

УДК 524.386

## ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА ЗАТМЕННО-ДВОЙНЫХ СИСТЕМ RY Aur, GG Cas, RS Lep и RV Tri

© 2019 г. А. И. Халиуллина\*

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

Поступила в редакцию 03.04.2019 г.; после доработки 29.04.2019 г.; принята к публикации 29.04.2019 г.

В затменно-двойных системах RY Aur, GG Cas, RS Lep и RV Tri изучены изменения орбитального периода. Показано, что изменения периода всех этих систем можно представить в виде суперпозиции его векового уменьшения и циклических изменений, которые можно объяснить световым уравнением вследствие присутствия третьего тела в системе. Вековое уменьшение периодов может быть вызвано магнитным торможением.

DOI: 10.1134/S0004629919090032

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении эволюции тесных двойных систем типа Алголя следует принимать во внимание многие физические механизмы (консервативный и неконсервативный перенос вещества, приливные эффекты, магнитное торможение и т.п.). Наблюдательными проявлениями процессов, происходящих в этих системах, являются изменения орбитальных параметров, в частности, периода. Прежде чем делать выводы о характере физических процессов, приводящих к вековому увеличению или уменьшению периода, следует убедиться в достоверности полученных данных, в том, что период действительно меняется монотонно. Довольно часто для затменно-двойной системы имеется много фотографических и визуальных наблюдений и только небольшое количество фотоэлектрических. Низкая точность фотографических и визуальных данных затрудняет интерпретацию изменений периода. Кроме того, при большом периоде циклических изменений орбитального периода и недостаточно длительном ряде наблюдений циклические изменения можно принять за монотонные. Например, в затменно-двойных системах TW Cas, RW CrB, FK Aql, FZ Del, TU Sps изменения орбитального периода вначале принимались за вековые, однако подробное их изучение показало, что то, что считалось частью параболы, на самом деле часть синусоиды [1–4].

В данной работе продолжено изучение изменений орбитальных периодов затменно-двойных систем, в которых подозревается вековое уменьшение периода, с целью накопления достоверных

данных о системах с уменьшением периода. Рассмотрены диаграммы  $O - C$  четырех затменно-двойных систем, для которых имеется вообще мало наблюдательных данных и особенно мало высокоточных данных. Однако имеющиеся к настоящему времени моменты минимумов для каждой из этих систем позволяют сделать вывод о том, что орбитальный период меняется, и наблюдается общий тренд, указывающий на уменьшение периода. Для исследования изменений периода каждой из затменно-двойных систем были использованы моменты минимумов из базы данных В. Р. Н. О. [5]. Начальные значения параметров световых уравнений определялись методом перебора в области их возможных значений. Затем они уточнялись методом дифференциальных поправок [6] совместно с линейными или квадратичными элементами. Одновременно вычислялись ошибки определения параметров. Отклонение наблюдаемых ( $O$ ) точек от теоретической ( $C$ ) кривой, вычисленной согласно соответствующему представлению, характеризовалось величиной стандартного отклонения:

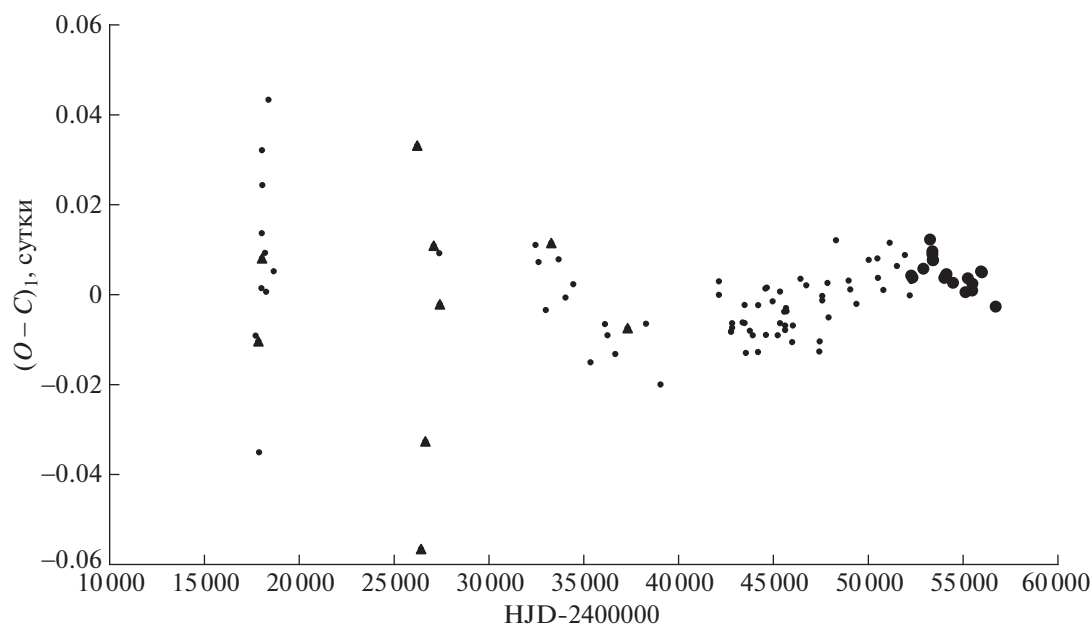
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (O - C)_k^2}{N - 1}},$$

где  $N$  — число наблюдений.

