

УДК 524.386

КАНДИДАТ В ЭКЗОЮПИТЕРЫ В ЗАТМЕННОЙ ДВОЙНОЙ FL Lyr

© 2015 г. В. С. Козырева¹, А. И. Богомазов^{1*},
Б. П. Демков^{2,3}, Л. В. Зотов¹, А. В. Тутуков⁴

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

²ООО “ИТ проект”, Зеленоград, Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево Моск. обл., Россия

⁴Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

Поступила в редакцию 11.03.2015 г.; принята в печать 13.05.2015 г.

Проведен анализ кривых блеска затменной двойной системы FL Lyr, полученных при помощи космического телескопа “Кеплер”. Методом тайминга затмений FL Lyr получено свидетельство в пользу существования в системе третьего тела. Первичные оценки массы и орбитального периода данного тела составляют $\gtrsim 2M_J$ и $\gtrsim 7$ лет, соответственно. Приводятся моменты главных минимумов кривой блеска FL Lyr, полученные за время работы “Кеплера”.

DOI: 10.7868/S0004629915110055

1. ВВЕДЕНИЕ

Внесолнечные планетные системы оставались гипотетическими объектами вплоть до 90-х гг. прошлого века, когда появились достаточно совершенные средства для их наблюдательного обнаружения. С тех пор при помощи различных методов было открыто порядка 10^4 кандидатов во внесолнечные планеты, существование большого числа экзопланет имеет надежное подтверждение [1]. Подавляющее большинство открытых планет обращается вокруг одиночных звезд, либо отдельных компонент широких кратных систем.

В настоящее время известно 8 внесолнечных планет в 5 звездных системах и 2 кандидата в планеты, обращающихся сразу вокруг обеих компонент двойной системы, в которых обе звезды находятся на главной последовательности. Первой планетой, открытой в такой двойной системе, стала планета Kepler-16 (AB)b [2]. Кроме нее известны планеты Kepler-34 (AB)b и Kepler-35 (AB)b [3], Kepler-38 (AB)b [4], Kepler-47 (AB)b и Kepler-47 (AB)c [5], PH1-Kepler-64 b [6], Kepler-413 (AB)b [7, 8], возможная третья планета в системе Kepler-47 [9] и кандидат в планеты KIC 9632895 (AB)b [10]. Также открыто несколько планет около катаклизмических переменных и планета около молодой двойной звезды FW Tau [1].

Поиск планет в двойных системах важен сразу по нескольким причинам. Несмотря на то, что, согласно результатам работы [11], планетные орбиты в двойных звездных системах могут быть долговременно устойчивыми, возможность выживания планет в системах с различными параметрами еще предстоит подтвердить наблюдательно. Известные на сегодняшний день системы имеют очень сходные параметры. Отсутствие или наличие планет в двойных системах и параметры этих систем имеют большое значение для понимания процессов звездо- и планетообразования (см., например, [12]). Кроме того, двойные системы более благоприятны для жизни, чем одиночные, причем в них может существовать несколько обитаемых планет [13]. Именно поэтому поиск планет в различных двойных системах очень важен с точки зрения поиска внеземной жизни — в том числе, возможно, и разумной. В работе [14] приводится список затменных двойных звезд, пригодных для поиска планет. В их числе система FL Lyr.

В 2009–2014 гг. область неба, в которой расположена FL Lyr, находилась в поле зрения космического телескопа “Кеплер” [15], запущенного на околосолнечную орбиту с целью поиска экзопланет. Все эти годы на телескопе проводился непрерывный фотометрический обзор неба, и, в частности, по системе FL Lyr накопился большой наблюдательный материал. Наблюдения, полученные телескопом, могут быть использованы

*E-mail: a78b@yandex.ru

для различных научных задач. В частности, под воздействием третьего тела, обращающегося по орбите вокруг затменной переменной звезды, положение центра масс системы периодически смещается относительно наблюдателя, вследствие этого наблюдаемый орбитальный период двойной звезды испытывает колебания около некоторого значения. Цель нашей работы — поиск светового уравнения FL Lyr¹.

2. ЗАТМЕННОЯ ДВОЙНАЯ FL Lyr

Затменная переменная FL Lyr была открыта на фотографических пластинках в 1935 г. [16]. Минимумы системы довольно глубокие, величина изменения блеска звезды внутри главного и вторичного минимумов отличается в 2 раза: $m_{max} = 9.27^m$, $m_{min I} = 9.89^m$, $m_{min II} = 9.52^m$; $P_{orb} = 2.1781544^d$ согласно “Общему каталогу переменных звезд” (ОКПЗ) [17]. Размеры и спектральные классы звезд в системе разные. В 1950 г. Струве [18] получил спектроскопическую кривую блеска главной звезды пары и определил спектр звезды: G5.

В 1963 г. Кристалди [19] получил фотоэлектрическую кривую блеска и нашел фотометрические параметры этой системы. Используя спектроскопические данные, полученные предыдущими авторами для этой звезды, как опубликованные, так и неопубликованные, он смог оценить массы обеих компонент. Найденные им параметры компонент соответствовали двум звездам, образующим систему типа Алголя. В таких системах главная (изначально более массивная) компонента системы покинула главную последовательность (ГП) и начала расширение, при этом часть массы звезда передала вторичной компоненте. Масса главной компоненты системы меньше, а радиус больше, чем у спутницы. При этом вторичная компонента еще находится на стадии главной последовательности. Главная компонента системы имеет меньшую, чем вторичная компонента, светимость. Эту звезду ошибочно принимают за вторичную, а ее соседку, которая вначале была менее массивной звездой и находится на ГП, называют главной.

В цитированной статье приводятся вычисленные авторами параметры системы FL Lyr: одна компонента системы имеет массу $M_1 = 1 M_{\odot}$, относительный радиус² $r_1 = 0.132$ и относительную светимость³ в V-фильтре $L_1 = 0.234$, вторая

компонента имеет следующие параметры: $M_2 = 1.1 M_{\odot}$, $r_2 = 0.114$, $L_2 = 0.430$. Из этого решения видно, что в системе реализован случай системы типа Алголя, когда менее массивная звезда имеет больший радиус, чем более массивная. В решении присутствует так называемый “третий свет” $L_3 = 0.336$, который принадлежит либо звезде поля, либо третьей компоненте системы. Компоненты двойной звезды вращаются в плоскости, почти перпендикулярной картинной плоскости ($i = 89^\circ$). Оценка произведения эксцентриситета и долготы периастра, данная авторами, составляет $e \cos \omega \leq 0.0002$. У звезд практически круговые орбиты. Оценка спектральных классов звезд, согласно [19], следующая: G0V + G5V.

Боцула [20] исследовал кривую блеска FL Lyr и нашел, что около вторичного минимума блеск системы падает. Он предположил, что в системе имеется диффузная материя, расположенная близко к вторичной компоненте, которая перекрывает часть света при вторичном затмении и искажает форму кривой в этом месте. Это предположение вполне укладывается в физику звезд типа Алголя, согласно которой более продвинутая по эволюции главная компонента сбрасывает свою оболочку на вторичную компоненту. Кроме того, кривая блеска FL Lyr испытывала эпизодические ослабления до $0.04^m - 0.05^m$. Возможно, что все эти искажения имеют случайный характер и могут быть вызваны систематическими ошибками именно той кривой блеска FL Lyr, которая изучалась в работе [20].

В 1986 г. Поппер и др. [21] получили фотоэлектрические и спектроскопические кривые блеска FL Lyr. Они нашли новое фотометрическое решение кривой блеска ($r_1 = 0.140$, $r_2 = 0.105$, $i = 86.3^\circ$, $L_1 = 0.79$, $L_2 = 0.21$), а также оценили массы звезд и спектральный класс компонент: $1.22 M_{\odot}$, $0.96 M_{\odot}$, F8 + G8. С большой точностью орбита звезд круговая. Возраст системы FL Lyr при сравнении наблюдаемых параметров системы и параметров системы, определенных из теоретических эволюционных треков звезд такой же массы, оценивается в $5.3 \times 10^7 - 3.55 \times 10^9$ лет, при этом наиболее правдоподобное значение возраста составляет 2.29×10^9 лет [22]. Время жизни звезды с массой $1.2 M_{\odot}$ на ГП составляет приблизительно 4.9×10^9 лет [23, ф-ла (6)], и, следовательно, обе компоненты FL Lyr не успели покинуть ГП. “Третий свет” в работе [21] не обнаружен. При вычислении фотометрических параметров на величину $k = r_2/r_1$ (отношение радиуса вторичной к главной компоненте) в работе накладывалось ограничение $k \leq 1$. Это ограничение исключает все решения для пары звезд, входящих в систему типа

¹ Или иначе — тайминг минимумов кривой блеска FL Lyr.

² Относительные радиусы исчисляются в долях большой полуоси орбиты FL Lyr.

³ Относительные светимости исчисляются в долях полной светимости системы.

Алголя, т.е. системы с обратным отношением радиусов компонент. Однако в пользу полученных параметров свидетельствует то, что, по утверждению авторов, нет никаких систематических отклонений разности блеска от времени между вычисленными и наблюдаемыми значениями. Параметры звезд значительно отличаются от решения, найденного Кристалды [19]. Из особенностей кривых блеска авторы работы [21] заметили модуляцию светимости ($\Delta m = 0.007^m$), и они связывают это явление с осевым вращением компонент.

3. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ FL Lyr НА ТЕЛЕСКОПЕ “КЕПЛЕР”

Мы исследовали данные, полученные в результате работы космического телескопа “Кеплер”. Основной целью проекта “Кеплер” был поиск экзопланет транзитным методом. Мы использовали данные, полученные “Кеплером”, для тайминга затмений (построения светового уравнения) звезды FL Lyr. Подробную информацию о телескопе “Кеплер” можно получить в описании [24].

Данные “Кеплера” представляются архивом для космических телескопов имени Барбары Микульской (MAST); архив управляется Институтом исследования космоса с помощью космических телескопов (STScI). Используемые нами данные можно получить по ссылке [25]. Идентификационный номер FL Lyr в каталоге телескопа “Кеплер” (Kepler Input Catalog) — 9641031. Подробную информацию о том, как осуществлять поиск и скачивание данных в архиве, можно получить в описании [24].

