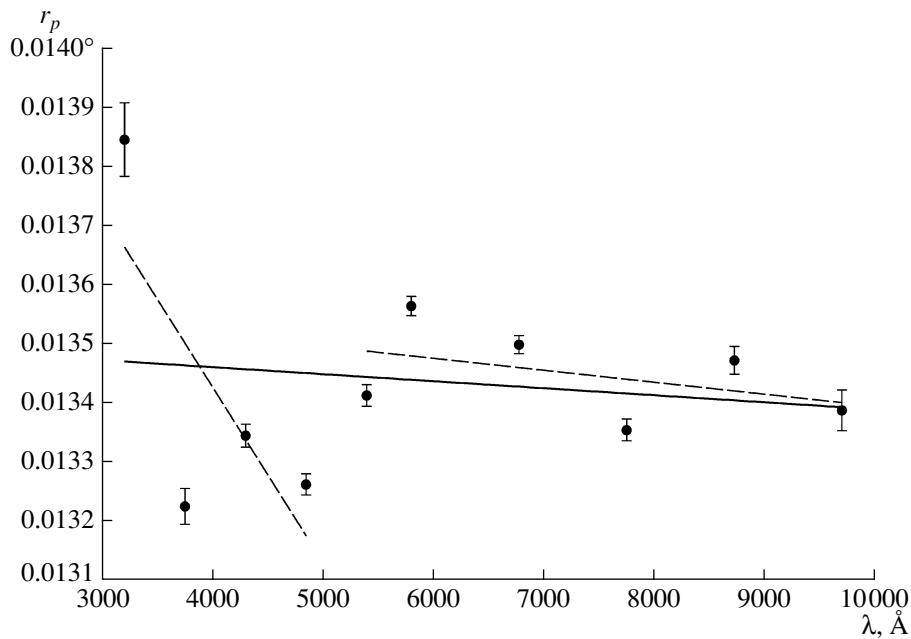


Рис. 4. Зависимость искомого параметра r_p от длины волны фотометрического фильтра, полученная при интерпретации транзитной кривой блеска двойной системы HD 209458 в предположении квадратичного закона потемнения звезды к краю при фиксированных значениях коэффициентов потемнения к краю. Значения коэффициентов потемнения к краю взяты из работы [15]. Сплошная прямая аппроксимирует зависимость во всем диапазоне $\lambda = 3201\text{--}9708 \text{\AA}$, штриховые прямые — МНК-аппроксимации в диапазонах $\lambda < 5000 \text{\AA}$ и $\lambda > 5000 \text{\AA}$.

ной системы HD 189733 вблизи минимума и в вследствие запятненности поверхности звезды [18], правой ветви присутствует возмущение (рис. 1) интерпретация выполнена лишь по левой ветви

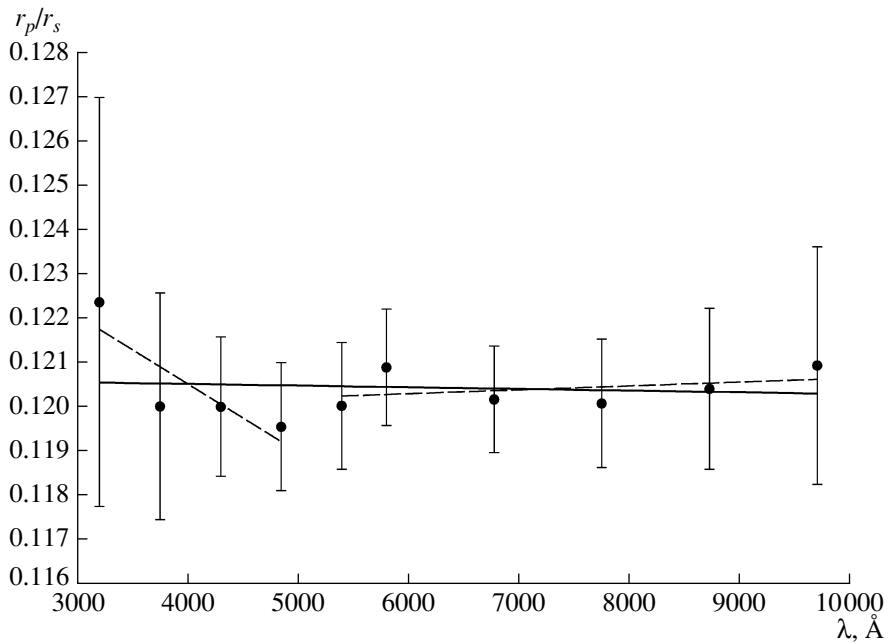


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для отношения r_p/r_s .

