

ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ОРБИТЫ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ С ЭКЗОПЛАНЕТОЙ ПО ТРАНЗИТНОЙ КРИВОЙ БЛЕСКА

© 2023 г. Е. В. Бекесов¹, М. К. Абубекеров^{1,*}, Н. Ю. Гостев^{1,**}, А. М. Черепашук^{1,***}

¹Московский 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

***E-mail: cherepashchuk@gmail.com

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.

После доработки 28.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

В работе, как по модельным, так и по наблюдаемым транзитным кривым блеска выполнено исследование возможности определения эксцентриситета орбиты двойной звездной системы с экзопланетой. Показано, что определение точного значения эксцентриситета на основе транзитных кривых блеска возможно при знании долготы периастра. В случае отсутствия информации о долготе периастра анализ транзитной кривой блеска позволяет наложить ограничения на значения эксцентриситета орбиты. Изучено влияние неопределенности в значении эксцентриситета орбиты на точность определения остальных параметров системы: радиуса звезды, радиуса планеты, наклона орбиты и коэффициента потемнения к краю.

Ключевые слова: транзитные кривые блеска, двойные системы с экзопланетами, эксцентриситет, коэффициенты потемнения к краю, радиус планеты, радиус звезды

DOI: 10.31857/S0004629923110014, **EDN:** YGKUYD

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени открыто свыше 5000 звездных систем с экзопланетами¹. Подавляющее большинство экзопланет открыты фотометрическими методом, т.е. на основе транзитных кривых блеска. Представляет интерес исследование возможности определения из транзитных кривых блеска не только радиусов экзопланет и родительских звезд, но и параметров орбит экзопланет e и ω , где e — эксцентриситет орбиты, а ω — долгота периастра. Эти параметры находятся из кривых лучевых скоростей родительских звезд. Использование транзитных кривых затмения позволит повысить надежность определения e и ω из кривых лучевых скоростей, а в случае, когда спектральные наблюдения отсутствуют, дать предварительные ограничения на значения e и ω .

В фокусе исследований двойных систем с экзопланетами ранее оказывались геометрические параметры двойных систем (радиус звезды, радиус планеты, наклонение орбиты двойной системы), в настоящее время исследуются также

тонкие эффекты (запятненность поверхности звезды, значения коэффициентов потемнения к краю и др.) [1, 2]. Однако не менее важная информация — параметры орбиты двойной системы — зачастую ускользают от внимания исследователей при фотометрических исследованиях, несмотря на то, что мы располагаем огромным банком фотометрических данных, которые также содержат информацию и об элементах орбиты, прежде всего эксцентриситете и долготе периастра.

В то же время даже небольшие значения эксцентриситета при обработке кривых блеска могут оказывать существенное влияние на другие параметры системы, получаемые при помощи аппроксимации кривых блеска. Например, к изменению эксцентриситета оказываются очень чувствительны параметры потемнения к краю материнской звезды [3], что может говорить о том, что имевшее место расхождение в коэффициентах потемнения к краю полученных эмпирически и теоретически из модели звездных атмосфер [4] может быть в значительной мере объяснено расхождениями в оценках эксцентриситета орбит экзопланет.

¹ <https://exoplanets.nasa.gov>

В отдельных случаях (см., напр., [5]) при экстремально точных спутниковых фотометрических наблюдениях удается построить точную орбитальную кривую блеска, включающую как транзитное затмение звезды экзопланетой, так и затмение типа прохождения (occultation), когда экзопланета (горячий юпитер) затмевается звездой. В этих случаях по смещению вторичного затмения относительно середины между главными (транзитными) затмениями определяется величина $e \cos \omega$, где e — эксцентриситет орбиты, ω — долгота периастра орбиты. Из различия ширины главного транзитного затмения и вторичного затмения оценивается величина $e \sin \omega$. Таким образом, если удастся отнаблюдать главное транзитное и вторичное затмения, то из одной кривой блеска независимо от спектральных данных, можно определить элементы орбиты системы e и ω . Поскольку в подавляющем большинстве случаев при фотометрических наблюдениях регистрируется лишь одно транзитное затмение, представляет интерес исследование возможности оценки как значения эксцентриситета орбиты системы, так и степени неопределенности этого значения по одной кривой блеска. Особый интерес представляет исследование такой возможности для транзитных кривых затмения в случае коротких орбитальных периодов ($P < 10^d$). В большинстве случаев орбиты таких систем близки к круговым, а малые значения эксцентриситета орбиты в таких системах из-за сравнительно низкой относительной точности кривых лучевых скоростей определяются со значительными относительными ошибками. В этих случаях дополнительное привлечение фотометрических данных может увеличить надежность определения малого значения эксцентриситета орбиты.

Оценки эксцентриситетов орбиты для короткопериодических экзопланетных систем представляют интерес для проверки теории округления орбиты в двойной системе в результате действия механизма диссипации кинетической энергии орбитального движения в приливах звезд поздних спектральных классов [6]. Поэтому такие исследования представляют значительный интерес.

Мы исследовали эту возможность с использованием как модельных кривых затмения, так и высокоточной наблюдаемой кривой затмения.

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 [4, 7–13].

Коротко об алгоритме сообщим, что использовалась модель двух сферических звезд в отсутствие эффектов отражения и эллипсоидальности. Обычно относительный радиус полости Роша значительно превосходит радиус планеты [14]. Поэтому наше предположение о сферичности планеты вполне обосновано. То же самое можно сказать и об оптической звезде.

Поскольку работа носит методический характер, при расчете кривой блеска в качестве функции распределения яркости по диску звезды использовался линейный закон потемнения к краю диска с линейным коэффициентом x :

$$I(\rho) = I_0 \left(1 - x + x \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{R_s^2}} \right). \quad (1)$$

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, $a = 1$. “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 .

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 большой полуоси орбиты a .

Интерпретация наблюдательных данных, а именно, поиск геометрических параметров двойной системы выполнен также для линейного закона потемнения материнской звезды к краю.

3. МОДЕЛЬНЫЕ И НАБЛЮДАЕМАЯ КРИВАЯ БЛЕСКА

Как отмечено выше, работа носит методический характер, поэтому для исследования чувствительности задачи к изменению параметров e и ω использовались модельные кривые блеска с параметрами, близкими к реальным наблюдаемым транзитным кривым блеска двойных систем с горячими юпитерами. Параметры модельной двойной системы приняты следующими: $R_s = 0.1$, $R_p = 0.01$, $P_{orb} = 8^d$, $x = 0.45$, $i = 88^\circ$. Радиус звезды $R_s = 0.1$ и радиус планеты $R_p = 0.01$

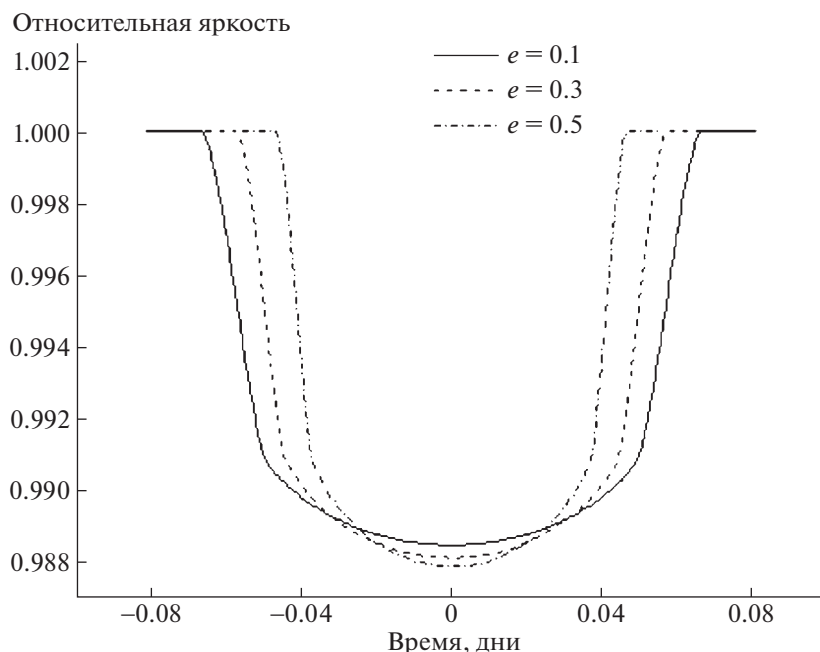


Рис. 1. Синтетические модельные кривые, полученные при значениях эксцентриситета $e = 0.1, 0.3$ и 0.5 для долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

заданы в единицах большой полуоси орбиты двойной системы a .

Значение эксцентриситета орбиты модельных двойных систем принято равным $e = 0.1, 0.3$ и 0.5 . Долгота периастра орбиты ω принята равной $0^\circ, 90^\circ$ и 270° . Некоторые модельные кривые блеска приведены на рис. 1–3. Стандартное отклонение индивидуальных значений блеска модельных кривых принято равным 10^{-4} , предполагалось, что дисперсия распределена по Гауссу.

В качестве наблюдаемой кривой блеска использовалась высокоточная кривая блеска двойной системы Kepler-7b [15] (см. рис. 4). Кривая блеска получена на космической обсерватории Kepler с 1 мая по 14 июня 2009 г. Kepler-7b является объектом ~ 13 звездной величины.

Кривые блеска получены в оптическом “белом свете” в диапазоне $4000\text{--}8500 \text{ \AA}$ и в так называемой “длинной моде” (long-cadence mode) с итоговой экспозицией в 30 мин. В этой моде базовая 6-с съемка копилась и складывалась до получения и передачи на Землю одной единственной 30-мин экспозиции, из которой и получались индивидуальные значения блеска. Транзитная кривая блеска включает в себя около 2100 индивидуальных значений блеска системы, большинство которых приходится на внезатменную часть кривой блеска.

Точность индивидуальных значений транзитной кривой блеска системы Kepler-7b в интенсивностях составила $\sigma = 1.0248 \times 10^{-4}$. Относительная ошибка (по отношению к глубине затмения) составляет $\sim 1\%$.

4. МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ И НАБЛЮДАЕМОЙ КРИВЫХ БЛЕСКА

При интерпретации кривой блеска предполагалось, что помимо радиуса звезды R_* и коэффициента потемнения к краю x мы также располагаем значением долготы периастра ω . Искомыми параметрами являлись радиус планеты R_p , наклонение орбиты i , эксцентриситет орбиты e . Другими словами, задачей данного методического исследования являлось выяснение возможности достоверного определения значения эксцентриситета на основе модельной транзитной кривой блеска при фиксированных R_* и ω .

При интерпретации при фиксированных e и ω минимизация выполнялась одновременно по следующим параметрам: линейному коэффициенту потемнения звезды к краю x , радиусу планеты R_p и наклонению орбиты двойной i . Параметр R_* считался известным, а по параметру ω осуществлялся перебор.

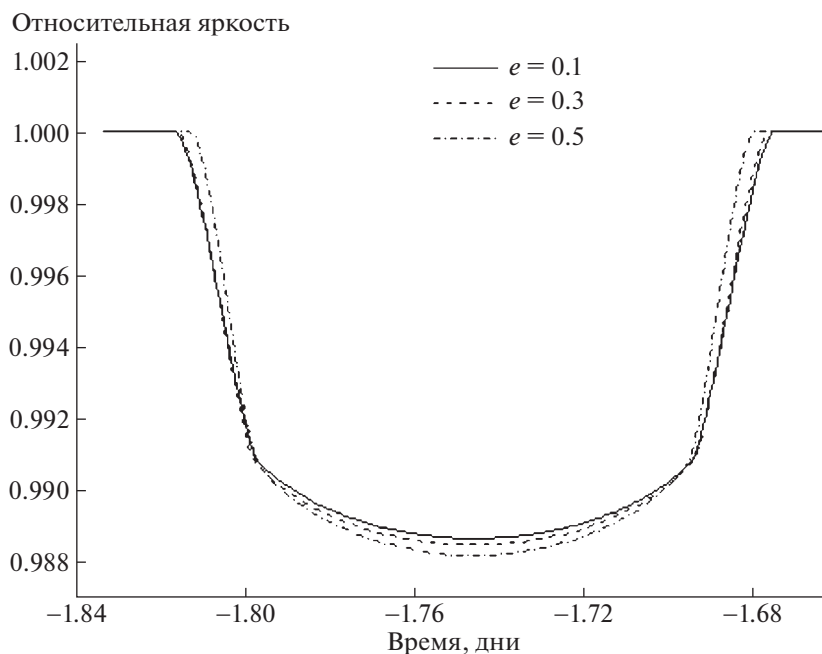


Рис. 2. Синтетические модельные кривые, полученные при значениях эксцентриситета $e = 0.1, 0.3$ и 0.5 для долготы периастра $\omega = 180^\circ$.

