

КАНДИДАТ В ЭКЗОЮПИТЕРЫ FL Lyr b ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ KEPLER И TESS

© 2023 г. В. С. Козырева¹, А. И. Богомазов^{1,*}, Б. П. Демков²,
Л. В. Зотов^{1,3}, А. В. Тутуков⁴

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

² Индивидуальный предприниматель Демков Борис Павлович, Зеленоград, Москва, Россия

³ Высшая школа экономики, Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова,
Москва, Россия

⁴ Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: a78b@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.11.2022 г.

После доработки 24.02.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

В работе изучается световое уравнение затменной двойной системы FL Lyr по данным космических телескопов Kepler и TESS. Показано, что в системе есть кандидат в экзопланеты FL Lyr b с вероятным значением орбитального периода около 22 лет.

Ключевые слова: затменные двойные, экзопланеты

DOI: 10.31857/S0004629923050067, EDN: YWQGEE

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование физики и эволюции тесных двойных звезд — главная тема наблюдательной и теоретической астрофизики конца двадцатого века. В начале двадцать первого века ведущей задачей астрофизики становится всестороннее изучение внесолнечных планетных систем. Изучение условий появления планетных систем в двойных звездных системах, обращающихся как около компонент (S-тип), так и около самих систем (P-тип), объединяет эти два популярных направления современной астрофизики. Наблюдательный поиск планет в двойных звездах осложнен, как обычно, эффектами наблюдательной селекции, что делает текущую статистику таких систем небогатой [1]. Сейчас представляется перспективным поиск планет около компонент затменных двойных систем, что увеличивает вероятность попадания наблюдателя в плоскость орбит возможных планет, обращающихся как около компонент, так и около самих систем [2]. Последнее обстоятельство делает возможным как обнаружение прохождения планет по дискам компонент, так и регистрацию вариации моментов взаимных затмений компонент, вызванных наличием третьего, планетного тела.

Кандидат во внесолнечные планеты P-типа FL Lyr b был предложен по результатам поиска

светового уравнения затменной двойной системы FL Lyr в кривых блеска космического телескопа Kepler [3, 4]. В момент написания статьи объект значится в качестве подтвержденной экзопланеты в “Энциклопедии внесолнечных планет”¹, тем не менее, все еще требуется надежное наблюдательное подтверждение наличия указанного третьего тела в системе. Орбитальный период предполагаемой планеты >7 лет [3] превышает время наблюдения системы телескопом Kepler и не позволяет точно установить фотометрические параметры орбиты третьего тела из данных этого аппарата. Амплитуда светового уравнения $\lesssim 10$ с [3] практически исключает использование наземных фотометрических данных совместно с космическими наблюдениями для поиска величин, связанных с воздействием найденного кандидата на центральную пару звезд.

Открытие FL Lyr b на основе кривых блеска телескопа Kepler [3] было подвергнуто критике на основе иной методики работы с данными [5]. Кроме того, в данных телескопа Kepler главное затмение FL Lyr становилось глубже, а вторичное мельче [6], что было объяснено циклом активности звезд, который мог изменять их поверхностную яркость.

¹ <http://exoplanet.eu/>.

Запуск космического аппарата TESS позволил продолжить ряд высокоточных космических наблюдений. Целью данной работы является продолжение изучения светового уравнения системы FL Ygr с использованием фотометрических данных обоих проектов (Kepler и TESS) для увеличения точности и надежности получаемых результатов.

2. ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ И СВЕТОВОЕ УРАВНЕНИЕ FL Ygr ПО ДАННЫМ KEPLER И TESS

Кривые блеска системы, полученные на КА TESS, были проанализированы нами тем же методом, что и кривые блеска, полученные ранее на телескопе Kepler [3]. В ходе аппроксимации кривых блеска были вычислены фотометрические параметры FL Ygr (см. табл. 1), большая часть из которых близки к значениям, приведенным в работе [3], табл. 1, или находятся в диапазоне их неопределенности, за исключением коэффициентов покраснения к краю (в указанной работе эти коэффициенты не варьировались, были взяты теоретические значения). Для наблюдений, сделанных на спутнике TESS, коэффициенты варьировались, и их значение получилось гораздо меньше теоретических. Получаемые моменты минимумов остаются неизменными в рамках их точности (см. табл. 2) при расчетах в границах указанных значений параметров центральной двойной. Основной целью нашего исследования является получение светового уравнения. Исследование показало, что даже довольно значительное различие коэффициентов потемнения звезд к краю (такое, как между вычисленными и теоретическими коэффициентами в данной работе) не меняет с точностью до 0.00001^d моменты минимумов.

Новые моменты минимумов из наземных наблюдений и из наблюдений на спутнике TESS позволили уточнить новую эфемериду FL Ygr по сравнению с той, что была получена в работе [3], где использовался менее продолжительный ряд наблюдений:

$$\text{Min I} = T_i + P_{\text{orb}}E, \quad (1)$$

где Min I – момент главного минимума, $T_i = \text{BJD } 2455997.46934 \pm 0.00004$ – начальная эпоха, $P_{\text{orb}} = 2.17815441 \pm 0.00000005^d$ – орбитальный период системы, E – количество орбитальных циклов от начальной эпохи. Момент наступления вторичного минимума может быть вычислен при помощи выражения $\text{Min II} = \text{Min I} + 0.5P_{\text{orb}}$.

Таблица 1. Значения параметров FL Ygr, вычисленные из кривых блеска, полученных на космическом аппарате TESS, для эпох BJD 2458 684 и BJD 2458 685

Элемент	Величина
r_1	0.124 ± 0.002
r_2	0.121 ± 0.002
e	$0.000-0.001$
ω	$0.000-0.003$
i , град	85.6 ± 0.2
L_1	0.61 ± 0.03
L_2	0.35 ± 0.03
L_3	0.04 ± 0.03
u_1	0.35 ± 0.05
u_2	0.25 ± 0.05
σ_{O-C}	0.00115

Примечание. Приведены: r_1, r_2 – радиусы главной (1) и вторичной (2) звезд в единицах большой полуоси системы, i – наклонение орбиты, e – ее эксцентриситет, ω – долгота периастра в радианах, L_1, L_2 – светимости главной и вторичной звезд в единицах светимости системы, L_3 – “третий свет” в тех же единицах, u_1, u_2 – коэффициенты потемнения дисков главной и вторичной звезд к краю, σ_{O-C} – стандартное отклонение вычисленной кривой блеска (со значениями параметров, приводимых в данной таблице) и наблюдаемых точек, полученных TESS.