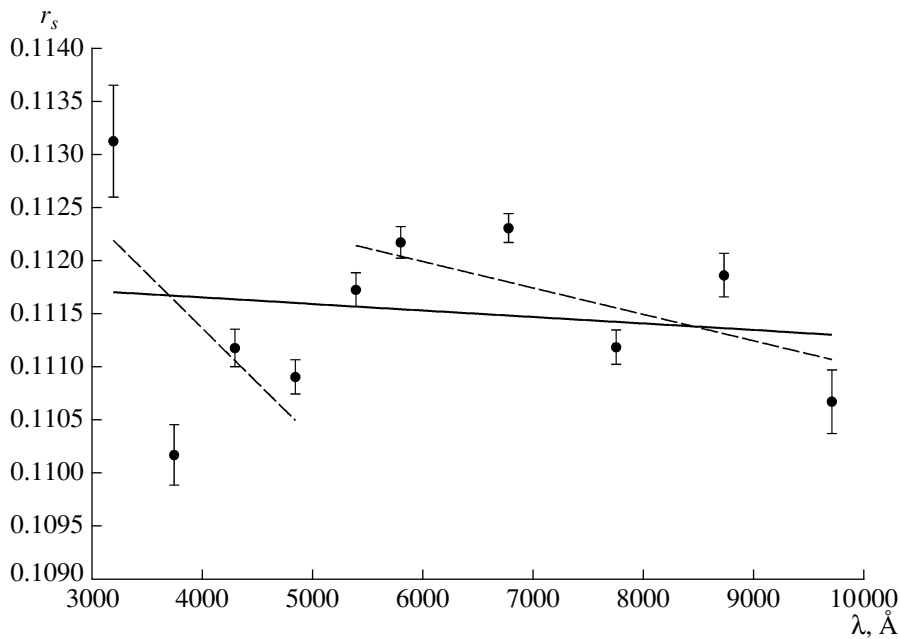


Рис. 6. То же, что на рис. 4, для искомого параметра r_s .

транзитной кривой блеска до значения орбитальной фазы 178° . В работе [13] показано, что для используемого наблюдательного материала наиболее надежна левая ветвь транзитной кривой блеска.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты интерпретации транзитной кривой блеска двойной системы HD 209458 приведены

табл. 1, графически результаты представлены на рис. 3–6. Результаты интерпретации транзитной кривой блеска двойной системы HD 189733 приведены табл. 2, графически результаты представлены на рис. 7–10.

Как видно из табл. 1, значения критического уровня значимости α для моделей, полученных на основе транзитных кривых блеска HD 209458 с

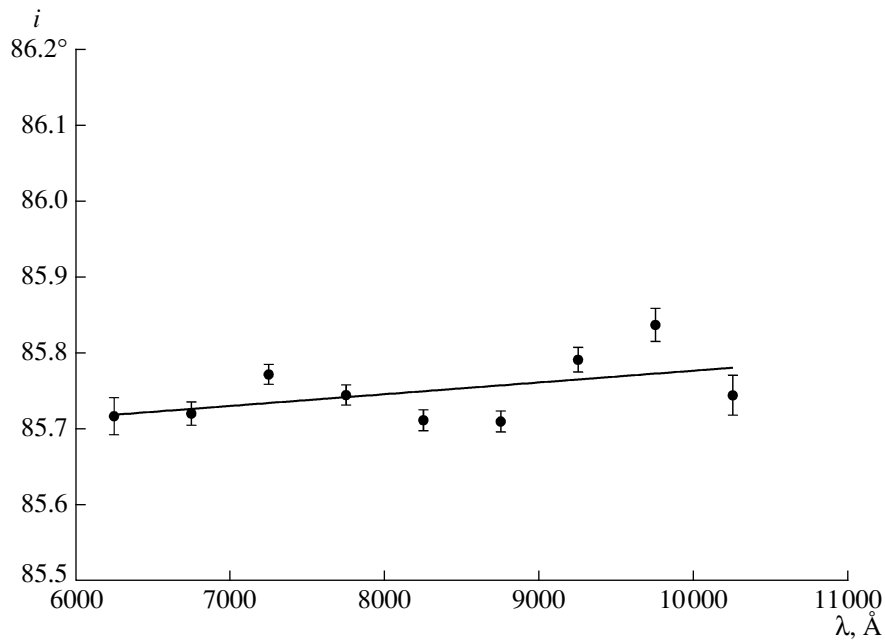


Рис. 7. То же, что на рис. 3, для двойной системы HD 189733.