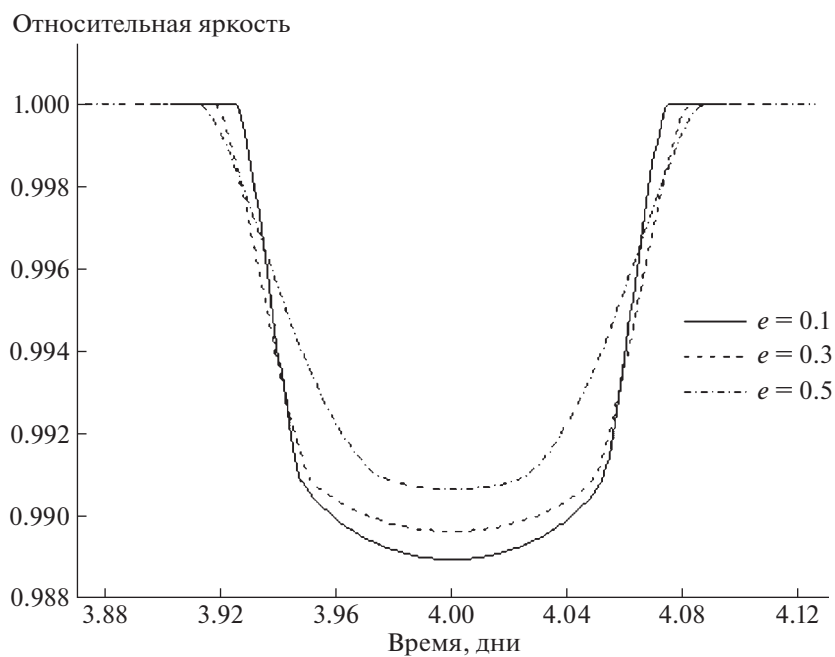


Рис. 3. Синтетические модельные кривые, полученные при значениях эксцентриситета $e = 0.1, 0.3$ и 0.5 для долготы периастра $\omega = 270^\circ$.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ КРИВЫХ БЛЕСКА

Интерпретация транзитных модельных кривых блеска выполнена при разных значениях долготы периастра: $\omega = 90^\circ, 180^\circ$ и 270° , результаты соот-

ветственно представлены в табл. 1–6. На рис. 5–10 представлена зависимость невязки χ^2 от эксцентриситета. Видно, что задача при известных R_s и фиксированной ω чувствительна к эксцентриситету и при априорной информации о долго-

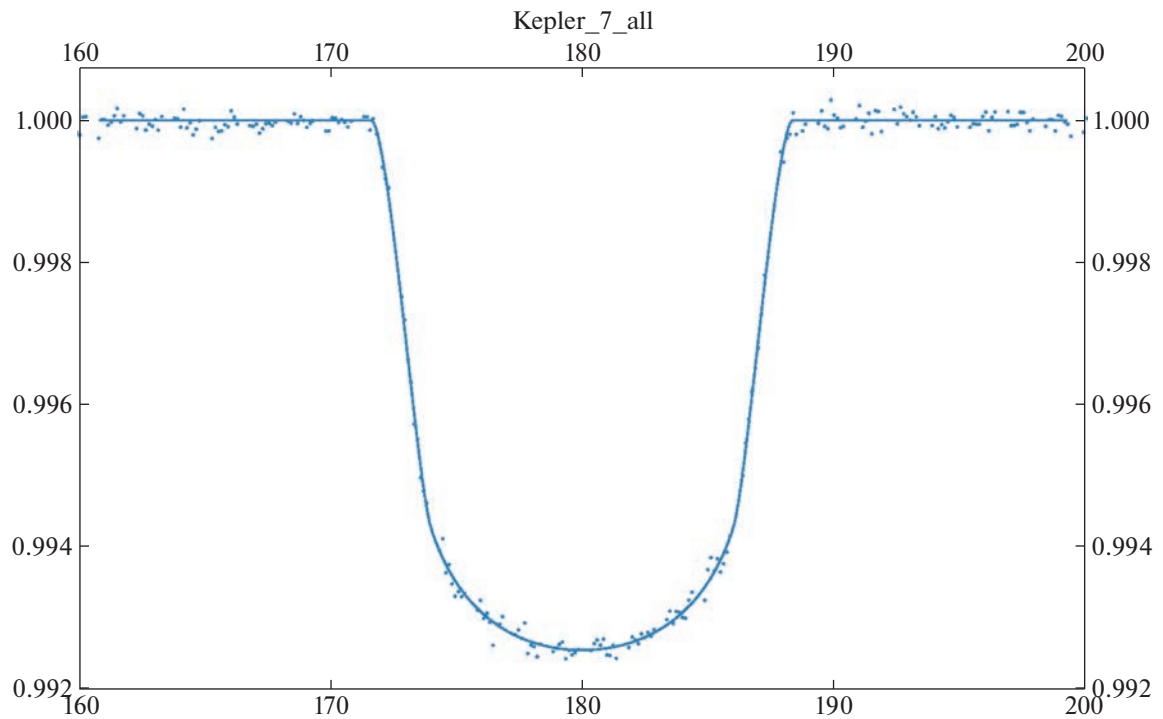


Рис. 4. Наблюдаемая кривая блеска двойной системы с экзопланетой Kepler-7b из работы [15]. Сплошная линия — оптимальная теоретическая кривая, полученная в предположении квадратичного закона потемнения диска звезды к краю.

те периастра ω на основе транзитной кривой блеска можно уверенно определять значение эксцентриситета орбиты, как для сильно, так и для слабо эксцентричных орбит (см. рис. 5–10).

Таблица 1. Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значениях эксцентриситета $e = 0.0\text{--}0.17$ и долготы периастра $\omega = 90^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p, a	$i, ^\circ$	χ^2
0.00	0.00	0.014136737	89.6224	4346.73
0.01	0.00	0.013016038	89.6224	2089.12
0.02	0.00	0.011906691	89.6224	755.052
0.03	0.05	0.010806052	89.6224	152.271
0.04	0.53	0.009722229	89.6173	3.15496
0.05	0.52	0.009767897	89.0583	2.54162
0.06	0.51	0.009813052	88.7411	2.01723
0.07	0.49	0.009869988	88.4993	1.58994
0.08	0.48	0.009909168	88.3056	1.26199
0.09	0.47	0.009949117	88.1409	1.06206
0.10	0.45	0.009994871	87.9969	0.987588
0.11	0.44	0.010039856	87.87	1.07118
0.12	0.42	0.010084499	87.7569	1.30427
0.13	0.40	0.01012385	87.6557	1.70566
0.14	0.38	0.0101568	87.5648	2.28178
0.15	0.37	0.010187017	87.4825	3.03932
0.16	0.35	0.010218857	87.4071	3.98245
0.17	0.32	0.010262134	87.3368	5.12027

Примечание. e — эксцентриситет, x — линейный коэффициент, R_p — радиус планеты в единицах большой полуоси a , i — наклонение орбиты.

Таблица 2. Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значениях эксцентриситета $e = 0.2-0.4$ и долготы периастра $\omega = 90^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p, a	$i, ^\circ$	χ^2
0.20	0.00	0.011816892	89.6224	891.176
0.21	0.10	0.010671012	89.6224	176.201
0.22	0.58	0.009584542	89.5898	5.95593
0.23	0.56	0.009647624	89.1406	4.96467
0.24	0.55	0.009700974	88.8697	4.03079
0.25	0.53	0.009751422	88.6622	3.19319
0.26	0.52	0.00980298	88.4907	2.4466
0.27	0.50	0.009858806	88.3433	1.8349
0.28	0.48	0.009908998	88.2147	1.377
0.29	0.47	0.009949459	88.1015	1.0745
0.30	0.45	0.009999992	87.9986	0.973023
0.31	0.43	0.010044721	87.906	1.08436
0.32	0.41	0.010083902	87.822	1.42005
0.33	0.39	0.010124363	87.7449	1.98847
0.34	0.37	0.010156287	87.6746	2.80898
0.35	0.35	0.010189749	87.6094	3.88107
0.36	0.32	0.01021954	87.5494	5.20751
0.37	0.29	0.010260427	87.4928	6.79081
0.38	0.26	0.010286035	87.4414	8.65593
0.39	0.23	0.010312156	87.3933	10.7968
0.40	0.19	0.010310875	87.3505	13.1928

Таблица 3. Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значениях эксцентриситета $e = 0.4-0.62$ и долготы периастра $\omega = 90^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p, a	$i, ^\circ$	χ^2
0.40	0.47	0.009790603	90.0004	36.89620
0.41	0.63	0.009441393	89.4116	10.23319
0.42	0.61	0.009512583	89.0902	8.97929
0.43	0.60	0.009574896	88.8661	7.51608
0.44	0.58	0.009639941	88.6862	6.09876
0.45	0.56	0.009709254	88.5338	4.77876
0.46	0.54	0.009770287	88.4021	3.57789
0.47	0.52	0.009833966	88.2851	2.54776
0.48	0.50	0.009888767	88.1809	1.72923
0.49	0.48	0.009940923	88.0865	1.19117
0.50	0.45	0.009995212	88.0000	0.95934
0.51	0.42	0.010051465	87.9203	1.12212
0.52	0.39	0.01009773	87.8476	1.69819
0.53	0.36	0.010134777	87.7807	2.70534
0.54	0.33	0.010167214	87.7188	4.18288
0.55	0.29	0.010203919	87.6608	6.13950
0.56	0.25	0.010239172	87.6067	8.60545
0.57	0.21	0.010248648	87.5576	12.77195
0.58	0.15	0.010260171	87.5114	14.94330
0.59	0.10	0.010269902	87.4681	18.78500
0.60	0.03	0.010254025	87.4288	22.023
0.61	0.00	0.010263842	87.3905	27.83990
0.62	0.00	0.010278097	87.3541	34.51120

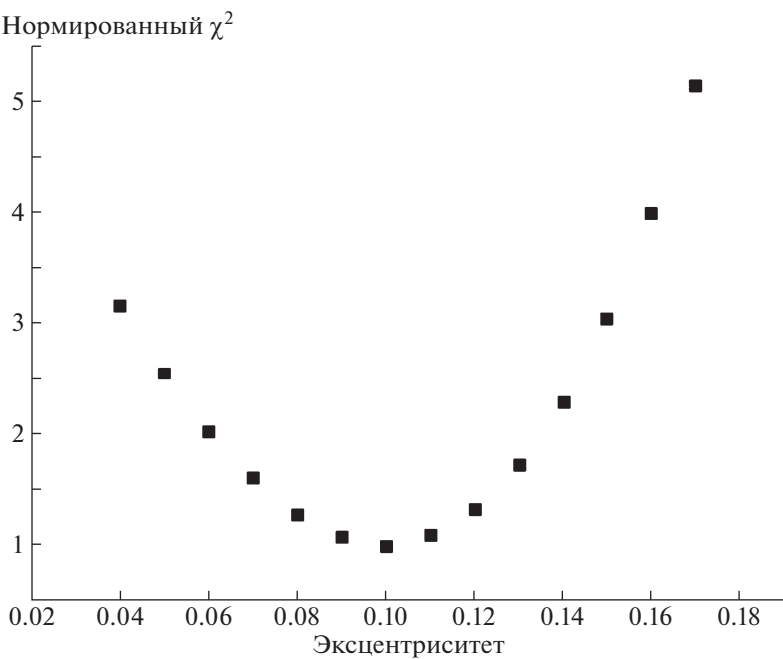


Рис. 5. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета $e = 0.04\text{--}0.17$ при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

Таблица 4. Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значениях эксцентриситета $e = 0.0\text{--}0.15$ и долготы периастра $\omega = 270^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p, a	$i, ^\circ$	χ^2
0.00	0.27	0.010361409	86.8085	7.60867
0.01	0.30	0.010329313	86.8773	6.35237
0.02	0.32	0.010297132	86.953	5.22887
0.03	0.34	0.010266061	87.0366	4.23469
0.04	0.35	0.010241904	87.128	3.3746
0.05	0.37	0.010199651	87.2322	2.65104
0.06	0.39	0.010166957	87.3472	2.06223
0.07	0.40	0.010130594	87.477	1.60621
0.08	0.42	0.010086548	87.6254	1.27943
0.09	0.43	0.010053001	87.7935	1.08815
0.10	0.45	0.010002638	87.9931	1.01329
0.11	0.46	0.00996397	88.229	1.05901
0.12	0.48	0.009912754	88.5269	1.22085
0.13	0.49	0.009867854	88.9319	1.48079
0.14	0.50	0.00982304	89.8049	1.84133
0.15	0.02	0.010902936	90.0004	126.546

