

УДК 524.386

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗАТМЕННОЙ СИСТЕМЫ V2647 Cyg

© 2019 г. А. С. Кравцова<sup>1\*</sup>, И. М. Волков<sup>1,2\*\*</sup>, Д. Хохол<sup>3\*\*\*</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия<sup>3</sup>Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранская Ломница, Словакия

Поступила в редакцию 14.12.2018 г.; после доработки 28.01.2019 г.; принята к публикации 29.01.2019 г.

С помощью ПЗС-приемников впервые получены высокоточные  $UBVRI(RI)c$  кривые блеска недавно открытой затменной системы V2647 Cyg = GSC 3612 1565 ( $P = 3.90^d$ ,  $V = 11.08^m$ ). Найдены фотометрические решения кривых блеска, определены физические характеристики звезд-компонентов. Орбита звезды оказалась круговой, а не эллиптической, как это считалось ранее, период составляет  $2/3$  принятого ранее значения. Высокая точность наших наблюдений позволила определить надежные параметры системы. Полученное нами значение фотометрического параллакса в точности равно значению GAIA. Звезда имеет оптический спутник на расстоянии  $\rho = 9.5''$  и, если будет подтверждено, что между ними существует физическая связь, то систему следует считать иерархической.

DOI: 10.1134/S000462991906001X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Переменность звезды GSC 3612 1565 была открыта Отеро и др. [1] на основании анализа наблюдений обзора ROTSE [2]. Было предположено, что звезда является затменной разделенной системой с эллиптической орбитой и периодом 5.86 дня. Группой ОКПЗ звезде было присвоено обозначение V2647 Cyg [3]. Звезда была включена в каталог звезд с эллиптическими орбитами [4], в котором дублируется ошибочная информация, взятая из [1]. Наша наблюдательная программа [5] направлена, в первую очередь, на изучение затменных звезд с эллиптическими орбитами, поэтому V2647 Cyg была включена в список для наблюдений. Так как одновременно наблюдается много программных объектов и обработка наблюдений несколько отстает, то мы успели получить полное покрытие кривой блеска наблюдениями, прежде чем удалось разобраться в истинной природе звезды. После анализа наших данных стало понятно, что в ROTSE отсутствуют измерения звезды в главном минимуме, и это привело к ошибке в определении правильного значения орбитального периода. Наблюдения в нескольких последовательных вторичных минимумах были истолкованы программой поиска периодов как наблюдения отдельно в главном и отдельно во вторичном минимумах, при этом

фаза вторичного минимума была определена равной 0.334 или  $1/3$  ложного периода. Такое иногда случается при поиске затменных переменных звезд на основании данных обзоров или при просмотре коллекций фотографических пластинок, когда наблюдения распределены по времени случайным образом. Нами ранее была исследована похожая звезда, UW Нуа, период которой также оказался завышен в 1.5 раза [6], а фаза вторичного минимума по данным ОКПЗ [7] равна 0.64, т.е.  $2/3$  ложного значения.

V2647 Cyg оказалась бесперспективной системой с точки зрения изучения внутреннего строения звезд. Но полученные нами надежные данные о размерах, температурах и массах компонентов представляют независимый интерес, и в данной статье мы привели результаты подробного анализа наших фотометрических наблюдений. Мы приводим правильную эфемериду для вычисления моментов минимумов, в которой главным считается более глубокий минимум.

### 2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕДУКЦИЯ ДАННЫХ

Мы наблюдали звезду в течение пятнадцати ночей в 2009–2018 гг., всего получено 6347 измерений в семи полосах  $UBVRI(RI)c$  системы Джонсона-Кузенса. Наблюдения проводились в Крымской Астрофизической Обсерватории на

\*E-mail: kravts@yandex.ru

\*\*E-mail: hwp@yandex.ru

\*\*\*E-mail: chochol@ta3.sk

**Таблица 1.** Звездные величины переменной, основных звезд сравнения и фотометрических стандартов в системе Джонсона

Звезда	$V$	$U-B$	$B-V$	$V-R$	$R-I$	Примечание
V2647 Cyg	11.076(4)	0.030(20)	0.514(10)	0.443(18)	0.334(27)	переменная, плато*
V2647 Cyg, B	13.777(6)	0.247(21)	0.712(8)	0.665(9)	0.523(17)	оптический спутник
HD 207232	7.062(4)	-0.407(10)	-0.060(4)	0.026(4)		ФЭУ-стандарт
GSC 543 227	10.003(4)	0.003(9)	0.453(4)	0.438(16)	0.286(28)	ПЗС-стандарт
GSC 3612 718	10.998(6)	0.244(14)	0.329(8)	0.287(9)	0.284(15)	осн. зв. сравнения
GSC 3612 1292	12.704(6)	0.468(17)	0.600(8)	0.554(9)	0.543(16)	контрольная звезда

Примечание. \* Термином “плато” обозначена часть кривой блеска вне затмения.

г. Кошка, где использовались телескопы Цейсс-1000 и Цейсс-600, и в Астрономической Обсерватории Словацкой Академии Наук (Старая Лесна, Высокие Татры) на телескопе Цейсс-600. Мы использовали  $UBVRI(RI)c$ -фотометры с ПЗС-матрицами VersArray 512UV, FLI PL09000, ST-10XME, Moravian Mono CCD Camera G4-9000, а также одноканальный  $UBV$ -фотометр конструкции Волкова с фотоумножителем ЕМ1 9789. Инструментальные фотометрические системы всех приборов мы исследовали отдельно, они оказались достаточно близкими к  $UBVRI(RI)c$ -полосам системы Джонсона-Кузенса, чтобы обеспечить надежный перевод инструментальных звездных величин в стандартные. Мы использовали такую же методику наблюдений и редукции данных, что и в предыдущих наших работах [8–11].

В качестве основной звезды сравнения при наблюдениях с ПЗС-матрицей была выбрана GSC 3612 718. Экспозиции зависели от величины сигнала в каждой из полос и составляли от 90 с в полосе  $U$ , где сигнал наименьший, до 2–5 с в  $R$ , где величина сигнала была максимальной. При наблюдениях с  $UBV$ -фотометром в качестве звезды сравнения была выбрана HD 207232. Звездные величины основной звезды сравнения, контрольной звезды GSC 3612 1292 и самой переменной вне затмений (так называемом “плато”) были получены привязками с помощью ПЗС-матрицы VersArray 512UV и телескопа Цейсс-600, расположенных на г. Кошка, к экваториальному стандарту из работ [12, 13]:  $113\ 466 \equiv$  GSC 543 227 (F5). Привязки были выполнены в три разные ночи, отличавшиеся стабильной прозрачностью атмосферы. Коэффициенты прозрачности для получения внеатмосферных величин звезд по методу [14] определялись в каждую из ночей путем специальных наблюдений стандартных звезд. Так

как исследуемая область отстоит далеко от экваториального стандарта GSC 543 227, то привязки осуществлялись при разности воздушных масс между исследуемой областью и стандартной звездой, доходящей до 0.35. Поэтому мы проверили полученные данные дополнительными измерениями с помощью  $UBV$ -фотометра с фотоумножителем. Для этого мы провели в течение нескольких часов мониторинг переменной звезды и основной звезды сравнения, используя звезду HD 207232, находящуюся на удалении  $38'$  от исследуемой области, в качестве стандарта. Величины HD 207232 были взяты из каталога ГАИШ [15]. Приводимые в этом каталоге ультрафиолетовые величины  $W$  были пересчитаны в стандартную систему  $U$ . Результаты всех привязок совпали с хорошей точностью. Усредненные звездные величины объектов вместе с их ошибками представлены в табл. 1.

Мы получили наблюдения в восьми главных и пяти вторичных минимумах. Было обнаружено, что наблюдения в разные ночи показывают немного отличающиеся уровни внезатменного блеска. Для

**Таблица 2.** Таблица индивидуальных наблюдений

$JD_{hel}$	Зв. величина
245 5072.50004	11.078
245 5072.50058	11.075
245 5072.50128	11.078
245 5072.50241	11.077

Примечание. Полная версия таблицы доступна в электронном Приложении.