На рис. 1 показаны все точки, которые удалось собрать из литературы², а также рассчитанные из кривых блеска Kepler [3], табл. 3 и TESS (см. табл. 2). По вертикальной оси отложена разность между наблюдаемыми значениями моментов минимумов и значениями, вычисленными с новой эфемеридой (1). Видно, что долговременных вариаций с высокой амплитудой нет, старые данные отличаются очень высоким разбросом, более современные моменты минимумов имеют меньший разброс.

На рис. 2 приведены только те моменты минимумов, которые были получены из кривых блеска космических аппаратов Kepler и TESS. Точность измерений в несколько раз лучше, чем достигается в доступных наземных наблюдениях. С такой точностью удастся увидеть световое уравнение с амплитудой несколько секунд. В работе [3] приведены амплитуда и период светового уравнения, полученные по наблюдениям аппарата Kepler. Указанный результат носил предварительный характер, так как эти наблюдения расположены компактно на кривой светового уравнения, при этом найденный период превышает длительность наблюдений. Появление новых моментов минимумов (из кривых блеска спутника TESS) спустя

² С использованием базы данных V.R.N.O. <http://var2.as-tro.cz/ocgate/?lang=en>.

Таблица 2. Моменты главных минимумов FL Луг, рассчитанные из кривых блеска, полученных на космическом аппарате TESS

Min I BJD 2400000+	O–C, сут	Min I BJD 2400000+	O–C, сут	Min I BJD 2400000+	O–C, сут
58685.31164	–0.00024	59399.74626	–0.00027	59761.31990	–0.00026
58687.48983	–0.00020	59401.92449	–0.00019	59763.49803	–0.00028
58689.66797	–0.00022	59404.10265	–0.00019	59765.67617	–0.00030
58691.84612	–0.00022	59406.28081	–0.00018	59767.85437	–0.00025
58694.02425	–0.00025	59408.45894	–0.00021	59770.03251	–0.00027
58696.20248	–0.00017	59410.63713	–0.00017	59772.21068	–0.00025
58698.38058	–0.00022	59412.81522	–0.00024	59774.38888	–0.00021
58700.55876	–0.00020	59414.99334	–0.00027	59776.56702	–0.00022
58702.73684	–0.00027	59417.17150	–0.00027	59778.74519	–0.00021
58704.91498	–0.00029	59421.52777	–0.00031	59780.92329	–0.00026
58707.09312	–0.00031	59423.70595	–0.00028	59785.27967	–0.00019
58709.27128	–0.00030	59425.88408	–0.00030	59787.45777	–0.00024
58711.44951	–0.00022	59428.06226	–0.00028	59789.63589	–0.00028
58713.62767	–0.00022	59432.41857	–0.00027	59791.81403	–0.00029
58715.80587	–0.00017	59434.59672	–0.00028	59798.34848	–0.00031
58717.98400	–0.00020	59436.77493	–0.00023	59800.52664	–0.00030
58720.16217	–0.00018	59438.95307	–0.00024	59802.70480	–0.00029
58722.34030	–0.00020	59441.13123	–0.00023	59804.88294	–0.00031
58726.69658	–0.00023	59443.30942	–0.00020	59807.06109	–0.00031
58728.87470	–0.00027	59445.48753	–0.00024	59809.23925	–0.00031
58731.05291	–0.00021	59746.07292	–0.00016	59811.41741	–0.00030
58733.23104	–0.00023	59748.25108	–0.00015	59813.59560	–0.00027
58735.40922	–0.00021	59750.42921	–0.00018	59815.77375	–0.00027
59391.03366	–0.00025	59752.60730	–0.00024	59817.95191	–0.00027
59393.21184	–0.00023	59754.78539	–0.00031	59820.13006	–0.00027
59395.38994	–0.00028	59756.96354	–0.00031	59822.30817	–0.00031
59397.56805	–0.00032	59759.14174	–0.00027		

Примечание. O–C – разность между наблюдаемым значением и значением, вычисленным при помощи эфемериды (1).

несколько лет после окончания наблюдений системы FL Луг космическим телескопом Kepler дало возможность определить новые параметры (период и амплитуду светового уравнения) с большей точностью (рис. 2), другие параметры орбиты третьего тела из имеющихся данных пока вычислить невозможно. Для круговой орбиты амплитуда $A = 15 \pm 2$ с, период $P_{\text{orb}} = 22 \pm 0.5$ года.

На рис. 2 и при расчетах параметров светового уравнения используются только главные минимумы кривой блеска. Разброс моментов минимумов зависит от правильного учета изменений блеска звезды, обнаруженных у нее, см. ниже. Чем меньше глубина затмения, тем меньше эти колебания исказят форму кривой и повысят ошибку определения момента минимума. Из-за меньшей в два раза глубины вторичных миниму-

мов разброс моментов становится почти в два раза больше, при этом результат не меняется, но стандартное отклонение сильно возрастает.

Функция масс для третьего тела дает оценку его массы M_3 с углом наклона орбиты i_3 по отношению к картинной плоскости $M_3 \sin i_3 \approx 6M_J$, что несколько повышает оценку нижнего предела массы третьего тела по сравнению с величиной, приведенной в работе [4].