Таблица 5. Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значениях эксцентриситета $e = 0.18\text{--}0.35$ и долготы периастра $\omega = 270^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p, a	$i, ^\circ$	χ^2
0.18	0.22	0.010432002	85.9847	9.95654
0.19	0.25	0.010413223	86.0545	8.52385
0.20	0.27	0.01038642	86.1341	7.20911
0.21	0.29	0.010354921	86.2245	6.01863
0.22	0.31	0.010326582	86.3258	4.95312
0.23	0.33	0.010294828	86.4408	4.01497
0.24	0.35	0.010256415	86.5725	3.20178
0.25	0.37	0.010218345	86.723	2.52319
0.26	0.38	0.010183517	86.895	1.97195
0.27	0.40	0.010141349	87.0965	1.53967
0.28	0.42	0.01009423	87.3354	1.23518
0.29	0.43	0.010051806	87.6225	1.0554
0.30	0.45	0.01000298	87.9842	1.00543
0.31	0.46	0.009958678	88.4719	1.07433
0.32	0.48	0.009900718	89.3468	1.26791
0.33	0.06	0.010849159	90.0004	81.9252
0.34	0.00	0.012086888	90.0004	554.275
0.35	0.00	0.013347151	90.0004	1700.45

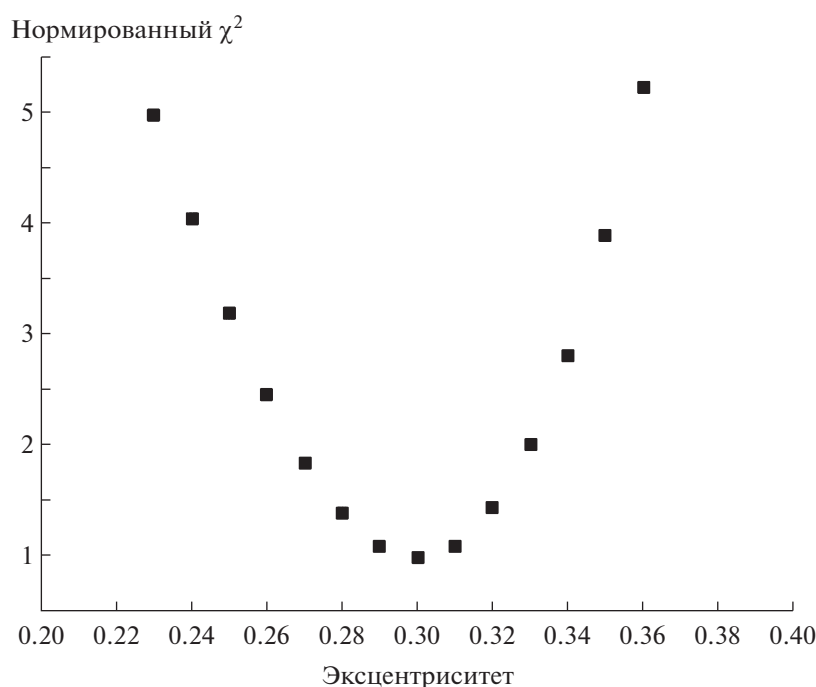


Рис. 6. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета $e = 0.23$ – 0.36 при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

Таблица 6. Результаты интерпретации модельной кривой блеска при значениях эксцентриситета $e = 0.4$ – 0.54 и долготы периастра $\omega = 170^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p, a	$i, ^\circ$	χ^2
0.40	0.25	0.010437636	84.742	8.01467
0.41	0.28	0.01040537	84.86	6.72334
0.42	0.30	0.010371652	84.9986	5.54395
0.43	0.32	0.010333837	85.1628	4.49039
0.44	0.34	0.010296193	85.3565	3.56914
0.45	0.36	0.010252233	85.5885	2.77881
0.46	0.38	0.010207418	85.8677	2.13496
0.47	0.40	0.010157995	86.2098	1.635
0.48	0.42	0.010105925	86.6394	1.27752
0.49	0.44	0.010047879	87.2066	1.06554
0.50	0.45	0.009997602	88.0285	0.993937
0.51	0.39	0.010120351	90.0004	3.15305
0.52	0.00	0.011589492	90.0004	223.805
0.53	0.00	0.013097642	90.0004	1100.11
0.54	0.00	0.014644974	90.0004	2958.11

Интерпретация наблюдаемой транзитной кривой блеска Kerlet-7b выполнена при разных значениях долготы периастра: $\omega = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ и 177° , результаты соответственно представлены в табл. 7–10 и на рис. 11–14. Видно, что эксцентриситет значительно зависит от априорного значения долготы периастра. При изменении долготы периастра от $\omega = 45^\circ$ до 177° значение эксцентриситета изменяется от 0.06 до 0.09.

Это указывает на то, что орбита двойной эксцентрична. В то же время существующие оценки эксцентриситета данной системы, полученные как из кривых лучевых скоростей, так и из фотометрических данных разнятся от $e = 0$ до 0.1 [5, 15, 17].

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НА ПАРАМЕТРЫ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

Поскольку барицентр орбиты двойной системы с экзопланетой расположен внутри материнской звезды или близко к ее поверхности, то амплитуда кривой лучевых скоростей, как правило, составляет ~ 10 – 40 км/с при ошибке индивидуальных значений кривой лучевых скоростей ~ 5 – 10 км/с.

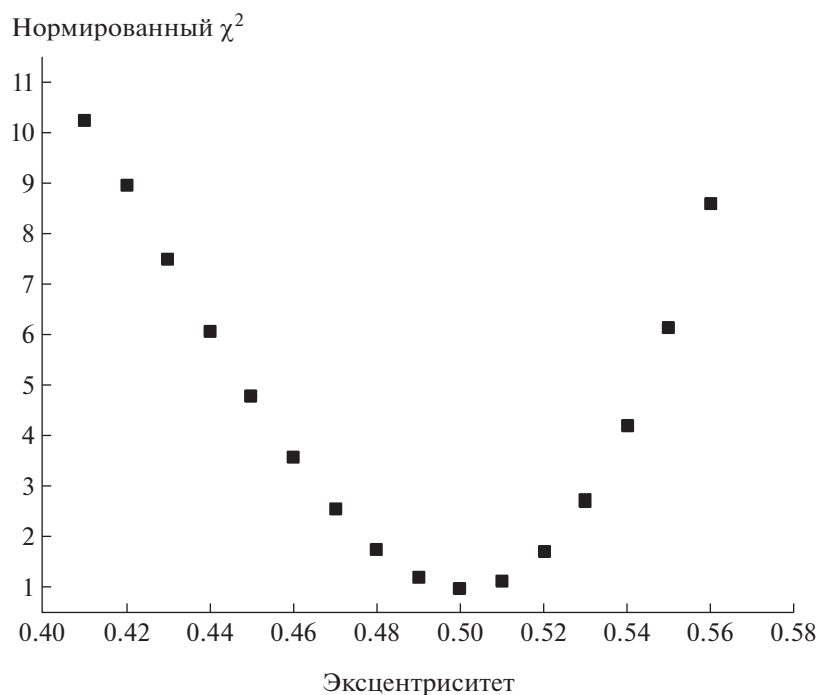


Рис. 7. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета $e = 0.41\text{--}0.56$ при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

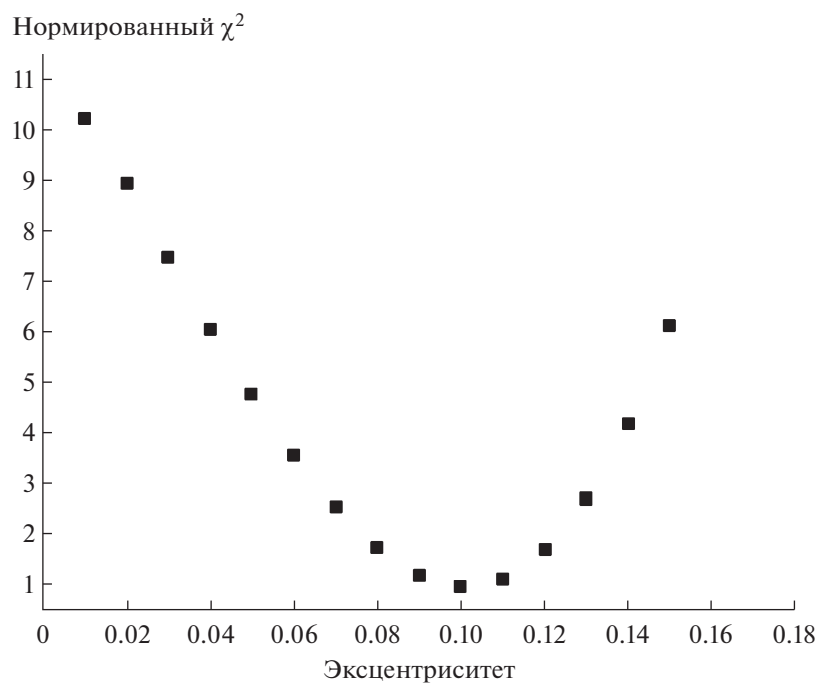


Рис. 8. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета $e = 0.01\text{--}0.15$ при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 270^\circ$.

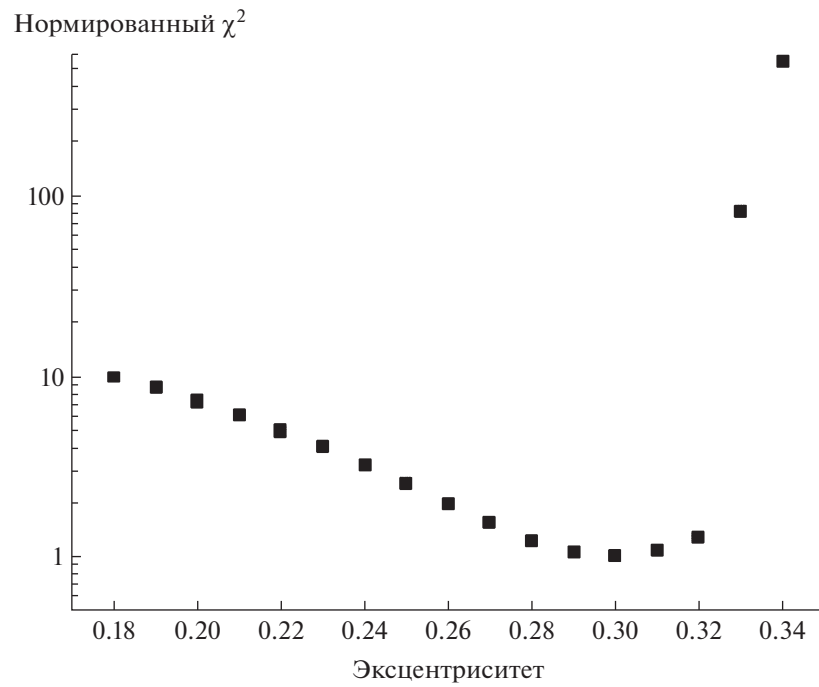


Рис. 9. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета $e = 0.18\text{--}0.34$ при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 270^\circ$.