### 2. ИЗМЕНЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА RY AUR

Переменность звезды **RY Aur** (HD 280752,  $V = 11.7^m$ ,  $P = 2.7254^d$ ) обнаружила Цераская [7], в этой же работе определен тип переменности.

\*E-mail: hfh@sai.msu.ru



**Рис. 1.** Отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых ( $O$ ) моментов минимумов RY Aug от вычисленных ( $C$ ) с линейными элементами (1). Фотографические наблюдения представлены в виде треугольников, визуальные — маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС — большими точками.

Луизе [8] вычислил первые линейные элементы. Шафранец построила первую и до сих пор единственную кривую блеска системы из визуальных наблюдений (в главном минимуме) [9], но фотометрические элементы не определила. Построенная ею диаграмма  $O - C$  не показала изменений периода. Спектральный класс системы, В9, был определен из наблюдений с объективной призмой для каталога HD [10]. К настоящему времени получено относительно много моментов минимумов системы, но изменения ее периода не изучались. Всего для затменно-двойной системы RY Aug имеются 102 момента главного минимума: 74 визуальных, 9 фотографических и 19 фотоэлектрических и из ПЗС наблюдений. На рис. 1 приведены отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых ( $O$ ) моментов минимумов RY Aug от вычисленных ( $C$ ) с линейными элементами, полученными по всем моментам минимумов методом наименьших квадратов:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2453426.404(2) + \quad (1) \\ + 2.7253933(3)^d T,$$

где  $T$  — эпоха наблюдения. На этом рисунке фотографические наблюдения обозначены треугольниками, визуальные — маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС наблюдения — большими точками. Из рисунка видно, что период системы меняется, причем не монотонно.

В дальнейшем анализе мы не использовали фотографические наблюдения, имеющие низкую точность. Остальные моменты главного минимума

RY Aug были представлены квадратичной зависимостью, параметры которой также определялись методом наименьших квадратов:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2453426.408(2) + \quad (2) \\ + 2.7253965(9)^d T + 2.6(7)^d \times 10^{-10} T^2.$$

Остаточные разности, полученные после исключения параболы, были представлены световым уравнением [11]:

$$LTE = \frac{a_3 \sin i_3}{c} (1 - e_3 \cos E) \sin(v + \omega_3). \quad (3)$$

В выражении для светового уравнения использованы следующие обозначения для элементов орбиты затменно-двойной системы относительно центра тяжести тройной системы:  $a_3$  — большая полуось,  $i_3$  — наклонение,  $e_3$  — эксцентриситет и  $\omega_3$  — долгота периастра.  $v$  и  $E$  — истинная и эксцентрическая аномалии соответственно, которые отсчитываются в той же орбите,  $c$  — скорость света.

В табл. 1 приведены полученные нами значения параметров светового уравнения и квадратичных элементов: орбитального периода двойной системы  $P_2$ , начальной эпохи  $JD_2$  и коэффициента при квадратичном члене  $Q$ . Отметим, что совместное определение квадратичных элементов и параметров светового уравнения приводит к отрицательному значению коэффициента при квадратичном члене, в то время как при непосредственном представлении моментов минимумов квадратичной зависимостью этот коэффициент положителен (см.

**Таблица 1.** Параметры гипотетической долгопериодической орбиты RY Aug

Параметр	Парабола + 3-е тело	Только 3-е тело
$P_3$	$(33\,700 \pm 600)$ сут = $(92.3 \pm 1.6)$ лет	$(28\,200 \pm 700)$ сут = $(77 \pm 2)$ лет
$A_3$	$(0.019 \pm 0.006)$ сут	$(0.0104 \pm 0.0017)$ сут
$e_3$	0.0	0.0
$\omega_3$	0.0	0.0
JD <sub>3</sub>	$2\,446\,700 \pm 300$	$2\,446\,500 \pm 300$
$a_3 \sin i_3$	$(4.9 \pm 1.6) \times 10^8$ км = $(3.3 \pm 1.0)$ а.е.	$(2.7 \pm 0.4) \times 10^8$ км = $(1.8 \pm 0.3)$ а.е.
$P_2$	2.725387(3)	2.7253923(3)
JD <sub>2</sub>	2453426.394(4)	2453426.3992(15)
$Q$	$(-4.2 \pm 2.0) \times 10^{-10}$	—
$dP/dt$	$-1.13 \times 10^{-7}$ сут/год	

представление 2). На рис. 2 приведены отклонения наблюдаемых моментов минимумов RY Aug от теоретических, вычисленных с квадратичными элементами из табл. 1. Визуальные наблюдения обозначены маленькими точками, фотоэлектрические — большими точками. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 1. Остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретической кривой с параметрами из первого столбца табл. 1 приведены в нижней части рис. 2.

Изменения периода RY Aug можно представить также только световым уравнением. Параметры долгопериодической орбиты для этого случая и линейные элементы также приведены в табл. 1. График отклонений наблюдаемых моментов минимумов от теоретических для этого случая и соответствующая теоретическая кривая имеют почти такой же вид, как рис. 2, поэтому приводить его нет необходимости. Величина стандартного отклонения в обоих случаях получается одна и та же:  $\sigma = 0.008^d$ .