У изучаемой звезды фиксировали активность вне минимумов. Разность между периодом затменной двойной и мелкоамплитудными периодами изменения блеска составляет 0.04^d (2.178^d и 2.139^d соответственно). Можно предположить, что несоответствие этих периодов возникает из-

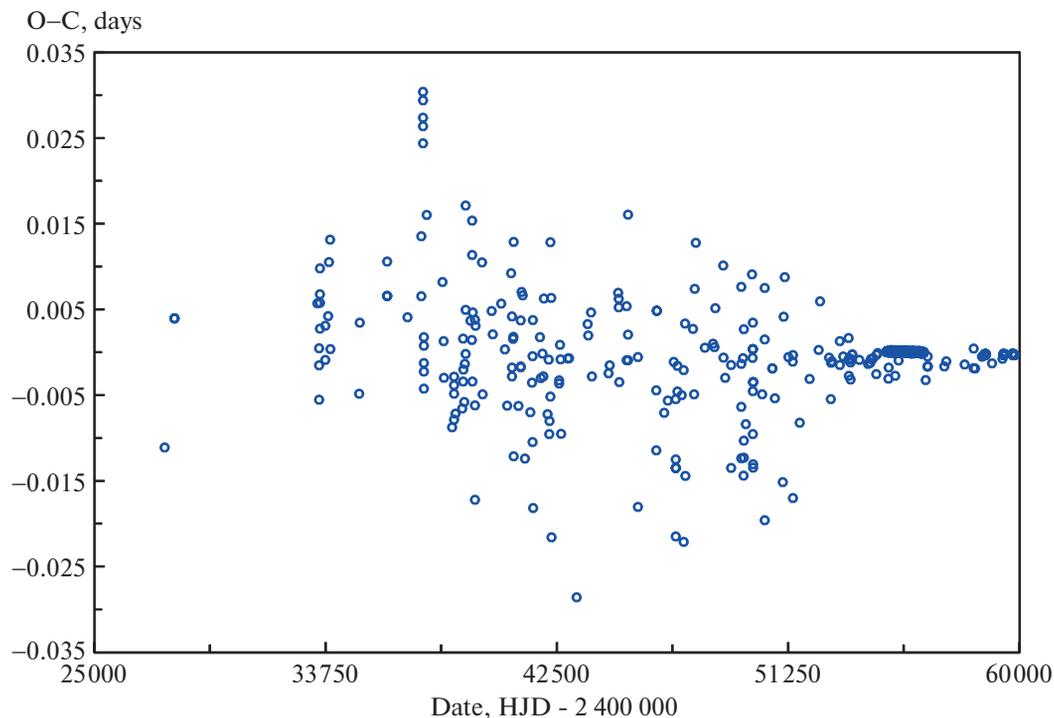


Рис. 1. Диаграмма O–C с моментами минимумов из литературы (главные и вторичные минимумы) и из данных Kepler и TESS (главные минимумы). Здесь O – моменты минимумов, вычисленные из кривых блеска, C – моменты минимумов, вычисленные с использованием эфемериды (1).

за вращения звезды, ответственной за мелкоамплитудные изменения блеска, вокруг своей оси со скоростью, не совпадающей со скоростью син-

хронного (с орбитальным) вращения. График мощности, полученный для наблюдений 2022 г. (рис. 3), показывает пик на частоте 0.4674 сут^{-1} .

Таблица 3. Сводная информация о файлах данных TESS, используемых в данной работе

Name	N_S	Date _C	Date _{start}	Date _{end}	BTJD	TESS _{mag}
tess2019198215352-s0014-0000000158660631-0150-s_lc.fits	14	2020-04-08	2019-07-18 T20:30:39.042	2019-08-14 T16:56:30.778	1683.355419– 1710.206713	8.80498981
tess20192226182529-s0015-0000000158660631-0151-s_lc.fits	15	2020-04-09	2019-08-15 T20:46:29.690	2019-09-10 T21:51:44.739	1711.366422– 1737.411735	8.80498981
tess2021175071901-s0040-0000000158660631-0211-s_lc.fits	40	2021-08-22	2021-06-25 T03:41:47.276	2021-07-23 T08:32:12.642	2390.65482– 2418.856503	8.80498981
tess2021204101404-s0041-0000000158660631-0212-s_lc.fits	41	2021-09-10	2021-07-24 T11:46:12.594	2021-08-20 T01:55:56.033	2419.991224– 2446.58131	8.80498981
tess2022164095748-s0053-0000000158660631-0226-s_lc.fits	53	2022-07-13	2022-06-13 T11:55:11.147	2022-07-08 T11:31:50.189	2743.997458– 2768.981243	8.80498981
tess2022190063128-s0054-0000000158660631-0226-s_lc.fits	54	2022-08-19	2022-07-09 T09:35:50.124	2022-08-04 T15:07:55.686	2769.900686– 2796.131306	8.80498981
tess2022217014003-s0055-0000000158660631-0242-s_lc.fits	55	2022-09-08	2022-08-05 T14:25:55.118	2022-09-01 T18:21:21.086	2797.102133– 2824.265628	8.80498981

Примечание. Приняты следующие обозначения: Name – имя fits файла с фотометрией, N_S – номер сектора наблюдений, Date_C – дата создания fits файла, Date_{start} – дата и время начала наблюдений в шкале времени UTC, Date_{end} – дата и время завершения наблюдений в шкале времени UTC, BTJD – время начала (вверху) и окончания (внизу) наблюдений в шкале времени BTJD=BJD -2457 000, TESS_{mag} звездная величина во входном каталоге TESS для объекта FL Lyr [15].