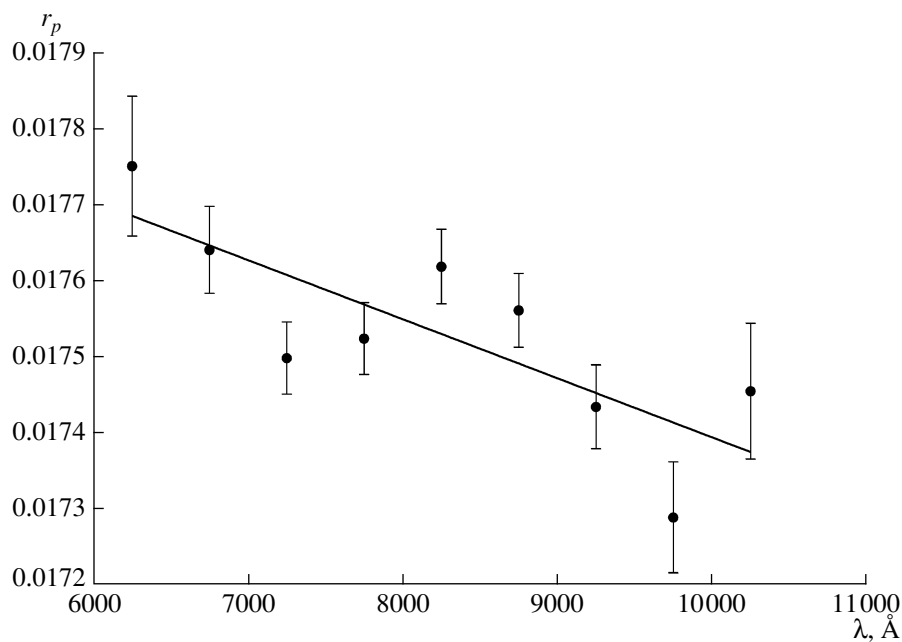


Рис. 8. Зависимость искомого параметра r_p от длины волны фотометрического фильтра, полученная при интерпретации транзитной кривой блеска двойной системы HD 189733 в предположении квадратичного закона потемнения звезды к краю при фиксированных значениях коэффициентов потемнения к краю. Значения коэффициентов потемнения к краю взяты из работы [15]. Сплошная прямая — МНК-аппроксимация.

$\lambda \geq 4300 \text{ \AA}$, близко к нулю. Таким образом, данные модели плохо удовлетворяют наблюдательным данным, что скорее всего, происходит по причине того, что мы зафиксировали значения коэффициентов потемнения к краю. Следует отметить, что это сказывается и на характере зависимости ис-

комых параметров от длины волны фотометрического фильтра. Из представленных зависимостей на рис. 3–6 видно, что общий разброс точек носит нерегулярный характер.