Используя найденные нами параметры долгопериодических орбит, приведенные в табл. 1, можно оценить массу третьего тела, вычислив функцию масс:

$$f(M_3) = \frac{4\pi^2 a_3^3 \sin^3 i_3}{G P_3^2} = \frac{M_3^3 \sin^3 i_3}{(M_1 + M_2 + M_3)^2}. \quad (4)$$

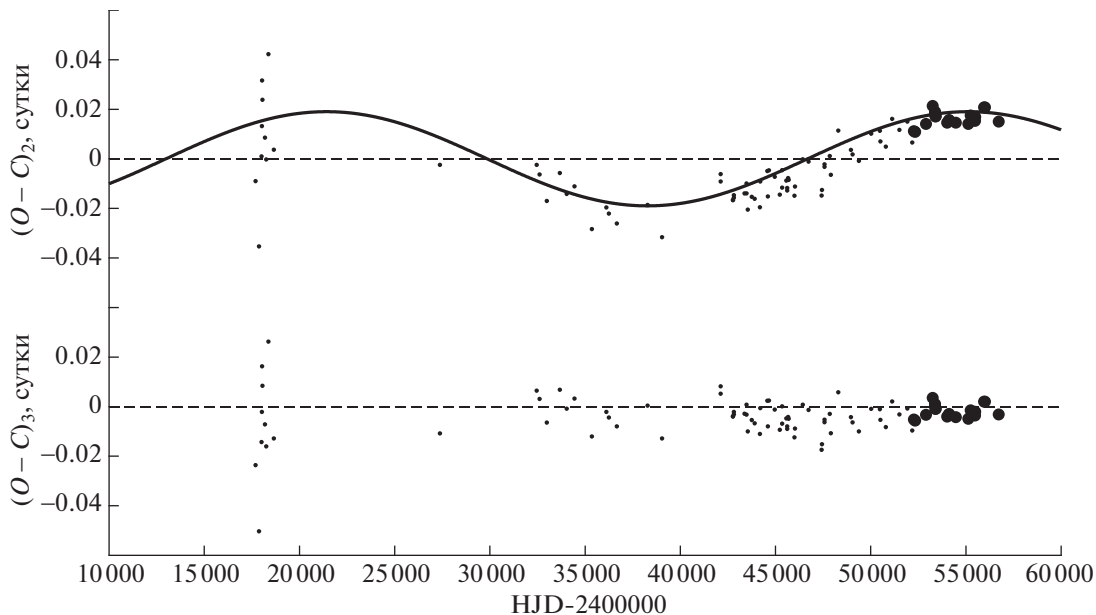
Здесь  $M_1$  и  $M_2$  — массы компонентов затменно-двойной системы,  $M_3$  — масса третьего тела,  $G$  — гравитационная постоянная. В случае непосредственного представления диаграммы  $O - C$  световым уравнением  $f(M_3) = 0.00098M_\odot$ , в случае суперпозиции параболы и светового уравнения  $f(M_3) = 0.0042M_\odot$ . Для масс компонентов затменно-двойной системы имеются лишь оценки,

полученные Свечниковым и Кузнецовой [12]:  $M_1 = 2.80M_\odot$ ,  $M_2 = 0.64M_\odot$ . Считая  $i_3 = 90^\circ$ , находим нижнюю границу для массы третьего тела:  $M_3 > 0.24M_\odot$  для первого случая и  $M_3 > 0.40M_\odot$  для второго. Светимость звезды Главной последовательности массой  $0.40M_\odot$  составляет  $0.011L_\odot$  [13]. Светимости компонентов затменно-двойной системы определим, исходя из оценок массы и относительной светимости главного компонента, полученных в работе [12]:  $L_1 = 77.9L_\odot$ ,  $L_2 = 3.12L_\odot$ . Тогда относительная светимость третьего тела массой  $0.40M_\odot$  будет равна  $L_3/(L_1 + L_2 + L_3) = 0.00014$ , то есть ничтожно мала. Для третьего тела массой  $0.24M_\odot$  она будет еще меньше.

Таким образом, изменения периода затменно-двойной системы RY Aug с одинаковой точностью можно представить либо только световым уравнением, либо суперпозицией обратной параболы и светового уравнения. В обоих случаях получаются приемлемые значения для массы третьего тела.

### 3. ИЗМЕНЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА GG CAS

Переменность звезды **GG Cas** (BD +550274,  $V = 9.94^m$ ,  $P = 3.7587^d$ ) открыл Лайнер [14]. Спектральные классы компонентов из спектроскопических наблюдений определялись в работах [15–17]. В работе [18] из спектрофотометрических наблюдений был определен спектральный класс главного компонента, V4V, и вторичного, K0III. Кривые блеска были построены в работах [19–21]. В работе [21] из решения кривой блеска получены фотометрические элементы затменно-двойной системы, и сделаны оценки абсолютных параметров компонентов. К сожалению, для этой



**Рис. 2.** Зависимость от времени остатков  $(O - C)_2$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов RY Aur теоретических, вычисленных с квадратичными элементами из табл. 1. Сплошной кривой показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1. Внизу приведена зависимость от времени значений  $(O - C)_3$ , полученных вычитанием из наблюдаемых значений моментов минимумов теоретических, вычисленных с учетом квадратичных элементов и светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 1. Визуальные наблюдения обозначены маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС — большими точками.