Архив телескопа “Кеплер” предоставляет собой файлы с данными в fits-формате. Файлы представлены в двух вариантах: LC (long cadence) и SC (short cadence). LC — основной вариант, данные в этом варианте собирались один раз в 30 мин. Один fits-файл LC содержит один квартал наблюдений по одному объекту⁴. SC (short cadence) — дополняющий вариант (для исследований переменности и сейсмоактивности звезд), данные в нем собирались один раз в минуту. В одном SC-fits-файле представлены данные одного месяца по одному объекту. Из-за конструктивных особенностей телескопа “Кеплер” данные в варианте SC собирались не в каждом квартале работы телескопа. Для FL Lyr данные в формате SC собраны полностью только для следующих кварталов наблюдений: 7, 8, 13, 14, 15, 16. Для повышения точности исследований мы использовали файлы fits, полученные в режиме SC. Для преобразования файлов fits в вид,

⁴ Кривые блеска внутри минимумов FL Lyr в режиме LC содержат всего 5–6 точек.

удобный для анализа, был использован программный комплекс IRAF с расширением PyRAF (подпрограмма kepcnvert, которая преобразует fits-файл в текстовый файл).

4. СВЕТОВОЕ УРАВНЕНИЕ FL Lyr

Одним из методов, при помощи которого можно обнаружить третье тело в системе затменных звезд, является поиск светового уравнения. Периоды главного и вторичного минимумов звезды испытывают колебания из-за изменения расстояния между центром Солнечной системы и центром исследуемой затменной системы. Любое третье тело в системе двойной звезды заставляет центр масс системы вращаться с периодом, равным периоду обращения этого тела⁵. Сравнительно небольшой период обращения звезд вокруг общего центра (около 2 дней) позволяет выделить из наблюдений, полученных на “Кеплере”, большое количество кривых блеска внутри минимумов. Цель нашей работы — поиск светового уравнения FL Lyr, т.е. поиск смещения наблюдаемых моментов минимумов относительно вычисленных.

В двойной системе орбита вращается из-за приливных сил между звездами и из-за эффектов, вытекающих из общей теории относительности. В случае эллиптической орбиты это проявляется в движении линии апсид, вследствие чего происходит смещение наблюдаемых моментов минимумов относительно расчетных. Для FL Lyr с практически круговой орбитой двух звезд ($e \leq 0.0002$), теоретические оценки вращения линии апсид дают период вращения более 100 лет с амплитудой меньше 10 с. На протяжении времени наблюдений “Кеплера” этот эффект очень мал, поэтому его можно не учитывать. Мы ищем световое уравнение с гораздо меньшим периодом.

Исследования проводились только с главными минимумами, поскольку они симметричные и глубокие ($\approx 0.6^m$) — более чем в 2 раза глубже вторичных минимумов, что во столько же раз повышает точность определения моментов минимумов. Мы выделили около 600 кривых блеска внутри главных минимумов FL Lyr, полученных на “Кеплере”.

⁵ Вопросы устойчивости орбит планет в системах двойных звезд изучены в работе [11]; согласно табл. 6 из этой работы, орбита планеты вокруг центральной двойной системы стабильна, если большая полуось орбиты планеты превышает большую полуось орбиты двойной звезды приблизительно в 4 и более раз, т.е. если орбитальный период планеты превышает орбитальный период центральной двойной звезды приблизительно в 10 или более раз, что следует из третьего закона Кеплера. Таким образом, в системе FL Lyr условия долговременного выживания планет выполнены при орбитальном периоде планеты свыше 20 дней.

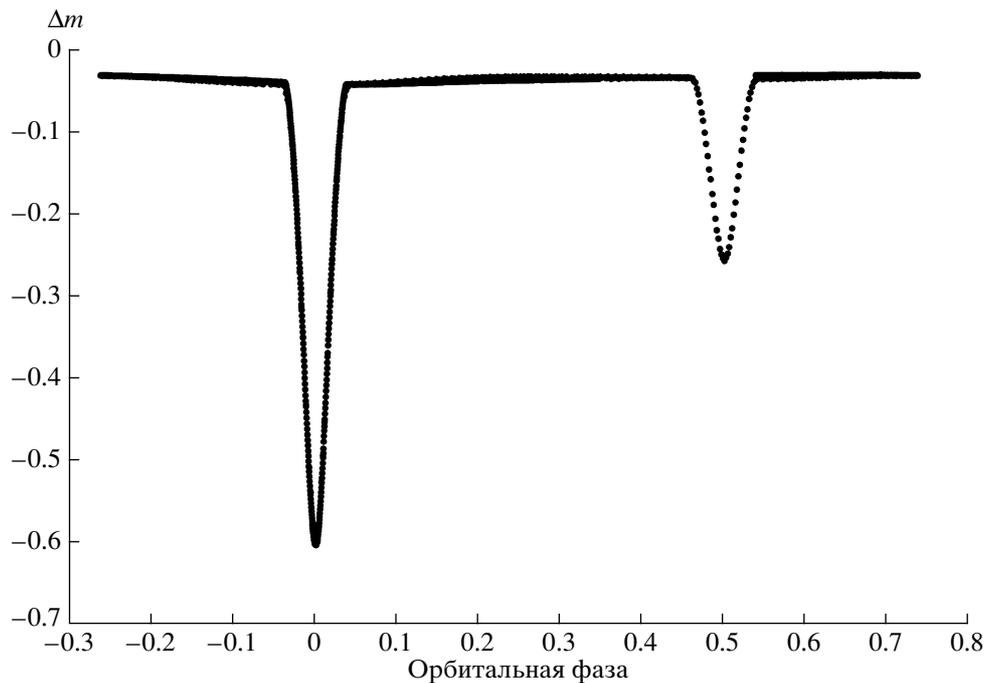


Рис. 1. Кривая блеска FL Lyr, составленная по наблюдениям телескопа “Кеплер” в промежутке от HJD–2400000 55031.54198 до HJD–2400000 55042.44777; она включает в себя следующие моменты главных минимумов: HJD–2400000 55032.54697, HJD–2400000 55034.72509, HJD–2400000 55036.90328, HJD–2400000 55039.08140, HJD–2400000 55041.25957.

Наблюдения на телескопе “Кеплер” обладают систематическими ошибками (см., например, [24, п. 7.1]), так называемыми линейными трендами, достигающими несколько сотых звездной величины на протяжении длительности минимума кривой блеска FL Lyr. Наша работа с кривыми блеска FL Lyr, уже исправленными за линейный тренд с помощью корректировочных коэффициентов авторами проекта, показала, что тренд не полностью устранен, и форма кривых блеска в минимумах остается искаженной. Разница блеска между входом и выходом достигает несколько десятитысячных звездной величины, причем с разным знаком для различных кривых блеска. Для главного минимума FL Lyr искажения формы в одну десятитысячную вызывает ошибку момента минимума, равную приблизительно 2 с. Это большая ошибка, способная полностью исказить световое уравнение с амплитудой порядка 5–6 с, которое может быть вызвано планетой.

В работе [26] изучалось световое уравнение 1279 тесных затменных двойных звезд. Авторы сообщают о нахождении 236 затменных двойных с заподозренными третьими телами. Эта работа будет дополнена изучением вариаций орбитального периода (статья Ороша и др. (J.A. Orosz et al.) готовится к публикации, согласно [26]). Сравнение полученных результатов нашей работы и работы Ороша и др. будет представлять большой интерес.

Мы исследовали индивидуальные кривые блеска главных минимумов FL Lyr, полученные на телескопе “Кеплер” и, исходя из гипотезы равенства блеска на входе в минимум и выходе из минимума, вычислили индивидуальные коэффициенты, исправляющие линейный тренд в каждом конкретном случае. Так как смена коэффициентов тренда происходит редко, не более 2 раз в течение периода FL Lyr, была принята гипотеза, что за время минимума кривой блеска (≈ 4 ч) функция тренда не имеет изломов, т.е. исправление кривой блеска мы делали с помощью одного набора коэффициентов, но индивидуального для каждого минимума. Даже если разность блеска входа и выхода из минимума у этой звезды имеет физическую природу, наше предположение позволяет решить задачу поиска светового уравнения, так как мы исследуем динамику изменения моментов минимумов. В случае медленного по сравнению с периодом наблюдений изменения кривой блеска, все моменты минимумов будут смещены относительно истинных, но величина этого смещения на амплитуду светового уравнения влиять не будет. Если же изменение кривой блеска сравнимо с продолжительностью наблюдений, что крайне маловероятно, то световое уравнение будет получено с дополнительными систематическими ошибками. Тем не менее, период светового уравнения из кривой блеска может быть найден. Для вычисления моментов главных мини-

Таблица 1. Значения параметров, полученные из “кеплеровских” кривых блеска и принятые для расчета теоретической кривой блеска FL Lyr: r_1 , r_2 — радиусы первичной и вторичной компонент, соответственно, в единицах большой полуоси FL Lyr, i — наклонение орбиты, e — эксцентриситет орбиты, ω — долгота периастро, L_1 , L_2 — светимости первой и второй компонент, соответственно, в единицах светимости системы, L_3 — “третий свет” в единицах светимости системы, u_1 , u_2 — коэффициенты потемнения к краю дисков первой и второй компонент, соответственно, σ_{O-C} — стандартное отклонение (O–C)

Параметр	Значения для FL Lyr	Значения, принятые для расчета
r_1	0.122–0.133	0.123
r_2	0.118–0.126	0.123
i	85.3°–86.5°	85.9°
e	0–0.0002	0
ω	0°–360°	0
L_1	0.520–0.610	0.596
L_2	0.260–0.310	0.298
L_3	0.008–0.22	0.106
u_1	0.62 (фикс.)	0.62 (фикс.)
u_2	0.68 (фикс.)	0.68 (фикс.)
σ_{O-C}	—	0.00026 ^m

мумов мы использовали трафарет, в качестве которого использовалась теоретическая кривая блеска, вычисленная на основе элементов орбиты и относительных параметров звезд данной двойной системы.