В случае интерпретации транзитных кривых

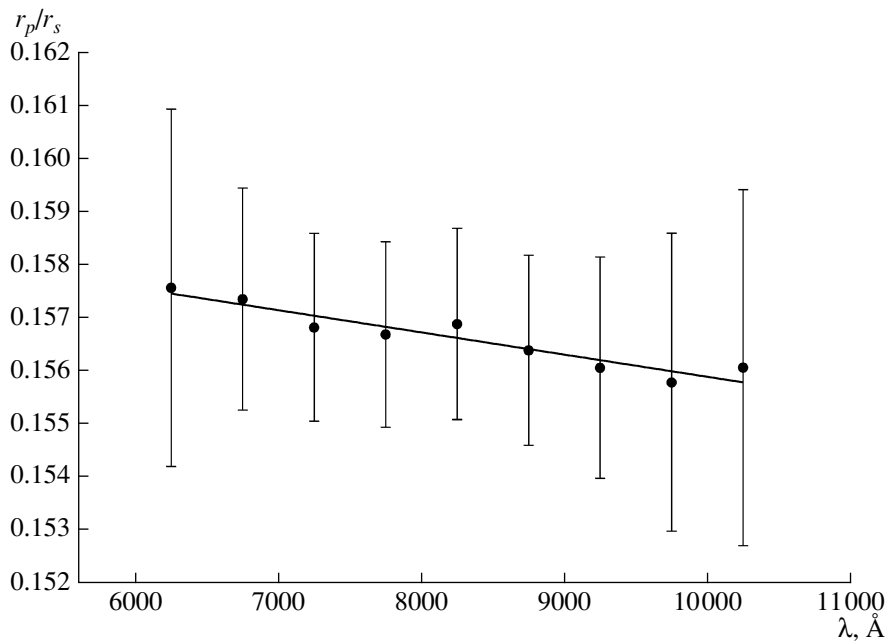


Рис. 9. То же, что на рис. 8, для отношения r_p/r_s .

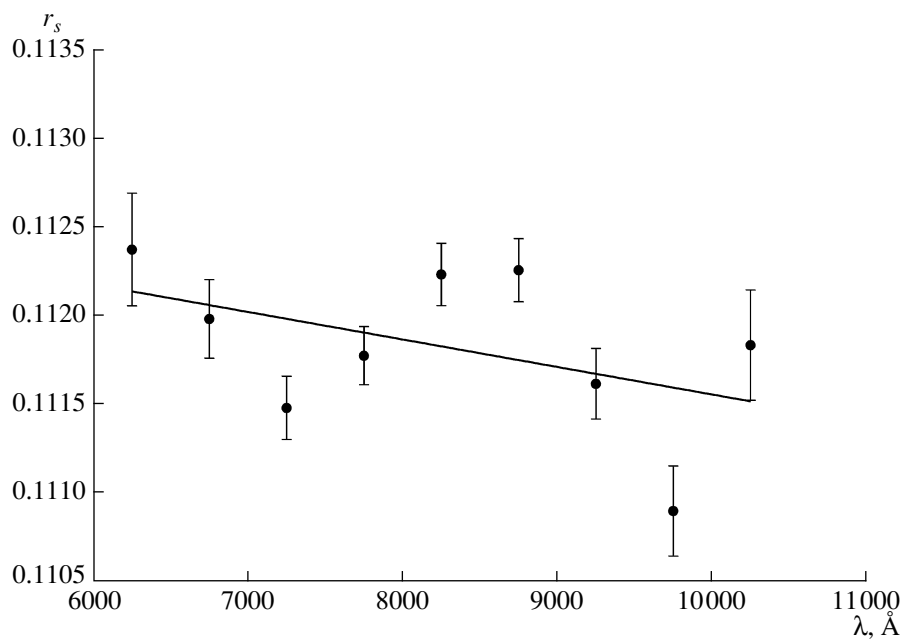


Рис. 10. То же, что на рис. 8, для искомого параметра r_s .

блеска двойной HD 189733 модель сферических звезд [3] значительно лучше удовлетворяет наблюдательным данным. Зависимость от λ значений искомого параметра, представленных на рис. 7–10, носит более регулярный характер, в котором можно выделить единый тренд. Поскольку модель двойной системы, полученная по транзитной кривой блеска в фотометрическом фильтре с цен-

тральной длиной волны $\lambda = 5750 \text{ \AA}$, отвергается по критерию χ_{red}^2 , то полученные для этой кривой блеска значения параметров не использовались в общем анализе.

Для выявления зависимости искомого параметра (наклона орбиты i , радиуса экзопланеты r_p , радиуса звезды r_s) от длины волны λ для двойных систем HD 209458 и HD 189733 использова-

Таблица 2. Результаты интерпретации наблюдаемых кривых блеска (левой ветви кривой блеска) из работы [18] двойной системы с экзопланетой HD 189733 закона потемнения к краю при фиксированных коэффициентах потемнения (ошибка параметров получена в рамках квадратичного метода дифференциальных поправок; ошибка приведена на уровне 1σ ; в двух последних столбцах даны приведенные значения хи-квадрат и соответствующие уровни значимости α)

