АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023, том 100, № 6, с. 481–487

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОШИБКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОТЕМНЕНИЯ К КРАЮ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ С ЭКЗОПЛАНЕТОЙ

© 2023 г. М. К. Абубекеров[1,*], Н. Ю. Гостев[1,]**

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

**E-mail: marat@sai.msu.ru*

***E-mail: ngostev@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.
После доработки 02.05.2023 г.
Принята к публикации 18.05.2023 г.

На основе наблюдаемых кривых блеска Kepler-5, Kepler-6, Kepler-7, HD 209458 выполнен поиск геометрических параметров двойной системы с экзопланетой для разных значений коэффициентов потемнения материнской звезды к краю. Показано, что для наблюдаемых кривых блеска с относительной точностью 10^{-4}–10^{-5} ошибка в несколько раз в значении коэффициента потемнения к краю не оказывает заметного влияния на значения радиуса планеты, радиуса звезды и наклонения орбиты.

Ключевые слова: коэффициенты потемнения звезды к краю, транзитные кривые блеска, геометрические параметры, радиус планеты, радиус звезды

DOI: 10.31857/S0004629923060026, **EDN:** ZETWEW

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] показано значимое расхождение эмпирических значений коэффициентов потемнения к краю для кривых блеска одной и той же двойной звездной системы, полученных в разные эпохи. Различия в эмпирических значениях коэффициентов потемнения к краю между кривыми блеска, отстоящими друг от друга на 15 дней (около половины периода оборота звезды вокруг своей оси вращения), отличаются в несколько раз.

Также неоднократно отмечалось расхождение между теоретическими и наблюдаемыми коэффициентами потемнения к краю, вычисленных на основе высокоточных транзитных кривых блеска. Например, в работе [2] исследовалась группа звезд, собранная в довольно малом диапазоне по атмосферным параметрам ($T_{\rm eff}$ = 5647–6297 K, $\log g$ = 3.96–4.59, [M/H] = = –0.55…+0.33), что обусловливало довольно малый разброс величин коэффициентов потемнения. Сравнивались эмпирические коэффициенты потемнения к краю и коэффициенты, полученные с помощью синтетической фотометрии (или прямой подгонкой к моделям атмосфер). Несколько удивительным результатом было то, что согласие между этими коэффициентами варьировалось от отличного (Кеплер-6) до статистически неприемлемого (например, Кеплер-5). Детали исследований приведены в работах [3–5].

Различие коэффициентов потемнения к краю вызвано физическими процессами, приводящими к неоднородной поверхности материнской звезды, остающимися за рамками модели, используемой для интерпретации двойной системы, но от эффектов которых сложно и порой невозможно очистить транзитную кривую блеска. Вследствие этого при интерпретации транзитной кривой блеска коэффициенты потемнения к краю не могут быть получены с той точностью, которая формально соответствует точности наблюдений. Неточные значения коэффициентов потемнения к краю могут сказаться на значении геометрических параметров двойной системы. В связи с неточным знанием коэффициента потемнения к краю возникает закономерный вопрос: насколько вариации значений коэффициентов потемнения к краю влияют на радиус экзопланеты и радиус звезды?

Данный вопрос рассматривался и ранее. Например, в работе [6], проанализировав 38 кривых блеска, ее авторы пришли к выводу, что при моделировании транзитов вполне достаточно установить общепринятые теоретические коэффициенты потемнения к краю в качестве фиксирован-

ных параметров. Более того, использование теоретических коэффициентов потемнения к краю даже необходимо в случае транзитных систем с высоким импакт-параметром, поскольку коэффициенты потемнения к краю материнских звезд не могут быть определены по их транзитным кривым блеска.

Авторы данной работы на основе наблюдаемых кривых блеска двойных систем Kepler-5, Kepler-6, Kepler-7 и HD 209458 изучили степень влияния изменения коэффициентов потемнения к краю на оптимальные значения радиуса экзопланеты, радиуса звезды и наклонения орбиты для линейного и квадратичного закона потемнения к краю. Отметим, что рассмотренные в данной работе кривые блеска анализировались в упомянутой выше работе [2], а первые три входят в число исследованных в работах [3, 6]. При этом авторы данной работы выполнили интерпретацию наблюдательного материала на разработанном ими высокоточном алгоритме, который дает более надежные значения невязок χ^2 [7]. Также авторы сконцентрировались не на массовости исследуемых кривых блеска (как в работе [6]), а на детальности исследования зависимости результатов интерпретации кривой блеска от вариаций коэффициентов потемнения к краю.