Для вычисления фотометрических элементов использовались компилятивные кривые блеска, составленные из наблюдений, полученных в режиме SC, и в них входили только соседние наблюдения внутри главного и вторичного минимумов (на рис. 1 приведен пример кривой блеска FL Lyr). Фотоэлектрические кривые блеска FL Lyr, полученные Поппером и др. [21], имеют одинаковый уровень блеска системы вне затмений для обоих минимумов кривой блеска. Этот факт был нами использован при отборе кривых блеска для вычисления фотометрических элементов. Так как наблюдения искажены линейным трендом, мы постарались выбрать такие кривые блеска, где его влияние сказалось минимально. Поскольку влияние тренда в каждом случае величина случайная,

то в результате мы получили наборы элементов с распределением, близким к нормальному. Самый важный параметр для поиска светового уравнения — смещение наблюдаемых моментов главного минимума относительно вычисленных (O–C). Эта величина оказалась малочувствительна к изменениям остальных параметров, найденных нами и приведенных в табл. 1. В колонке 2 приведен диапазон изменения параметров, которые были получены для разных кривых блеска FL Lyr. В колонке 3 дан набор параметров, использованный нами для получения теоретической кривой, которая затем применялась в качестве трафарета.

Работающая на спутнике матрица оснащена широким фильтром с диапазоном от 430 до 890 нм, что соответствует суммарному диапазону трех фильтров B , V , R фотометрической системы Джонсона. В связи с этим некорректно сравнивать фотометрические элементы, вычисленные по этим кривым блеска, с элементами, полученными другими авторами по кривым блеска, полученных в фильтрах системы Джонсона; особенно это касается светимости компонент.

В качестве минимизирующего алгоритма применялся квазиньютоновский метод с аналитическими вычислениями производных функционала⁶. В минимизирующий функционал входит сумма квадратов разности наблюдаемой и теоретической звездных величин в каждой точке, включая простые и линейные ограничения на искомые параметры. Из-за очень слабого влияния на кривую блеска коэффициенты потемнения к краю u_1 и u_2 не варьировались, а фиксировались в соответствии со спектральным классом звезд-компонент (F8V + G8V в работе [21]). Теоретические значения u_1 и u_2 взяты из работы [32], и они соответствуют длинам волн, которые находятся в середине диапазона инструментального фильтра. Некоторые параметры, полученные нами в свободном поиске элементов и параметров орбиты, существенно отличаются от параметров, полученных Поппером [21]; особенно это касается светимости компонент. Отчасти данный факт можно объяснить различием спектральных диапазонов. В контексте рассматриваемой задачи набор элементов нас интересует только как инструмент для построения теоретической кривой, наиболее близко приближающейся к наблюдательным кривым в главных минимумах.

Моменты минимумов, собранные нами по литературным источникам, приведены на рис. 2 и в табл. 2. Разброс точек на графике, включающем фотографические наблюдения, очень большой —

⁶ Ранее этот же алгоритм применялся в работах [27–31], и при этом были открыты коричневые карлики в системах HP Aig и AS Cam.

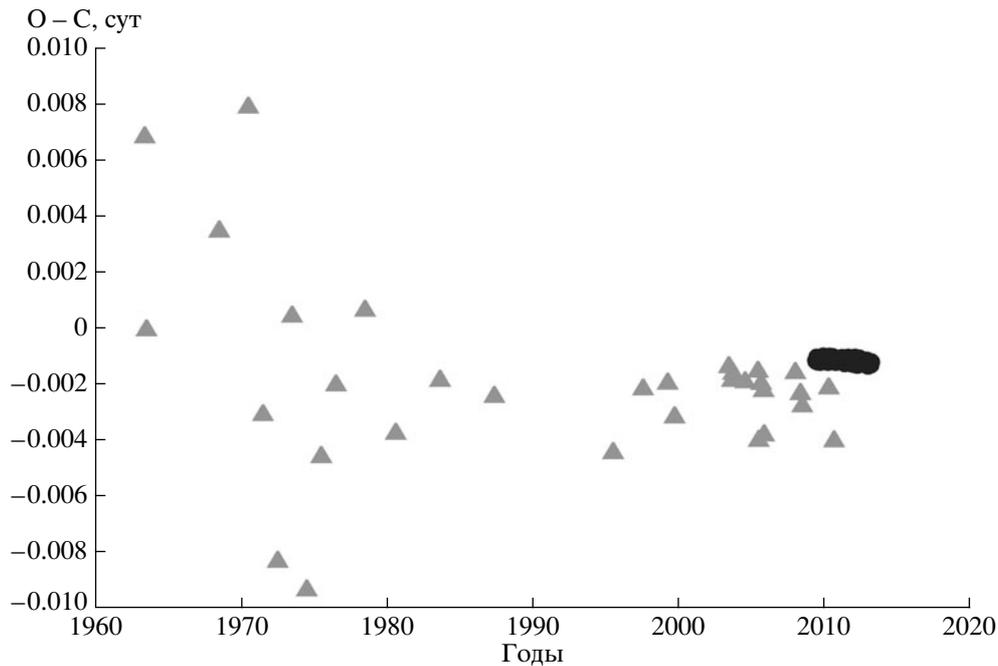


Рис. 2. Моменты минимумов системы FL Lyr. Кружками обозначены данные телескопа “Кеплер” (табл. 3), треугольниками — данные наземных наблюдений (табл. 2). По горизонтальной оси отложена дата наблюдения, по вертикальной — разница между наблюдаемым значением и величиной, рассчитанной по формуле (1).

достигающий ± 15 мин. Разброс фотоэлектрических моментов достигает ± 1.5 мин. Большой разброс моментов минимумов можно объяснить множеством причин, часть из которых была изложена выше. Наша цель — получить амплитуду светового уравнения с секундной точностью. Большой разброс моментов минимумов, приведенный в литературе, не позволит это сделать. Для этой цели мы используем только длительный однородный ряд наблюдений орбитального телескопа “Кеплер”, получая моменты минимумов по единому алгоритму.

Для работы использовались лишь те точки, которые соответствуют главным минимумам FL Lyr (фазы от 0.94 до 1.06). После того, как была получена кривая блеска индивидуального минимума без линейного тренда, вычислялся сдвиг наблюдаемого момента минимума относительно вычисленного момента. Для этого был использован алгоритм вычисления⁷ наименьших невязок между наблюдаемыми и теоретическими кривыми блеска, в качестве свободного параметра использовался только параметр сдвига главного минимума, остальные параметры были фиксированы в соответствии со столбцом 3 в табл. 1. Критерием решения считалось симметричное расположение относительно

фазы ноль значений невязки (наблюдаемых и рассчитанных точек кривой блеска). Контроль осуществлялся методом построения линейного тренда остатков $O - C$. Результат считался удовлетворительным только при отсутствии тренда. Такая работа была проведена со всеми главными минимумами FL Lyr, полученными в наблюдениях “Кеплера”; моменты минимумов даны в первом столбце табл. 3, во втором столбце приведена величина $O - C$ — разность наблюдаемых и теоретических моментов главных минимумов, вычисленных с эфемеридами (1).

Для поиска светового уравнения необходимо как можно более точно знать орбитальный период двойной звезды, поскольку от него зависят параметры светового уравнения. В данной работе мы используем три значения орбитального периода FL Lyr. В первом варианте используется период $P_{10} = 2.17815440^d$, полученный в работе [19] (именно этот период приводится в ОКПЗ). Период $P_{11} = 2.17815408^d$ получен с использованием всех опубликованных с 1962 г. по настоящее время данных наземных наблюдений о моментах минимумов без привлечения данных телескопа “Кеплер”. Орбитальный период $P_{13} = 2.17815414^d$ дня FL Lyr рассчитан с использованием всех наземных наблю-

⁷ Подробности см. в работах [27–31].

Таблица 2. Моменты главных минимумов кривой блеска системы FL Lyr по результатам наземных наблюдений (величина O–C рассчитана с использованием эфемерид (1))

Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут	Ссылка
38173.6400	0.00690	[34]
38221.5525	0.00000	[19]
40038.1368	0.00350	[35]
40770.0011	0.00800	[35]
41133.7419	–0.00303	[35]
41499.6666	–0.00830	[35]
41865.6053	0.00050	[35]
42229.3473	–0.00930	[35]
42595.2820	–0.00454	[35]
42961.2145	–0.00197	[35]
43690.8989	0.00070	[35]
44459.7830	–0.00370	[36]
45572.8218	–0.00180	[36]
46925.4551	–0.00238	[37]
49909.5271	–0.00191	[38]
50654.4547	–0.00312	[39]
51266.5174	–0.00180	[40]
51440.7700	–0.00155	[41]
52806.4725	–0.00186	[42]
52911.0235	–0.00227	[43]
53209.4302	–0.00273	[44]
53531.7977	–0.00208	[45]
53555.7555	–0.00400	[45]
53612.3871	–0.00439	[46]
53673.3777	–0.00211	[46]
53684.2691	–0.00149	[47]
54466.2261	–0.00192	[48]
54583.8446	–0.00375	[49]
54594.7376	–0.00152	[49]
54642.6572	–0.00132	[49]
55304.8135	–0.00396	[50]
55437.6827	–0.00218	[50]

дений и 6 моментов минимумов⁸ “кеплеровской” кривой блеска. Эфемериды системы для трех указанных периодов при этом следующие:

$$\text{Min I} = \text{HJD } 2438221.55250 + 2.17815440E, \quad (1)$$

$$\text{Min I} = \text{HJD } 2438221.55239 + 2.17815408E, \quad (2)$$

$$\text{Min I} = \text{HJD } 2438221.55211 + 2.17815414E. \quad (3)$$

На рис. 2 треугольниками показаны величины O–C, вычисленные с эфемеридами (1) моментов минимумов, взятых из литературы, кружками показаны наши значения, вычисленные из наблюдений “Кеплера”. Наглядно видно, какой эффект смещения минимумов мы пытаемся найти.