Таблица 3. Величины звезд окрестности V2647 Cyg

Number	$U$	$B$	$V$	$R$	$I$	$U-B$	$B-V$	$V-R$	$R-I$	
3	13.772	13.304	12.704	12.150	11.607	0.468	0.600	0.554	0.543	GSC 3612 1292
	0.016	0.005	0.006	0.007	0.014	0.017	0.008	0.009	0.016	
4	12.983	12.643	12.186	11.785	11.411	0.340	0.457	0.401	0.374	GSC 3612 1137
	0.020	0.006	0.007	0.008	0.015	0.021	0.009	0.011	0.017	

Примечание. Полная версия таблицы доступна в электронном Приложении. Номера звезд соответствуют карте окрестностей V2647 Cyg, представленной в электронном Приложении. В последнем столбце приведено название звезды. Для каждой звезды под строкой со звездными величинами указаны их погрешности.

приведения внезатменного блеска звезды к одному уровню в ходе решения кривых блеска были определены ночные поправки, составившие не более  $\pm 0.007^m$  от среднего значения. По данному показателю звезда оказалась самой “спокойной” из всех нами исследованных. Все звезды из табл. 1 можно считать постоянными в указанных пределах. Эти поправки учтены в таблице наблюдений, приведенной в электронном Приложении, образец которого показан в табл. 2.

Используя основную звезду сравнения GSC 3612 718 в качестве вторичного стандарта, с помощью ПЗС-матрицы VersArray 512UV, чувствительной к ультрафиолетовому излучению, и телескопа Цейсс-600 на г. Кошка в Крыму были определены звездные величины  $UBVRI$  всех звезд в области  $6' \times 6'$  с переменной в центре. Были выбраны звезды, для которых отношение сигнала к шуму в полосе  $U$  обеспечивало бы точность лучше  $\pm 0.1^m$ . Таких звезд, в дополнение к приведенным в табл. 1, измерено 13 (см. табл. 3). Самая слабая из них имеет величину  $U = 16.14(5)$ . Эти данные были использованы для исследования межзвездного поглощения в окрестности V2647 Cyg (см. рис. 1, 2).

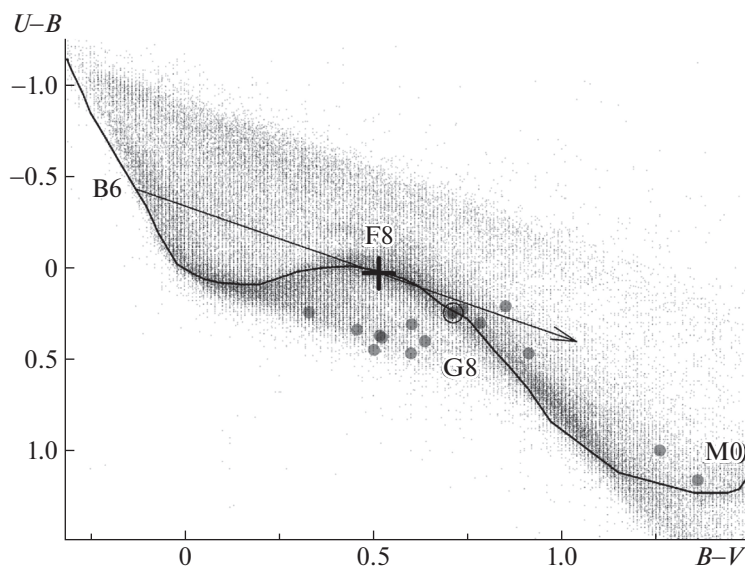
Все индивидуальные измерения переменной и средние величины звезд окрестности приведены в двух таблицах в электронном Приложении к данной статье. Фрагменты таблиц представлены в виде табл. 2 и 3. Таблица индивидуальных наблюдений (см. табл. 2) содержит в последовательном виде измерения во всех полосах  $U, B, V, R_c, R, I_c, I$ . В первом столбце этой таблицы представлена Юлианская гелиоцентрическая дата наблюдения, отнесенная к середине экспозиции, во втором — звездная величина объекта, исправленная за атмосферную экстинкцию и редуцированная в стандартную систему  $UBVRI(RI)_c$  Джонсона—Кузенса. Небольшие ночные поправки, полученные при окончательном решении кривых блеска, также учтены. В первом столбце таблицы величин

звезд окрестности (см. табл. 3) стоит номер звезды, соответствующий прилагаемой в электронном Приложении карте окрестности (север вверху, восток слева), затем идут звездные величины  $UBVRI$  и показатели цвета  $U-B, B-V, V-R, R-I$ . Под каждой строкой с величинами идет строка с их погрешностями. В последнем столбце указан, если есть, GSC-номер звезды.

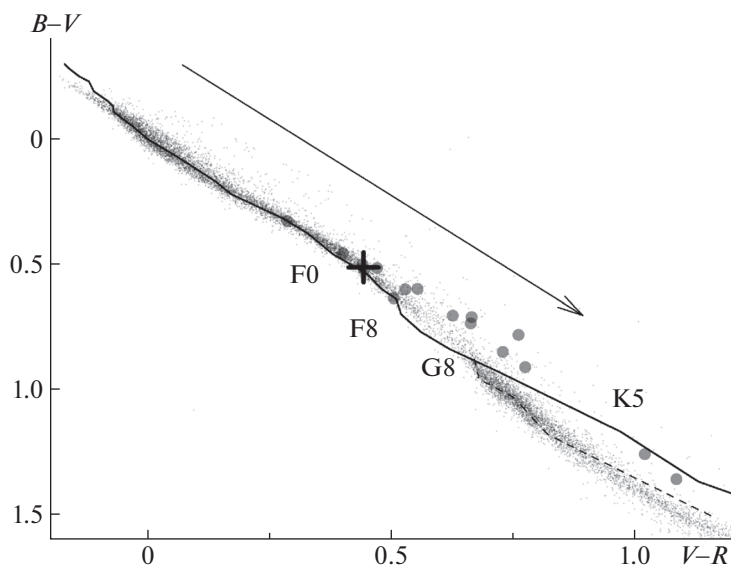
Звездные величины стандартной звезды GSC 3612 718 в системе Кузенса  $(RI)_c$  были получены пересчетом из показателей цвета  $V-R, R-I$  из табл. 1 по формулам из [18]. Они оказались равными  $V - R_c = 0.185(9)$ ,  $R_c - I_c = 0.264(17)$  и были использованы при вычислении звездных величин  $R_c, I_c$ , которые приведены в табл. 2 в электронном Приложении.

### 3. МЕЖЗВЕЗДНАЯ ЭКСТИНКЦИЯ И ТЕМПЕРАТУРА КОМПОНЕНТОВ

Температуру компонентов можно определить из наблюдаемых показателей цвета  $B-V$  звезды, исправленных за влияние межзвездного покраснения. В данном конкретном случае с определением межзвездного поглощения возникают трудности. Рассмотрим двухцветную диаграмму  $(U-B, B-V)$ , которая представлена на рис. 1. Исследуемая область расположена недалеко от Галактического экватора,  $b = -2.7^\circ$ , и из диаграммы видно, что влиянию межзвездного поглощения подвержены практически все звезды окрестности. Положение V2647 Cyg соответствует спектральному классу F8 V. Такой спектр имела бы звезда при нулевом межзвездном поглощении. Так как вектор межзвездного покраснения идет в данной области вдоль линии нормальных показателей цвета, то, с некоторыми допущениями, положение звезды удовлетворяет любому межзвездному поглощению в интервале  $0.0 < E(B-V) < 0.15$ . Если продлить