Отметим, что работа носит методологический характер. Интерпретация наблюдаемых транзитных кривых блеска, используемых в работе, выполнена в предположении отсутствия запятненности поверхности материнской звезды.

2. АЛГОРИТМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Метод интерпретации наблюдаемых транзитных кривых блеска двойной системы с экзопланетой основан на алгоритме высокоточного вычисления блеска при прохождении планеты по диску звезды. Алгоритм подробно описан в цикле работ [5, 7–10].

Коротко об алгоритме сообщим, что использовалась модель двух сферических звезд на круговой орбите в отсутствие эффектов отражения и эллипсоидальности. Относительный радиус полости Роша в десятки раз превосходит радиус планеты [11]. Поэтому наше предположение о сферичности планеты вполне обосновано. То же самое можно сказать и об оптической звезде.

При расчете кривой блеска в качестве функций распределения яркости по диску звезды использовались линейный закон потемнения к краю диска с линейным коэффициентом потемнения к краю x,

$$I(\rho) = I_0\left(1 - x + x\sqrt{1-\frac{\rho^2}{r_s^2}}\right), \qquad (1)$$

и квадратичный закон потемнения к краю диска, отличающийся от линейного дополнительным слагаемым, содержащим квадратичный коэффициент потемнения к краю y:

$$I(\rho) = I_0\left(1 - x\left(1-\sqrt{1-\frac{\rho^2}{r_s^2}}\right) - y\left(1-\sqrt{1-\frac{\rho^2}{r_s^2}}\right)^2\right). \qquad (2)$$

Здесь ρ – полярное расстояние от центра диска звезды, I_0 – яркость в центре диска, а r_s – радиус диска звезды. Яркость в центре планеты и, соответственно, яркость в любой точке ее диска предполагается равной нулю. Планета в орбитальной фазе $\theta = \pi$ затмевает звезду. Единицей длины в наших моделях является расстояние между центрами масс звезды и планеты a ($a = 1$), орбита считается круговой. “Третий свет” в модели отсутствует. Радиус планеты обозначен как r_p. Искомыми параметрами модели являются: радиусы звезды и планеты, r_s и r_p, угол наклона орбиты i, коэффициент потемнения к краю x, а в случае квадратичного закона потемнения к краю – также коэффициент потемнения y.

Полный блеск системы предполагается известным, в используемой нормировке он равен единице. Наблюдаемые значения блеска предполагаются распределенными по нормальному закону. Также предполагаются известными стандартные отклонения наблюдаемых значений блеска σ. Значения радиусов звезды и планеты задаются в единицах радиуса орбиты.

Интерпретация наблюдательных данных, а именно, поиск геометрических параметров двойной системы выполнен как для линейного, так и для квадратичного закона потемнения материнской звезды к краю. Для фиксированных значений коэффициентов потемнения к краю, варьируемых в широком диапазоне численных значений, для наблюдаемых кривых блеска двойных систем Kepler-5, Kepler-6, Kepler-7, HD 209458 вычислялись оптимальные значения геометрических параметров, доставляющих минимальное значение невязки χ^2.

3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В работе выполнен анализ высокоточных транзитных кривых блеска двойных систем с экзопланетой HD 209458b, Kepler-5b, Kepler-6b и Kepler-7b.

Наблюдаемая кривая блеска HD 209458 получена на Космическом телескопе имени Хаббла (HST) в апреле-мае 2000 г. Кривая блеска включает в себя 556 индивидуальных значений блеска двойной системы. Среднеквадратичная ошибка индивидуального измерения для разных точек

кривой блеска меняется от $\sigma_i^{obs} = 1.13\times10^{-4}$ до 2.47×10^{-4} (в долях внезатменной интенсивности). Величины относительных ошибок (в долях глубины затмения) лежат в пределах от $\sim7\times10^{-3}$ до $\sim1.5\times10^{-2}$. Более подробно наблюдательные данные представлены в работе [12].