системы нет ни современных исследований кривых блеска, ни кривой лучевых скоростей. Изучение изменений периода GG Cas было проведено в работе [22], но из-за недостатка данных автор не смог выделить ни монотонные, ни циклические изменения периода. Он лишь констатировал, что период определенно меняется и выделил два момента его резких изменений. К настоящему времени имеется не так много данных для изучения изменений периода GG Cas, однако уже можно сделать некоторые выводы.

Для затменно-двойной системы GG Cas имеется 43 момента главного минимума: 8 визуальных, 17 фотографических и 18 фотоэлектрических и из ПЗС наблюдений. На рис. 3 приведены отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых моментов минимумов GG Cas от вычисленных с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2455894.297(16) + 3.758711(4)^d T, \quad (5)$$

Обозначения здесь те же, что на рис. 1. На этом рисунке видно, что фотографические наблюдения имеют очень большой разброс, поэтому они были исключены из последующего анализа. Остальные

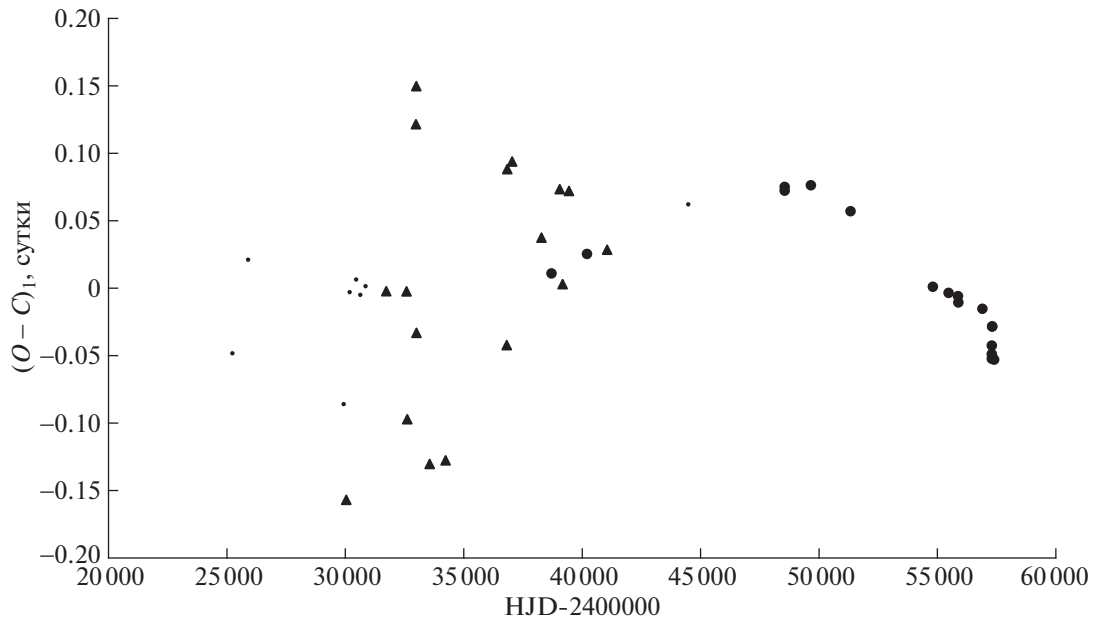
точки хорошо представляются обратной параболой:

$$C_2 \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2455894.282(8) + 3.758671(7)^d T - (5.5 \pm 1.0)^d \times 10^{-9} T^2. \quad (6)$$

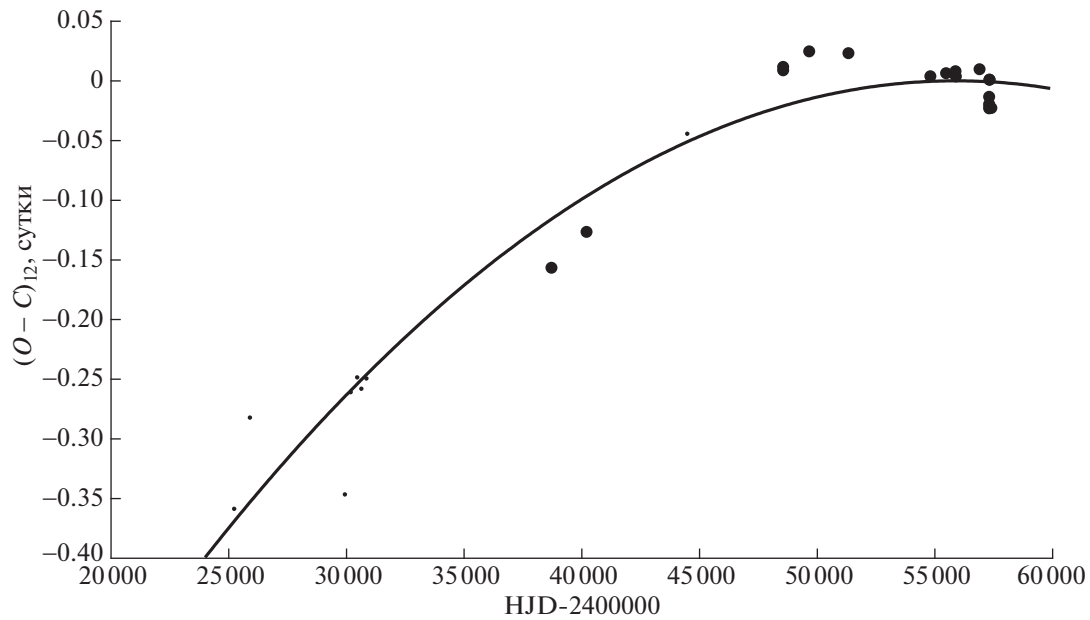
На рис. 4 приведены отклонения  $(O - C)_{12}$  наблюдаемых моментов минимумов GG Cas от вычисленных с линейными элементами из представления (6). Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой.