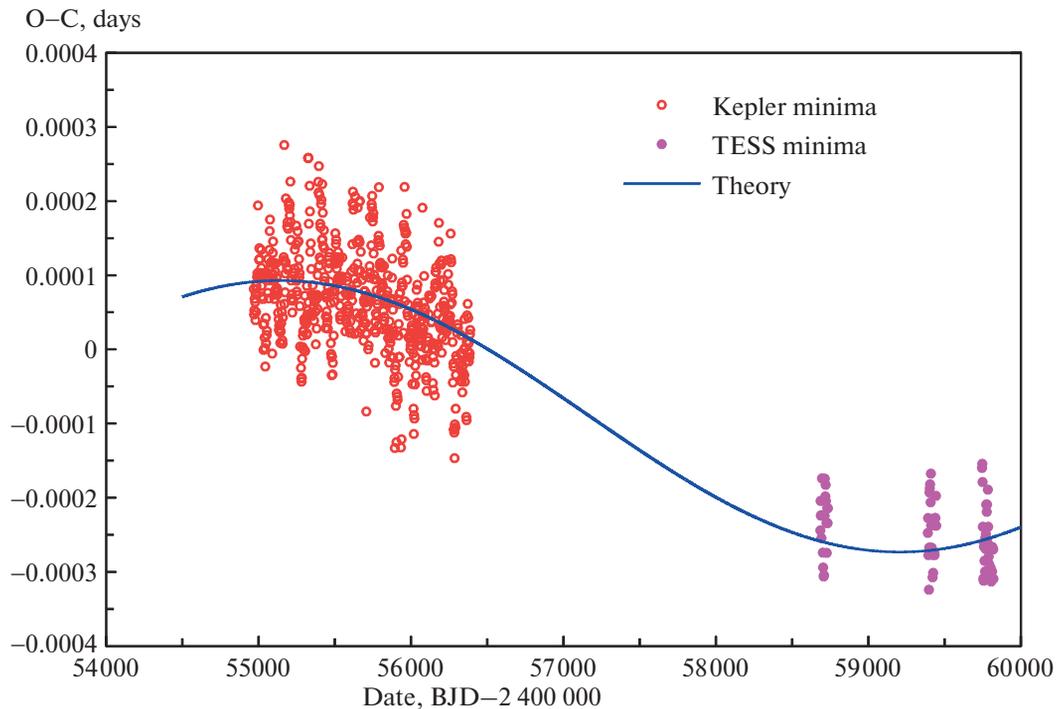


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для главных моментов минимумов, рассчитанных из кривых блеска, полученных на КА Kepler и TESS.

С учетом периода затменной двойной получается, что звезда совершает оборот вокруг оси за 120 ± 15^d . Набор наблюдений в 2022 г. самый длинный и превышает половину этого периода, поэтому позволяет проследить относительные положения пульсаций и минимумов для более половины цикла предполагаемого осевого вращения одной из компонент (см. рис. 4 и 5). С большой долей вероятности за мелкоамплитудные изменения блеска может быть ответственно пятно на одной из звезд. Если следовать этому объяснению, то изменение амплитуды колебаний может быть следствием как изменения яркости пятна, так и изменением положения пятна относительно наблюдателя из-за несинхронного вращения звезды.

Система FL Lyr является разделенной, доля затмеваемой площади компонент относительно мала (0.51 и 0.88 для главной и вторичной звезд), вследствие чего определение геометрических параметров системы имеет повышенные ошибки [7]. Кроме того, решение для получения параметров и элементов системы с использованием модели шарообразных звезд дает небольшие систематические отклонения вследствие описанных выше мелкоамплитудных изменений блеска. Для уменьшения влияния на параметры, в особенности, на вычисленные моменты минимумов из кривой блеска, была найдена наиболее адекват-

ная кривая пульсаций блеска для каждого ряда продолжительностью около десяти суток. Таким способом мы добивались решения, погрешность наблюдений которого (O-C) была бы минимальной и не показывала систематических отклонений относительно середины минимумов. Это видно на рис. 6 и 7, где красными точками приведены (O-C) после вычитания пульсаций. Пульсации были учтены в двух вариантах – для всего года и непосредственно той части ряда наблюдений, к которому относится кривая блеска. Для этих рисунков были случайно выбраны по два минимума в наблюдениях TESS в 2019 и 2021 гг. Даже в этом случае стандартное отклонение полученных моментов минимумов остается довольно большим (0.00015^d).

Сравнение различных участков кривой блеска 2022 г. (см. рис. 4) показывает, что период активности немного не совпадает с периодом переменности звезды, главные минимумы оказываются то на минимальном блеске, то на максимальном. Остальные наблюдения 2019–2022 гг. подтверждают плавное изменение между минимумами пульсаций и наступлением затмений звезд. Разложение Фурье при помощи программы PERDET [8] дает широкий спектр частот из-за близости периода пульсаций и периода затмений (см. рис. 3). Видно, что второй пик расположен на частоте вдвое больше основной. Это свидетель-

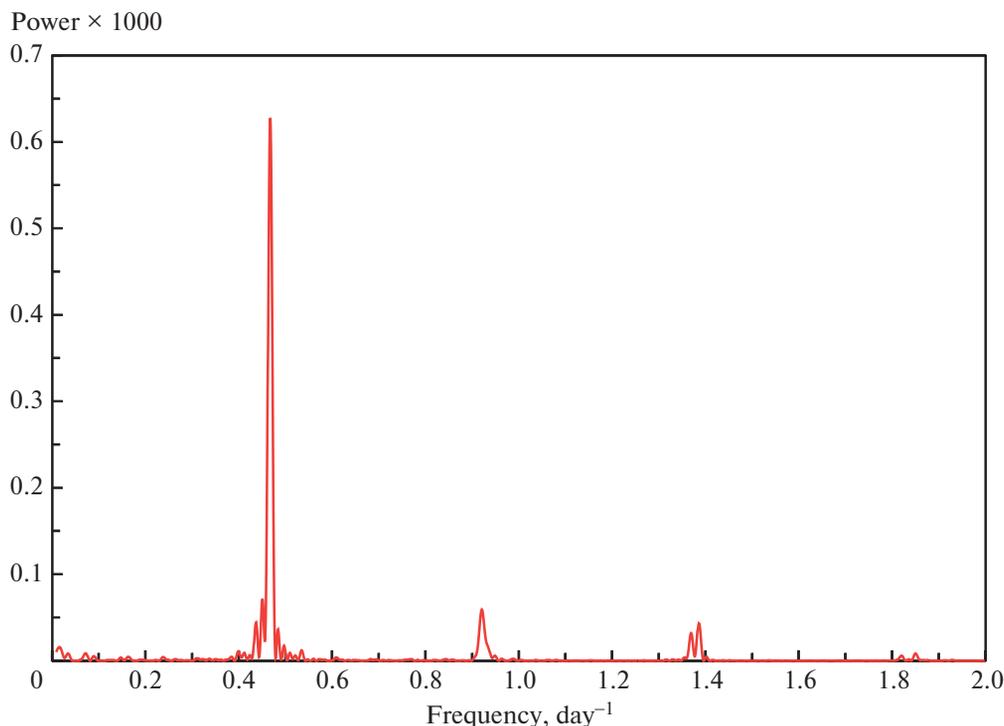


Рис. 3. Спектральная мощность в разложении Фурье, данные TESS.