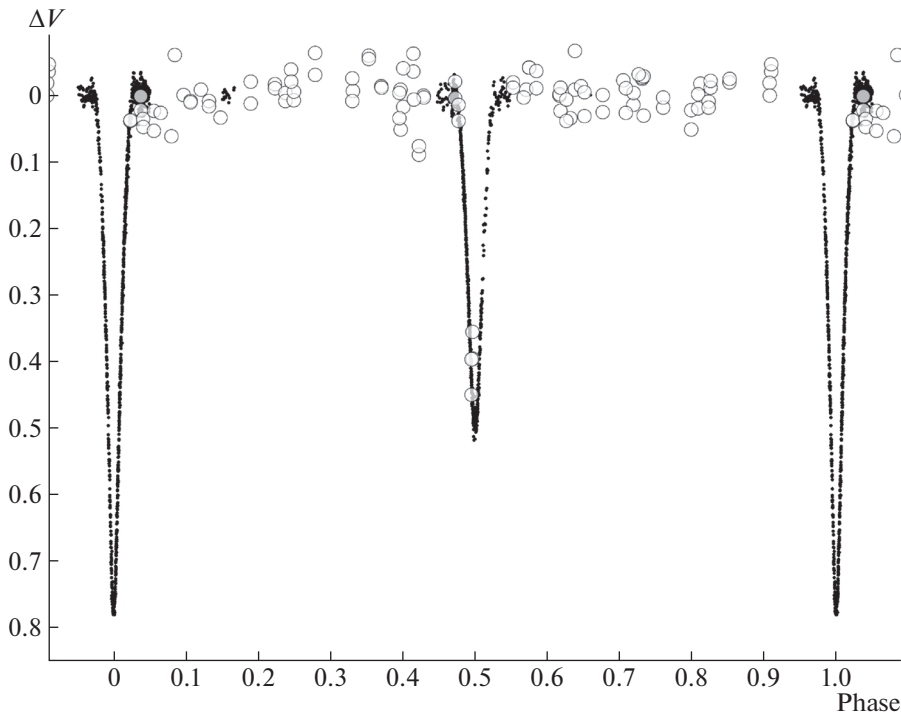
**Рис. 1.** Двухцветная диаграмма ( $U-B$ ,  $B-V$ ). Крестом показано положение V2647 Cyg. Серыми кружками обозначено положение звезд из ближайшей окрестности переменной. Сплошная линия показывает положение нормальных показателей цвета звезд пятого класса светимости согласно [16]. Стрелка указывает направление линии межзвездного покраснения. Указаны спектральные классы в месте пересечения этой линии с графиком нормальных показателей цвета. Облако точек — данные фотоэлектрического каталога [17]. Положение оптического спутника обведено кружком.



**Рис. 2.** Двухцветная диаграмма ( $B-V$ ,  $V-R$ ). Сплошная линия показывает положение нормальных показателей цвета для звезд пятого класса светимости, штриховая — третий класс светимости. Данные [16] для  $B-V$  были увеличены на  $0.02^m$ ,  $V-R$  уменьшены на  $0.02^m$ . Черным крестом показано наблюдаемое положение V2647 Cyg. Стрелка указывает вектор межзвездного покраснения.

вектор межзвездного покраснения дальше, то следующей точкой пересечения с линией нормальных показателей цвета будет область спектральных классов B6 при  $E(B-V) \approx 0.6$ , что значи-

тельно превышает величину среднего межзвездного поглощения в данном направлении. Однако в системах GG Ori [19], GSC 4292 0745 [20] и GSC 3152 1202 [21] мы обнаружили аномально



**Рис. 3.** Фазовая кривая V2647 Cyg, построенная по наблюдениям ROTSE (большие кружки) и нашим данным в полосе V (черные точки). Для вычисления фаз использованы эфемериды (1). Между минимумами преобладают наблюдения ROTSE. Средний блеск звезды на плато принят равным нулю. Видно, что наблюдений ROTSE в главном минимуме нет.

высокое поглощение, не совпадающее с данными обзоров, поэтому в данном исследовании будет рассмотрена и такая возможность.

Вначале мы воспользовались данными обзора [22], для этого нам необходимо знать расстояние до системы. Последовательными итерациями (см. в следующем разделе) была определена эта величина, она составила 350 пк. В работе [8] было указано, что определяемый из *UBV*-фотометрии фотометрический параллакс слабо зависит от величины межзвездного поглощения, поэтому даже при грубой начальной оценке поглощения итерации быстро сходятся. Обзор [22] дал значение  $E(B-V) = 0.13^{+0.03}_{-0.04}$ . Другие обзоры дают формально меньшие значения:  $E(B-V) = 0.08 \pm 0.04$  [23] и  $E(B-V) = 0.09 \pm 0.04$  [24].

Дополнительную возможность для независимого определения межзвездного поглощения в направлении системы предоставляет наличие оптического спутника. По положению спутника на двухцветной диаграмме также можно было бы оценить межзвездное поглощение. К сожалению, однозначной величины межзвездного поглощения получить невозможно, спутник допускает любое значение поглощения в интервале  $0.0 < E(B-V) < 0.3$ .

Из рис. 3 видно, что глубины минимумов заметно отличаются, следовательно, компоненты имеют различную поверхностную яркость, и разную

температуру. Определим температуру каждого из компонентов в отдельности, не прибегая пока к решению кривых блеска. В ходе затмения из общего потока излучения вычитается та доля, которая соответствует только затмеваемой звезде. Мы определяем эту долю по разности блеска звезды на плато и в каждой конкретной точке кривой блеска в минимуме. Прделав эти несложные вычисления для наблюдений в каждой из полос *UBVRI*, мы интерполировали данные к одинаковым фазам кривой блеска и определили показатели цвета. Несмотря на простоту данный способ пока широко не используется. Были получены графики, аналогичные представленным в нашей работе [11, рис. 6]. Наивысшую точность метод имеет для максимальных фаз затмений. Мы определили  $(B-V)_1 = 0.467$ ,  $(B-V)_2 = 0.571$ . Не имея пока решающих аргументов в пользу определенного значения межзвездного поглощения, мы приняли  $E(B-V) = 0.0$ , и из показателей цвета *B-V* для калибровок из работы [25] получили следующие температуры компонентов:  $T_1 = 6420$  К и  $T_2 = 6000$  К. Эти значения температур были приняты в качестве начальных при итерационном поиске решения. Окончательные значения, найденные после тщательного анализа многоцветных кривых блеска, увеличились примерно на 300 К (см. ниже)

**Таблица 4.** Фотометрические элементы V2647 Cyg в полосах *UBVRcIcI*, а также значения, принятые в последующих расчетах

Параметр	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>Rc</i>	<i>R</i>	<i>Ic</i>	<i>I</i>	Принято
$r_1$	0.0900(21)	0.0887(1)	0.0893(1)	0.0892(1)	0.0902(3)	0.0888(1)	0.0905(5)	0.0893(4)
$r_2$	0.0804(21)	0.0760(1)	0.0768(1)	0.0767(1)	0.0764(3)	0.0766(1)	0.0759(5)	0.0768(4)
$i, ^\circ$	89.0639(47)	89.99(3)	89.6816(8)	89.99(3)	89.6637(23)	89.99(3)	89.5293(28)	89.68(3)
$L_1$	0.658(17)	0.6552(6)	0.6378(6)	0.6263(7)	0.6276(15)	0.6147(7)	0.6215(25)	
$L_1^*$	0.6709(27)	0.6550(3)	0.6378(6)	0.6269(4)	0.6233(9)	0.6176(4)	0.6153(14)	
$u_1$	0.695	0.643	0.541	0.475	0.442	0.417	0.397	
$u_2$	0.746	0.682	0.569	0.499	0.466	0.439	0.418	
$r_1 + r_2$	0.1704(33)	0.1647(2)	0.1661(2)	0.1659(2)	0.1666(5)	0.1654(2)	0.1664(8)	0.1661(3)
$N$	259	1200	1491	735	245	923	244	
$\sigma_{o-c}$	0.0392	0.0114	0.0115	0.0101	0.0126	0.0118	0.0203	

Примечание.  $L_2 = 1 - L_1$ . Значения  $L_1$ , принятые в последующих расчетах, обозначены как  $L_1^*$ .  $r_1, r_2$  — радиусы звезд в единицах расстояния между центрами масс компонентов. Значения  $\sigma_{o-c}$  даны в звездных величинах.