Остаточные разности, полученные после исключения параболы, были представлены световым уравнением. Параметры светового уравнения вместе с квадратичными элементами приведены в табл. 2. Обозначения в этой таблице такие же, как в табл. 1. На рис. 5 приведена зависимость от времени остатков  $(O - C)_2$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов GG Cas теоретических, вычисленных с квадратичными элементами из табл. 2. Сплошной кривой на рис. 5 проведена теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 2.

Диаграмму  $O - C$  для GG Cas можно представить непосредственно световым уравнением. Параметры светового уравнения для этого случая



**Рис. 3.** Отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых  $(O)$  моментов минимумов GG Cas от вычисленных  $(C)$  с линейными элементами (5). Обозначения те же, что на рис. 1.



**Рис. 4.** Отклонения  $(O - C)_{12}$  наблюдаемых моментов минимумов GG Cas от вычисленных с линейными элементами из представления (6). Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой. Обозначения те же, что на рис. 2.

совместно с линейными элементами также приведены в табл. 2. На рис. 6 показаны отклонения наблюдаемых моментов минимумов GG Cas от вычисленных с линейными элементами, приведенными во втором столбце этой таблицы. Сплошная линия на рис. 6 — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из второго столбца табл. 2. Эта кривая также неплохо описы-

вает наблюдения. Остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов соответствующих теоретических кривых с параметрами из табл. 2 приведены в нижних частях рис. 5 и 6.

Используя найденные нами параметры долгопериодических орбит, приведенные в табл. 2, можно вычислить соответствующие функции масс. В случае непосредственного представления диаграммы

Таблица 2. Параметры гипотетической долгопериодической орбиты GG Cas

Параметр	Парабола + 3-е тело	Только 3-е тело
$P_3$	$(29\,000 \pm 1700)$ сут = $(79 \pm 5)$ лет	$(50\,800 \pm 1800)$ сут = $(139 \pm 5)$ лет
$A_3$	$(0.044 \pm 0.009)$ сут	$(0.134 \pm 0.022)$ сут
$e_3$	0.0	0.0
$\omega_3$	0.0	0.0
$JD_3$	$2\,442\,000 \pm 1200$	$2\,438\,000 \pm 1000$
$a_3 \sin i_3$	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^9$ км = $(7.6 \pm 1.6)$ а.е.	$(3.5 \pm 0.6) \times 10^9$ км = $(23 \pm 4)$ а.е.
$P_2$	$3.758677(9)$	$3.758681(7)$
$JD_2$	$2455894.278(11)$	$2455894.176(24)$
$Q$	$(-4.3 \pm 1.3) \times 10^{-9}$	—
$dP/dt$	$-8.36 \times 10^{-7}$ сут/год	