$\lambda, \text{\AA}$	r_s	$\sigma(r_s)$	r_p	$\sigma(r_p)$	r_p/r_s	$\sigma(r_p/r_s)$	i	$\sigma(i)$	χ_{red}^2	α
5750	0.1102	0.00028	0.01717	0.000061	0.1558	0.0025	86.03°	0.018	5.56	0.00
6250	0.1127	0.00039	0.01775	0.000092	0.1576	0.0034	85.72	0.024	0.58	1.00
6750	0.1121	0.00024	0.01764	0.000057	0.1574	0.0021	85.72	0.015	0.52	1.00
7250	0.1116	0.00020	0.01750	0.000048	0.1568	0.0018	85.77	0.013	0.69	0.98
7750	0.1118	0.00020	0.01752	0.000047	0.1567	0.0017	85.75	0.013	1.02	0.55
8250	0.1123	0.00021	0.01762	0.000049	0.1569	0.0018	85.71	0.014	1.80	0.0005
8750	0.1123	0.00021	0.01756	0.000049	0.1564	0.0018	85.71	0.014	0.88	0.81
9250	0.1117	0.00024	0.01743	0.000055	0.1561	0.0021	85.79	0.016	0.99	0.61
9750	0.1110	0.00032	0.01729	0.000073	0.1558	0.0028	85.84	0.022	1.38	0.054
10250	0.1118	0.00038	0.01746	0.000090	0.1561	0.0034	85.75	0.026	0.62	1.00

Примечание. Значение $\chi_{red}^2 < 1$ свидетельствуют, скорее всего, о скоррелированности наблюдаемых точек на кривых блеска.

лась линейная аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. HD 209458

Для двойной системы HD 209458 можно отметить лишь слабую зависимость наклона орбиты i от длины волны λ (рис. 3). Зависимость остальных искоемых параметров (r_p , r_s , r_p/r_s) от длины волны λ носит более выраженный характер, хотя разброс точек на соответствующих кривых весьма велик.

Из рис. 4 видно, что разброс точек относительно тренда, выраженного линейной МНК-аппроксимацией, достаточно велик. Отклонения от тренда особенно велики в диапазоне $\lambda < 5000 \text{\AA}$. В связи с этим тренд зависимости r_p от λ исследовался отдельно для области со значениями $\lambda < 5000 \text{\AA}$ и $\lambda > 5000 \text{\AA}$ (рис. 4). Аналогично мы поступили и при анализе зависимости отношения радиусов планеты и звезды r_p/r_s и радиуса звезды r_s от длины волны λ (рис. 5 и 6, соответственно). Для диапазона длин волн $\lambda < 5000 \text{\AA}$ зависимость радиуса экзопланеты HD 209458b r_p от длины волны имеет более ярко выраженный характер в сравнении с участком $\lambda > 5000 \text{\AA}$ (рис. 4). Хотя если отбросить точку, соответствующую $\lambda = 3201 \text{\AA}$, то эта зависимость меняет знак.

На рис. 4 отмеченные области качественно отличаются друг от друга углом наклона средней аппроксимирующей прямой. Как и следует ожидать, зависимость $\lambda < 5000 \text{\AA}$ имеет более крутой ход в сравнении с зависимостью для точек, имеющих $\lambda > 5000 \text{\AA}$ (рис. 4). Данный излом подтверждает вывод о том, что в синем конце спектра эффекты поглощения света звезды деформированной атмосферой экзопланеты существенны.

Согласно недавним работам [7, 8], горячий Юпитер в двойной системе HD 209458b, вследствие слабого магнитного поля и взаимодействия со звездным ветром материнской звезды, значительно отклоняется от сферической формы и имеет газовый шлейф в виде кометного хвоста. Таким образом, качественный ход зависимости на рис. 4 укладывается в представление экзопланеты HD 209458b как планеты-кометы [7, 8].

Наши выводы о двойной системе HD 209458 качественно согласуются с выводами авторов работы [4], показавшими, что в двойной системе WASP-12b транзитная кривая блеска в УФ-диапазоне значимо отличается от транзитной кривой блеска в видимом диапазоне — и по длительности, и по глубине затмения.