Далее анализ полученных данных был проведен для трех значений периода (P_{10} , P_{11} , P_{12}). Большой разброс значений O–C ограничивает возможность получения множественности параметров светового уравнения. В качестве минимизации параметров мы применяем самую простую гипотезу кругового вращения третьего тела вокруг затменной двойной звезды. С помощью фурье-разложения⁹ был произведен анализ величины O–C, полученной для каждого значения периода и были вычислены параметры синусоиды, которая наилучшим способом аппроксимирует график зависимости моментов минимумов от времени (световое уравнение). В табл. 4 приведены значения амплитуды и периода теоретической кривой. На рис. 3 и 4 приведен спектр мощности для O–C, рассчитанный с эфемеридами (1). На рис. 4 показан в более крупном масштабе участок рис. 3. Пик около периода ≈ 2 дня соответствует орбитальному периоду FL Lyr, это хорошо видно на рис. 5. На рис. 3 виден пик около 5–6 лет, этот пик связан со световым уравнением. Поиски большего количества тел в системе затруднены большим разбросом полученных значений моментов минимумов, сравнимым с амплитудой светового уравнения. Вычисления o–c, проведенные для всех трех значений периода (P_{10} , P_{11} , P_{12}), показывают их систематические отклонения со временем, которые можно объяснить световым уравнением, имеющим период, несколько больший, чем длительность всех наблюдений, проведенных на “Кеплере”. На рис. 6–8 показаны отклонения

⁸ Чтобы космические данные не могли доминировать над другими определениями минимумов, мы взяли 3 момента из наблюдений “Кеплера”, принадлежащие 2009 г., и 3 момента, принадлежащие 2014 г. Моменты 2009 г. — это HJD–2400000 54965.02424, HJD–2400000 54967.20240, HJD–2400000 54969.38054, моменты 2014 г. — это HJD–2400000 56385.18082, HJD–2400000 56387.35900, HJD–2400000 56389.53716.

⁹ Используется программа PERDET (PERiod DETermination)[33].

Таблица 3. Моменты главных минимумов кривой блеска системы FL Луг, полученные в ходе обработки наблюдений телескопа “Кеплер” (величина O–C рассчитана с использованием эфемерид (1))

Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут	Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут	Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут
54965.02424	–0.00113	55065.21935	–0.00113	55163.23632	–0.00110
54967.20240	–0.00113	55067.39750	–0.00113	55165.41448	–0.00110
54969.38054	–0.00114	55069.57563	–0.00115	55167.59263	–0.00110
54971.55866	–0.00118	55071.75385	–0.00109	55169.77094	–0.00095
54973.73682	–0.00117	55073.93203	–0.00106	55171.94888	–0.00116
54975.91499	–0.00115	55076.11020	–0.00105	55174.12705	–0.00115
54978.09314	–0.00116	55078.28829	–0.00111	55176.30523	–0.00112
54980.27127	–0.00118	55080.46645	–0.00111	55178.48340	–0.00110
54982.44946	–0.00115	55082.64459	–0.00112	55180.66164	–0.00102
54984.62759	–0.00117	55084.82276	–0.00110	55187.19601	–0.00111
54986.80578	–0.00114	55087.00089	–0.00113	55189.37422	–0.00106
54988.98393	–0.00114	55091.35710	–0.00123	55191.55238	–0.00105
54991.16210	–0.00113	55093.53539	–0.00109	55193.73047	–0.00111
54993.34026	–0.00112	55095.71356	–0.00108	55195.90868	–0.00106
54995.51841	–0.00112	55097.89167	–0.00112	55198.08687	–0.00102
54997.69669	–0.00100	55100.06984	–0.00111	55200.26502	–0.00103
55004.23105	–0.00110	55102.24797	–0.00113	55202.44317	–0.00103
55006.40922	–0.00109	55104.42610	–0.00115	55204.62133	–0.00103
55008.58736	–0.00110	55106.60426	–0.00115	55206.79947	–0.00104
55010.76549	–0.00113	55108.78242	–0.00114	55208.97767	–0.00100
55012.94365	–0.00112	55110.96060	–0.00112	55211.15577	–0.00105
55017.29999	–0.00109	55113.13873	–0.00114	55213.33390	–0.00107
55019.47812	–0.00111	55115.31692	–0.00111	55215.51200	–0.00113
55021.65625	–0.00114	55117.49504	–0.00114	55217.69013	–0.00115
55023.83439	–0.00115	55119.67321	–0.00113	55219.86829	–0.00115
55026.01257	–0.00113	55121.85135	–0.00114	55222.04642	–0.00117
55028.19073	–0.00112	55124.02950	–0.00114	55224.22459	–0.00116
55030.36885	–0.00115	55126.20765	–0.00115	55228.58090	–0.00116
55032.54697	–0.00119	55128.38578	–0.00117	55235.11540	–0.00112
55034.72509	–0.00122	55132.74208	–0.00118	55237.29356	–0.00111
55036.90328	–0.00119	55134.92022	–0.00120	55239.47174	–0.00109
55039.08140	–0.00122	55137.09838	–0.00119	55243.82801	–0.00113
55041.25957	–0.00121	55139.27653	–0.00119	55246.00621	–0.00108
55043.43771	–0.00122	55141.45468	–0.00120	55248.18439	–0.00105
55045.61584	–0.00125	55143.63282	–0.00121	55250.36247	–0.00113
55047.79406	–0.00118	55145.81099	–0.00120	55252.54061	–0.00114
55049.97218	–0.00121	55147.98918	–0.00116	55254.71876	–0.00115
55052.15043	–0.00112	55150.16731	–0.00119	55256.89700	–0.00106
55054.32850	–0.00120	55152.34548	–0.00117	55259.07514	–0.00108
55056.50666	–0.00120	55156.70175	–0.00121	55261.25326	–0.00111
55060.86302	–0.00115	55158.87990	–0.00121	55263.43145	–0.00108
55063.04122	–0.00110	55161.05809	–0.00118	55265.60958	–0.00110

Таблица 3. Продолжение

Момент главного минимума, HJD — 2400000	O—C, сут	Момент главного минимума, HJD — 2400000	O—C, сут	Момент главного минимума, HJD — 2400000	O—C, сут
55267.78771	−0.00112	55372.33909	−0.00116	55468.17791	−0.00113
55269.96587	−0.00112	55374.51723	−0.00117	55470.35605	−0.00114
55272.14398	−0.00116	55376.69534	−0.00121	55472.53419	−0.00116
55274.32208	−0.00122	55378.87356	−0.00115	55474.71229	−0.00121
55278.67836	−0.00125	55381.05167	−0.00119	55476.89043	−0.00123
55280.85650	−0.00126	55383.22987	−0.00115	55479.06858	−0.00123
55283.03465	−0.00127	55385.40802	−0.00115	55481.24671	−0.00126
55285.21281	−0.00126	55387.58616	−0.00117	55483.42489	−0.00123
55287.39099	−0.00123	55389.76436	−0.00112	55485.60302	−0.00125
55289.56916	−0.00122	55391.94264	−0.00100	55487.78119	−0.00124
55291.74733	−0.00120	55394.12078	−0.00101	55489.95944	−0.00114
55293.92549	−0.00120	55396.29897	−0.00097	55494.31569	−0.00120
55296.10362	−0.00122	55398.47699	−0.00111	55496.49389	−0.00116
55298.28180	−0.00120	55400.65524	−0.00101	55498.67206	−0.00114
55300.45997	−0.00118	55402.83331	−0.00110	55500.85025	−0.00111
55302.63812	−0.00118	55405.01151	−0.00105	55503.02841	−0.00110
55304.81631	−0.00115	55407.18966	−0.00106	55505.20660	−0.00106
55306.99439	−0.00122	55409.36777	−0.00110	55507.38474	−0.00108
55311.35074	−0.00118	55411.54600	−0.00102	55509.56290	−0.00107
55313.52889	−0.00119	55413.72416	−0.00102	55511.74103	−0.00110
55315.70703	−0.00120	55415.90226	−0.00107	55513.91917	−0.00111
55317.88525	−0.00114	55418.08049	−0.00100	55516.09734	−0.00110
55320.06334	−0.00120	55420.25857	−0.00107	55518.27549	−0.00110
55322.24152	−0.00117	55422.43676	−0.00104	55520.45362	−0.00112
55324.41968	−0.00117	55424.61487	−0.00108	55522.63181	−0.00109
55326.59804	−0.00096	55428.97120	−0.00106	55524.80995	−0.00110
55328.77600	−0.00116	55431.14933	−0.00108	55526.98808	−0.00113
55330.95426	−0.00105	55433.32744	−0.00113	55529.16624	−0.00112
55335.31062	−0.00100	55435.50560	−0.00112	55531.34442	−0.00110
55337.48874	−0.00104	55437.68373	−0.00115	55533.52251	−0.00116
55339.66684	−0.00109	55439.86184	−0.00119	55535.70065	−0.00118
55344.02316	−0.00108	55442.04001	−0.00118	55537.87880	−0.00118
55346.20128	−0.00111	55444.21819	−0.00115	55540.05696	−0.00117
55348.37940	−0.00115	55446.39635	−0.00115	55542.23514	−0.00115
55350.55753	−0.00117	55448.57448	−0.00117	55546.59147	−0.00113
55352.73568	−0.00118	55450.75262	−0.00118	55548.76963	−0.00112
55354.91386	−0.00115	55452.93078	−0.00118	55550.94781	−0.00110
55357.09203	−0.00113	55455.10892	−0.00119	55570.55110	−0.00120
55359.27017	−0.00115	55457.28713	−0.00114	55572.72927	−0.00118
55361.44831	−0.00116	55459.46531	−0.00111	55574.90746	−0.00114
55363.62648	−0.00115	55461.64348	−0.00110	55577.08559	−0.00117
55365.80460	−0.00118	55463.82164	−0.00109	55579.26373	−0.00118
55367.98278	−0.00116	55465.99978	−0.00110	55581.44194	−0.00113