соответственно и межзвездное поглощение оказалось совсем не нулевым.

#### 4. РЕШЕНИЕ КРИВЫХ БЛЕСКА

Наши наблюдения, а также наблюдения ROTSE [2] (см. рис. 3), показывают, что система практически не изменяет блеск между минимумами, эффекты близости незначительные. Поэтому анализ кривых блеска будет проводиться в модели двух сферических звезд с линейным законом потемнения к краю, обращающихся на круговой орбите,  $e = 0$ . Для решения кривых блеска мы использовали нашу программу, алгоритм которой описан в работе [26]. Линейные коэффициенты потемнения к краю из решения данных конкретных кривых блеска не определяются, поэтому их приходится задавать интерполяцией таблиц из работы [27]. Входными параметрами для этих таблиц служат температура звезды и значение ускорения свободного падения на ее поверхности. Окончательные результаты решений кривых блеска в различных спектральных полосах приведены в табл. 4. Первое, на что следует обратить внимание, это то, что в полосах *BRcIc* значения угла наклона орбиты ушли на границы допустимых значений, максимально приблизившись к  $90^\circ$ . Также обращают на себя внимание значительные ошибки этого параметра. Все это указывает на то, что

угол наклона орбиты из указанных кривых блеска надежно не определяется. Причина, возможно, кроется в небольших систематических ошибках в наблюдениях в данных спектральных полосах. К счастью, из наиболее точных и многочисленных наблюдений в полосе *V* минимум *O-C* может быть найден для всех параметров, участвующих в поиске, в том числе и для угла наклона орбиты. Угол наклона орбиты определяется также из решений в полосах *R, I*, но наблюдений в них гораздо меньше, чем в полосе *V*. Значения остальных геометрических параметров системы хорошо совпадают для всех решений. Если взять их средневзвешенные значения, то они оказываются близкими к параметрам, полученным для полосы *V*. Поэтому, также как и в предыдущей нашей работе [11], мы предпочли не брать средневзвешенные значения параметров, а взять за основу решение в полосе *V*.

Зафиксировав значения элементов, полученные в полосе *V*, мы нашли относительные светимости компонентов в каждой из фотометрических полос. Эти значения приведены в табл. 4 в строке " $L_1^*$ ". Столбцы в табл. 4 расположены слева направо в сторону увеличения длин волн. Для этих относительных светимостей были вычислены показатели цвета компонентов, они приведены в табл. 5.

Теперь вернемся на некоторое время назад и поясним, каким именно образом мы пришли к оконча-

Таблица 5. Абсолютные параметры V2647 Cyg

Параметр	Главный компонент	Вторичный компонент
$M, M_{\odot}$	$1.30 \pm 0.10$	$1.14 \pm 0.10$
$R, R_{\odot}$	$1.25 \pm 0.03$	$1.08 \pm 0.03$
$L, L_{\odot}$	$2.85 \pm 0.10$	$1.66 \pm 0.09$
$T_{\text{eff}}, \text{K}$	$6760 \pm 150$	$6340 \pm 100$
Sp	F4 V	F6 V
$\lg g, \text{cm}/\text{c}^2$	$4.356 \pm 0.008$	$4.428 \pm 0.007$
$V$	$11.564 \pm 0.008$	$12.179 \pm 0.008$
$U-B$	$0.004 \pm 0.016$	$0.081 \pm 0.016$
$B-V$	$0.485 \pm 0.012$	$0.567 \pm 0.012$
$V-R$	$0.418 \pm 0.015$	$0.486 \pm 0.015$
$R-I$	$0.320 \pm 0.020$	$0.357 \pm 0.020$
$E(B-V)$	$0.090 \pm 0.02$	
V.C.	0.021	-0.006
$M_v$	$3.53 \pm 0.08$	$4.15 \pm 0.07$
$a, R_{\odot}$	$14.02 \pm 0.50$	
$d, \text{пк}$	$353 \pm 10$	
$\pi_{ph}, ''$	$0.00283 \pm 0.00020$	

Примечание. В таблице приведены:  $T_{\text{eff}}$  — эффективные температуры звезд; Sp — спектральные классы, оцененные по  $UBV$ -фотометрии;  $g$  — гравитационное ускорение; значения потоков  $V$ ,  $U-B$  и пр. даны в звездных величинах;  $E(B-V)$  — межзвездное поглощение в звездных величинах; V.C. — болометрические поправки в звездных величинах;  $M_v$  — абсолютные визуальные величины;  $a$  — большая полуось;  $d$  — расстояние до системы;  $\pi_{ph}$  — фотометрический параллакс в секундах дуги.

тельному решению, представленному в табл. 4. Геометрические параметры системы через коэффициенты потемнения к краю связаны с температурами звезд-компонентов. Но в предыдущем разделе мы не смогли определить точные значения межзвездного покраснения, и, следовательно, нормальные показатели цвета  $B-V$ , а из них и температуры. Для решения вопроса мы воспользовались теми возможностями, которые предоставляет нам наша программа решения кривых блеска.

Сначала мы провели численный эксперимент по исследованию зависимости невязок модельной кривой блеска от температуры, с которой они

связаны через коэффициенты потемнения к краю. Подобное исследование проводилось нами в работе [11] и дало хорошие результаты — была получена независимая от межзвездного поглощения оценка температуры звезд-компонентов. В работе [11] температура компонентов оказалась одинаковой. В нашем случае температуры компонентов отличаются довольно значительно, ведь показатели цвета  $B-V$  обеих звезд отличаются примерно на  $0.08^m$  (см. табл. 5). Поэтому последовательность наших действий была немного иной: задавался показатель цвета  $B-V$  главного компонента, из таблицы в работе [25] определялась его температура. Температура вторичного компонента определялась из тех же таблиц для показателя цвета на  $0.08^m$  краснее. Затем интерполяцией таблиц из работы [27] фиксировались линейные коэффициенты потемнения к краю для обеих звезд. Варьируя четыре параметра — относительные размеры звезд, угол наклона орбиты и относительную светимость компонентов — мы с помощью нашей программы решения кривых блеска находили минимум невязок для варьируемой температуры главного компонента. Результаты представлены на рис. 4.

В полосе  $B$  наблюдается ярко выраженный минимум в районе 6100 К. Для фильтров  $V$  и  $R$  решения практически одинаково хорошо удовлетворяют интервалу температур от 6000 до 8000 К с неглубоким минимумом на 7500 К в  $V$  и 6100 К в  $R$ . В полосе  $Rc$  картина сложнее. Здесь мы видим локальный минимум на температуре 6700 К, после чего ошибки асимптотически уменьшаются в сторону низких температур. Таким образом, наш эксперимент не позволил уверенно остановиться на каком-то определенном значении температуры, но позволяет сделать два вывода. Во-первых, мы можем уверенно исключить для звезд-компонентов область спектральных классов в районе  $B6$  с температурами более 11 000 К, для которых ошибки решений очень велики и есть заметные систематические отклонения между решением и наблюдаемыми точками. Следовательно, межзвездное поглощение не является аномально высоким. И, во-вторых, корреляция с температурой все-таки есть и, что удивительно, среднее значение температуры главного компонента, полученное из всех кривых блеска, равно 6600 К, что близко к окончательно принятому значению температуры 6760 К (см. табл. 5). Метод в данном случае тоже работает, хотя и не дает высокой точности.