Можно предполагать что поглощение в оптическом диапазоне $\lambda > 5000 \text{\AA}$ меньше, чем в УФ-диапазоне, поэтому наклон аппроксимирующей тренд прямой на рис. 4 для точек со значением $\lambda > 5000 \text{\AA}$ заметно отличается от наклона в диапазоне $\lambda < 5000 \text{\AA}$. Зависимость радиуса экзопла-

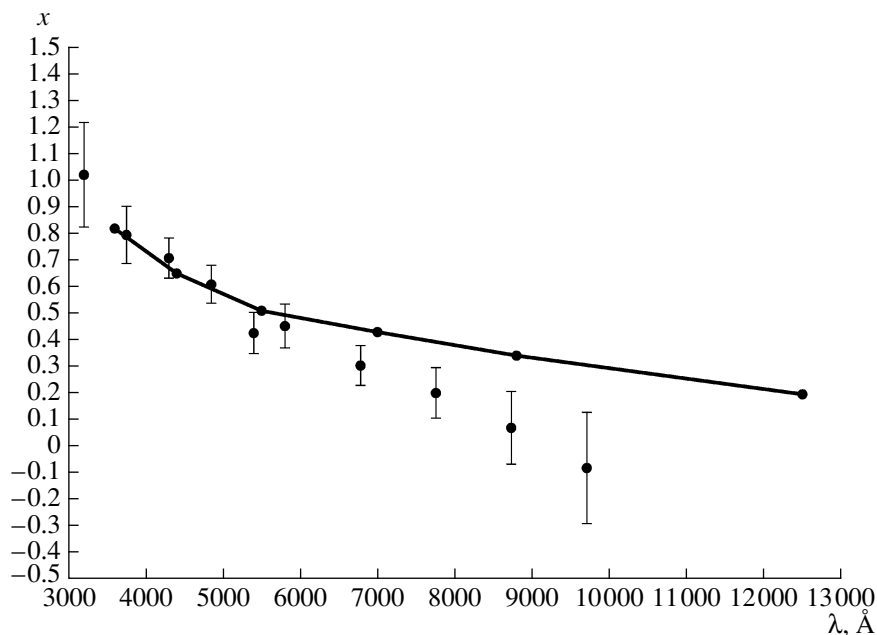


Рис. 11. Зависимость эмпирических [12] и теоретических [15] значений линейного коэффициента квадратичного закона потемнения к краю для звезды HD 209458 от центральной длины волны фотометрического фильтра. Ошибки коэффициента потемнения x получены методом дифференциальных поправок. Уровень ошибок — 1σ .

неты от длины волны для $\lambda > 5000 \text{ \AA}$ становится не столь выраженной (рис. 4).

Для полноты анализа мы приводим на рис. 11 зависимость эмпирических значений линейного коэффициента x квадратичного закона потемнения, полученного ранее в работе [12], от длины волны λ . На этом же рисунке приведены новейшие теоретические значения коэффициентов потемнения к краю из работы Кларе [15]. Из рис. 11 видно, что теоретические и эмпирические значения находятся в согласии для коротких длин волн $\lambda < 5000 \text{ \AA}$ и не согласуются для диапазона $\lambda > 5000 \text{ \AA}$.

Таким образом, приходится признать, что, хотя в случае HD 209458 длинноволновой диапазон $\lambda > 5000 \text{ \AA}$ менее подвержен влиянию эффектов поглощения света звезды деформированной протяженной атмосферой экзопланеты (в том числе “кометным хвостом”), эмпирические значения линейного коэффициента потемнения в квадратичном законе не согласуются с теоретическими для $\lambda > 5000 \text{ \AA}$. Причина такого расхождения наблюдений и теории пока остается неясной.

4.2. HD 189733

Модель двух сферических звезд для системы HD 189733 согласно критерию χ^2 может быть признанной адекватной наблюдаемым транзитным кривым блеска (за исключением транзитной кривой

блеска с центральной длиной волны $\lambda = 5750 \text{ \AA}$, которая не принималась во внимание при анализе результатов интерпретации).

Наклонение орбиты двойной системы HD 189733 слабо зависит от длины волны (рис. 7). В отличие от экзопланеты в системе HD 209458, в системе HD 189733 зависимость радиуса экзопланеты от длины волны носит более регулярный характер. Радиус экзопланеты r_p в диапазоне $\lambda = 6000\text{--}10\,000 \text{ \AA}$ меняется на $\sim 2.5\%$, причем радиус r_p монотонно растет с уменьшением длины волны, что свидетельствует о наличии у экзопланеты атмосферы, рассеивающей свет звезды по рэлеевскому закону. То что радиус звезды r_s в этом диапазоне меняется незначительно на $\sim 0.7\%$ (рис. 10), позволяет считать выявленную нами зависимость r_p от λ достаточно надежной. Данная зависимость подтверждает наличие рэлеевского рассеяния в атмосфере экзопланеты [13, 17].