Таблица 3. Продолжение

Момент главного минимума, HJD — 2400000	O—C, сут	Момент главного минимума, HJD — 2400000	O—C, сут	Момент главного минимума, HJD — 2400000	O—C, сут
55583.62010	−0.00112	55690.34958	−0.00121	55788.36667	−0.00107
55585.79823	−0.00115	55692.52779	−0.00115	55790.54489	−0.00100
55587.97637	−0.00116	55694.70594	−0.00116	55792.72297	−0.00107
55590.15452	−0.00117	55696.88411	−0.00114	55794.90112	−0.00108
55592.33267	−0.00117	55699.06225	−0.00116	55797.07925	−0.00110
55598.86711	−0.00119	55701.24044	−0.00112	55799.25740	−0.00111
55601.04526	−0.00120	55703.41853	−0.00118	55801.43556	−0.00110
55603.22343	−0.00118	55705.59667	−0.00120	55803.61371	−0.00111
55605.40162	−0.00115	55707.77467	−0.00135	55805.79183	−0.00114
55607.57978	−0.00114	55709.95298	−0.00120	55807.96999	−0.00114
55609.75796	−0.00112	55712.13117	−0.00116	55810.14815	−0.00113
55611.93609	−0.00114	55714.30934	−0.00115	55812.32630	−0.00113
55614.11423	−0.00115	55716.48749	−0.00115	55814.50448	−0.00111
55616.29246	−0.00108	55718.66564	−0.00116	55816.68261	−0.00113
55618.47067	−0.00102	55720.84373	−0.00122	55818.86073	−0.00117
55620.64884	−0.00101	55723.02189	−0.00121	55821.03886	−0.00119
55622.82710	−0.00090	55727.37829	−0.00112	55823.21710	−0.00111
55625.00513	−0.00103	55729.55646	−0.00111	55825.39518	−0.00118
55627.18320	−0.00111	55731.73468	−0.00104	55827.57334	−0.00118
55629.36134	−0.00112	55733.91276	−0.00112	55829.75152	−0.00115
55631.53942	−0.00120	55738.26903	−0.00115	55831.92960	−0.00122
55633.71776	−0.00101	55740.44726	−0.00108	55836.28598	−0.00115
55642.43022	−0.00117	55742.62547	−0.00102	55838.46413	−0.00116
55644.60847	−0.00108	55744.80362	−0.00103	55840.64225	−0.00119
55646.78657	−0.00113	55746.98179	−0.00101	55842.82045	−0.00115
55648.96475	−0.00110	55749.15991	−0.00105	55844.99861	−0.00114
55651.14298	−0.00103	55751.33807	−0.00104	55847.17675	−0.00115
55653.32105	−0.00111	55753.51623	−0.00104	55849.35494	−0.00112
55655.49912	−0.00120	55755.69433	−0.00109	55851.53301	−0.00120
55657.67740	−0.00107	55757.87245	−0.00112	55853.71115	−0.00122
55659.85545	−0.00118	55760.05061	−0.00112	55855.88933	−0.00119
55662.03376	−0.00102	55762.22869	−0.00119	55858.06744	−0.00124
55664.21186	−0.00108	55764.40680	−0.00124	55860.24565	−0.00118
55666.39007	−0.00102	55766.58501	−0.00118	55862.42379	−0.00120
55668.56813	−0.00111	55768.76315	−0.00120	55864.60193	−0.00121
55670.74631	−0.00109	55770.94133	−0.00117	55866.78009	−0.00120
55672.92436	−0.00119	55773.11953	−0.00113	55868.95822	−0.00123
55677.28069	−0.00117	55775.29767	−0.00114	55871.13645	−0.00115
55679.45889	−0.00113	55777.47579	−0.00117	55873.31456	−0.00120
55681.63700	−0.00117	55779.65396	−0.00116	55875.49279	−0.00112
55683.81515	−0.00117	55781.83212	−0.00115	55877.67097	−0.00110
55685.99329	−0.00119	55784.01024	−0.00119	55879.84907	−0.00115
55688.17145	−0.00118	55786.18851	−0.00107	55882.02721	−0.00117

Таблица 3. Продолжение

Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут	Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут	Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут
55884.20530	–0.00123	55982.22232	–0.00116	56082.41739	–0.00119
55886.38349	–0.00119	55984.40043	–0.00120	56084.59558	–0.00115
55888.56164	–0.00120	55990.93486	–0.00124	56086.77377	–0.00112
55890.73973	–0.00126	55993.11305	–0.00120	56088.95187	–0.00117
55892.91789	–0.00126	55995.29120	–0.00120	56091.13003	–0.00117
55895.09595	–0.00135	55997.46934	–0.00122	56093.30819	–0.00116
55897.27421	–0.00125	55999.64750	–0.00121	56095.48629	–0.00122
55899.45237	–0.00124	56001.82566	–0.00121	56097.66443	–0.00123
55901.63047	–0.00129	56004.00383	–0.00119	56099.84256	–0.00126
55905.98673	–0.00134	56006.18199	–0.00119	56102.02071	–0.00126
55908.16495	–0.00128	56008.36016	–0.00117	56104.19885	–0.00127
55910.34310	–0.00128	56010.53822	–0.00126	56108.55520	–0.00123
55912.52125	–0.00129	56012.71645	–0.00119	56110.73337	–0.00122
55914.69954	–0.00115	56014.89457	–0.00122	56112.91154	–0.00120
55916.87759	–0.00126	56017.07265	–0.00130	56115.08969	–0.00121
55919.05580	–0.00120	56019.25077	–0.00133	56117.26788	–0.00117
55921.23397	–0.00118	56021.42895	–0.00131	56119.44606	–0.00114
55923.41208	–0.00123	56023.60710	–0.00131	56121.62421	–0.00115
55925.59032	–0.00114	56025.78530	–0.00127	56130.33683	–0.00115
55927.76846	–0.00116	56027.96348	–0.00124	56132.51495	–0.00118
55929.94663	–0.00114	56030.14168	–0.00119	56134.69314	–0.00115
55934.30273	–0.00135	56032.31980	–0.00123	56136.87126	–0.00118
55936.48115	–0.00109	56034.49793	–0.00125	56141.22754	–0.00121
55938.65905	–0.00134	56036.67620	–0.00114	56143.40564	–0.00126
55940.83741	–0.00113	56038.85433	–0.00116	56145.58383	–0.00123
55943.01557	–0.00113	56041.03247	–0.00118	56147.76194	–0.00127
55945.19372	–0.00113	56043.21064	–0.00116	56149.94015	–0.00122
55947.37191	–0.00110	56045.38880	–0.00116	56152.11831	–0.00121
55949.55006	–0.00110	56047.56695	–0.00116	56154.29644	–0.00124
55951.72812	–0.00120	56049.74509	–0.00117	56156.47455	–0.00128
55953.90642	–0.00105	56051.92322	–0.00120	56158.65285	–0.00113
55956.08457	–0.00105	56054.10136	–0.00121	56160.83101	–0.00113
55958.26278	–0.00100	56056.27953	–0.00120	56163.00918	–0.00111
55960.44078	–0.00115	56058.45768	–0.00120	56165.18734	–0.00111
55962.61903	–0.00106	56060.63583	–0.00121	56167.36547	–0.00113
55964.79718	–0.00106	56062.81401	–0.00118	56171.72170	–0.00121
55966.97532	–0.00108	56064.99215	–0.00119	56176.07805	–0.00117
55969.15349	–0.00106	56067.17031	–0.00119	56178.25616	–0.00121
55971.33167	–0.00104	56069.34844	–0.00121	56182.61266	–0.00102
55973.50978	–0.00108	56071.52663	–0.00118	56184.79079	–0.00105
55975.68789	–0.00112	56073.70473	–0.00123	56186.96889	–0.00110
55977.86600	–0.00117	56075.88309	–0.00103	56189.14696	–0.00119
55980.04415	–0.00117	56080.23923	–0.00120	56191.32514	–0.00116

Таблица 3. Окончание

Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут	Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут	Момент главного минимума, HJD – 2400000	O–C, сут
56193.50333	–0.00112	56258.84793	–0.00116	56330.72696	–0.00122
56195.68142	–0.00119	56261.02618	–0.00106	56332.90509	–0.00125
56197.85966	–0.00110	56263.20430	–0.00110	56335.08323	–0.00126
56200.03782	–0.00110	56265.38245	–0.00110	56337.26137	–0.00127
56202.21585	–0.00122	56267.56055	–0.00115	56339.43956	–0.00124
56206.57218	–0.00120	56269.73872	–0.00114	56341.61770	–0.00125
56208.75036	–0.00118	56271.91687	–0.00114	56343.79586	–0.00125
56210.92850	–0.00119	56274.09496	–0.00121	56345.97401	–0.00125
56213.10672	–0.00112	56276.27306	–0.00126	56348.15220	–0.00122
56215.28484	–0.00116	56278.45124	–0.00124	56350.33032	–0.00125
56217.46300	–0.00115	56280.62939	–0.00124	56352.50855	–0.00118
56219.64117	–0.00114	56282.80746	–0.00132	56354.68662	–0.00126
56221.81930	–0.00116	56284.98561	–0.00133	56356.86482	–0.00121
56223.99745	–0.00117	56287.16373	–0.00136	56361.22111	–0.00123
56226.17558	–0.00119	56289.34193	–0.00132	56363.39919	–0.00131
56228.35372	–0.00120	56291.52008	–0.00132	56365.57734	–0.00131
56230.53189	–0.00119	56293.69826	–0.00130	56367.75560	–0.00121
56232.71004	–0.00119	56295.87646	–0.00125	56369.93379	–0.00117
56234.88821	–0.00118	56298.05464	–0.00123	56372.11196	–0.00116
56237.06636	–0.00118	56300.23279	–0.00123	56374.29005	–0.00122
56239.24460	–0.00110	56302.41098	–0.00119	56376.46825	–0.00117
56241.42268	–0.00117	56306.76730	–0.00118	56378.64637	–0.00121
56243.60089	–0.00112	56308.94545	–0.00119	56380.82450	–0.00123
56245.77903	–0.00113	56322.01433	–0.00123	56383.00266	–0.00123
56252.31344	–0.00118	56324.19246	–0.00126	56385.18082	–0.00122
56254.49160	–0.00118	56326.37065	–0.00122	56387.35900	–0.00120
56256.66976	–0.00117	56328.54883	–0.00120	56389.53716	–0.00119

O–C моментов минимумов в зависимости от орбитальной фазы третьего тела.