ствует о несинусоидальном характере изменения блеска, что хорошо совмещается с гипотезой о том, что причиной пульсаций является пятно. Возможно, это пятно на звезде, обращение которой вокруг оси несинхронно с вращением звезды по орбите, возможно, это изменение блеска, форма пульсаций которых отличается от синусоиды (см. рис. 5). Все это делает невозможным “отбеливание” кривой блеска от переменности независимо от ее характера и объясняет довольно большой разброс моментов минимумов (в главном минимуме стандартное отклонение достигает 0.00015^d для главных и вдвое больше для вторичных минимумов из-за разницы в глубине). Гораздо больший разброс для моментов минимумов получается, если совсем не учитывать переменность блеска, к тому же в этом случае постепенное смещение кривой блеска внутри минимумов приводит к тому, что изменение моментов минимумов будет иметь систематический характер. Это может проявиться как получение ложных периодов светового уравнения. Вполне вероятно, что период 103.2^d , полученный для светового уравнения в работе [5], как раз и является таким “наведенным” периодом, который не подтверждается нашими расчетами.

3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЮЛИАНСКИЕ ДАТЫ

В приведенной в работе [3] таблице с моментами минимумов на кривой блеска системы, полученными по данным телескопа Kepler, есть неточность. Указано, что минимумы приведены в гелиоцентрических юлианских датах (HJD UTC), хотя в действительности данные телескопа Kepler (а также и TESS) приведены в барицентрических юлианских датах (BJD UTC). Между гелиоцентрическими и барицентрическими юлианскими датами имеется квазипериодическое расхождение с амплитудой до ≈ 4 с [9, 10], что потенциально может вносить ошибки в результаты по FL Ygr b.

Эфемериды в работе [3] рассчитаны с использованием гелиоцентрических юлианских дат. Причина этого в том, что традиционно все моменты минимумов затменных двойных звезд принято сохранять именно с такой датой. Пересчет дат наземных наблюдений в барицентрические обычно не имеет смысла из-за высоких ошибок таких наблюдений. Получить эфемериду с разумной точностью только из космических данных пока невозможно, так как продолжительность космических наблюдений невелика. Для работы с более однородным рядом моментов минимумов мы пересчитали все “литературные” значения моментов из гелиоцентрических в барицентрические юлианские даты.