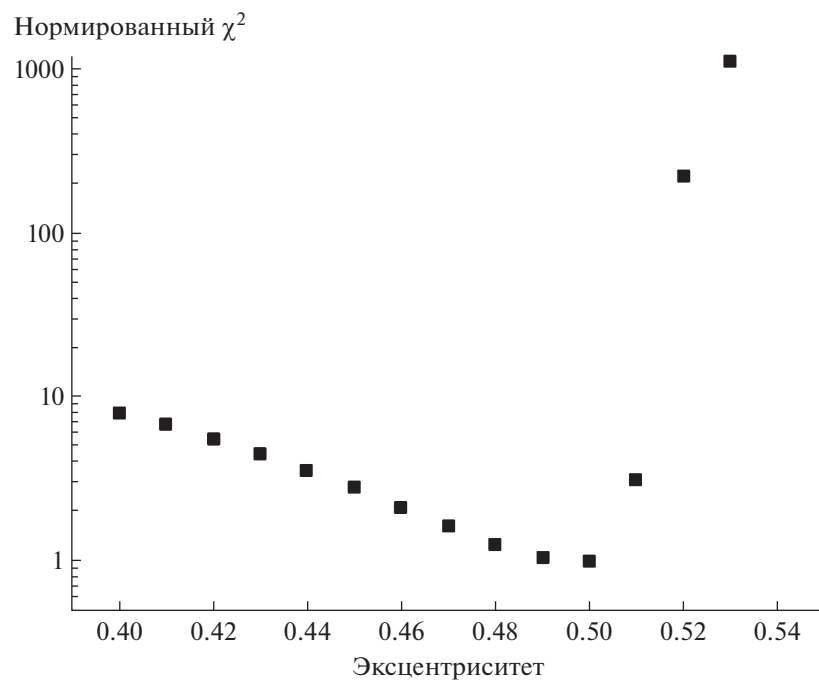


Рис. 10. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета $e = 0.40\text{--}0.53$ при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 270^\circ$.

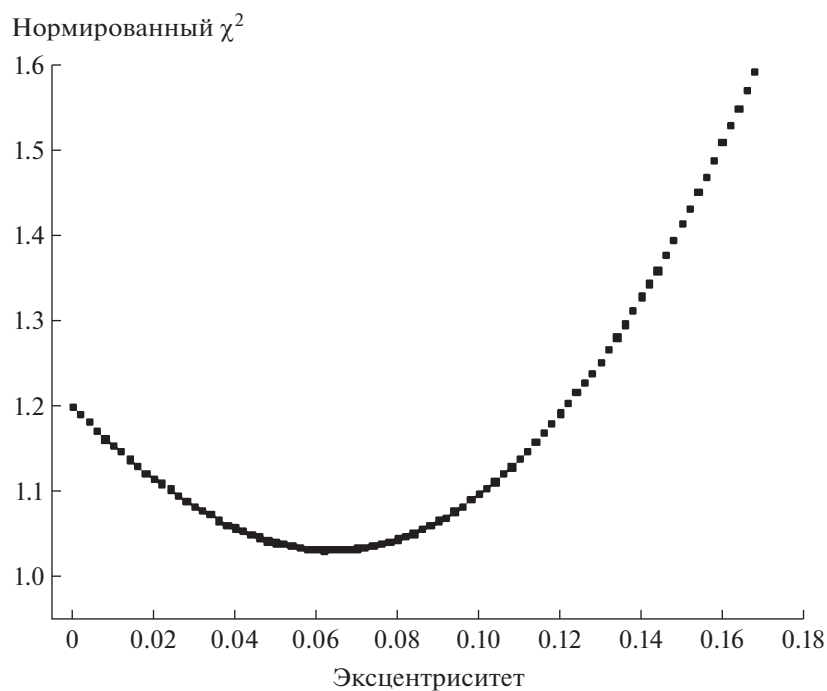


Рис. 11. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета для наблюдаемой кривой блеска Kepler-7b при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 45^\circ$.

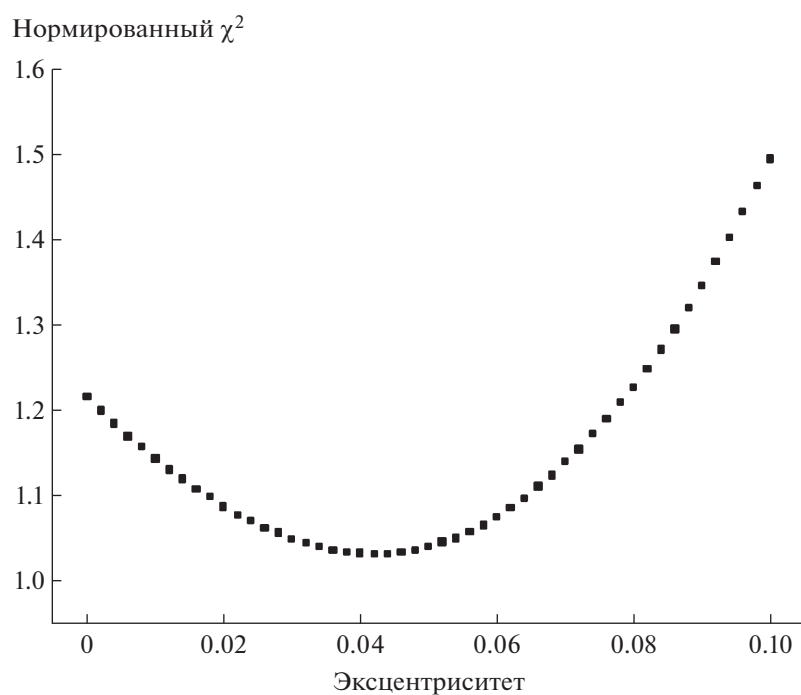


Рис. 12. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета для наблюдаемой кривой блеска Kepler-7b при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$.

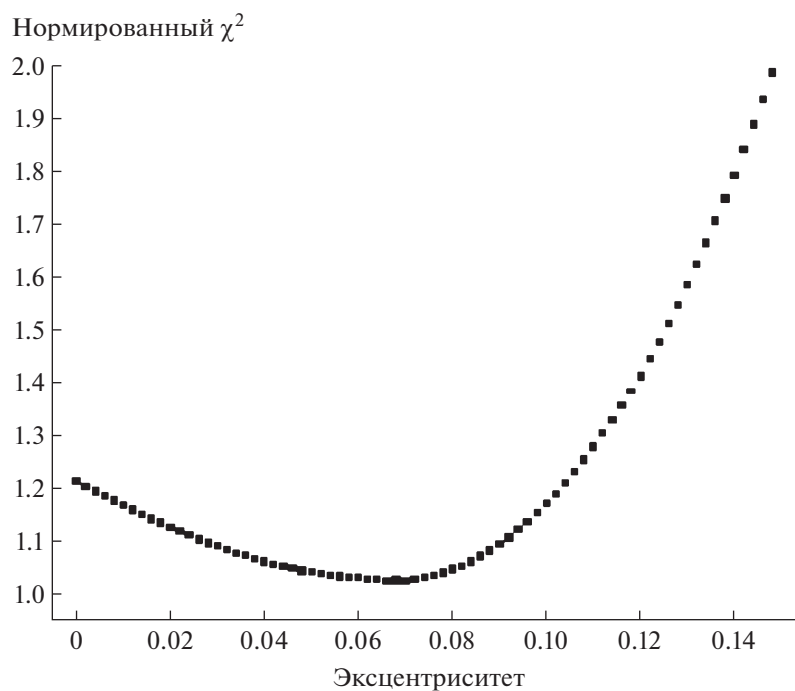


Рис. 13. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета для наблюдаемой кривой блеска Kepler-7b при фиксированном значении долготы периастро $\omega = 135^\circ$.

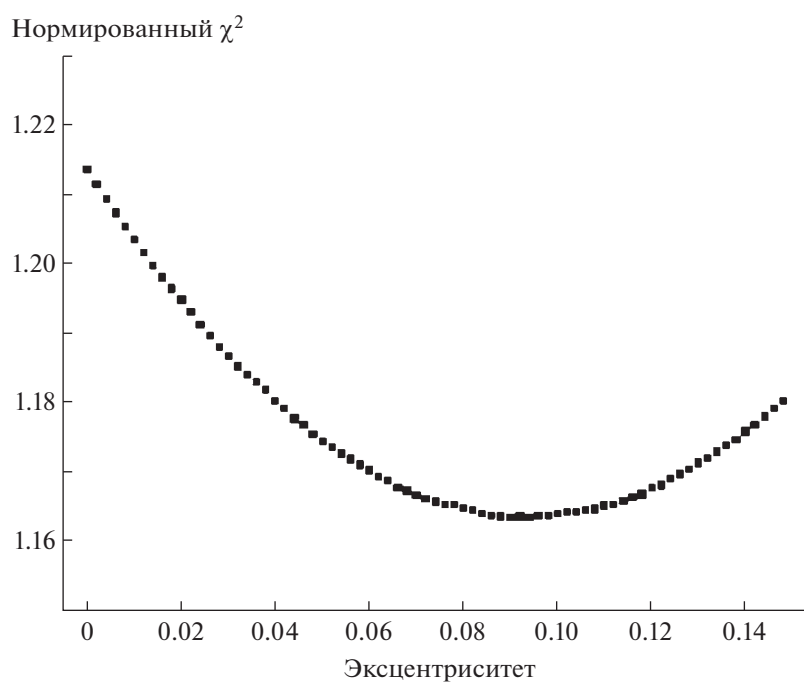


Рис. 14. Зависимость невязки χ^2 от значения эксцентриситета для наблюдаемой кривой блеска Kepler-7b при фиксированном значении долготы периастро $\omega = 177^\circ$.

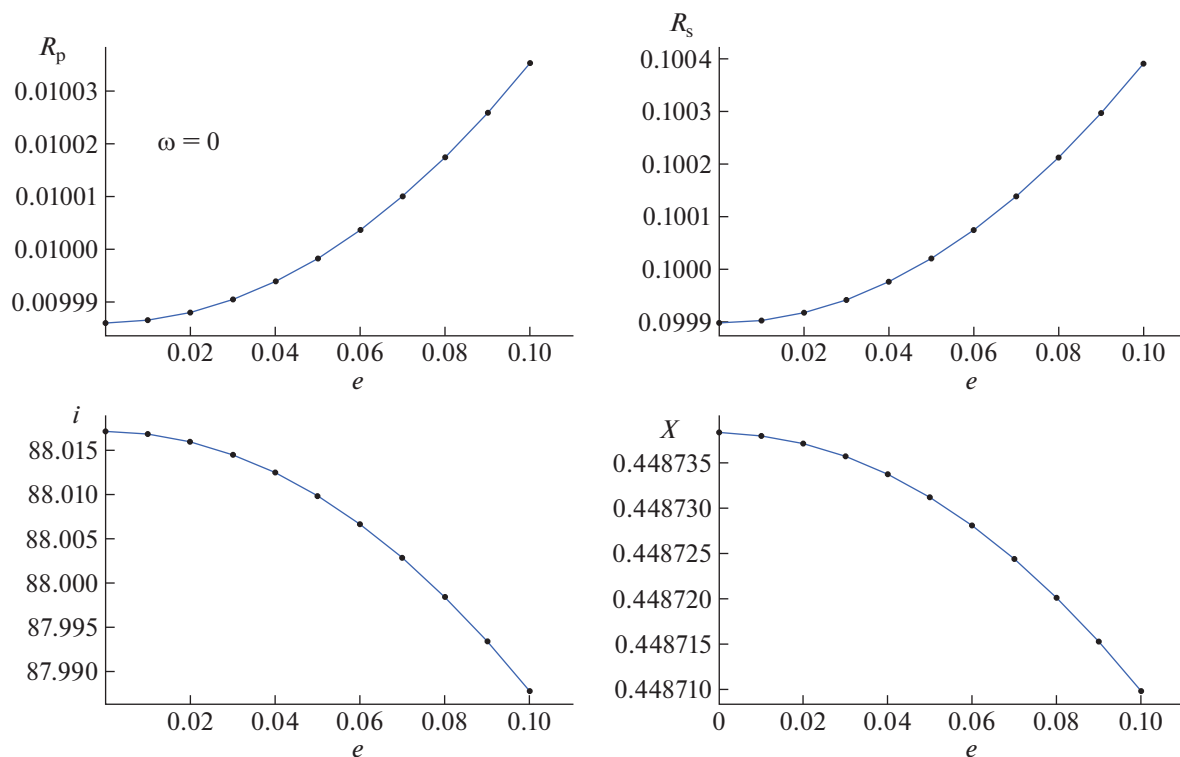


Рис. 15. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 0^\circ$, полученные в результате интерпретации модельной транзитной кривой блеска.