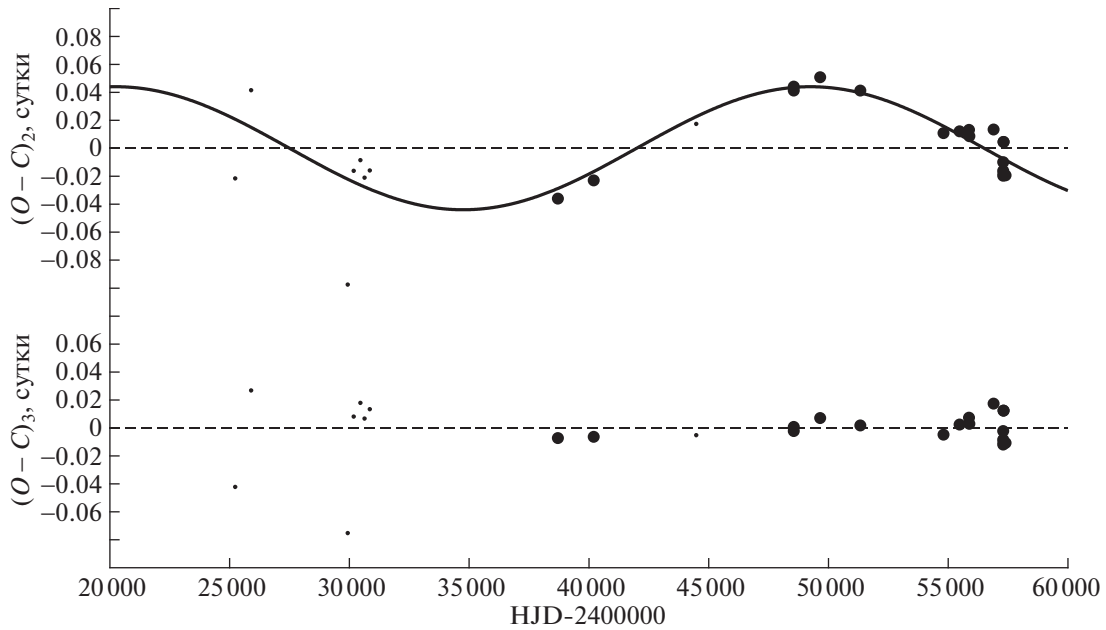
$O - C$  световым уравнением  $f(M_3) = 0.65M_\odot$ , в случае суперпозиции параболы и светового уравнения  $f(M_3) = 0.071M_\odot$ . Используя оценки масс компонентов затменно-двойной системы, полученные в работе [21]:  $M_1 = 4.35M_\odot$ ,  $M_2 = 3.44M_\odot$ , для оценки минимальной массы третьего тела получаем  $M_3 \geq 4.6M_\odot$  для первого случая и  $M_3 \geq 1.9M_\odot$  для второго случая. Таким образом, как и в случае RY Aur, изменения периода GG Cas можно представить либо непосредственно световым уравнением, либо суперпозицией обратной параболы и светового уравнения. Точность представления практически одинакова:  $\sigma = 0.023^d$  в первом случае и  $\sigma = 0.022^d$  во втором. Представление изменений орбитального периода GG Cas суперпозицией параболы и светового уравнения позволяет заметно уменьшить массу предполагаемого третьего тела. При непосредственном представлении изменений периода световым уравнением масса предполагаемого третьего тела получается больше массы каждого из компонентов затменно-двойной системы. Поэтому этот вариант следует отбросить. Для суперпозиции параболы и светового уравнения относительная светимость третьего тела получается  $\sim 6\%$ . Для получения этой оценки использованы светимости компонентов затменно-двойной системы из работы [21], светимость третьего тела оценена из зависимости масса-светимость в соответствующем диапазоне масс в предположении, что это звезда Главной последовательности [13]. Следует учитывать, что GG Cas изучена плохо и для масс компонентов имеются лишь приблизительные оценки. Кроме того, имеется слишком мало значений минимумов блеска. Для выяснения природы циклических изменений периода этой системы следует прежде всего получить надежные оценки масс компонентов, а также высокоточную

кривую блеска, из которой можно было бы определить присутствие (или отсутствие) третьего света в системе. Нужны также дальнейшие определения моментов минимумов GG Cas для уточнения характера изменений ее орбитального периода.

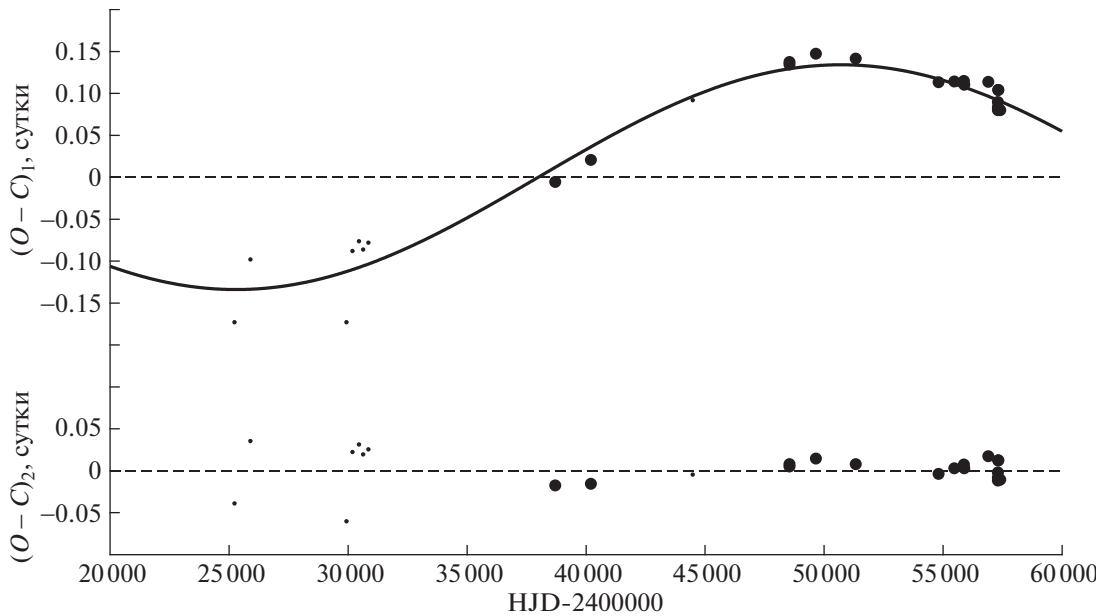
#### 4. ИЗМЕНЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА RS Lep