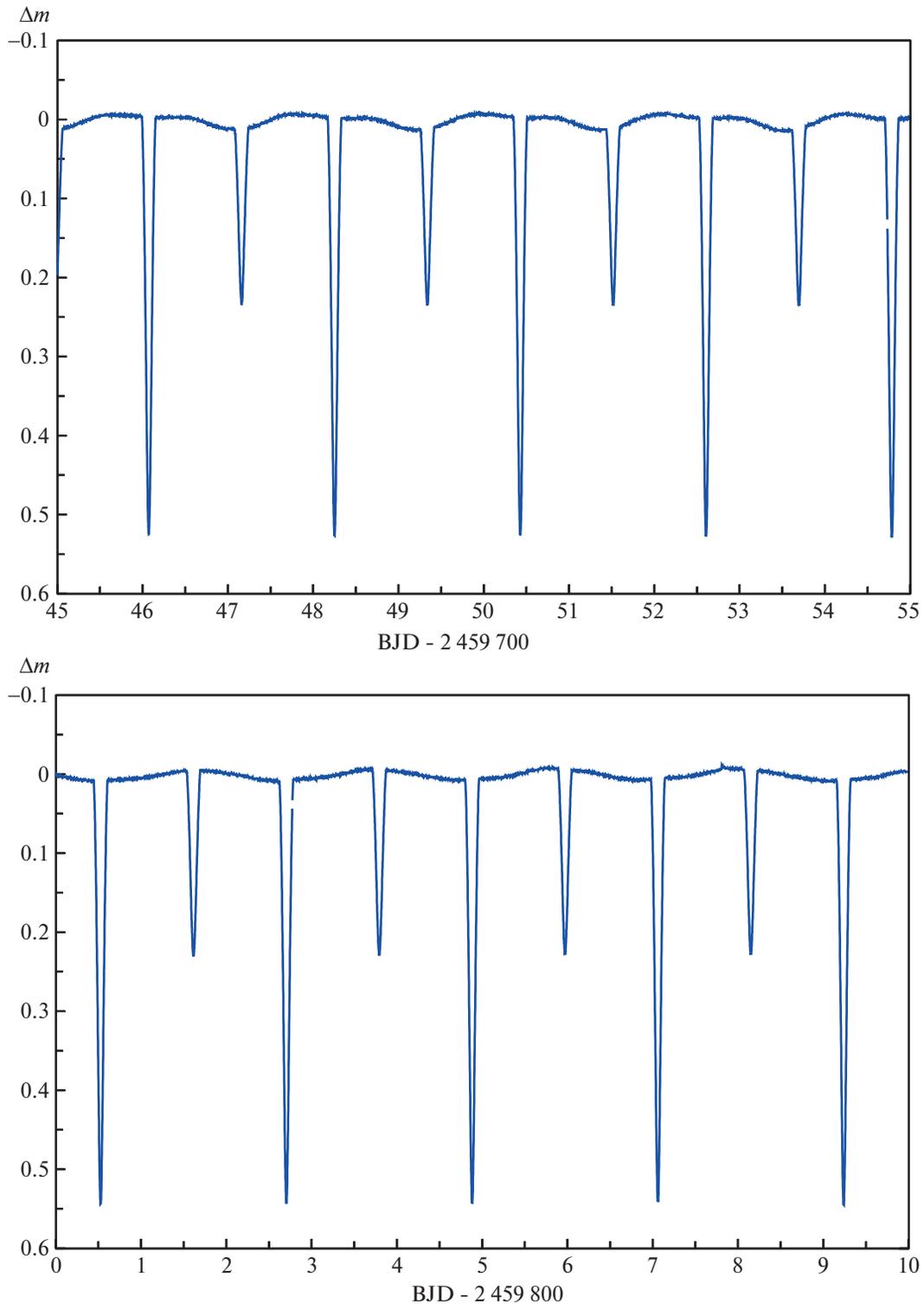


Рис. 4. Кривая блеска FL Lyr по данным TESS в разные промежутки времени (2022 г.).

Потенциально при поиске сигнала (светового уравнения) с малой амплитудой (несколько секунд, что характерно для влияния третьего тела с планетной массой) может быть обнаружено дви-

жение барицентра солнечной системы (т.е. обнаружение кандидата во внесолнечные планеты будет фиктивным). Найденная амплитуда светового уравнения (≈ 15 с) намного превышает разницу

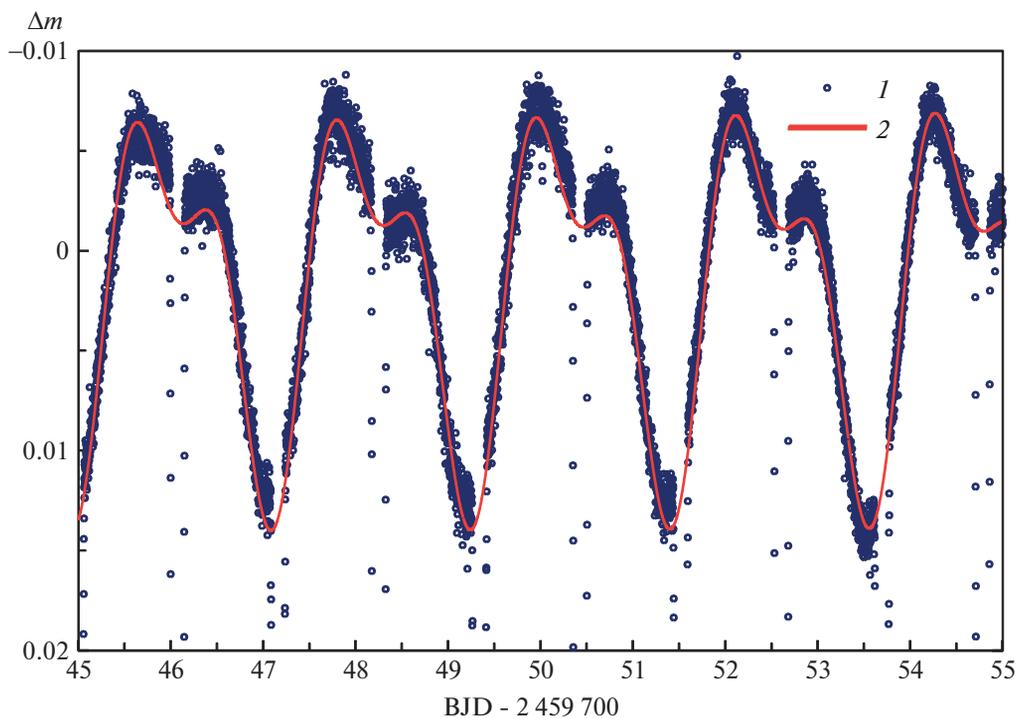


Рис. 5. Кривая блеска FL Луг по данным TESS в увеличенном масштабе, точки 1 – данные TESS, линия 2 – пример наиболее приближенной теоретической кривой, вычисленной для данного промежутка наблюдений, частоты пульсаций 0.4555 и 0.4649 сут^{-1} .