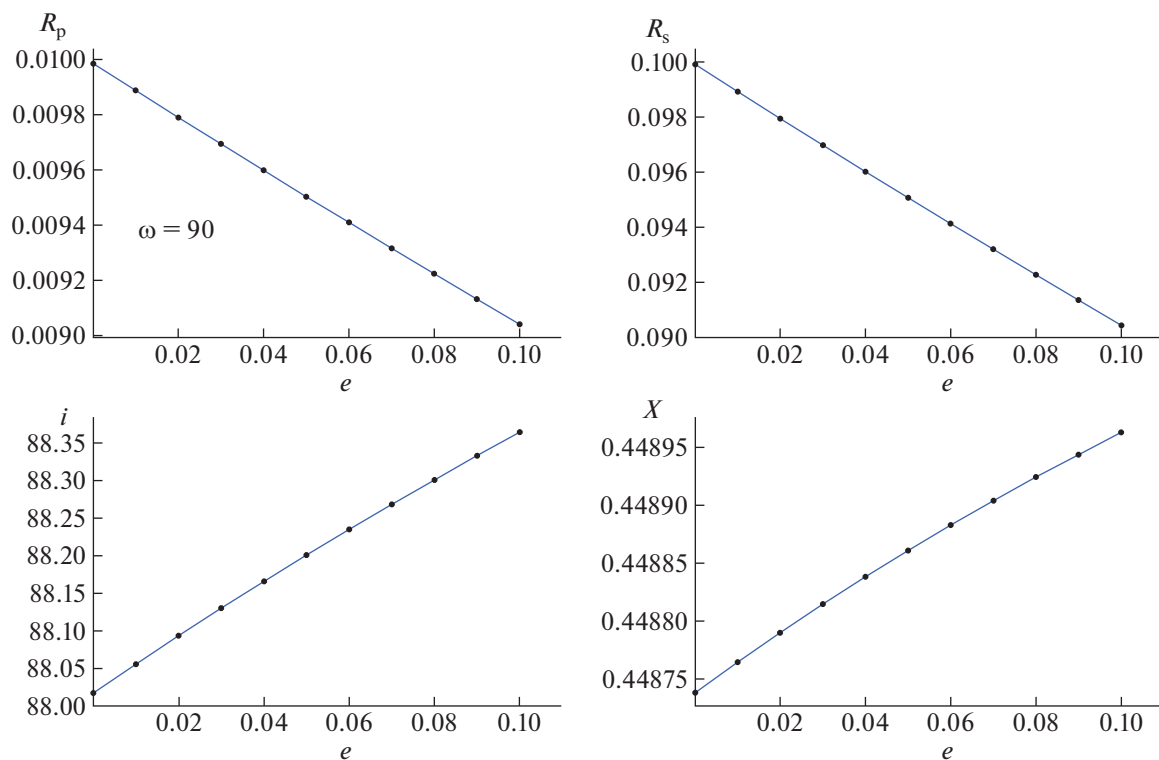


Рис. 16. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$, полученные в результате интерпретации модельной транзитной кривой блеска.

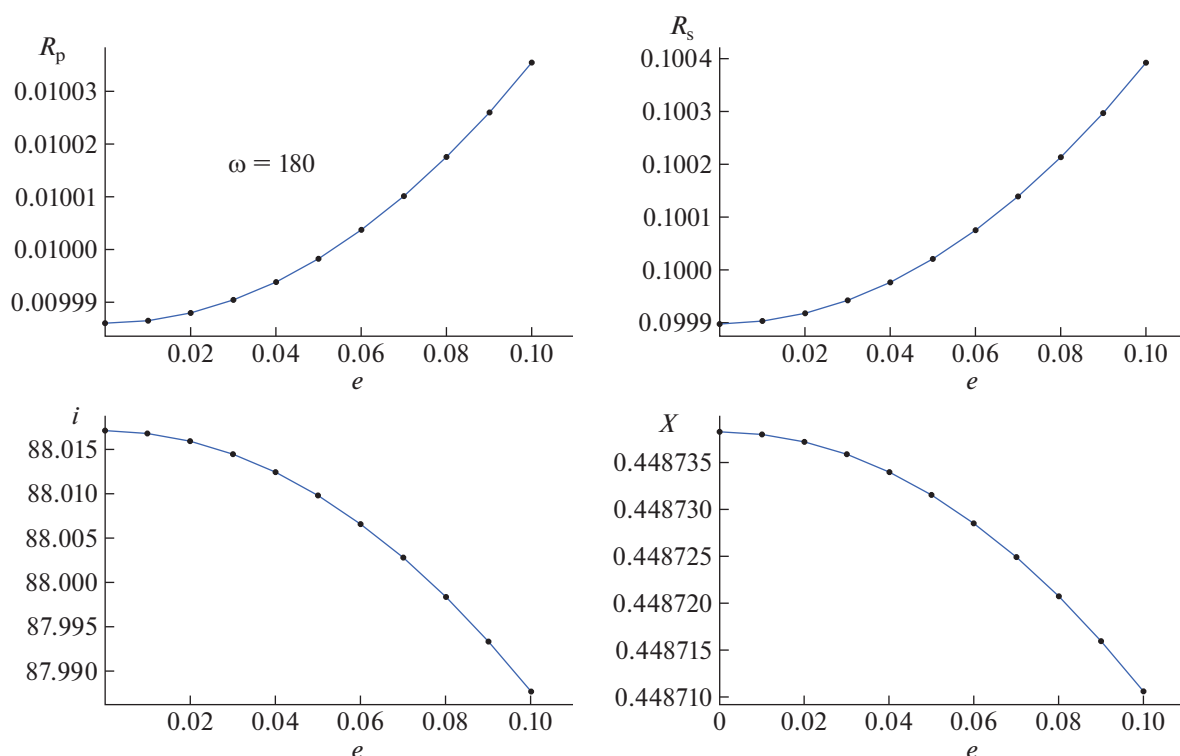


Рис. 17. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастро $\omega = 180^\circ$, полученные в результате интерпретации модельной транзитной кривой блеска.

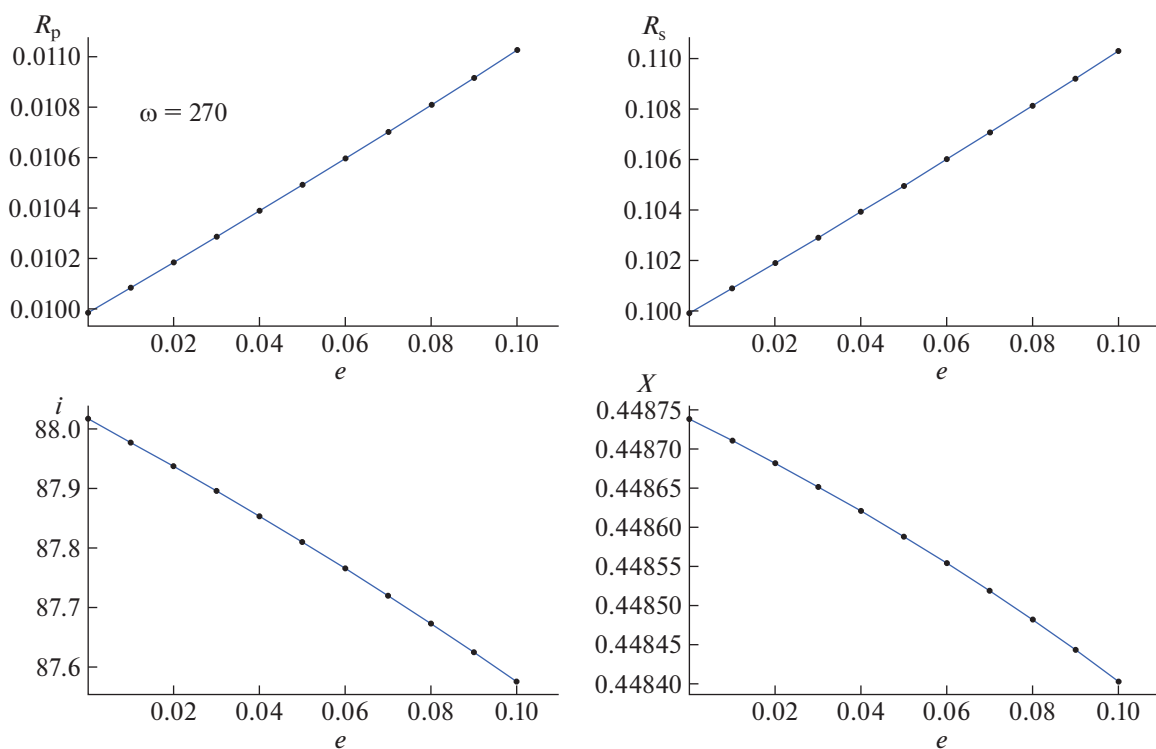


Рис. 18. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастро $\omega = 270^\circ$, полученные в результате интерпретации модельной транзитной кривой блеска.

Таблица 7. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска Kerler-7b при значении долготы периастра $\omega = 177^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p , км	i , °	χ^2	e	x	R_p , км	i , °	χ^2
0.000	0.65	119 125	84.481	1.21353	0.076	0.61	119 622	84.3876	1.17
0.002	0.64	119 214	84.4777	1.21149	0.078	0.61	119 711	84.3842	1.16522
0.004	0.64	119 154	84.476	1.20936	0.080	0.60	119 657	84.3826	1.16465
0.006	0.64	119 241	84.4727	1.2073	0.082	0.60	119 603	84.3809	1.16
0.008	0.64	119 184	84.471	1.20532	0.084	0.60	119 692	84.3776	1.16393
0.010	0.64	119 272	84.4677	1.20339	0.086	0.60	119 638	84.3759	1.16374
0.012	0.64	119 216	84.466	1.20155	0.088	0.60	119 726	84.3726	1.16355
0.014	0.64	119 304	84.4627	1.19978	0.090	0.60	119 672	84.3709	1.16342
0.016	0.64	119 248	84.461	1.19807	0.092	0.60	119 760	84.3676	1.16349
0.018	0.64	119 336	84.4577	1.19647	0.094	0.60	119 706	84.3659	1.16334
0.020	0.63	119 281	84.456	1.19481	0.096	0.60	119 653	84.3642	1.16362
0.022	0.63	119 370	84.4527	1.19305	0.098	0.60	119 741	84.3609	1.16
0.024	0.63	119 315	84.451	1.19135	0.100	0.60	119 687	84.3592	1.16388
0.026	0.63	119 404	84.4477	1.18976	0.102	0.59	119 775	84.3559	1.16414
0.028	0.63	119 350	84.446	1.19	0.104	0.59	119 713	84.3542	1.16422
0.030	0.63	119 439	84.4427	1.18678	0.106	0.59	119 800	84.3509	1.1645
0.032	0.63	119 385	84.441	1.19	0.108	0.59	119 746	84.3492	1.16458
0.034	0.63	119 475	84.4377	1.18414	0.110	0.59	119 692	84.3475	1.1651
0.036	0.63	119 422	84.436	1.18268	0.112	0.59	119 778	84.3442	1.17
0.038	0.62	119 505	84.4326	1.18168	0.114	0.59	119 724	84.3425	1.16578
0.040	0.62	119 450	84.431	1.18007	0.116	0.59	119 810	84.3392	1.16631
0.042	0.62	119 396	84.4293	1.17905	0.118	0.59	119 756	84.3375	1.16673
0.044	0.62	119 485	84.426	1.17758	0.120	0.59	119 842	84.3342	1.1676
0.046	0.62	119 431	84.4243	1.17659	0.122	0.59	119 787	84.3325	1.16803
0.048	0.62	119 520	84.421	1.17529	0.124	0.59	119 733	84.3308	1.16888
0.050	0.62	119 466	84.4193	1.17435	0.126	0.59	119 819	84.3275	1.16966
0.052	0.62	119 555	84.416	1.17342	0.128	0.58	119 765	84.3258	1.17035
0.054	0.62	119 501	84.4143	1.17252	0.130	0.58	119 851	84.3225	1.17125
0.056	0.62	119 591	84.411	1.17177	0.132	0.58	119 797	84.3208	1.17182
0.058	0.62	119 536	84.4093	1.17097	0.134	0.58	119 743	84.3192	1.17278
0.060	0.61	119 626	84.4059	1.17018	0.136	0.58	119 828	84.3158	1.17366
0.062	0.61	119 572	84.4043	1.16919	0.138	0.58	119 774	84.3142	1.17455
0.064	0.61	119 518	84.4026	1.16867	0.140	0.58	119 860	84.3108	1.17574
0.066	0.61	119 607	84.3993	1.16769	0.142	0.58	119 806	84.3091	1.17663
0.068	0.61	119 553	84.3976	1.16721	0.144	0.58	119 753	84.3075	1.17787
0.070	0.61	119 642	84.3943	1.16653	0.146	0.58	119 838	84.3041	1.17907
0.072	0.61	119 588	84.3926	1.1661	0.148	0.58	119 785	84.3025	1.18017
0.074	0.61	119 676	84.3893	1.17					