В принципе, на данном этапе, учитывая слабую зависимость решения от температуры в полосе  $V$ , которое является в нашем исследовании основным, можно было бы остановиться, а температуру главного компонента ориентировочно принять равной 6600 К с ошибкой порядка 400 К. Но мы пошли

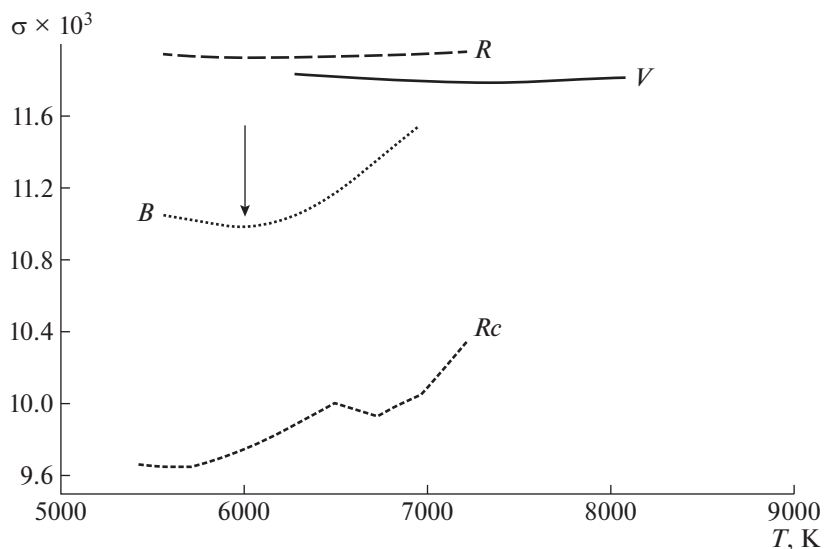


Рис. 4. Определение температуры звезды. Графики невязок фотометрических решений в  $B$ ,  $V$ ,  $Rc$  и  $R$ . Ошибки показаны в реальном масштабе.

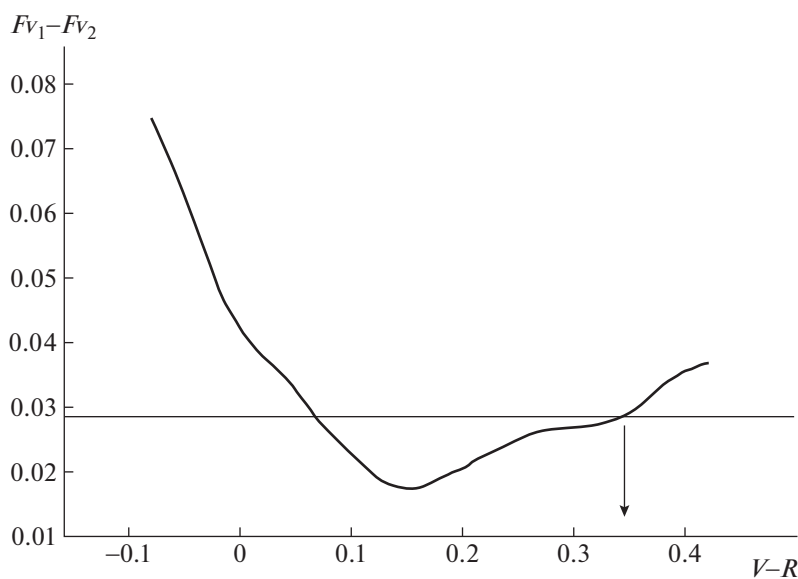


Рис. 5. Зависимость разности поверхностных яркостей компонентов в полосе  $V$  от нормального показателя цвета  $V-R$  главного компонента. Горизонтальная линия — значение разности поверхностных яркостей, полученное из решения кривых блеска. Стрелкой указано принятое значение  $V-R$  для главного компонента.

несколько дальше и впервые в нашей практике воспользовались результатами работы [28], в которой исследована зависимость поверхностной яркости звезды в полосе  $V$  от показателей цвета  $U-B$ ,  $B-V$  и  $V-R$ . Обычно этой зависимостью пользуются, чтобы определить разность температур звезд-компонентов, когда наблюдения прово-

дятся только в одной фотометрической полосе  $V$  (см., напр., [29]). В нашем же исследовании разность температур по показателям цвета определяется из решения многоцветных кривых блеска. Реально можно построить зависимость разности поверхностных яркостей компонентов от абсолютной температуры главного компонента. Результат



представлен на рис. 5. Используя этот график, мы построили следующий итерационный процесс поиска оптимального решения. Как уже было сказано в предыдущем разделе, на первом шаге мы взяли температуры компонентов, которые соответствовали полному отсутствию межзвездного поглощения. Определив из таблиц [27] коэффициенты потемнения к краю для каждой из полос, мы получили первый вариант табл. 4. Таким образом, стало понятно, что наилучший результат получается для полосы  $V$ , и в анализе следует опираться именно на эти наблюдательные данные.

Зафиксировав геометрические параметры из решения в  $V$ , мы получили относительные светимости для всех семи фотометрических полос. На этом этапе с помощью той же программы решения кривых блеска мы получили индивидуальные моменты минимумов, что позволило вычислить точные значения периода и начальной эпохи. С этого момента период и начальная эпоха были зафиксированы и больше не варьировались. Переведа относительные светимости в фильтрах  $V$  и  $R$  с помощью звездных величин на плато из табл. 1 в разности показателей цвета  $V-R$ , мы построили график, аналогичный представленному на рис. 5. Мы говорим здесь аналогичный потому, что этот график строился на каждом итерационном шаге заново, ведь решения уточнялись и значения показателей цвета  $V-R$  изменялись. На рис. 5 представлен график, полученный после окончания итерационного процесса. По оси абсцисс отложен нормальный показатель цвета  $V-R$  главного компонента, а по оси ординат откладывается разность поверхностных яркостей главного и вторичного компонентов. Эта же разность может быть получена как  $F_{v2} - F_{v1} = 0.25 \lg I_{v2}/I_{v1}$ . В правой части стоят величины, которые легко вычисляются на основании данных табл. 4.

В результате уже на первом шаге итераций мы получили нормальные показатели цвета компонентов  $V-R$ , вычислили значение  $E(V-R)$ , из которого можно определить  $E(B-V)$  [16]. Зная нормальный показатель цвета  $B-V$ , из таблиц [25] получаем температуры звезд. Определив температуры, мы косвенным методом, описанным в [30, 31], получаем абсолютные параметры системы, в том числе,  $\lg g$ , что дает нам возможность определить коэффициенты потемнения к краю и запустить весь процесс снова. Уже на третьем шаге расчетов итерации сошлись. В табл. 4, 5 приведены окончательно принятые значения параметров. Ошибки, приведенные в последней строке табл. 4, хорошо характеризуют среднюю точность наблюдений в каждой из фотометрических полос. Полученное нами только на основании наших наблюдений значение межзвездного поглощения  $E(B-V) = 0.09 \pm 0.02$

хорошо совпало с данными обзоров [23, 24], хотя результаты [24] имеют заметно большее значение.

На промежуточных этапах итераций проводились проверки решения на наличие третьего света. Как уже было отмечено, звезда является довольно широкой визуальной парой. Мы использовали при обработке кадров апертуру порядка  $3''-4''$ , расстояние между компонентами визуальной пары составляет  $9.5''$ , и в ночи с очень плохими изображениями небольшая доля света спутника могла бы измеряться вместе с блеском звезды. Но результат оказался отрицательным, третий свет в решениях обнаружен не был.

На рис. 6 показана фазовая кривая блеска в полосе  $V$ , под которой приведен ход остатков  $O-C$  для решений в каждой из спектральных полос. Видно, что систематических отклонений наблюдаемых точек от решений для полосы  $V$  нет. В других полосах, особенно в  $BRIc$ , такие отклонения заметны. Основной массив наблюдений в этих полосах был получен на метровом телескопе с матрицей FLI PL09000 в течение всего 2–3 ночей. Мы предполагаем, что наблюдающиеся систематические отклонения являются следствием инструментальных ошибок данной матрицы. В полосе  $V$  наблюдения с этой же аппаратурой и в эти же ночи тоже имеют систематические отклонения. Но большое количество измерений в полосе  $V$  в другие ночи позволяет перевести эти систематические ошибки в разряд случайных.

## 5. АБСОЛЮТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ, СРАВНЕНИЕ С ТЕОРИЕЙ

Используя данные об относительных размерах и светимостях звезд-компонентов из табл. 4, а также их температур, нами были вычислены абсолютные значения масс и размеров звезд (см. табл. 5). Был использован тот же способ, что и в наших предыдущих работах. Метод основан на эмпирическом законе “масса-светимость” и третьем законе Кеплера, он детально описан в [30, 31]. Ошибки определения масс мы оценили, проведя вычисления для затменных звезд из каталога [32], в котором массы определены с высокой точностью из наблюдений лучевых скоростей. Для масс звезд, немного превышающих солнечные, ошибка среднего значения равна  $\pm 0.1 M_{\odot}$ . Абсолютные параметры системы приведены в табл. 5.