Переменность звезды **RS Lep** (BD -201245,  $V = 9.91^m$ ,  $P = 1.2885^d$ ) открыл Хоффмайстер [23]. Клепчинский и Вуд [24] построили первую (фотоэлектрическую) кривую блеска и определили фотометрические элементы орбиты. Гиурицин и Мардиросян [25] заново проанализировали кривую блеска, полученную в работе [24], получили однородную систему орбитальных элементов, подтвердили спектральный класс главного компонента, A2 V, приведенный в работе [24], а также оценили спектральный класс вторичного компонента, K IV, и абсолютные характеристики компонентов, в частности, их массы:  $M_1 = 2.6M_\odot$ ,  $M_2 = 0.8M_\odot$ . Шергхонг и др. [26] построили новую кривую блеска, из которой получили два фотоэлектрических момента минимума. Используя более ранние моменты минимумов RS Lep, в основном, фотографические, и полученные ими, они построили диаграмму  $O - C$  для этой системы и сделали вывод, что период не меняется. С тех пор до настоящего времени было получено довольно много визуальных и фотоэлектрических моментов минимумов RS Lep, но новых исследований периода не проводилось.

Для RS Lep имеется 112 моментов главного минимума: 11 фотографических, 87 визуальных и 14 фотоэлектрических и из ПЗС наблюдений. В базе данных В. R. N. O. для фотографических точек



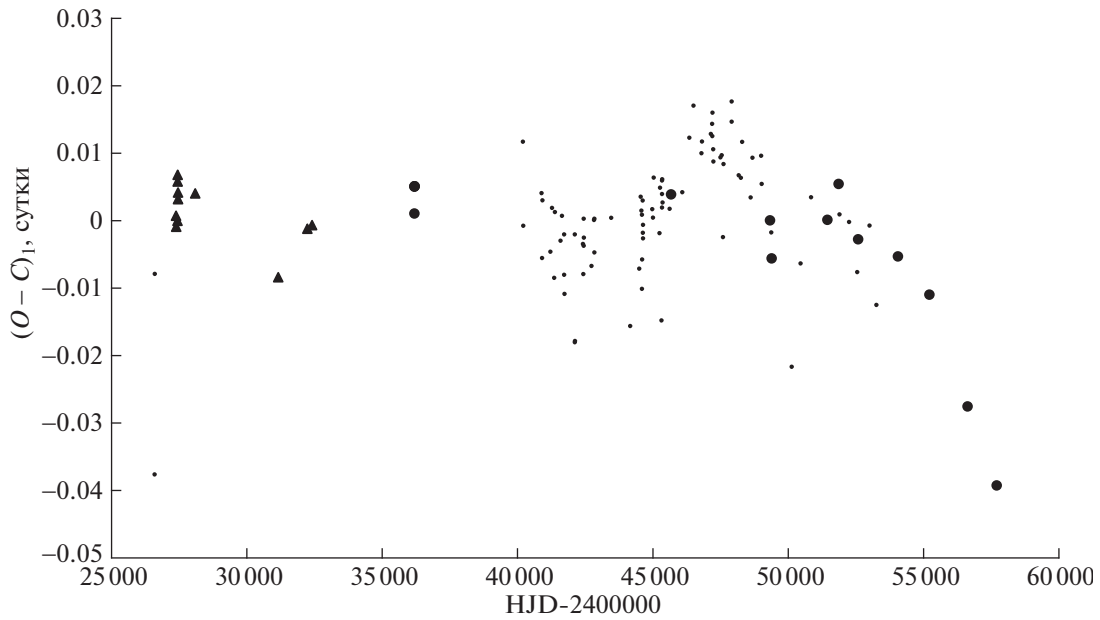
**Рис. 5.** Зависимость от времени остатков  $(O - C)_2$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов GG Cas теоретических, вычисленных с квадратичными элементами из табл. 2. Сплошной кривой проведена теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 2. Внизу приведена зависимость от времени значений  $(O - C)_3$ , полученных вычитанием из наблюдаемых значений моментов минимумов теоретических, вычисленных с учетом квадратичных элементов и светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 2. Обозначения те же, что на рис. 2.



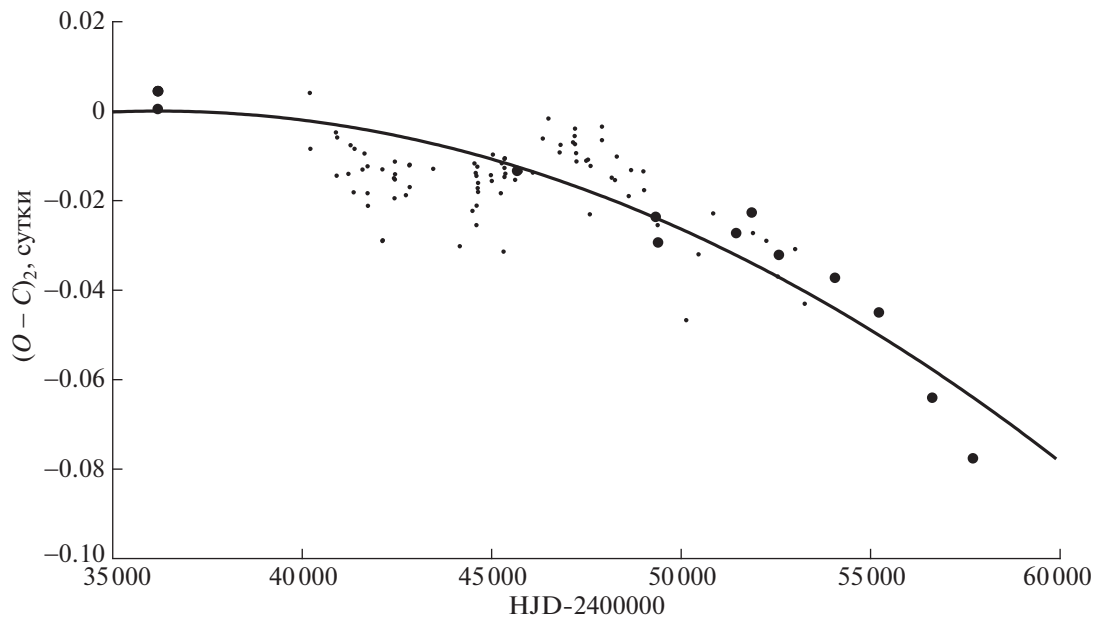
**Рис. 6.** Отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых моментов минимумов GG Cas от вычисленных с линейными элементами, приведенными во втором столбце табл. 2. Сплошная линия — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из второго столбца табл. 2. В нижней части рисунка приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретической кривой с параметрами из второго столбца табл. 2. Обозначения те же, что на рис. 2.