Таблица 8. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска Kepler-7b при значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p , км	i , °	χ^2	e	x	R_p , км	i , °	χ^2
0.000	0.61	119603	84.4143	1.21353	0.052	0.50	121754	84.1351	1.04449
0.002	0.61	119665	84.4009	1.19791	0.054	0.50	121910	84.1262	1.04923
0.004	0.60	119758	84.3876	1.18258	0.056	0.50	121982	84.1184	1.05702
0.006	0.60	119869	84.3742	1.16780	0.058	0.49	121969	84.1115	1.06431
0.008	0.60	120003	84.3609	1.15580	0.060	0.49	122074	84.1036	1.07351
0.010	0.59	120010	84.3492	1.14195	0.062	0.48	122093	84.0967	1.08422
0.012	0.59	120188	84.3358	1.12911	0.064	0.48	122231	84.0889	1.09574
0.014	0.58	120238	84.3242	1.11782	0.066	0.47	122177	84.0830	1.10931
0.016	0.58	120308	84.3125	1.10634	0.068	0.47	122347	84.0751	1.12254
0.018	0.58	120400	84.3008	1.09714	0.070	0.46	122324	84.0692	1.13806
0.020	0.57	120504	84.2891	1.08574	0.072	0.46	122420	84.0623	1.15265
0.022	0.57	120636	84.2774	1.07647	0.074	0.46	122426	84.0564	1.17029
0.024	0.56	120788	84.2658	1.06984	0.076	0.45	122446	84.0505	1.18802
0.026	0.56	120803	84.2557	1.06025	0.078	0.45	122588	84.0436	1.20702
0.028	0.55	120836	84.2457	1.05554	0.080	0.44	122531	84.0387	1.22748
0.030	0.55	121049	84.2340	1.04851	0.082	0.44	122702	84.0318	1.24878
0.032	0.55	121121	84.2240	1.04333	0.084	0.43	122672	84.0269	1.27125
0.034	0.54	121213	84.2140	1.04001	0.086	0.43	122765	84.0210	1.29488
0.036	0.54	121161	84.2057	1.03582	0.088	0.42	122762	84.0161	1.32039
0.038	0.53	121289	84.1957	1.03333	0.090	0.42	122773	84.0112	1.34600
0.040	0.53	121436	84.1856	1.03157	0.092	0.41	122797	84.0063	1.37377
0.042	0.53	121432	84.1773	1.03146	0.094	0.41	122938	84.0004	1.40191
0.044	0.52	121500	84.1685	1.03101	0.096	0.40	122877	83.9965	1.43156
0.046	0.52	121585	84.1596	1.03284	0.098	0.40	122941	83.9915	1.46135
0.048	0.51	121688	84.1508	1.03563	0.100	0.40	123017	83.9866	1.49344
0.050	0.51	121709	84.1429	1.03885					

Относительно небольшая амплитуда кривой лучевых скоростей при сравнительно большой ошибке не позволяет точно определить значение эксцентриситета орбиты двойной. Как правило, для простоты расчетов эксцентриситет орбиты двойной принимается в большинстве случаев близким к нулю, что может быть не совсем верно. Поэтому авторы для полноты исследования рассмотрели степень влияния неопределенности значения эксцентриситета орбиты двойной на значение радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , коэффициента потемнения к краю x и наклонения орбиты i , определяемых в ходе интерпретации транзитной кривой блеска. Или, другими словами, в какой мере неопределенность в значении эксцентриситета e вносит неопределенность в значение радиуса планеты, радиуса звезды, коэффициента потемнения к краю наклонения орбиты?

Для ответа на этот вопрос авторы выполнили интерпретацию модельной кривой блеска, полученной при следующих значениях параметров: $e = 0.0$, $R_s = 0.1$, $R_p = 0.01$, $P_{orb} = 8^d$, $x = 0.45$, $i = 88^\circ$. Интерпретация выполнена при значениях долготы периастра 0° , 180° , 90° и 270° для каждого значения эксцентриситета $e = 0.0, \dots, 0.1$ с шагом 0.01. Искомые параметрами задачи являлись: радиус планеты R_p , радиус звезды R_s , коэффициент потемнения к краю x и наклонение орбиты i .

Результаты интерпретации для долготы периастра $\omega = 0^\circ$, 90° , 180° и 270° представлены на рис. 15–18 соответственно. Из рис. 15–18 видно, что разброс значений радиуса звезды R_s и радиуса планеты R_p при отсутствии априорной информации о значении эксцентриситета и долготы периастра может достигать $\sim 10\%$. Максимальный раз-

Таблица 9. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска Kerler-7b при значении долготы периастра $\omega = 45^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p , км	i , $^\circ$	χ^2	e	x	R_p , км	i , $^\circ$	χ^2
0.000	0.60	119752	84.3909	1.19739	0.100	0.51	122262	84.1005	1.09540
0.002	0.60	119818	84.3826	1.18853	0.102	0.50	122242	84.0972	1.10152
0.004	0.59	119894	84.3742	1.17902	0.104	0.50	122228	84.0939	1.10952
0.006	0.59	119833	84.3676	1.16892	0.106	0.50	122399	84.0888	1.11887
0.008	0.59	119931	84.3592	1.15925	0.108	0.50	122395	84.0855	1.12668
0.010	0.59	120039	84.3509	1.15115	0.110	0.50	122396	84.0822	1.13621
0.012	0.59	120008	84.3442	1.14462	0.112	0.49	122401	84.0788	1.14573
0.014	0.58	120144	84.3358	1.13538	0.114	0.49	122412	84.0755	1.15555
0.016	0.58	120134	84.3292	1.12787	0.116	0.49	122427	84.0722	1.16630
0.018	0.58	120287	84.3208	1.11986	0.118	0.49	122447	84.0688	1.17766
0.020	0.58	120298	84.3142	1.11249	0.120	0.49	122655	84.0638	1.18942
0.022	0.58	120318	84.3075	1.10710	0.122	0.49	122685	84.0605	1.20130
0.024	0.57	120347	84.3008	1.10081	0.124	0.49	122719	84.0571	1.21351
0.026	0.57	120541	84.2925	1.09315	0.126	0.48	122571	84.0555	1.22564
0.028	0.57	120591	84.2858	1.08641	0.128	0.48	122614	84.0521	1.23822
0.030	0.57	120649	84.2791	1.08074	0.130	0.48	122660	84.0488	1.25144
0.032	0.57	120717	84.2724	1.07585	0.132	0.48	122711	84.0455	1.26512
0.034	0.56	120636	84.2674	1.07101	0.134	0.48	122766	84.0421	1.27959
0.036	0.56	120722	84.2607	1.06453	0.136	0.48	122826	84.0388	1.29484
0.038	0.56	120817	84.2541	1.05913	0.138	0.48	122882	84.0354	1.31092
0.040	0.56	120922	84.2474	1.05551	0.140	0.48	122949	84.0321	1.32759
0.042	0.56	120875	84.2424	1.05195	0.142	0.47	122830	84.0304	1.34253
0.044	0.55	120989	84.2357	1.04858	0.144	0.47	122904	84.0271	1.35771
0.046	0.55	120957	84.2307	1.04479	0.146	0.47	122983	84.0238	1.37532
0.048	0.55	121095	84.2240	1.04079	0.148	0.47	123065	84.0204	1.39267
0.050	0.55	121078	84.2190	1.03828	0.150	0.46	122958	84.0187	1.41195
0.052	0.55	121233	84.2123	1.03654	0.152	0.46	123048	84.0154	1.42955
0.054	0.55	121232	84.2073	1.03471	0.154	0.47	123140	84.0121	1.44863
0.056	0.54	121238	84.2023	1.03241	0.156	0.46	123043	84.0104	1.46686
0.058	0.54	121252	84.1973	1.03147	0.158	0.46	123142	84.0071	1.48530
0.060	0.54	121440	84.1906	1.03095	0.160	0.46	123245	84.0037	1.50673
0.062	0.54	121469	84.1856	1.02979	0.162	0.46	123156	84.0021	1.52624
0.064	0.54	121505	84.1806	1.03008	0.164	0.46	123266	83.9987	1.54647
0.066	0.53	121548	84.1756	1.03086	0.166	0.45	123182	83.9971	1.56831
0.068	0.53	121598	84.1706	1.03087	0.168	0.46	123297	83.9937	1.58973
0.070	0.53	121655	84.1656	1.03174	0.170	0.45	123219	83.9920	1.61139
0.072	0.53	121720	84.1606	1.03349	0.172	0.45	123340	83.9887	1.63294
0.074	0.53	121620	84.1573	1.03551	0.174	0.45	123266	83.9870	1.65717
0.076	0.52	121697	84.1523	1.03744	0.176	0.45	123394	83.9837	1.67926
0.078	0.52	121781	84.1473	1.03951	0.178	0.45	123324	83.9820	1.70486
0.080	0.52	121872	84.1422	1.04276	0.180	0.45	123457	83.9787	1.72770
0.082	0.52	121797	84.1389	1.04553	0.182	0.44	123392	83.9770	1.75300
0.084	0.52	121900	84.1339	1.04909	0.184	0.45	123530	83.9737	1.77847
0.086	0.52	122018	84.1289	1.05468	0.186	0.44	123469	83.9720	1.80291
0.088	0.51	121960	84.1256	1.05860	0.188	0.44	123410	83.9703	1.83084
0.090	0.51	122084	84.1206	1.06440	0.190	0.44	123556	83.9670	1.85552
0.092	0.51	122038	84.1172	1.06806	0.192	0.44	123501	83.9653	1.88319
0.094	0.51	122173	84.1122	1.07525	0.194	0.44	123651	83.9620	1.90951
0.096	0.51	122138	84.1089	1.08032	0.196	0.44	123600	83.9603	1.93766
0.098	0.50	122108	84.1055	1.08866	0.198	0.43	123550	83.9587	1.96594

Таблица 10. Результаты интерпретации наблюдаемой кривой блеска Kepler-7b при значении долготы периастра $\omega = 135^\circ$, полученные в программе [16]

e	x	R_p , км	i , °	χ^2	e	x	R_p , км	i , °	χ^2
0.000	0.65	119 125	84.481	1.21353	0.076	0.51	121 785	84.1272	1.03491
0.002	0.64	119 221	84.4694	1.20345	0.078	0.50	121 765	84.1206	1.04027
0.004	0.64	119 330	84.4577	1.19384	0.080	0.50	121 920	84.1122	1.04707
0.006	0.64	119 452	84.446	1.18530	0.082	0.49	121 913	84.1055	1.05269
0.008	0.63	119 439	84.436	1.17607	0.084	0.49	121 913	84.0989	1.06169
0.010	0.63	119 584	84.4243	1.16662	0.086	0.49	122 089	84.0905	1.07176
0.012	0.63	119 594	84.4143	1.15892	0.088	0.48	122 102	84.0838	1.08223
0.014	0.62	119 763	84.4026	1.14965	0.090	0.48	122 121	84.0772	1.09333
0.016	0.62	119 787	84.3926	1.14130	0.092	0.47	122 146	84.0705	1.10636
0.018	0.62	119 977	84.3809	1.13412	0.094	0.47	122 177	84.0638	1.12095
0.020	0.61	120 029	84.3709	1.12561	0.096	0.46	122 214	84.0571	1.13627
0.022	0.61	120 090	84.3609	1.11781	0.098	0.46	122 257	84.0505	1.15379
0.024	0.61	120 162	84.3509	1.11107	0.100	0.46	122 306	84.0438	1.17008
0.026	0.60	120 244	84.3409	1.10346	0.102	0.45	122 360	84.0371	1.18931
0.028	0.60	120 337	84.3308	1.09669	0.104	0.45	122 420	84.0304	1.20886
0.030	0.59	120 439	84.3208	1.09095	0.106	0.45	122 486	84.0238	1.23
0.032	0.59	120 397	84.3125	1.08389	0.108	0.44	122 551	84.0171	1.25333
0.034	0.59	120 519	84.3025	1.07776	0.110	0.43	122 451	84.0121	1.27745
0.036	0.58	120 651	84.2925	1.07259	0.112	0.43	122 533	84.0054	1.30237
0.038	0.58	120 636	84.2841	1.06648	0.114	0.43	122 620	83.9987	1.32733
0.040	0.58	120 787	84.2741	1.06192	0.116	0.42	122 535	83.9937	1.35598
0.042	0.57	120 790	84.2658	1.05667	0.118	0.42	122 631	83.987	1.38423
0.044	0.57	120 802	84.2574	1.05263	0.120	0.41	122 555	83.982	1.41368
0.046	0.57	120 980	84.2474	1.04874	0.122	0.41	122 662	83.9754	1.44603
0.048	0.56	121 009	84.239	1.04421	0.124	0.40	122 594	83.9703	1.47812
0.050	0.56	121 046	84.2307	1.04111	0.126	0.40	122 711	83.9637	1.51342
0.052	0.55	121 099	84.2224	1.03819	0.128	0.39	122 652	83.9587	1.54754
0.054	0.55	121 154	84.214	1.03535	0.130	0.39	122 777	83.952	1.59
0.056	0.55	121 217	84.2057	1.03365	0.132	0.38	122 727	83.947	1.62328
0.058	0.54	121 288	84.1973	1.03131	0.134	0.38	122 862	83.9403	1.66448
0.060	0.54	121 368	84.189	1.03095	0.136	0.38	122 819	83.9353	1.70633
0.062	0.53	121 455	84.1806	1.02858	0.138	0.37	122 780	83.9303	1.74817
0.064	0.53	121 550	84.1723	1.02732	0.140	0.37	122 928	83.9236	1.79195
0.066	0.53	121 489	84.1656	1.02589	0.142	0.36	122 896	83.9186	1.20
0.068	0.52	121 599	84.1573	1.0266	0.144	0.36	122 869	83.9136	1.89
0.070	0.52	121 718	84.1489	1.02591	0.146	0.35	122 844	83.9086	1.93496
0.072	0.51	121 678	84.1422	1.0284	0.148	0.34	122 823	83.9036	1.98454
0.074	0.51	121 811	84.1339	1.03124					