Наблюдаемые транзитные кривые блеска Kepler-5b, Kepler-6b, Kepler-7b подробно описаны в работах [13–15]. Кривые блеска были получены на космической обсерватории Kepler с 1 мая по 14 июня 2009 г.

Звездные системы Kepler-5, Kepler-6, Kepler-7 являются объектами $\sim13^m$ звездной величины. Кривые блеска получены в оптическом "белом свете" с диапазоном 400–850 нанометров и в так называемой "длинной моде" (long-cadence mode) с итоговой экспозицией в 30 мин. В этой моде базовая съемка длительностью 6 с копилась и складывалась до получения и передачи на Землю одной единственной 30 мин экспозиции, из которой и получались индивидуальные значения блеска исследованных на КО Кеплер систем. Транзитные кривые блеска каждой из исследуемых систем включают в себя около 2100 индивидуальных значений блеска системы, большинство которых приходится на внезатменную часть кривой блеска.

Точность транзитных кривых блеска двойных систем Kepler-5b, Kepler-6b, Kepler-7b в интенсивностях составила $\sigma = 1.3759\times10^{-4}$, 1.2874×10^{-4} и 1.0248×10^{-4} соответственно. Относительная ошибка (по отношению к глубине затмения) исследуемых в работе транзитных кривых блеска составляет $\sim1\%$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В ПРЕДПОЛОЖЕНИИ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА ПОТЕМНЕНИЯ К КРАЮ

Результаты интерпретации кривых блеска Kepler-5, Kepler-6, Kepler-7 и HD 209458, выполненные в линейном законе потемнения к краю, представлены в табл. 1–4 соответственно.

Для фиксированных значений коэффициентов потемнения к краю, варьируемых в диапазоне от 0.0 до 0.6, вычислялись оптимальные значения геометрических параметров, показывающие минимальное значение невязки χ^2. Указанный диапазон значений коэффициентов потемнения к краю рассматривался по причине того, что большинство эмпирических значений коэффициентов потемнения к краю располагаются в его пределах, а также потому, что величина диапазона на порядок больше стандартных отклонений значений коэффициентов потемнения к краю. Для исследования и демонстрации влияния вариации значений коэффициентов потемнения к краю на значения геометрических параметров использовались 5–7 значащих цифр в значениях искомых параметров и невязки χ^2.

Таблица 1. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы Kepler-5 в линейном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	81.61	0.21087	0.017746	1.0537503
0.05	81.609	0.21088	0.017747	1.0537491
0.1	81.608	0.21089	0.017748	1.0537479
0.15	81.607	0.2109	0.01775	1.0537466
0.2	81.605	0.21092	0.017751	1.0537453
0.25	81.604	0.21093	0.017753	1.0537441
0.3	81.602	0.21095	0.017755	1.0537428
0.35	81.599	0.21098	0.017758	1.0537417
0.4	81.596	0.211	0.01776	1.0537407
0.45	81.593	0.21104	0.017764	1.05374
0.5	81.589	0.21108	0.017768	1.05374
0.55	81.584	0.21113	0.017774	1.0537408
0.6	81.578	0.21119	0.01778	1.0537433

Таблица 2. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы Kepler-6 в линейном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	82.989	0.17919	0.018024	1.0741068
0.05	82.989	0.17919	0.018024	1.0740978
0.1	82.989	0.17919	0.018024	1.0740889
0.15	82.989	0.17919	0.018024	1.0740801
0.2	82.989	0.17919	0.018024	1.0740714
0.25	82.988	0.17919	0.018025	1.0740629
0.3	82.988	0.1792	0.018025	1.0740547
0.35	82.988	0.1792	0.018025	1.074047
0.4	82.987	0.1792	0.018026	1.0740398
0.45	82.987	0.17921	0.018027	1.0740333
0.5	82.986	0.17921	0.018027	1.0740277
0.55	82.985	0.17922	0.018029	1.0740234
0.6	82.983	0.17923	0.018031	1.0740207