Хотя точность определяемых косвенным способом масс не превышает десяти процентов, все же интересно провести сравнение данных из табл. 5 с теоретическими моделями [33]. Мы построили два графика, зависимость  $\lg g$  от  $\lg T$  (рис. 7) и  $\lg L$  от  $\lg T$  (диаграмма Герцшпрунга–Рессела) (см.

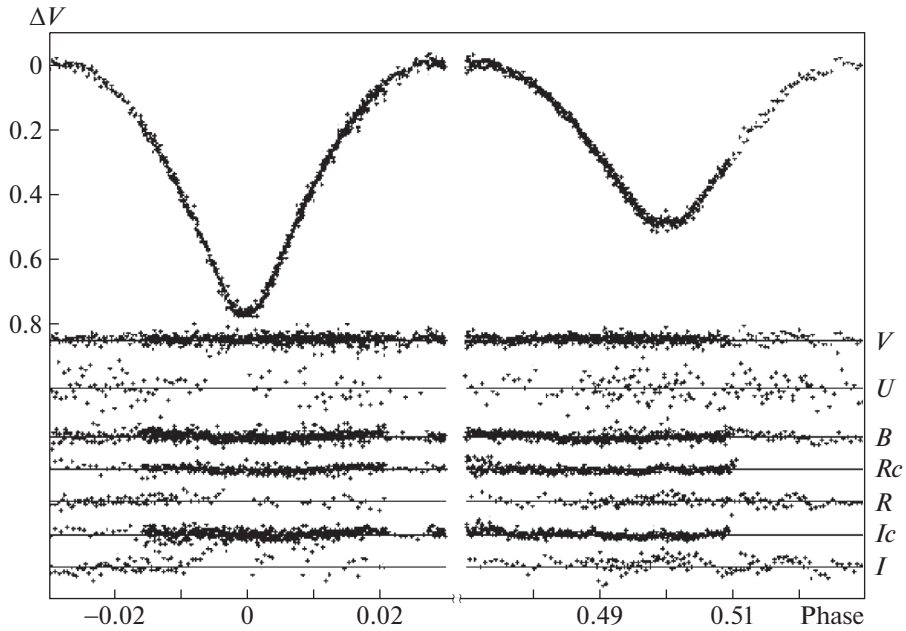


Рис. 6. Наблюдения в минимумах в полосе  $V$ . Под кривой блеска представлены уклонения  $O-C$  наблюдаемых точек от модельной кривой в каждой из фотометрических полос.

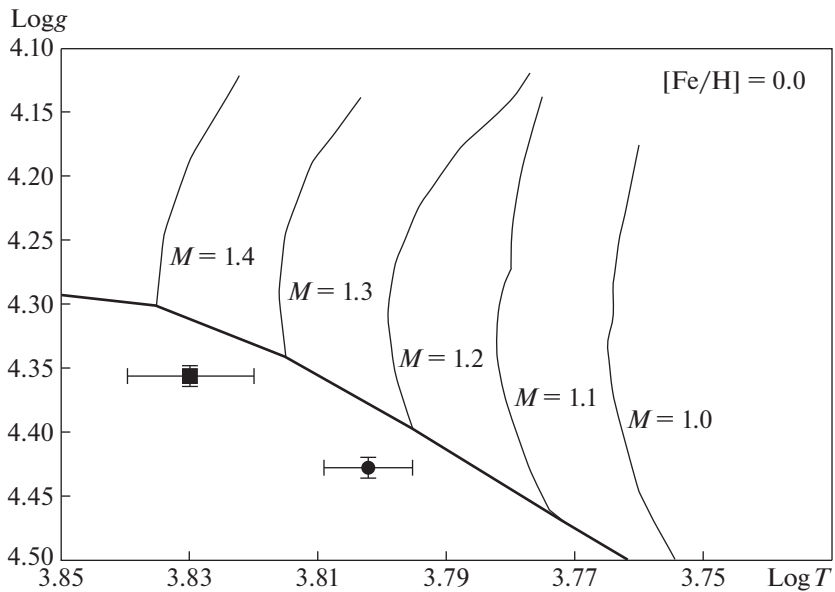
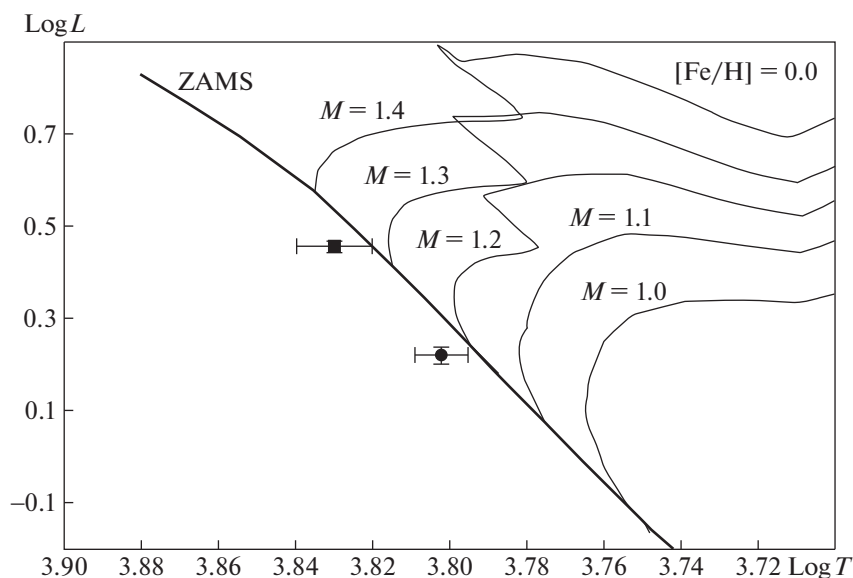


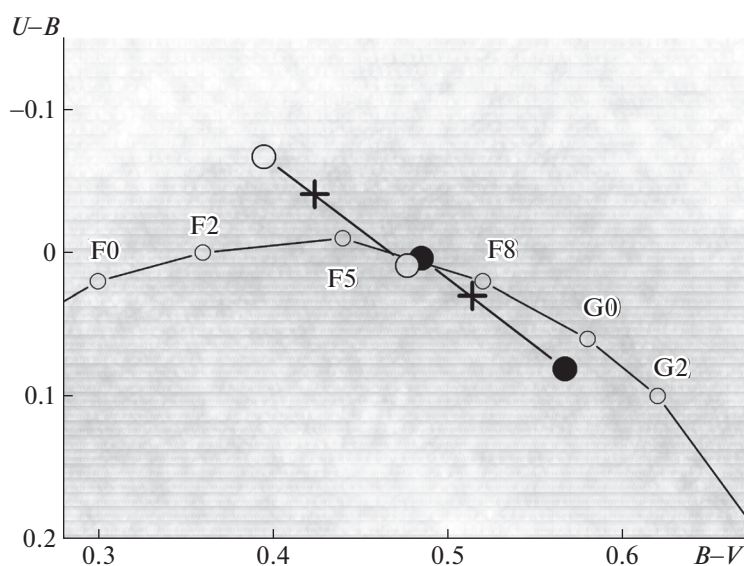
Рис. 7. Эволюционные треки, показывающие зависимость ускорения свободного падения  $g$  от температуры звезды  $T$ , построенные по данным [33] для избранных масс звезд солнечной металличности. Сплошной жирной линией показано положение начальной последовательности. Главный компонент обозначен квадратом, вторичный — кружком. Показаны ошибки определения параметров.