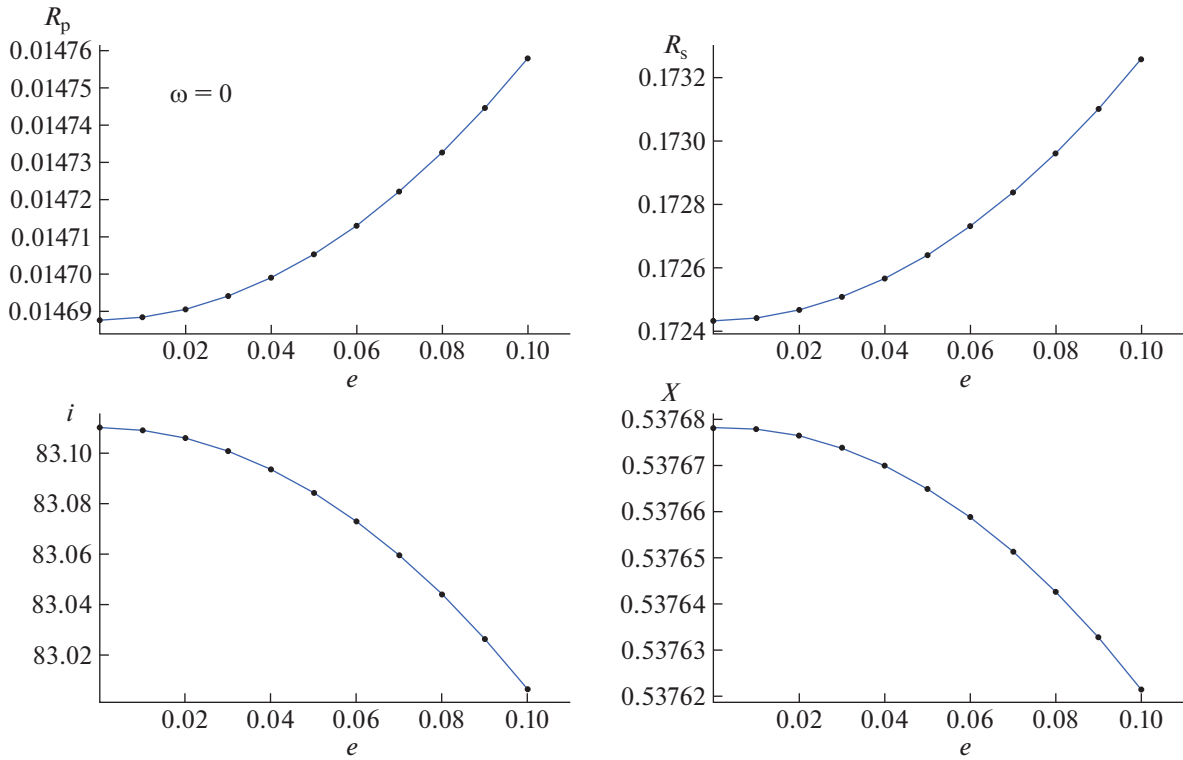


Рис. 19. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 0^\circ$, полученные в результате интерпретации наблюдаемой транзитной кривой блеска двойной системы с экзопланетой Kepler-7b.

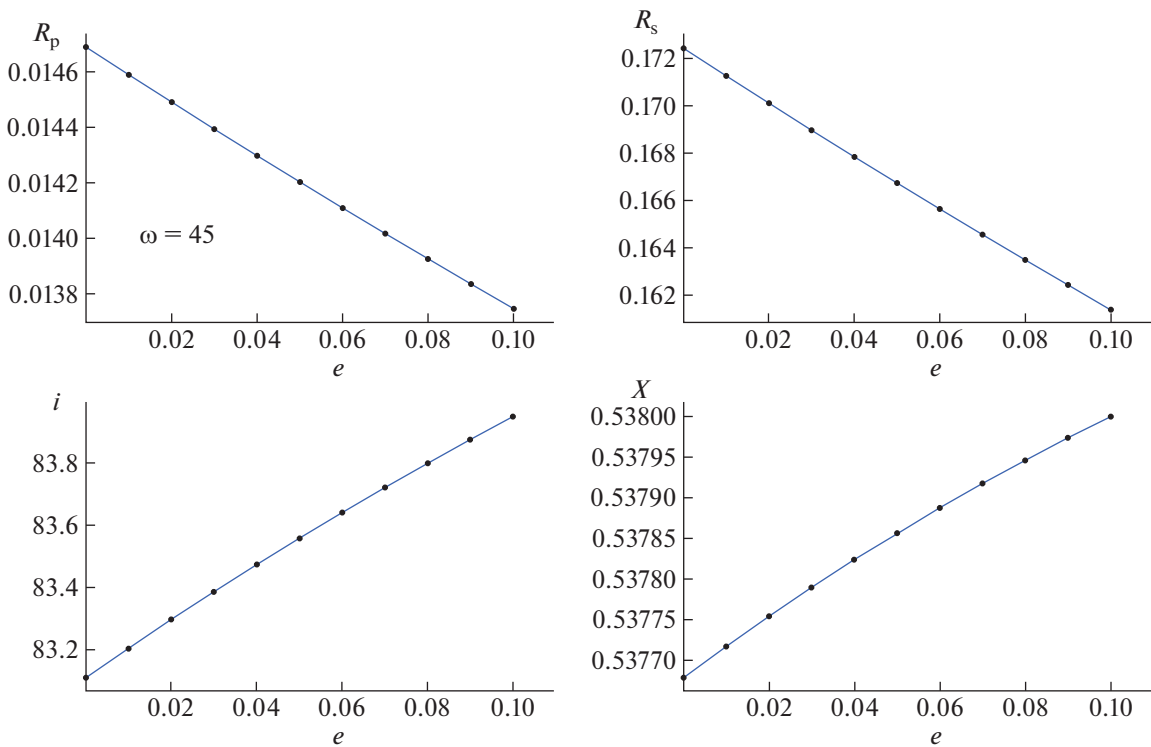


Рис. 20. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 45^\circ$, полученные в результате интерпретации наблюдаемой транзитной кривой блеска двойной системы с экзопланетой Kepler-7b.

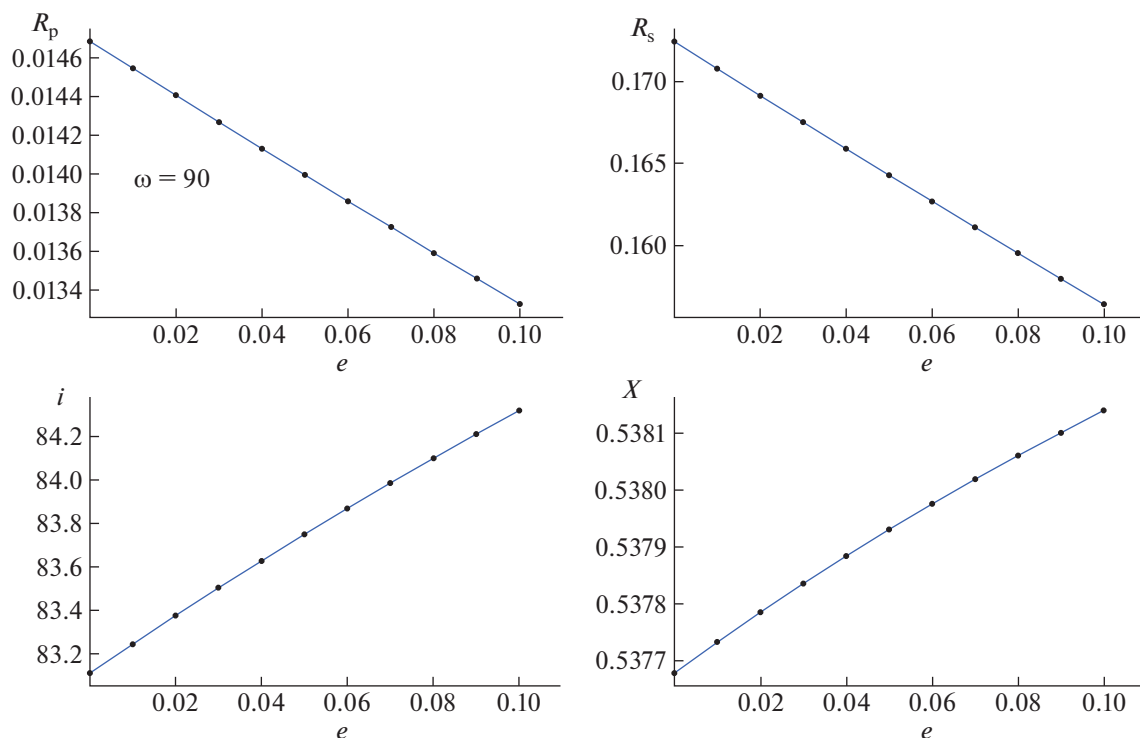


Рис. 21. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 90^\circ$, полученные в результате интерпретации наблюдаемой транзитной кривой блеска двойной системы с экзопланетой Kepler-7b.

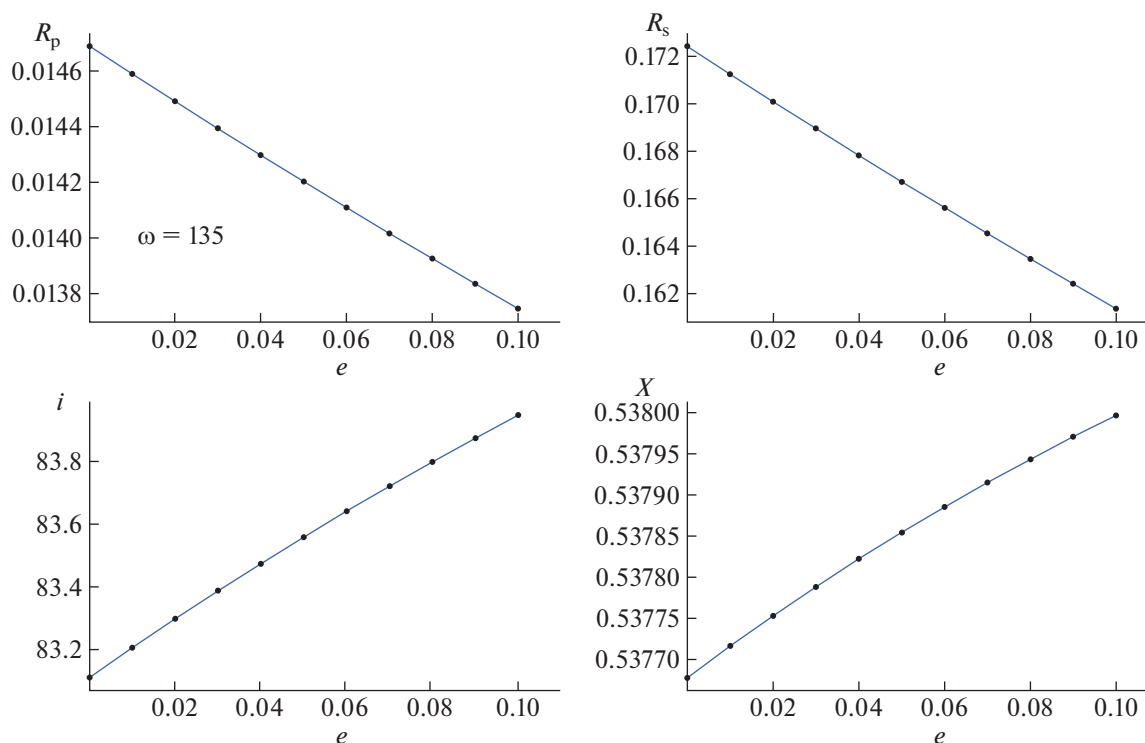


Рис. 22. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклонения орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 135^\circ$, полученные в результате интерпретации наблюдаемой транзитной кривой блеска двойной системы с экзопланетой Kepler-7b.