Мы провели сравнительный анализ полученных ранее в работе [13] линейных коэффициентов потемнения к краю x в квадратичном законе, с новейшими теоретическими коэффициентами потемнения к краю из работы Кларе [15]. Эмпирические и теоретические значения коэффициентов потемнения к краю для звезды HD 189733 находятся в хорошем согласии (рис. 12). Исключение составляет коэффициент потемнения к краю x , полученный на основе транзитной кривой блеска в фильтре

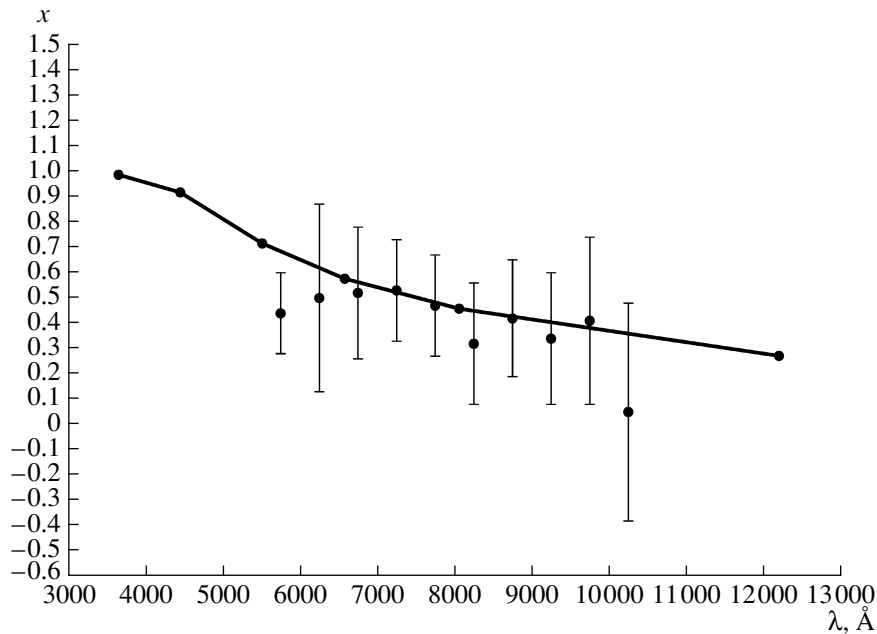


Рис. 12. Зависимость эмпирических [13] и теоретических [15] значений линейного коэффициента квадратичного закона потемнения к краю звезды HD 189733 от центральной длины волны фотометрического фильтра. Ошибки коэффициента потемнения x получены методом дифференциальных поправок. Уровень ошибок -1σ .

с центральной длиной волны $\lambda = 5750 \text{ \AA}$, модель которой по критерию χ^2_{red} отвергается (табл. 2).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей статье мы проанализировали многоцветные транзитные кривые блеска двойных систем с экзопланетами HD 209458 и HD 189733 при фиксированных теоретических коэффициентах потемнения к краю в квадратичном законе потемнения, взятых из работы [15]. Таким образом, считая модель звездной атмосферы правильной, мы попытались объяснить расхождение между эмпирическими [3, 11–14] и теоретическими [2, 15] значениями коэффициентов потемнения к краю влиянием протяженной несферической атмосферы экзопланеты. Для системы HD 209458 оказалось, что зависимость параметров i , r_s и r_p от длины волны λ наиболее существенна в коротковолновом диапазоне $\lambda = 3201\text{--}5000 \text{ \AA}$, в то время как в длинноволновом диапазоне $\lambda = 5000\text{--}9708 \text{ \AA}$ зависимость этих параметров от λ слабая. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что эффекты поглощения света звезды протяженной деформированной атмосферой экзопланеты заметно проявляют себя лишь в коротковолновом диапазоне и малы в длинноволновом диапазоне.