рис. 8). На обоих графиках нанесены эволюционные треки для нескольких масс звезд солнечной металличности из таблиц [33]. Как и в случае с V798 Сер [10], лучшее согласие с теорети-

ческими расчетами достигается в предположении именно солнечной металличности, хотя диаграмма  $(U-B, B-V)$  указывает на небольшой избыток металлов у главного компонента. Положение звезд



**Рис. 8.** Зависимость светимости звезд  $L$  в солнечных единицах от их температуры  $T$  для избранных масс и солнечной металличности согласно [33]. Показано положение начальной Главной Последовательности ZAMS. Главный компонент обозначен квадратом, вторичный — кружком. Показаны ошибки определения параметров.



**Рис. 9.** Двухцветная диаграмма ( $U-B$ ,  $B-V$ ), построенная в крупном масштабе. Заполненные круги — наблюдаемое положение звезд-компонентов, незаполненные — положение звезд-компонентов, исправленное за межзвездное покраснение. Ломаная кривая — линия нормальных показателей цвета из [16]. Крестики — положение комбинированного спектра звезды до и после исправления за межзвездную экстинкцию. Серым фоном, как и на рис. 1, обозначены звезды из каталога [17].

под линией нулевого возраста на рис. 7, 8 говорит о молодости системы. Точный возраст системы из этих графиков определить невозможно. Для более определенных выводов о массах звезд и об их эволюционном статусе следует получить кривую лучевых скоростей системы.

Положение компонентов на двухцветной диаграмме (рис. 9) может свидетельствовать о различии их химического состава. Это довольно странно для звезд, связанных общим происхождением. Но подобные аномалии уже наблюдались в некоторых затменных системах не только при фотометри-

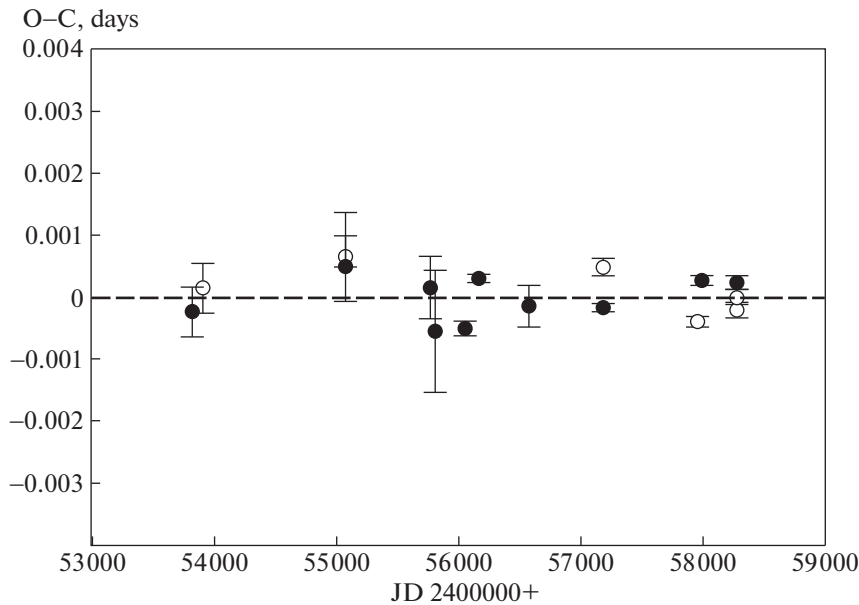


Рис. 10. График  $O-C$ , построенный в соответствии с эфемеридами (1). Главные минимумы показаны заполненными, вторичные — незаполненными кружками. Вертикальные отрезки — ошибки в определении моментов минимумов.

ческих, но и при спектральных наблюдениях [8, 34, 35]. Объяснить подобное расхождение можно различием в химическом составе атмосфер звезд, вызванном условиями перемешивания в ходе эволюции. Химический же состав ядер должен быть одинаковым. Возможно, в данной звезде мы имеем похожий случай.

Зная температуры и размеры звезд, мы можем определить расстояние до системы. Фотометрический параллакс оказался равен  $\pi_{ph} = 0.0028'' \pm \pm 0.0002''$ , значение, которое практически совпадает с величиной, определенной прямым измерением миссией GAIA,  $\pi = 0.00276'' \pm 0.0006''$  [36], что дает дополнительное подтверждение надежности определенных нами физических параметров системы.

Вычислим теперь физические характеристики оптического спутника V2647 Cyg, предположив его принадлежность системе. Исправив наблюдаемые показатели цвета из табл. 1 за межзвездное поглощение, определим его температуру в 5800 К. Учитывая расстояние до системы, получим значение светимости  $L_3 = 0.4L_{\odot}$  и радиус  $R_3 = 0.63R_{\odot}$ . Такие параметры не противоречат теоретическим значениям [33] при условии крайней молодости звезды и массы в пределах 0.9–1.1 солнечных. Полученная нами температура звезды больше соответствует верхней границе этого интервала, а светимость — нижней. Мы наблюдаем звезду, которая со временем превратится в близкий аналог Солнца.

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ $O-C$

Многие затменные системы показывают наличие невидимых спутников. Самым надежным способом выявления невидимых компонентов является исследование периодичностей в ходе остатков  $O-C$  моментов минимумов. Для этого необходимо получить точные моменты минимумов. Воспользуемся нашей программой решения кривых блеска. Варьируя только начальную эпоху, мы добивались наилучшего совпадения между теоретическими кривыми блеска, построенными с параметрами из табл. 4, и наблюдениями в конкретном минимуме. Если наблюдения проводились одновременно в нескольких фотометрических полосах, то вычислялось средневзвешенное значение. Результаты представлены в табл. 6, в скобках указаны ошибки определения моментов минимумов. В работах [37, 38] приводятся еще три момента минимумов. Клеидис [38] предоставил нам свои оригинальные наблюдения в двух главных минимумах. Данные оказались высокого качества, мы смогли их обработать нашей программой решения кривых блеска и получить два точных момента минимумов. Один из них был уже опубликован в [38] и наше новое значение совпадает с опубликованным. Второй момент ранее не публиковался. С разрешения автора мы приводим его в табл. 6. Клеидис использовал короткофокусный телескоп, и при обработке кадров оптический спутник измерялся вместе с затменной переменной. Так как блеск спутника нам известен с хорошей точностью (см. табл. 1), мы вычли его из предоставленных нам измерений и получили

Таблица 6. Наблюдавшиеся моменты минимумов

Моменты минимумов $JD_{hel} 240\ 0000+$	Эпоха	$O-C$	Примечание
53817.64371(40)	-1142	-0.00038	V [37]
53905.47340(40)	-1119.5	0.00001	V [37]
55072.62788(72)	-820.5	0.00052	V, FLI PL09000, Ц1000, КрАО
55078.48302(20)	-819	0.00037	V [38]
55769.40661(10)	-642	0.00004	V, Kleidis, частное сообщение, наши вычисления
55808.44116(98)	-632	-0.00066	V, Максудов 180mm, ST-10XME, Словакия
56050.45975(12)	-570	-0.00061	$BV(RI)c$ , Ц600, Moravia G4-9000
56167.56630(7)	-540	0.00019	$UBV(RI)c$ , Ц600, Moravia G4-9000
56577.43599(33)	-435	-0.00024	$UBV$ , Ц600, ФЭУ ЕМ1 9789, КрАО
57180.53124(14)	-280.5	0.00040	$UBVRI$ , Ц600, VersArray 512UV, КрАО
57186.38587(7)	-279	-0.00026	$BV(RI)c$ , Ц1000, FLI PL09000, КрАО
57957.33184(8)	-81.5	-0.00046	$UBVRI$ , Ц600, VersArray 512UV, КрАО
57990.51246(8)	-73	0.00019	$UBVRI$ , Ц600, VersArray 512UV, КрАО
58273.51755(13)	-0.5	-0.00028	$BV(RI)c$ , Ц1000, FLI PL09000, КрАО
58275.46976(11)	0.0	0.00017	$BV(RI)c$ , Ц1000, FLI PL09000, КрАО
58277.42129(13)	0.5	-0.00006	$UBVRI$ , Ц600, VersArray 512UV, КрАО

Примечание. В столбце Примечание приведены использованные фильтры и аппаратура для наблюдений на телескопах: Цейсс-600 (Ц600), Цейсс-1000 (Ц1000). Символом КрАО помечены наблюдения, выполненные в филиале Крымской Астрофизической Обсерватории на г. Кошка.