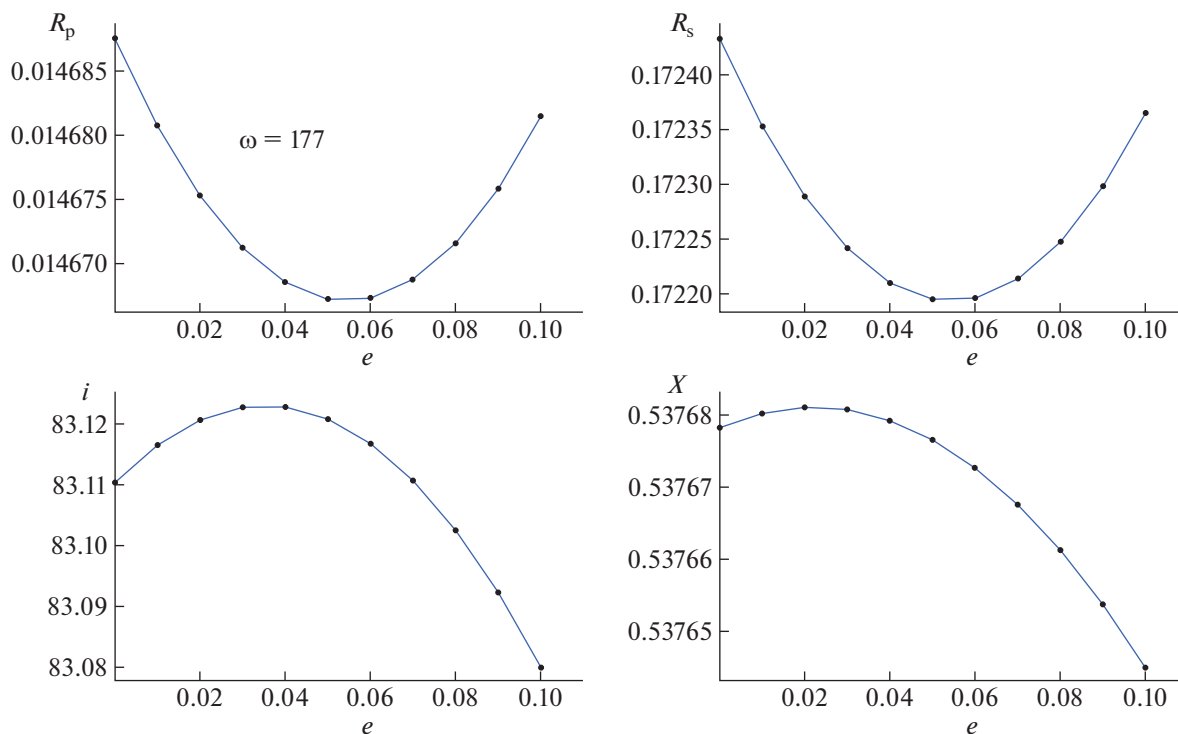


Рис. 23. Зависимость значения радиуса планеты R_p , радиуса звезды R_s , наклона орбиты i и коэффициента потемнения к краю x от значения эксцентриситета e при фиксированном значении долготы периастра $\omega = 177^\circ$, полученные в результате интерпретации наблюдаемой транзитной кривой блеска двойной системы с экзопланетой Kepler-7b.

брос в значении радиуса $\simeq 10\%$ достигается при долготах периастра 90° и 270° , когда эллипс орбиты повернут к наблюдателю “острой” стороной. В этом случае неопределенность радиуса максимальна, поскольку при таких значениях долготы периастра у затменных двойных систем различие в ширинах главного и вторичного минимумов максимально, и в данном случае сумма радиусов компонентов сильнее всего влияет на ширину затмения.

Следует отметить, что зависимость радиуса звезды от эксцентриситета орбиты может использоваться в обратном ключе. Например, если есть ограничение звезды по значению радиуса (см. каталог Гайя), то в этом случае мы можем наложить ограничение на эксцентриситет двойной.

Из рис. 15–18 видно, что значения коэффициента потемнения к краю x и наклона орбиты i устойчивы к неопределенности эксцентриситета.

Аналогичный расчет был выполнен для наблюдаемой транзитной кривой блеска двойной системы Kepler-7b. Для фиксированных значений радиуса звезды $R_s = 1.96 R_\odot$, фиксированного значения периода двойной $P_{orb} = 4.885525^d$, при фиксированных значениях эксцентриситета в пределах $e = 0.0, \dots, 0.1$ при значениях долготы

периастра $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ и 177° для каждого значения эксцентриситета решена обратная задача. Искомыми параметрами задачи являлись: радиус планеты R_p , радиус звезды R_s , коэффициент потемнения к краю x , наклонение орбиты i . Значение большой полуоси двойной системы Kepler-7b было принято равным 0.06246 а.е.

Результаты интерпретации наблюдаемой транзитной кривой двойной Kepler-7b для долготы периастра $\omega = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ и 177° представлены на рис. 19–23 соответственно. Для наблюдаемой кривой блеска для долгот периастра 45° и 135° разброс значений радиусов планеты и звезды также составляет $\sim 9\text{--}10\%$.

Таким образом, из представленных расчетов видно, что незнание долготы периастра и значения эксцентриситета (или ошибочного априорного предположения о круговой орбите) может приводить к ошибкам определения радиусов планеты и звезды до 10% . Значения же наклона орбиты и коэффициентов потемнения к краю устойчивы к отсутствию априорной информации о значении эксцентриситета и долготы периастра.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

Интерпретация наблюдаемых транзитных кривых блеска не позволяет одновременно получить надежные значения эксцентриситета e и долготы периастра ω . Однако при априорной информации о значении долготы периастра ω на основе наблюдаемой транзитной кривой блеска можно получить надежное значение эксцентриситета орбиты e двойной системы с экзопланетой.

При отсутствии информации о долготе периастра ω анализ кривой затмения звезды экзопланетой позволяет оценить интервал возможных значений эксцентриситета. Это полезная информация, которая может быть получена независимо от результатов сложных спектроскопических исследований.

Также прослеживается заметная корреляция между параметром эксцентриситета e и коэффициентом потемнения звезды к краю x . Характер данной корреляции четко зависит от долготы периастра транзита. Так, при транзите, происходящем вблизи периастра ($\omega = 270^\circ$), коэффициент потемнения к краю растет вместе с ростом эксцентриситета, и наоборот, для транзитов, происходящих вблизи апоафра ($\omega = 90^\circ$), наблюдается падение коэффициента потемнения к краю при росте эксцентриситета.

Данный эффект может быть связан с изменением прицельного расстояния, которое при небольших изменениях наклона орбиты изменяется вместе с расстоянием между планетой и звездой в момент транзита. Это согласуется с результатами, полученными для кривых блеска экзопланеты HD 209458b [3] и, по крайней мере частично (например, в сочетании с эффектами запятненности звезды), может объяснить расхождение между теоретическими и эмпирически полученными коэффициентами потемнения к краю.

При отсутствии априорной информации о значении долготы периафра мы не можем определить точное значение эксцентриситета из фотометрических данных с использованием одной транзитной кривой блеска. Однако интерпретация транзитной кривой блеска дает представление об эксцентricности или не эксцентricности орбиты, и позволяет примерно оценить величину эксцентриситета. Авторы рекомендуют в искомые параметры включать не только традиционный набор параметров (радиусы планеты и звезды, наклонение орбиты и коэффициенты потемнения к краю), но и выполнять минимизацию наблюдаемой кривой блеска по эксцентриситету.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря успешной работе космических обсерваторий накоплен обширный банк фотомет-

рических данных, который может быть использован не только для получения значения геометрических параметров двойной системы с экзопланетой, но и для оценки значений орбитальных параметров e и ω , которые, как показали недавние исследования, тоже стоит принимать во внимание [3].

Однако вследствие использования одной кривой затмения, точное определение значения эксцентриситета без априорной информации о величине ω невозможно. Можно говорить, что в этом случае надежно определяется величина $e \sin \omega$, этот вопрос авторы предполагают рассмотреть в дальнейших исследованиях.

Таким образом, анализ транзитных кривых блеска двойных систем с экзопланетами с включением в качестве искомого параметра эксцентриситета орбиты позволяет дать ограничения на степень эксцентricности орбиты для короткопериодических систем, у которых величины эксцентриситета, как правило, малы и лежат в пределах значительных ошибок определения. Знание степени эксцентricности орбиты короткопериодических систем с экзопланетами важно для выявления механизмов округления их орбит в результате приливной диссипации энергии орбитального обращения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта Научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, а также Программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Д.В. Бисикало за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. Claret and S. Bloemen*, Astron. and Astrophys. **529**, id. A75 (2011).
2. *J. Southworth*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **386**, 1644 (2008).
3. *Е. В. Бекесов, А. М. Черепашук*, Астрон. журн. **100**(2), 173 (2023).
4. *М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук*, Астрон. журн. **87**(12), 1199 (2010).
5. *B. O. Demory, S. Seager, N. Madhusudhan, H. Kjeldsen, et al.*, Astrophys. J. Letters **735**(1), L12 (2011).
6. *J. P. Zahn*, Astron. and Astrophys. **57**, 383 (1977).
7. *М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев, А. М. Черепашук*, Астрон. журн. **85**(2), 121 (2008).
8. *М. К. Абубекеров, Н. Ю. Гостев*, Вычисл. методы и программирование **15**, 677 (2014).

9. *M. K. Abubekеров, H. Ю. Гостев, А. М. Черепашчук*, Астрон. журн. **86**(8), 778 (2009).
10. *M. K. Abubekеров and N. Yu. Gostev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **432**, 2216 (2013).
11. *M. K. Abubekеров and N. Yu. Gostev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **459**, 2078 (2016).
12. *M. K. Abubekеров and N. Yu. Gostev*, Astron. and Astrophys. **633**, id. A96 (2020).
13. *M. K. Abubekеров, H. Ю. Гостев*, Астрон. журн. **98**(11), 922 (2021).
14. *H. Ю. Гостев*, Астрон. журн. **88**(7), 704 (2011).
15. *W. Latham, W. J. Borucki, D. G. Koch, T. M. Brown, et al.*, Astrophys. J. **713**, L140 (2010).
16. *Е. В. Бекесов, А. А. Белинский, С. Б. Попов*, Астрон. журн. **98**(12), 1043 (2021).
17. *A. S. Bonomo, S. Desidera, S. Benatti, and F. Borsa*, Astron. and Astrophys. **602**, id. A107 (2017).

ON THE POSSIBILITY OF ESTIMATION OF THE ORBIT ECCENTRICITY OF A BINARY SYSTEM WITH AN EXOPLANET USING A TRANSIT LIGHT CURVE

E. V. Bekesov^a, M. K. Abubekеров^a, N. Yu. Gostev^a, and A. M. Cherepashchuk^a

^a*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

Working with both simulated and observed transit light curves, we studied a possibility of determining an orbital eccentricity of a binary star system with an exoplanet. It is shown that determining an exact eccentricity value from transit light curves is possible if a longitude of a periastron is known. In the absence of information about the longitude of periastron, analysis of the transit light curve makes it possible to impose restrictions on orbital eccentricity values. The influence of uncertainty in the orbital eccentricity on the accuracy of determination of other parameters of the system (a radius of the star, a radius of the planet, orbit inclination, and limb darkening coefficient) has been studied.

Keywords: transit light curves, binary systems with exoplanets, eccentricity, limb darkening coefficients, planet radius, star radius