Таблица 3. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы Kepler-7 в линейном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	83.095	0.17262	0.014707	1.0560077
0.05	83.096	0.17261	0.014706	1.0560004
0.1	83.097	0.1726	0.014704	1.0559933
0.15	83.098	0.17258	0.014703	1.0559862
0.2	83.099	0.17257	0.014702	1.0559794
0.25	83.1	0.17256	0.0147	1.0559729
0.3	83.102	0.17254	0.014699	1.0559668
0.35	83.103	0.17252	0.014697	1.0559613
0.4	83.105	0.1725	0.014695	1.0559566
0.45	83.107	0.17248	0.014692	1.055953
0.5	83.109	0.17245	0.01469	1.0559507
0.55	83.111	0.17243	0.014687	1.0559502
0.6	83.114	0.17239	0.014683	1.055952

Таблица 4. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы HD 209458 в линейном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	86.503	0.11453	0.014032	1.1307138
0.05	86.502	0.11454	0.014033	1.1306579
0.1	86.501	0.11455	0.014035	1.1306004
0.15	86.5	0.11456	0.014036	1.1305415
0.2	86.498	0.11457	0.014038	1.1304821
0.25	86.497	0.11459	0.014041	1.130423
0.3	86.495	0.1146	0.014043	1.1303659
0.35	86.493	0.11462	0.014046	1.130313
0.4	86.49	0.11464	0.014049	1.1302678
0.45	86.487	0.11466	0.014053	1.1302357
0.5	86.484	0.11469	0.014057	1.1302249
0.55	86.48	0.11472	0.014062	1.1302481
0.6	86.476	0.11476	0.014068	1.1303259

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В ПРЕДПОЛОЖЕНИИ КВАДРАТИЧНОГО ЗАКОНА ПОТЕМНЕНИЯ К КРАЮ

Результаты интерпретации кривых блеска Kepler-5, Kepler-6, Kepler-7 и HD 209458, выполненных в предположении квадратичного закона потемнения к краю, представлены соответственно в табл. 5–8.

Для фиксированных значений коэффициентов потемнения к краю, варьируемых в диапазоне от 0.0 до 0.6, вычислялись оптимальные значения геометрических параметров с минимальным значением невязки χ^2.

Для иллюстрации зависимости оптимального значения радиуса планеты от значений коэффициентов потемнения к краю мы для системы HD 209458 изобразили графически зависимости радиуса планеты от квадратичного коэффициента потемнения к краю y при шести фиксированных значениях линейного коэффициента потемнения к краю x (рис. 1). Эти значения x мы положили равными 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимальные значения геометрических параметров 4-х исследованных систем (радиусы звезды r_s и планеты r_p, коэффициенты потемнения x и y, углы наклонов i и значения невязок χ^2), соответствующие минимуму невязки при интерпретации наблюдаемой кривой блеска в линейном и квадратичном законах потемнения к краю, собраны в табл. 9.

Из данных табл. 1–4, в которых представлены результаты интерпретации наблюдаемых транзитных кривых блеска двойных систем Kepler-5, Kepler-6, Kepler-7, HD 209458 соответственно, видно, что существенное изменение коэффициента потемнения к краю не оказывает столь же существенного влияния на значения геометрических параметров.

Так, например, из табл. 4 видно, что в предположении значения линейного коэффициента потемнения звезды к краю $x = 0.1$ значения радиуса звезды и планеты составляют $r_s = 0.11455$ и $r_p = 0.014035$, а в предположении линейного коэффициента $x = 0.6$ радиусы звезды и планеты составляют $r_s = 0.11476$ и $r_p = 0.014068$. При изменении коэффициента потемнения в 6 раз (такое изменение на порядок превышает погрешность определения этого коэффициента) изменение радиуса звезды и планеты составляет порядка одного стандартного отклонения их величины.

При этом для системы Kepler-6 величина погрешности определения геометрических параметров того же порядка, что для Kepler-5 и Kepler-7, и на порядок больше, чем для HD 209458, в то время как порядок изменений оптимальных геометрических параметров за счет варьирования коэффициентов потемнения к краю у системы Kepler-6 на порядок меньше, чем у остальных рассмотренных систем.