Если за время наблюдений прошло меньше по-

Таблица 4. Амплитуда теоретической кривой и орбитальный период третьего тела, полученные с помощью разложения Фурье для трех значений орбитального периода FL Lyr

Орбитальный период FL Lyr, сут	Амплитуда светового уравнения, с	Период светового уравнения, годы
2.17815440	4.8	7.2
2.17815408	9.9	12.4
2.17815414	7.6	11.3

ловины периода светового уравнения, то альтернативным объяснением световому уравнению может быть изменение периода тесной двойной ($dP/dt \sim 10^{-5}$ сут/год). Эта система наблюдается уже давно, и такие изменения периода были бы выявлены раньше по параболической форме O–C. За время наблюдений (почти 60 лет) изменение периода в FL Lyr накопилось бы уже в 4-м знаке после запятой, но период должен был бы увеличиваться, а все значения периода, имеющиеся в литературе [34–50], не меньше тех значений, которые нашли мы. Это можно рассматривать как свидетельство в пользу того, что период системы, скорее всего, не меняется, а моменты минимумов испытывают колебания вследствие светового уравнения.

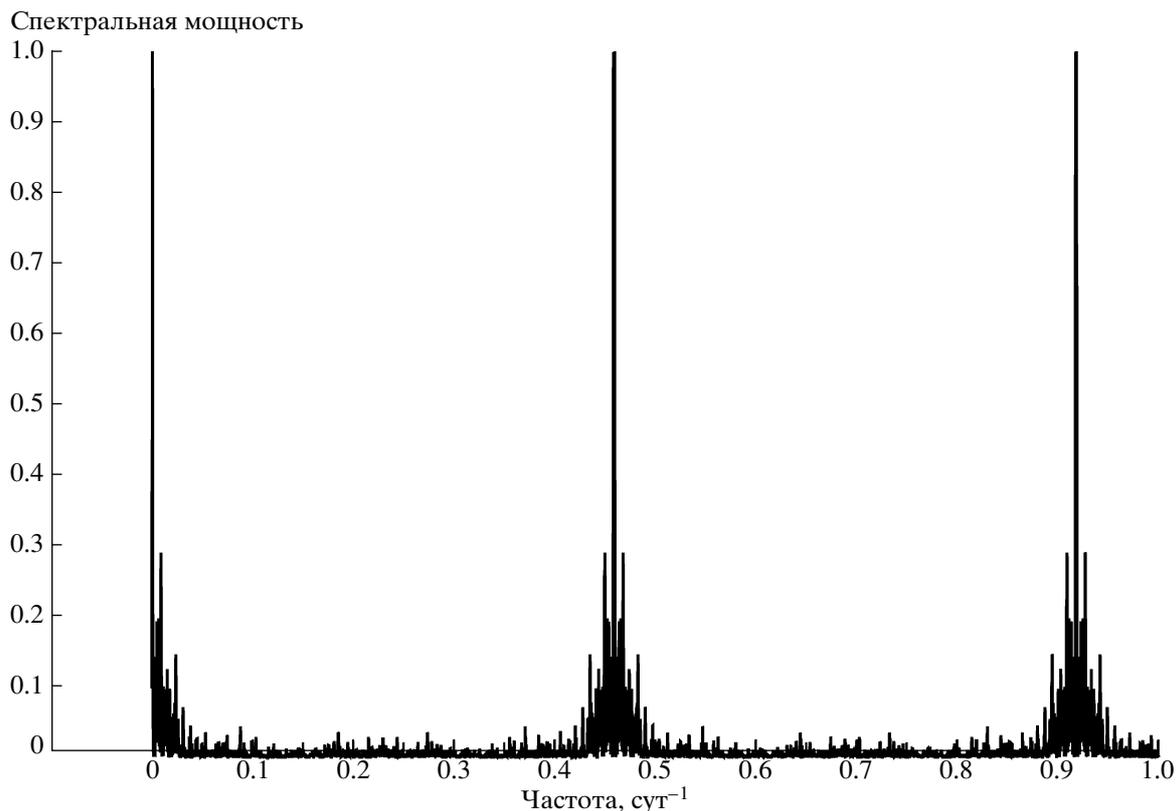


Рис. 3. Спектр мощности FL Lyr в относительных единицах, рассчитанный с эфемеридами (1).

5. МАССА ТРЕТЬЕГО ТЕЛА

В общем случае задача определения точного значения массы тела в двойной и тем более кратной системе может составлять отдельное сложное исследование. В контексте данной работы проводить такую оценку смысла не имеет, так как орбитальный период третьего тела пока точно не установлен ввиду того, что он оказался больше времени наблюдений на космическом телескопе “Кеплер”. Кроме того, в нашей работе мы не получили значения угла наклона орбиты третьего тела по отношению к плоскости орбиты звезд в системе. Поэтому мы приводим простую нижнюю оценку массы третьего тела.

Так как орбитальный период третьего тела намного больше орбитального периода центральной двойной звезды, мы можем использовать для простой оценки массы третий закон Кеплера¹⁰

¹⁰ Орбитальный период третьего тела составляет 7 и более лет против 2 дней орбитального периода FL Lyr. При этом стабильная орбита, для которой может быть использован третий закон Кеплера (для грубых оценок, так как возмущения орбиты третьего тела несомненно будут иметь место), начинается с орбитального периода 20 дней [11].

$$P_{orb} = 0.1 \frac{a^{3/2}}{M^{1/2}}, \quad (4)$$

где P_{orb} — орбитальный период третьего тела в днях, a — большая полуось орбиты третьего тела в радиусах Солнца, M — сумма масс обеих компонент FL Lyr и третьего тела в массах Солнца.

Сумма масс компонент системы FL Lyr составляет $\approx 2 M_{\odot}$ [21]. Орбитальный период третьего тела с эфемеридами (1) составляет $\gtrsim 7$ лет. Большая полуось орбиты третьего тела в соответствии с формулой (4) составляет $\gtrsim 1100 R_{\odot}$. Полуамплитуда светового уравнения с теми же эфемеридами составляет 2.4 с. За это время свет проходит половину расстояния, на которое периодически смещает двойную звезду FL Lyr третье тело, т.е. большая полуось орбиты центра масс системы FL Lyr вокруг центра масс системы “FL Lyr — третье тело” составляет приблизительно $1 R_{\odot}$. Таким образом, отношение массы третьего тела к массе двойной звезды FL Lyr составляет $\approx 1/1000$. Мы получаем простую оценку массы третьего тела: $2 M_{\odot}/1000 \approx 2 M_J$. Если орбитальный период третьего тела окажется выше приводимой

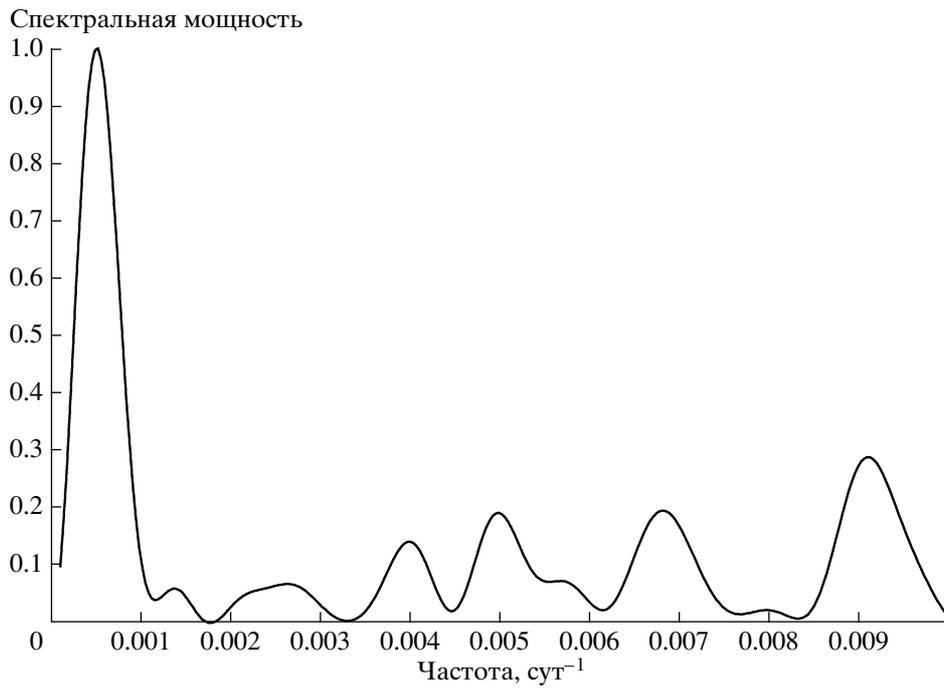


Рис. 4. То же, что на рис. 3, в увеличенном масштабе для участка малых частот.

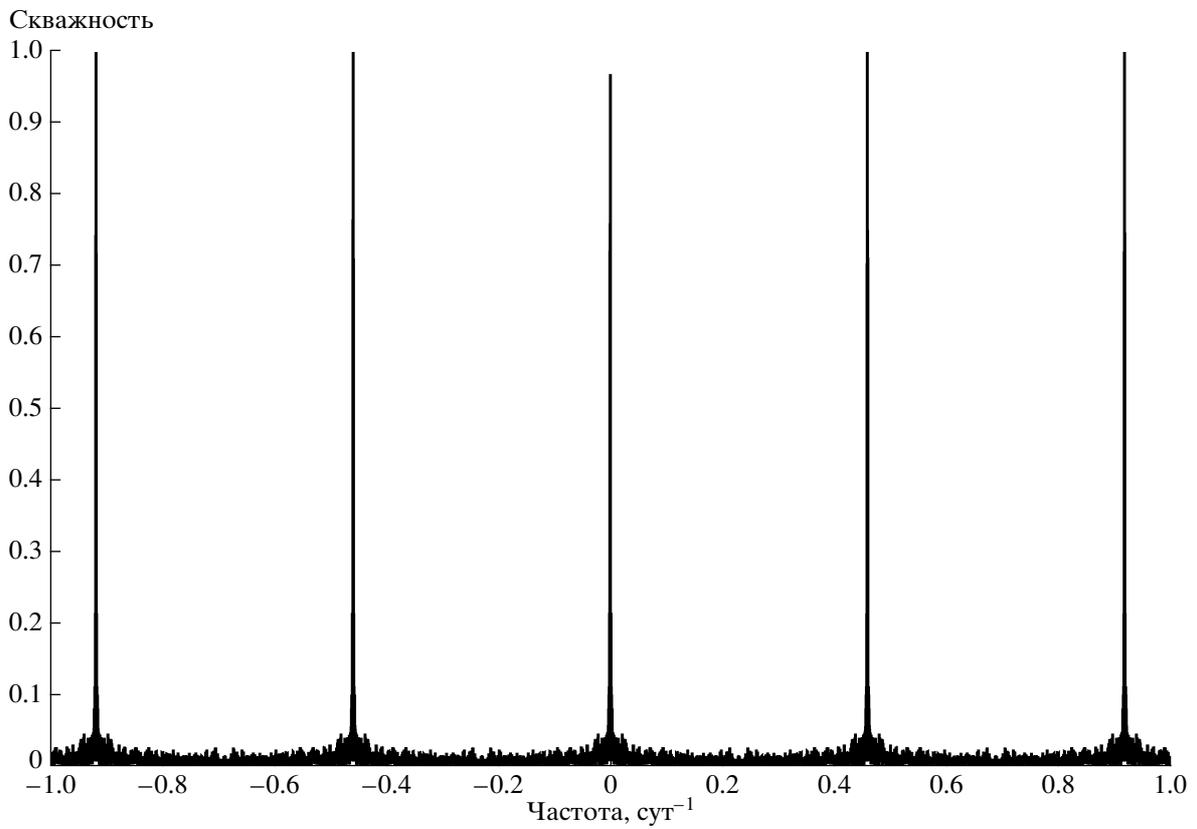


Рис. 5. Скважность в зависимости от частоты сигнала.