В связи с этим, казалось бы, именно в коротковолновом диапазоне $\lambda = 3201\text{--}5000 \text{ \AA}$ эмпирические значения коэффициентов потемнения

к краю должны наиболее сильно отличаться от теоретических [2, 15]. Однако в случае системы HD 209458 ситуация противоположная: в коротковолновом диапазоне наблюдается хорошее согласие эмпирических и теоретических значений коэффициентов потемнения к краю (рис. 11), в то время как в длинноволновом диапазоне наблюдается их значительное расхождение. Причина такого расхождения остается неясной, поэтому приходится признать, что система HD 209458 пока остается “вызовом для теории звездных атмосфер”, как считает Кларе [2].

В случае системы HD 189733 зависимость наклона орбиты i от длины волны λ является незначительной, а относительное изменение радиуса звезды r_s с длиной волны составляет менее $\sim 1\%$, что свидетельствует о том, что эффекты поглощения света звезды протяженной деформированной атмосферой планеты в длинноволновом диапазоне $\lambda = 6000\text{--}10\,000 \text{ \AA}$ незначительны, и простая модель двойной системы из двух сферических звезд на круговой орбите вполне адекватна имеющимся наблюдательным данным. Вместе с тем, поскольку радиус затмевающей экзопланеты возрастает с уменьшением длины волны λ на $\sim 2.5\%$ в диапазоне $\lambda = 6000\text{--}10\,000 \text{ \AA}$, можно считать, что экзопланта в данном случае обладает квазисферической атмосферой, рассеивающей свет по рэлеевскому закону. Эмпирические значения коэффициентов потемнения к краю [13] в квадратичном законе

потемнения краю в случае системы HD 189733 согласуются с теоретическими [2, 15] в диапазоне $\lambda = 6000\text{--}10\,000\text{ \AA}$, что подтверждает современную теорию тонких звездных атмосфер [15].

Дальнейшие тщательные исследования проблемы потемнения к краю звезд, затмеваемых экзопланетами, представляют большой интерес.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых—кандидатов наук МК-893.2012.2 и грантом Российского фонда фундаментальных исследований 12-02-31466.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Southworth, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **386**, 1644 (2008).
2. A. Claret, *Astron. and Astrophys.* **506**, 1335 (2009).
3. М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **85**, 121 (2008).
4. L. Fossati, C. A. Haswell, C. S. Froning, L. Hebb, S. Holmes, U. Kolb, Ch. Helling, A. Carter, P. Wheatley, A. C. Cameron, B. Loeillet, D. Pollacco, R. Street, H. C. Stempels, E. Simpson, S. Udry, Y. C. Joshi, R. G. West, I. Skillen, and D. Wilson, *Astrophys. J. (Letters)* **714**, L222 (2010).
5. J. Llama, K. Wood, M. Jardine, A. A. Vidotto, Ch. Helling, L. Fossati, and C. A. Haswell, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **416**, L41 (2011).
6. A. A. Vidotto, M. Jardine, and Ch. Helling, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 1573 (2011).
7. D. Bisikalo, P. Kaygorodov, D. Ionov, V. Shematovich, H. Lammer, and L. Fossati, *Astropys. J.* **764**, 19 (2013).
8. Д. В. Бисикало, П. В. Кайгородов, Д. Э. Ионов, В. И. Шематович, *Астрон. журн.* **90**, 779 (2013); e-Print arXiv:1311.4441v2 [astro-ph.EP] (2013).
9. E. M. Schneiter, P. F. Velazquez, A. Esquivel, and A. C. Raga, *Astrophys. J. (Letters)* **671**, L57 (2007).
10. V. Bourrier, and A. Lecavelier des Etangs, *Astron. and Astrophys.* **557**, A124 (2013).
11. М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **86**, 778 (2009).
12. М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **87**, 1199 (2010).
13. М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **88**, 1139 (2011).
14. М. К. AbubekeroV and N. Yu. Gostev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **432**, 2216 (2013).
15. A. Claret, *Astron. and Astrophys.* **552**, A16 (2013).
16. H. A. Knutson, D. Charbonneau, R. W. Noyes, T. M. Brown, and R. L. Gilliland, *Astrophys. J.* **655**, 564 (2007).
17. F. Pont, R. L. Gilliland, C. Moutou, D. Charbonneau, F. Bouchy, T. M. Brown, M. Mayor, D. Queloz, N. Santos, and S. Udry, *Astron. and Astrophys.* **476**, 1347 (2007).
18. F. Pont, H. Knutson, R. L. Gilliland, C. Moutou, and D. Charbonneau, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **385**, 109 (2008).