Для квадратичного закона потемнения к краю влияние значений коэффициентов потемнения к краю на оптимальные значения геометрических параметров несколько больше. Максимальный

Таблица 5. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы Kepler-5 в квадратичном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	y	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	0.0	81.893	0.2093	0.017186	1.048514
0.0	0.2	81.897	0.20926	0.017182	1.0485131
0.0	0.4	81.902	0.20921	0.017176	1.0485122
0.0	0.6	81.909	0.20914	0.017168	1.0485115
0.2	0.0	81.895	0.20928	0.017183	1.0485135
0.2	0.2	81.9	0.20923	0.017178	1.0485125
0.2	0.4	81.907	0.20916	0.01717	1.0485116
0.2	0.6	81.917	0.20905	0.017159	1.0485116
0.4	0.0	81.898	0.20925	0.01718	1.0485128
0.4	0.2	81.906	0.20917	0.017171	1.0485118
0.4	0.4	81.916	0.20906	0.01716	1.0485115
0.4	0.6	81.921	0.20571	0.017065	1.1129803
0.6	0.0	81.904	0.20919	0.017173	1.048512
0.6	0.2	81.915	0.20908	0.017161	1.0485115
0.6	0.4	81.859	0.20572	0.0171	1.1170746

Таблица 6. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы Kepler-6 в квадратичном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	y	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	0.0	83.125	0.17879	0.017705	1.0728066
0.0	0.2	83.129	0.17874	0.017698	1.0727266
0.0	0.4	83.135	0.17868	0.01769	1.0726597
0.0	0.6	83.142	0.17859	0.017681	1.072613
0.2	0.0	83.128	0.17876	0.017701	1.0727379
0.2	0.2	83.134	0.1787	0.017692	1.0726652
0.2	0.4	83.142	0.1786	0.017682	1.0726142
0.2	0.6	83.149	0.17848	0.017673	1.0725999
0.4	0.0	83.132	0.17872	0.017694	1.0726717
0.4	0.2	83.141	0.17862	0.017683	1.0726157
0.4	0.4	83.15	0.17849	0.017671	1.0725998
0.4	0.6	83.115	0.17862	0.017738	1.0727093
0.6	0.0	83.139	0.17864	0.017684	1.0726178
0.6	0.2	83.151	0.17849	0.01767	1.0726001
0.6	0.4	83.117	0.1786	0.017735	1.0727182

Таблица 7. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы Kepler-7 в квадратичном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	y	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	0.0	83.241	0.17173	0.014414	1.0544034
0.0	0.2	83.254	0.1716	0.014396	1.0543644
0.0	0.4	83.272	0.17142	0.014372	1.0543296
0.0	0.6	83.299	0.17116	0.014337	1.0543078
0.2	0.0	83.249	0.17165	0.014403	1.0543703
0.2	0.2	83.267	0.17147	0.014379	1.0543329
0.2	0.4	83.294	0.17121	0.014343	1.054308
0.2	0.6	83.336	0.17079	0.01429	1.0543221
0.4	0.0	83.261	0.17153	0.014386	1.0543375
0.4	0.2	83.288	0.17126	0.014351	1.0543094
0.4	0.4	83.333	0.17082	0.014294	1.054322
0.4	0.6	83.391	0.17016	0.014225	1.0544644
0.6	0.0	83.282	0.17133	0.014359	1.0543127
0.6	0.2	83.329	0.17086	0.014298	1.0543236
0.6	0.4	83.503	0.16782	0.014063	1.0666721

Таблица 8. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска двойной системы HD 209458 в квадратичном законе потемнения к краю для разных значений коэффициента потемнения к краю

x	y	i, °	r_s	r_p	χ^2
0.0	0.0	86.692	0.11372	0.013743	1.0404151
0.0	0.2	86.689	0.11375	0.013748	1.0403414
0.0	0.4	86.683	0.11378	0.013755	1.0402708
0.0	0.6	86.675	0.11384	0.013766	1.0402342
0.2	0.0	86.69	0.11373	0.013746	1.0403685
0.2	0.2	86.685	0.11377	0.013753	1.0402883
0.2	0.4	86.677	0.11383	0.013764	1.040235
0.2	0.6	86.663	0.11392	0.013782	1.0403326
0.4	0.0	86.687	0.11376	0.013751	1.0403111
0.4	0.2	86.679	0.11382	0.013761	1.0402399
0.4	0.4	86.665	0.11391	0.01378	1.0403101
0.4	0.6	86.632	0.11414	0.013824	1.0415324
0.6	0.0	86.681	0.1138	0.013759	1.0402502
0.6	0.2	86.666	0.1139	0.013778	1.0402879
0.6	0.4	86.63	0.11415	0.013826	1.0416162
0.6	0.6	86.485	0.1152	0.014026	1.0625252