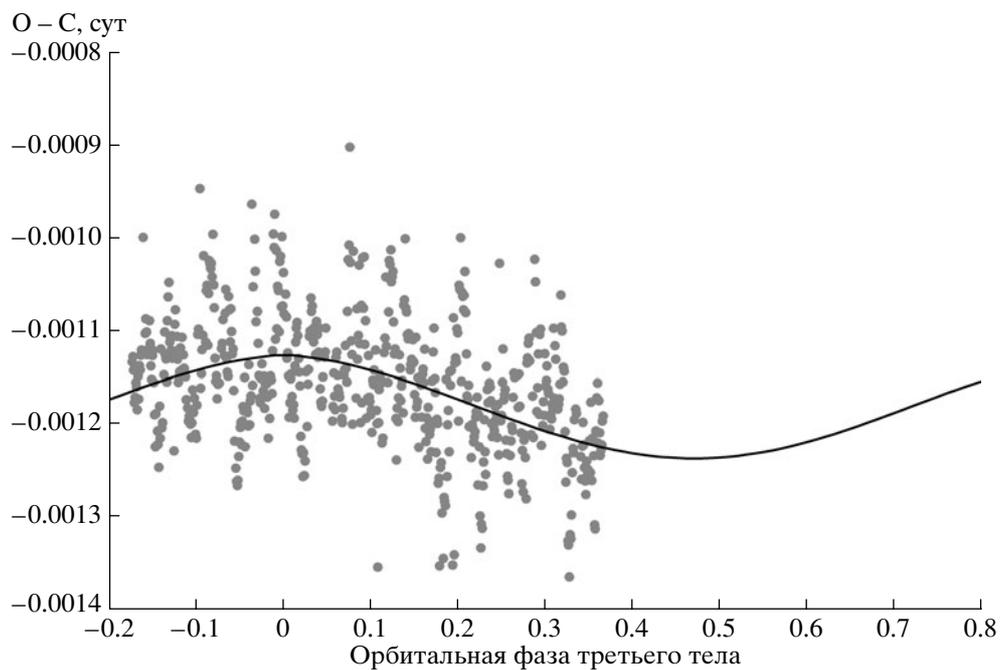


Рис. 6. График светового уравнения третьего тела. При вычислениях использованы эфемериды (1). Период и амплитуду светового уравнения см. в табл. 4. Сплошная линия — теоретическая кривая, кружками обозначены наблюдательные значения.

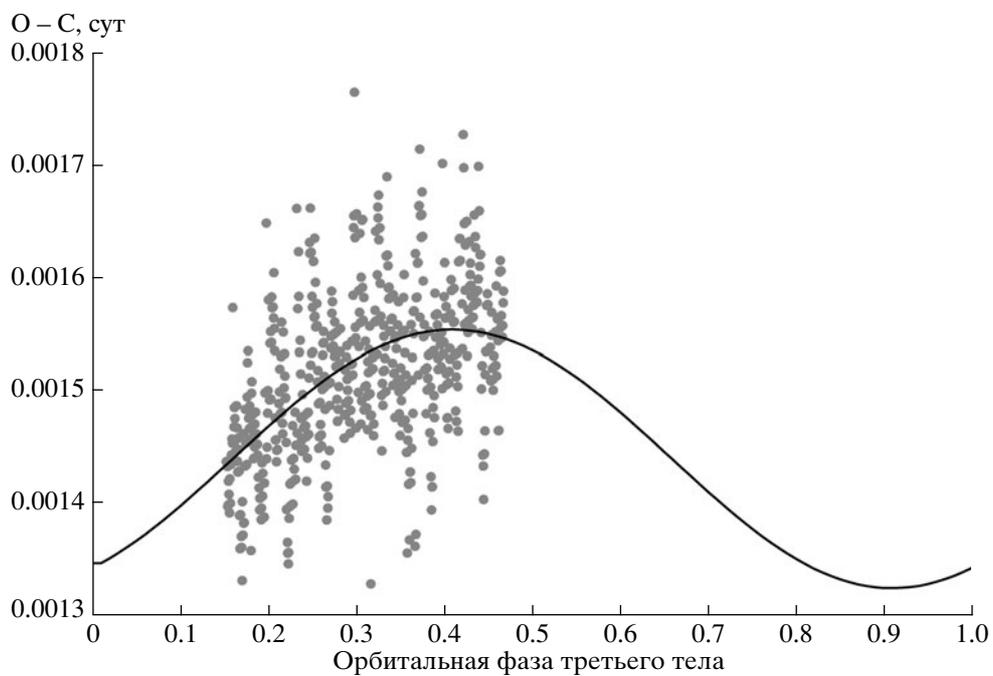


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для эфемериды (2).

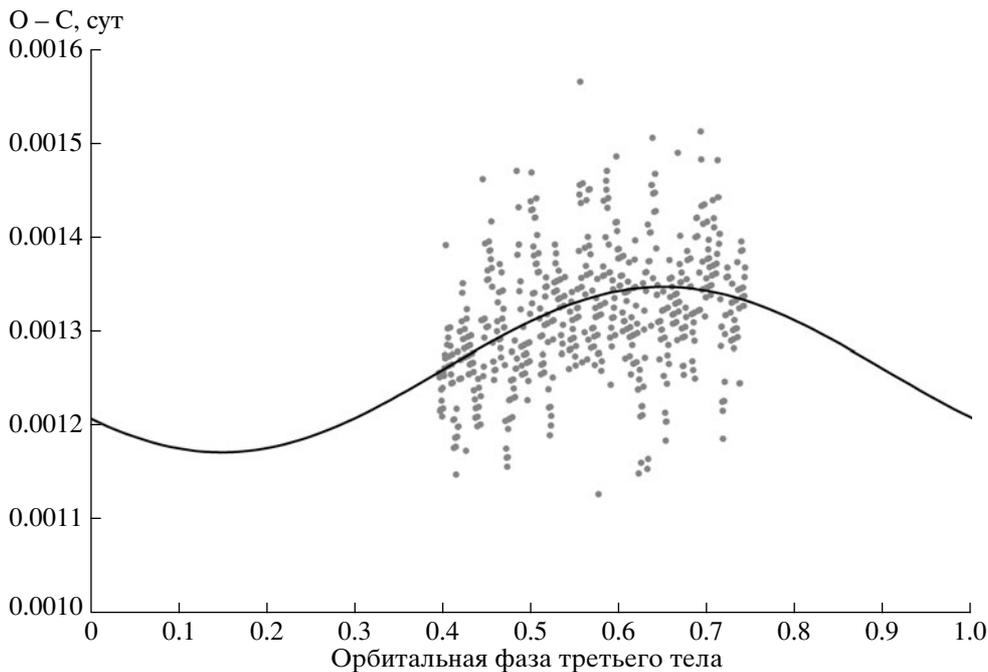


Рис. 8. То же, что на рис. 6, для эфемериды (3).

нами оценки, оценку массы этого тела можно будет понизить; в то же время наклон орбиты третьего тела повышает оценку его массы. Здесь следует отметить, что плоскость орбиты у всех 8 открытых внесолнечных планет, обращающихся вокруг двойных звезд, лежит очень близко (с точностью до 1°) к плоскости орбиты их родительских двойных звезд. Таким образом, наша грубая оценка массы планеты может оказаться близкой к действительной массе планеты.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы проанализировали “кеплеровские” кривые блеска затменной двойной звезды FL Луг и получили световое уравнение, свидетельствующее о том, что в системе возможно есть тело с массой около 2 масс Юпитера с периодом обращения вокруг тесной двойной ≥ 7 лет. Для подтверждения существования этой планеты необходимы длительные фотометрические наблюдения FL Луг с точностью не хуже, чем точность “кеплеровских” данных, либо необходимо в течение длительного времени изучать кривую лучевых скоростей системы с очень высокой точностью.

Приводимые нами моменты минимумов кривой блеска FL Луг могут быть использованы в дальнейших исследованиях этой звезды (табл. 3).

Обнаружение планет в двойных звездных системах, произошедшее в последние годы, означает, что образование двух звездных компонент в ходе

коллапса вращающегося протозвездного облака не решает полностью проблему неизбежного избытка углового момента у протозвездных облаков. Образование планет в околозвездных аккреционно-декреционных дисках остается необходимым средством для полного решения этой проблемы. В итоге компоненты широких двойных звезд и тесные двойные звезды могут иметь окружающие их планеты. Это означает, что большинство звезд могут иметь планетные системы, а частота образования планетных систем может оказаться близкой к частоте образования звезд (см., например, одну из последних работ [51]). Для Млечного Пути это составляет несколько планетных систем в год.