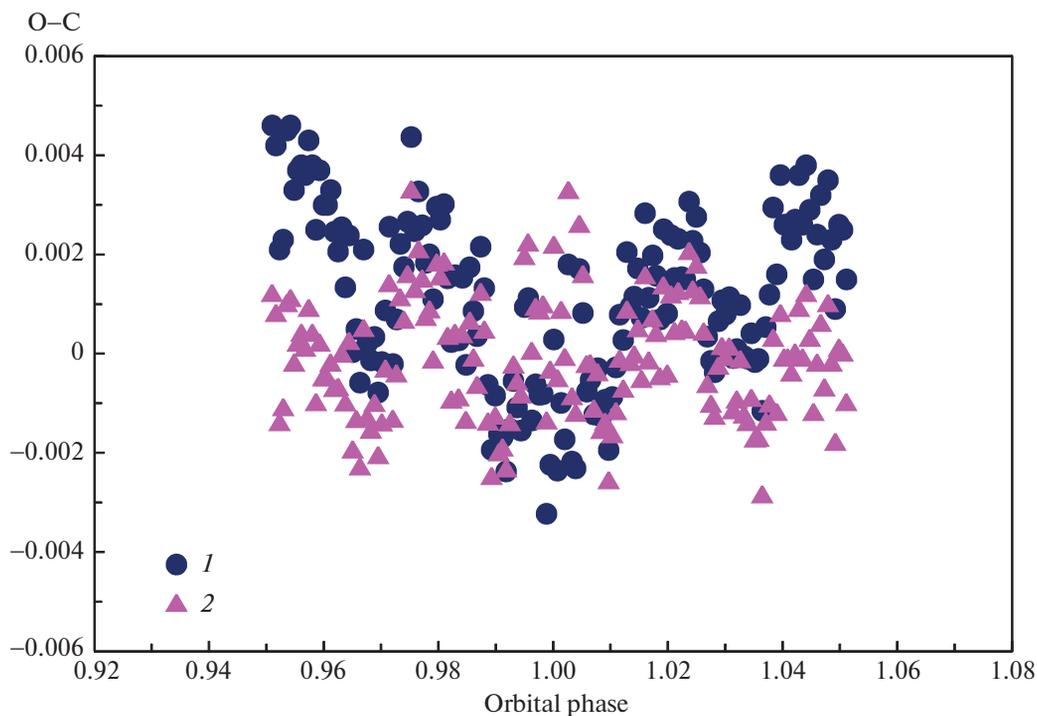


Рис. 6. Диаграммы O–C кривой блеска относительно фазы минимума, полученные в результате решения кривой блеска с целью получения моментов минимумов для наблюдений BJD 2458 722, где O представляет собой наблюдательные точки аппарата TESS, C является вычисленным результатом моделирования системы; точки (1) соответствуют кривой блеска внутри минимума, рассчитанной для пульсации блеска, найденной для всего ряда наблюдений 2019 г.; треугольники (2) – кривой блеска внутри минимума, рассчитанной при использовании формулы пульсации блеска для данной части наблюдений в BJD 2458 722.

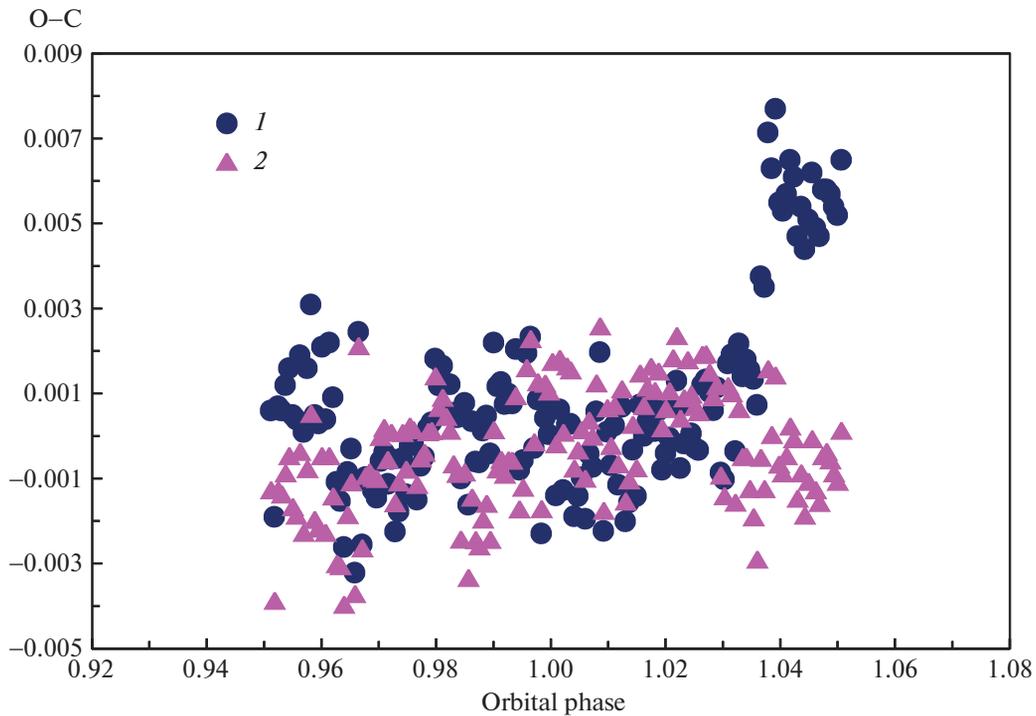


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для BJD 2459 401.

между гелиоцентрической и барицентрической юлианскими датами (по нашей оценке для координат положения FL Lyr разница между этими датами не превышает ≈ 1 с), есть основание полагать, что найденный сигнал от кандидата в планеты не является полностью результатом движения барицентра в течение промежутка времени от начала наблюдений телескопа Kepler до окончания используемых наблюдений аппарата TESS.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использованы фотометрические кривые блеска системы FL Lyr, полученные орбитальным аппаратом TESS. Они продолжают серию высокоточных наблюдений космического аппарата Kepler. Результаты работы в рамках имеющихся наблюдательных данных подтверждают наличие вариации времени наступления затмений в системе, которую может вызывать гравитационное влияние третьего тела планетной массы с амплитудой светового уравнения ≈ 15 с и нижним пределом массы $\approx 6M_J$. Ввиду большого орбитального периода предполагаемого тела (около 22 лет) необходимы дополнительные ряды высокоточных наблюдений для вычисления параметров фотометрической орбиты. Использование иных методов для подтверждения существования FL Lyr b может помочь надежно отличить воздействие методик работы с данными и активности

компонент системы на вариацию моментов минимумов от возможного гравитационного влияния третьего тела на центральную пару.

Образование и жизнь планет в двойных звездных системах с теоретической точки зрения имеет ряд осложняющих обстоятельств, главным из которых является возмущающее приливное действие второй компоненты. Это обстоятельство осложняет образование планет около компонент тесных двойных звезд и сужает поле стабильных орбит планет как около компонент, так и около самих двойных систем. Сравнительно простой сейчас кажется ситуация с образованием планетных систем около компонент широких двойных звезд с разделением компонент выше примерно пяти астрономических единиц [11]. Начальное распределение таких систем по отношению масс их компонент фактически повторяет распределение Солпитера звезд по массам, что говорит о независимости условий возникновения этих компонент от фактора их двойственности. Это позволяет считать долю звезд с планетными системами среди них близкой к стандартной трети [12]. Действительно, сравнение химических составов компонент широких двойных звезд [13] обнаружило, что около четверти таких систем имеют разные обилия некоторых элементов, характерных для планет. Это позволяет авторам полагать, что их компоненты могут обладать планетами. Таким образом, доля компонент широких систем с пла-

нетами может оказаться близкой к ожидаемой из уподобления их компонент одиночным звездам.