разброс при этом достигается при больших значениях квадратичного коэффициента потемнения к краю (что видно на примере HD 209458 из графика на рис. 1). Однако в целом картина аналогичная той, что наблюдается для линейного закона потемнения – значительные изменения квадратичного и линейного коэффициентов потемнения к краю не вызывают сравнимого (в масшта-

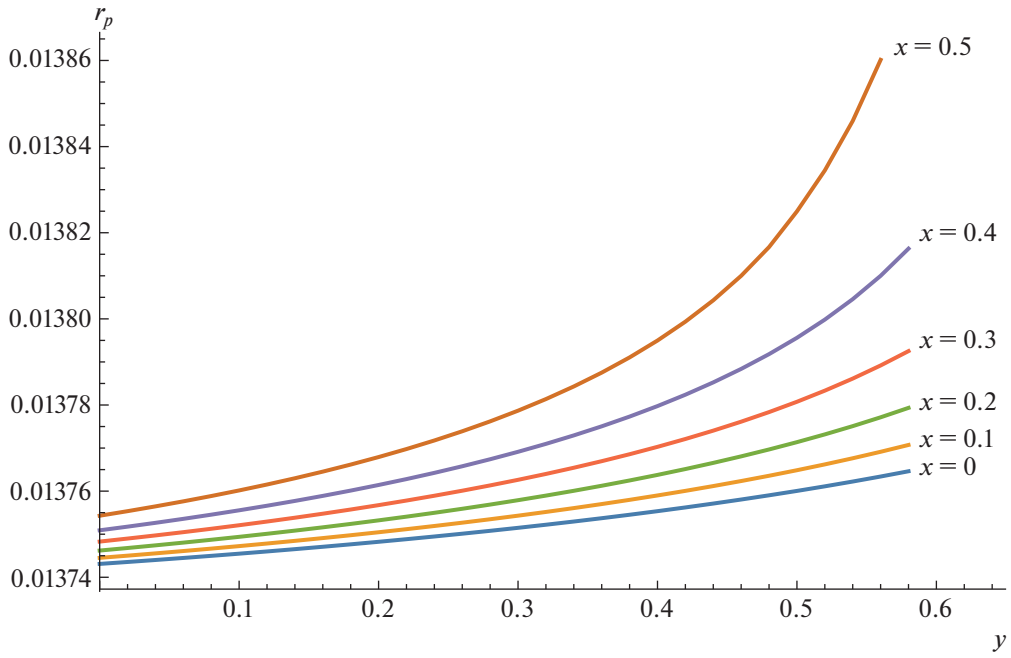


Рис. 1. Зависимости оптимального значения радиуса планеты r_p от значения квадратичного коэффициента потемнения y при значениях линейного коэффициента $x = 0.0$, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5. Система HD 209458.

бах погрешности) изменения геометрических параметров.

Таким образом, можно считать, что неопределенность в значении коэффициентов потемнения к краю не исключает возможности находить геометрические параметры двойной системы с точностью, которая соответствует текущей точности наблюдения (порядка 10^{-4}). Эффект влияния коэффициента потемнения к краю на геометрические параметры двойной можно отнести к тонким эффектам, которые не оказывают значимого влияния на численные значения геометрических параметров.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что имеет место определенная корреляция между геометрическими параметрами и коэффициентами потемнения к краю. Для квадратичного закона потемнения эта корреляция заметно больше. При этом степень такой корреляции может заметно отличаться для разных систем, как в случае с Кеплер-6, для которой значения геометрических параметров гораздо менее чувствительны к изменениям коэффициентов потемнения к краю, чем у остальных рассмотренных систем.