Авторы благодарны А.И. Захарову, С.Е. Леонтьеву и В.Н. Семенову за разработку программ по вычислениям фотометрических элементов затменных двойных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*, <http://www.exoplanet.eu>.
2. L. R. Doyle, J. A. Carter, D. C. Fabrycky, R. W. Slawson, S. B. Howell, J. N. Winn, J. A. Orosz, A. Prsa, W. F. Welsh, S. N. Quinn, D. Latham, G. Torres, L. A. Buchhave, G. W. Marcy, J. J. Fortney, A. Shporer, E. B. Ford, J. J. Lissauer, D. Ragozzine, M. Rucker, N. Batalha, J. M. Jenkins, W. J. Borucki, D. Koch, Ch. K. Middour, J. R. Hall, S. McCauliff, M. N. Fanelli, E. V. Quintana, M. J. Holman, D. A. Caldwell, M. Still, R. P. Stefanik, W. R. Brown,

- G. A. Esquerdo, S. Tang, G. Furesz, J. C. Geary, P. Berlind, M. L. Calkins, D. R. Short, J. H. Steffen, D. Sasselov, E. W. Dunham, W. D. Cochran, A. Boss, M. R. Haas, D. Buzasi, and D. Fischer, *Science* **333**, 1602 (2011).
3. W. F. Welsh, J. A. Orosz, J. A. Carter, D. C. Fabrycky, E. B. Ford, J. J. Lissauer, A. Prsa, S. N. Quinn, D. Ragozzine, D. R. Short, G. Torres, J. N. Winn, L. R. Doyle, Th. Barclay, N. Batalha, S. Bloemen, E. Brugamyer, L. A. Buchhave, C. Caldwell, D. A. Caldwell, J. L. Christiansen, D. R. Ciardi, W. D. Cochran, M. Endl, J. J. Fortney, Th. N. Gautier III, R. L. Gilliland, M. R. Haas, J. R. Hall, M. J. Holman, A. W. Howard, S. B. Howell, H. Isaacson, J. M. Jenkins, T. C. Klaus, D. W. Latham, J. Li, G. W. Marcy, Ts. Mazeh, E. V. Quintana, P. Robertson, A. Shporer, J. H. Steffen, G. Windmiller, D. G. Koch, and W. J. Borucki, *Nature* **481**, 475 (2012).
 4. J. A. Orosz, W. F. Welsh, J. A. Carter, E. Brugamyer, L. A. Buchhave, W. D. Cochran, M. Endl, E. B. Ford, Ph. MacQueen, D. R. Short, G. Torres, G. Windmiller, E. Agol, Th. Barclay, D. A. Caldwell, B. D. Clarke, L. R. Doyle, D. C. Fabrycky, J. C. Geary, N. Haghighipour, M. J. Holman, Kh. A. Ibrahim, J. M. Jenkins, K. Kinemuchi, J. Li, J. J. Lissauer, A. Prsa, D. Ragozzine, A. Shporer, M. Still, and R. A. Wade, *Astrophys. J.* **758**, 87 (2012).
 5. J. A. Orosz, W. F. Welsh, J. A. Carter, D. C. Fabrycky, W. D. Cochran, M. Endl, E. B. Ford, N. Haghighipour, Ph. J. MacQueen, Ts. Mazeh, R. Sanchis-Ojeda, D. R. Short, G. Torres, E. Agol, L. A. Buchhave, L. R. Doyle, H. Isaacson, J. J. Lissauer, G. W. Marcy, A. Shporer, G. Windmiller, Th. Barclay, A. P. Boss, B. D. Clarke, J. Fortney, J. C. Geary, M. J. Holman, D. Huber, J. M. Jenkins, K. Kinemuchi, E. Kruse, D. Ragozzine, D. Sasselov, M. Still, P. Tenenbaum, K. Uddin, J. N. Winn, D. G. Koch, and W. J. Borucki, *Science* **337**, 1511 (2012).
 6. M. E. Schwamb, J. A. Orosz, J. A. Carter, W. F. Welsh, D. A. Fischer, G. Torres, A. W. Howard, J. R. Crepp, W. C. Keel, Ch. J. Lintott, N. A. Kaib, D. Terrell, R. Gagliano, K. J. Jek, Mi. Parrish, A. M. Smith, S. Lynn, R. J. Simpson, M. J. Giguere, and K. Schawinski, *Astrophys. J.* **768**, 127 (2013).
 7. V. B. Kostov, P. R. McCullough, J. A. Carter, M. Deleuil, R. F. Diaz, D. C. Fabrycky, G. Hébrard, T. C. Hinse, Ts. Mazeh, J. A. Orosz, Z. I. Tsvetanov, and W. F. Welsh, *Astrophys. J.* **784**, 14 (2014).
 8. V. B. Kostov, P. R. McCullough, J. A. Carter, M. Deleuil, R. F. Díaz, D. C. Fabrycky, G. Hébrard, T. C. Hinse, T. Mazeh, J. A. Orosz, Z. I. Tsvetanov, and W. F. Welsh, *Astrophys. J.* **787**, 93 (2014).
 9. N. C. Hinse, N. Haghighipour, V. B. Kostov, and K. Gozdziewski, *Astrophys. J.* (2015, в печати); e-Print arXiv:1409.1349 [astro-ph.EP] (2014).
 10. W. F. Welsh, J. A. Orosz, D. R. Short, N. Haghighipour, L. A. Buchhave, L. R. Doyle, D. C. Fabrycky, T. C. Hinse, S. Kane, V. Kostov, Ts. Mazeh, S. M. Mills, T. W. A. Mueller, B. Quarles, S. N. Quinn, D. Ragozzine, A. Shporer, J. H. Steffen, L. Tal-Or, G. Torres, G. Windmiller, and W. J. Borucki, *Astrophys. J.* (2015, в печати); e-Print arXiv:1409.1605 [astro-ph.EP] (2014).
 11. M. J. Holman and P. A. Wiegert, *Astron. J.* **117**, 621 (1999).
 12. A. В. Тутуков, А. В. Федорова, *Астрон. журн.* **89**, 343 (2012).
 13. P. A. Mason, J. I. Zuluaga, J. M. Clark, and P. A. Cuartas, *Astrophys. J. (Letters)* **774**, L26 (2013).
 14. А. В. Тутуков, А. И. Богомазов, *Астрон. журн.* **89**, 857 (2012).
 15. *Kepler Science Center – The Kepler Field Of View*, <http://keplergo.arc.nasa.gov/CalibrationFOV.shtml>.
 16. O. Morgenroth, *Astron. Nachr.* **255**, 425 (1935).
 17. N. N. Samus, O. V. Durlevich, E. V. Kazarovets, E. N. Pastukhova, A. V. Zharova (et al.), *General Catalog of Variable Stars (GCVS database, Version 2012Apr)*, CDS B/gcvs, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/gcvs>.
 18. O. Struve, H. G. Horak, R. Canavaggia, V. Kourganoff, and A. Colacevich, *Astrophys. J.* **111**, 658 (1950).
 19. S. Cristaldi, *Mem. Soc. Astron. Ital.* **36**, 77 (1965).
 20. P. А. Боцула, *Переменные звезды* **20**, 588 (1978).
 21. D. M. Popper, C. H. Lacy, M. L. Frueh, and A. E. Turner, *Astron. J.* **91**, 383 (1986).
 22. E. Lastennet and D. Valls-Gabaud, *Astron. and Astrophys.* **396**, 551 (2002).
 23. В. М. Липунов, К. А. Постнов, М. Е. Прохоров, А. И. Богомазов, *Астрон. журн.* **86**, 985 (2009).
 24. *Kepler: A Search for Terrestrial Planets. Kepler Data Characteristic Handbook*, https://archive.stsci.edu/kepler/manuals/Data_Characteristics.pdf.
 25. *Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes – Kepler Home*, <https://archive.stsci.edu/kepler/>.
 26. K. E. Conroy, A. Prsa, K. G. Stassun, J. A. Orosz, D. C. Fabrycky, and W. F. Welsh, *Astron. J.* **147**, 45 (2014).
 27. Kh. F. Khaliullin and V. S. Kozyreva, *Astrophys. and Space Sci.* **94**, 115 (1983).
 28. V. S. Kozyreva, *Astrophys. and Space Sci.* **165**, 1 (1990).
 29. В. С. Козырева, А. И. Захаров, *Письма в Астрон. журн.* **27**, 834 (2001).
 30. В. С. Козырева, А. В. Кусакин, Х. Ф. Халиуллин, *Письма в Астрон. журн.* **31**, 131 (2005).
 31. В. С. Козырева, А. И. Захаров, *Письма в Астрон. журн.* **32**, 349 (2006).
 32. W. van Hamme, *Astron. J.* **106**, 2096 (1993).
 33. M. Breger, *Delta Scuti Star Newsletter*, **2**, 21 (1990).
 34. L. J. Robinson, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 111 (1965).
 35. A. D. Mallama, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **44**, 241 (1980).

36. C. D. Scarfe, D. W. Forbes, P. A. Delaney, and J. Gagne, *Inform. Bull. Var. Stars* No. 2545 (1984).
37. V. Keskin and E. Pohl, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 3355 (1989).
38. J. Safar and M. Zejda, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 4887 (2000).
39. H. J. Deeg, L. R. Doyle, B. J. S. Bejar, J. E. Blue, and S. Huver, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5470 (2003).
40. F. Agerer and J. Hubscher, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 4912 (2000).
41. R. Nelson, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 4840 (2000).
42. F. Agerer and J. Hubscher, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5484 (2003).
43. C.-H. Kim, C.-U. Lee, Y.-N. Yoon, S.-S. Park, D.-H. Kim, S.-M. Cha, and J.-H. Won, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5694 (2006).
44. J. Hübscher, A. Paschke, and F. Walter, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5657 (2005).
45. J. M. Cook, M. Divoky, A. Hofstrand, J. Lamb, and N. Quarderer, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5636 (2005).
46. J. Hübscher, A. Paschke, and F. Walter, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5731 (2006).
47. M. Zejda, Z. Mikulasek, and M. Wolf, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5741 (2006).
48. J. Hübscher, H.-M. Steinbach, and F. Walter, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5889 (2009).
49. G. Samolyk, *J. Amer. Assoc. Var. Stars Observ.* **36**, 186 (2008).
50. G. Samolyk, *J. Amer. Assoc. Var. Stars Observ.* **39**, 94 (2011).
51. S. Ballard and J. A. Johnson, *Astrophys. J.* (2015, в печати); e-Print arXiv:1410.4192 [astro-ph.EP] (2014).