надежный результат. Также были добавлены два момента минимума из [37]. Два момента минимума из [39] оказались плохого качества. Это подтверждается значительными ошибками, которые присвоили им сами авторы. Поэтому эти данные мы не использовали, и в табл. 6 они не представлены.

Линейная регрессия данных из табл. 6, с учетом индивидуальных весов каждого момента минимума, приводит к следующей формуле:

$$HJD_{Min} II = 2458275.46952(9) + \quad (1) \\ + 3.90352503(13)^d \times E.$$

Остаточные отклонения от линейной формулы (1) приведены в третьем столбце табл. 6 и на рис. 10. Они были исследованы нашей программой поиска периодов переменных звезд методом скользящего среднего (не опубликовано). Период искался от

почти нулевых значений до половины двенадцатилетнего интервала наблюдений. Никаких периодичностей с амплитудой, которая превышала бы  $0.0001^d$ , найдено не было. Этому вопросу было уделено особое внимание, так как на начальных этапах обработки мы заподозрили малоамплитудные периодические изменения в  $O-C$  и небольшой третий свет в наших кривых блеска. Новые наблюдения, полученные в 2018 г., а также любезно предоставленные нам оригинальные наблюдения Клейдиса, позволили избежать ошибки.

Хотя вторичные минимумы являются менее глубокими, точность определения моментов для них такая же, как и для главных. В данном исследовании точность определения индивидуального момента минимума составила 25 с при продолжительности самого минимума 4.8 часа, что несколько хуже точности, достигнутой нами в предыду-

щих исследованиях [11]. Возможно, это объясняется влиянием систематических инструментальных ошибок, о чем уже говорилось ранее.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы получили надежные относительные и абсолютные параметры двойной затменной системы V2647 Cyg. Орбита звезды оказалась круговой, а не эллиптической, как считалось ранее. Система состоит из пары близких по массе молодых звезд спектральных классов F4 V + F6 V и оптического спутника. Для определения температур звезд мы использовали ранее не применявшийся метод, основанный на связи относительной поверхностной яркости звезд-компонентов с разностью их показателей цвета  $V-R$ . Полученные из наших данных значения межзвездного поглощения и расстояние до системы хорошо совпали с измерениями, проведенными другими способами, что служит дополнительным критерием надежности полученных результатов.

Система очень интересна с точки зрения исследования синхронизации звезд и циркуляризации орбит, так как массы и размеры звезд относительно невелики, возраст системы незначителен, но орбита уже является круговой. Для уточнения масс и абсолютных размеров звезд необходимо получить кривую лучевых скоростей.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была выполнена при частичной поддержке стипендии Словацкого информационного агентства SAIA (АСК, ИМВ), гранта РФФИ 14-12-00146(ИМВ), гранта РФФИ № 11-02-01213а (ИМВ), гранта VEGA 2/031/18 (ДХ) и гранта APVV-15-0458 (ДХ).

## БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались база данных SIMBAD Страсбургского центра астрономических данных (Франция) и служба библиографических ссылок ADS (NASA, США). Приносим нашу благодарность анонимному рецензенту, чьи замечания позволили исправить допущенные нами неточности и значительно улучшить качество изложения материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. A. Otero, P. Wils, G. Hoogeveen, and P. A. Dubovsky, *Inform. Bull. Var. Stars* № 5681, 1 (2006).
2. P. R. Wozniak, W. T. Vestrand, C. W. Akerlof, R. Balsano, et al., *Astron. J.* **127**, 2436 (2004).
3. E. V. Kazarovets, N. N. Samus, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Inform. Bull. Var. Stars* № 6052, 1 (2013).
4. I. Bulut and O. Demircan, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **378**, 179 (2007).
5. И. М. Волков, Н. С. Волкова, *Астрон. журн.* **86**(2), 158 (2009).
6. В. М. Александрович, дипломная работа (М.: МГУ им. Ломоносова, 2005) (<https://istina.msu.ru/diplomas/4969717/>).
7. N. N. Samus, E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astron. Rep.* **61**(1), 80 (2017).
8. И. М. Волков, Н. С. Волкова, Д. Хохол, *Астрон. журн.* **87**(5), 1 (2010).
9. И. М. Волков, Н. С. Волкова, И. В. Николенко, Д. Хохол, *Астрон. журн.* **88**(9), 894 (2011).
10. И. М. Волков, Д. Хохол, А. С. Кравцова, *Астрон. журн.* **94**, 436 (2017).
11. Л. А. Багаев, И. М. Волков, И. В. Николенко, *Астрон. журн.* **95**(10), 702 (2018).
12. T. J. Moffett and T. G. Barnes, *Astron. J.* **84**, 627 (1979).
13. A. U. Landolt, *Astron. J.* **137**, 4186 (2009).
14. В. Г. Мошкалев, Х. Ф. Халлиулин, *Астрон. журн.* **62**(4), 393 (1985).
15. В. Г. Корнилов, И. М. Волков, А. И. Захаров, В. С. Козырева, и др., *WBVR Каталог ярких северных звезд* (МГУ, Москва, 1991).
16. V. Straižys, *Multicolor Stellar Photometry* (Tucson: Pachart Publ. House, 1992).
17. J. C. Mermilliod, M. Mermilliod, and B. Hauck, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 349 (1997).
18. B. J. Taylor, *Astrophys. J. Suppl.* **60**, 577 (1986).
19. И. М. Волков, Х. Ф. Халиуллин, *Астрон. журн.* **79**(9), 747 (2002).
20. I. M. Volkov, L. A. Bagaev, and D. Chochol, in *Living Together: Planets, Host Stars and Binaries*, edited by S. M. Rucinski, G. Torres, and M. Zejda, Proc. Conference, Sept. 8–12, 2014, Litomyšl, Czech Republic, *ASP Conf. Ser.* **496**, 266 (2015).
21. I. Volkov, D. Chochol, and L. Bagaev, Abstracts of Intern. Conference *The Impact of binaries on stellar evolution*, July 3–7, 2017, ESO Garching, Germany.
22. G. M. Green, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, H.-W. Rix, et al., *Astrophys. J.* **810**, 25 (2015).
23. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
24. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
25. P. J. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996).
26. А. И. Халиуллина, Х. Ф. Халиуллин, *Астрон. журн.* **61**(4), 393 (1984).
27. R. A. Wade and S. M. Rucinski, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **60**, 471 (1985).

28. T. G. Barnes, D. S. Evans and T. J. Moffett, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **183**, 285 (1978).
29. D. M. Popper, *Astrophys. J.* **254**, 203 (1982).
30. Kh. F. Khaliullin, *Astrophys. J.* **299**, 668 (1985).
31. I. M. Volkov, D. Chochol, J. Grygar, M. Mašek and J. Juryšek, *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso* **47**, 29 (2017).
32. Z. Eker, S. Bilir, F. Soyduğan, E. Yaz. Gökçe, et al., *Publ. Astron. Soc. Australia* **31**, id. e024 (2014).
33. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 371 (2000).
34. Х. Ф. Халиуллин, А. И. Халиуллина, А. В. Крылов, *Астрон. журн.* **78**(11), 1014 (2001).
35. Л. С. Любимков, Т. М. Рачковская, *Астрон. журн.* **72**(1), 64 (1995).
36. X. Luri, A. G. Brown, L. Sarro, F. Arenou, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A9 (2018).
37. L. Brát, M. Zejda, and P. Svoboda, *B. R.N. O. Contributions* **34**, 1 (2007).
38. P. Lampens, S. Kleidis, P. Van Cauteren, F. J. Hamsch, M. Vanleenhove and S. Dufoer, *Inform. Bull. Var. Stars № 5933*, 1 (2010).
39. W. Ogłóza, M. Drozd, J. M. Kreiner, G. Stachowski, M. Winiarski, and B. Zakrzewski, *Inform. Bull. Var. Stars № 6193*, 1 (2017).