Однако эта корреляция не так велика, чтобы неопределенность в значениях коэффициентов

Таблица 9. Оптимальные значения параметров

Система	Закон потемнения	r_s	r_p	i, °	x	y	χ^2
Кеплер-5	Линейный	0.21106 ± 0.0021	0.017767 ± 0.00021	81.59 ± 0.18	0.482 ± 0.016	–	1.054
	Квадратичный	0.2091 ± 0.0029	0.0172 ± 0.00036	81.91 ± 0.33	-0.063 ± 0.018	0.74 ± 0.27	1.049
Кеплер-6	Линейный	0.17924 ± 0.0013	0.018032 ± 0.00018	82.98 ± 0.13	0.635 ± 0.012	–	1.07402
	Квадратичный	0.635 ± 0.0016	0.635 ± 0.00029	0.635 ± 0.18	0.635 ± 0.24	0.37 ± 0.32	1.073
Кеплер-7	Линейный	0.17243 ± 0.0015	0.0146875 ± 0.00015	83.11 ± 0.13	83.11 ± 0.013	–	1.05595
	Квадратичный	0.1711 ± 0.0019	0.01433 ± 0.00025	83.3 ± 0.2	0.226 ± 0.015	0.44 ± 0.22	1.054
HD 209458	Линейный	0.114686 ± 0.00036	0.0140566 ± 0.000055	86.484 ± 0.040	0.4945 ± 0.0044	–	1.1302246
	Квадратичный	0.11383 ± 0.00043	0.013765 ± 0.000073	86.676 ± 0.055	0.295 ± 0.027	0.344 ± 0.048	1.040

потемнения к краю вызывала столь же значимую неопределенность в значениях геометрических параметров. Для текущей точности наблюдений (соответствующей точности наблюдений четырех рассмотренных в работе систем) неопределенность в значениях геометрических параметров, вызванная невозможностью точного определения коэффициентов потемнения к краю, может рассматриваться как тонкий эффект.

В частности, можно сделать вывод о том, что вследствие слабой корреляции геометрических параметров и коэффициентов потемнения к краю можно использовать теоретические значения коэффициентов потемнения к краю для определения значений геометрических параметров путем интерпретации кривой блеска. В этом отношении настоящая работа является частным подтверждением на основе высокоточного алгоритма интерпретации, вывода, сделанного в работе [6] на основе исследования на порядок большего количества кривых блеска.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят академика РАН А.М. Черепащука за полезные советы и обсуждение данной работы. Авторы выражают глубокую признательность М.А. Ибрагимову за полезные замечания, сделавшие работу “красочнее” и лучше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев*, Астрон. журн. **97**, 531 (2020).
2. *I. D. Howarth*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **418**, 1165 (2011).
3. *D. Kipping and G. Bakos*, **730**, 50 (2011).
4. *A. Claret*, Astron. and Astrophys. **506**, 1335 (2009).
5. *М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепащук*, Астрон. журн. **87**, 1199 (2010).
6. *H. M. Müller, K. F. Huber, S. Czesla, U. Wolter, and J. H. M. M. Schmitt*, Astron. and Astrophys. **560**, id. A112 (2013).
7. *M. K. Abubekerov and N. Yu. Gostev*, Astron. and Astrophys. **633**, id. A96 (2020).
8. *M. K. Abubekerov and N. Yu. Gostev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **432**, 2216 (2013).
9. *M. K. Abubekerov and N. Yu. Gostev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **459**, 2078 (2016).
10. *М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев*, Вычисл. методы и программирование **15**, 677 (2014).
11. *Н. Ю. Гостев*, Астрон. журн. **88**, 704 (2011).
12. *T. M. Brown, D. Charbonneau, R. L. Gilliland, R. W. Noyes, and A. Burrows*, Astrophys. J. **552**, 699 (2001).
13. *D. G. Koch, W. J. Borucki, J. F. Rowe, N. M. Batalha, et al.*, Astrophys. J. **713**, L131 (2010).
14. *E. W. Dunham, W. J. Borucki, D. G. Koch, N. M. Batalha, et al.*, Astrophys. J. **713**, L136 (2010).
15. *D. W. Latham, W. J. Borucki, D. G. Koch*, *T. M. Brown, et al.*, Astrophys. J. **713**, L140 (2010).