Ситуация с условиями формирования планет и их систем в тесных двойных с разделением компонент ниже пяти астрономических единиц видится более сложной. Газопылевые диски около тесных двойных с размером в несколько больших полуосей орбиты двойной наблюдаются. Однако столь близкие к двойной диски возмущаются и нагреваются приливным влиянием внутренней пары, что, вероятно, предотвращает образование в них планет. Для образования планет нужен протяженный газопылевой диск большой вязкости, судя по обычным размерам последнего, в одиночных звездах около ста астрономических единиц. Наличие спутника рождает в этом диске приливные ударные волны, увеличивающие вязкость газового диска. Внешний край околокомпонентных дисков тесных систем “открыт” и прямо нагревается приливами в отсутствие устойчивых орбит до корональных температур, формируя звездный ветер системы. Это обстоятельство способно истощить околозвездный диск, исключая обычный процесс планетообразования и формирование в нем больших планет. Только сохранение в силу каких-то пока не ясных причин компактного и достаточно массивного газового диска около компоненты тесной двойной оставляет надежду на возможность образования в нем массивных планет за счет гидродинамической неустойчивости газового диска или планет земного типа путем аккумуляции твердотельной компоненты. Для окончательных выводов о путях и эффективности формирования планет около компонент тесных двойных необходимы накопление данных наблюдательной статистики и адекватное численное моделирование формирования планет в этих условиях.

Стоит специально отметить, что формирование далеких от тесной двойной звезды планет может и не быть генетически связано с образованием центральной двойной. Далекие планеты могут быть продуктом захвата части газа гигантских молекулярных облаков при попадании компактной пары в последние на своем пути в Галактике [14]. В этом случае совпадение плоскости орбиты планеты с орбитальной плоскостью двойной не обязательно, что делает обнаружение таких планет сложным.

Приложение

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ FL Lyr НА ТЕЛЕСКОПЕ TESS

Наблюдения и характеристики приборов приведены на сайте TESS³, они взяты из архива данных космических телескопов имени Барбары Миккульской (MAST)⁴. Идентификационный номер

FL Lyr в каталоге телескопа TESS – TIC 158660631. Информацию о поиске и скачивании данных также можно найти в архиве TESS⁵, ссылка для скачивания данных FL Lyr приведена ниже в примечании⁶.

Архив TESS предоставляет следующие типы данных:

- Full Frame Images (FFI) fits файлы содержащие 30-минутные, 10-минутные или 200-секундные кадры всего поля зрения.
- Target Pixel (TP) Files fits файлы с пикселями изображений одного объекта, собранные с периодичностью 2 мин и 20 с. Файлы содержат как “сырые” данные, так и обработанные.
- Light Curve (LC) Files fits файлы с кривыми блеска, собранных с периодичностью 2 мин и 20 с.
- Cotrending Basis Vectors (CBV) fits файлы с векторами поправок, которые могут быть использованы для удаления ошибок инструментальной природы.

В данной работе мы использовали fits-файлы с кривыми блеска (Light Curve Files), полный перечень файлов с краткой информацией приведен в табл. 3. Для конвертации данных из fits формата использовалась библиотека *astropy* (4.0.2) на языке *python*.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа А.И. Богомазова и Л.В. Зотова была поддержана научной и образовательной школой МГУ имени М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные космические исследования”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за ценные замечания, которые позволили значительно улучшить содержание статьи.

³ <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/the-tess-space-telescope.html>

⁴ <https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>

⁵ <https://outerspace.stsci.edu/display/TESS/TESS+Archive+Manual>

⁶ https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html/?searchQuery=%7B%22service%22%3A%22CAO-MDB%22%22%2C%22input-Text%22%3A%22FL%20Lyr%22%2C%22paramsService%22%3A%22Mast.Caom.Cone%22%2C%22title%22%3A%22MAST%3A%20FL%20Lyr%22%2C%22col-umns%22%3A%22*%22%2C%22caomVersion%22%3Anull%22%7D

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *N. A. Kaib, S. N. Raymond, and M. Duncan*, *Nature* **493**, 381 (2013).
2. *A. V. Tutukov and A. I. Bogomazov*, *Astron. Rep.* **56**, 775 (2012).
3. *V. S. Kozyreva, A. I. Bogomazov, B. P. Demkov, L. V. Zotov, and A. V. Tutukov*, *Astron. Rep.* **59**, 1036 (2015).
4. *V. S. Kozyreva, A. I. Bogomazov, B. P. Demkov, L. V. Zotov, and A. V. Tutukov*, *Astron. Rep.* **60**, 534 (2016).
5. *K. G. Helminiak, N. Ukita, E. Kambe, S. K. Kozłowski, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **468**, 1726 (2017).
6. *G. Stolle-McAllister, P. Muirhead, G. Walker, and E. Han*, *Amer. Astronomical Society, AAS Meeting Abstracts* **235**, p. 170.28 (2020).
7. *D. M. Popper, C. H. Lacy, M. L. Frueh, and A. E. Turner*, *Astron. J.* **91**, 383 (1986).
8. *M. Breger*, *Delta Scuti Star Newsletter* **2**, 21 (1990).
9. *A. I. Khlystov, V. P. Dolgachev, and L. M. Domozhilova*, *Kinematika Fiz. Nebesn. Tel* **10**(1), 84 (1994).
10. *J. Eastman, R. Siverd, and B. S. Gaudi*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 935 (2010).
11. *А. Г. Масевич, А. В. Тутуков*, *Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М.: Наука, 1988).
12. *A. V. Tutukov*, *Astron. Rep.* **42**, 99 (1998).
13. *L. Spina, P. Sharma, J. Meléndez, M. Bedell, A. R. Casey, M. Carlos, E. Franciosini, and A. Vallenari*, *Nature Astron.* **5**, 1163 (2021).
14. *A. V. Tutukov and A. V. Fedorova*, *Astron. Rep.* **56**, 305 (2012).
15. *Stassun et al.*, *AJ*, 156, id. 102 (2018).
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AJ....156..102S/abstract>