не указано их происхождение и дана ссылка на работу [26] вместо работы [24], где приведены все ранние моменты минимумов со ссылками на первоисточники.

На рис. 7 приведены отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых моментов минимумов RS Lep от вычисленных с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием



**Рис. 7.** Отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых ( $O$ ) моментов минимумов RS Lep от вычисленных ( $C$ ) с линейными элементами (7). Обозначения те же, что на рис. 1.



**Рис. 8.** Отклонения  $(O - C)_2$  наблюдаемых моментов минимумов RS Lep от вычисленных с линейными элементами из представления (8). Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой. Обозначения те же, что на рис. 2.

всех имеющихся моментов главного минимума:

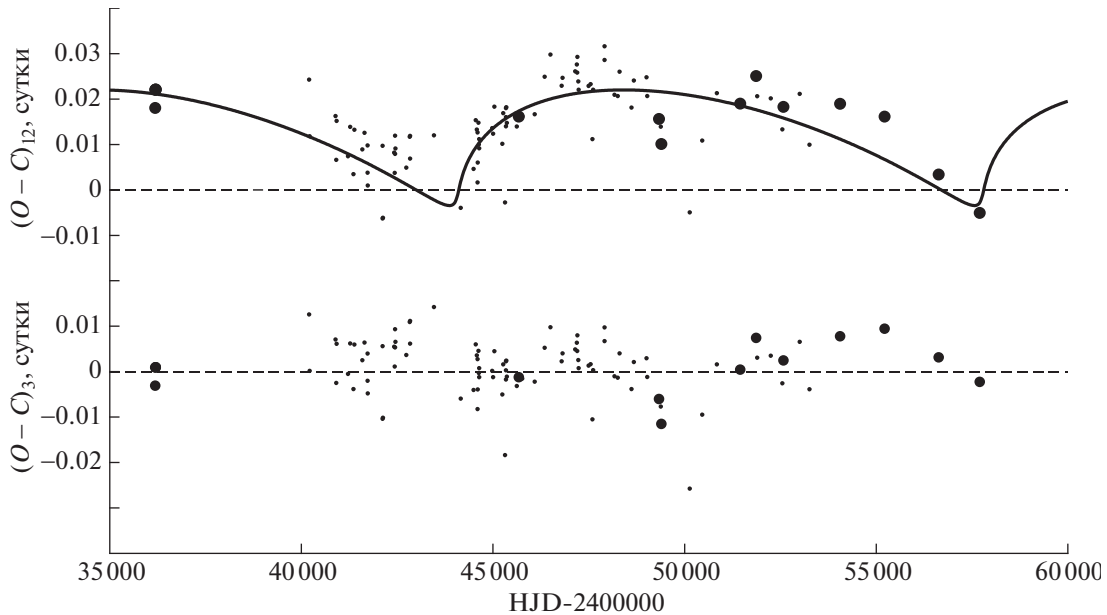
$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2436191.1470(13) + \quad (7) \\ + 1.2885442(2)^d T,$$

Обозначения здесь те же, что на рис. 1. Из рисунка видно, что период системы меняется, и основная тенденция — уменьшение периода. В дальнейшем анализе мы не использовали фотографические на-

блюдения и две самые ранние визуальные точки. Визуальным наблюдениям был приписан вес 1, фотоэлектрическим и из ПЗС наблюдений — вес 10. Моменты главного минимума были представлены квадратичной зависимостью:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2436191.1475(12) + \quad (8) \\ + 1.2885465(3)^d T - (2.3 \pm 0.2)^d \times 10^{-10} T^2.$$





**Рис. 9.** Зависимость от времени остатков  $(O - C)_{12}$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов RS Lep теоретических, вычисленных с квадратичными элементами из табл. 3. Сплошной кривой проведена теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 3. Внизу приведена зависимость от времени значений  $(O - C)_3$ , полученных вычитанием из наблюдаемых значений моментов минимумов теоретических, вычисленных с учетом квадратичных элементов и светового уравнения с параметрами из табл. 3. Обозначения те же, что на рис. 2.

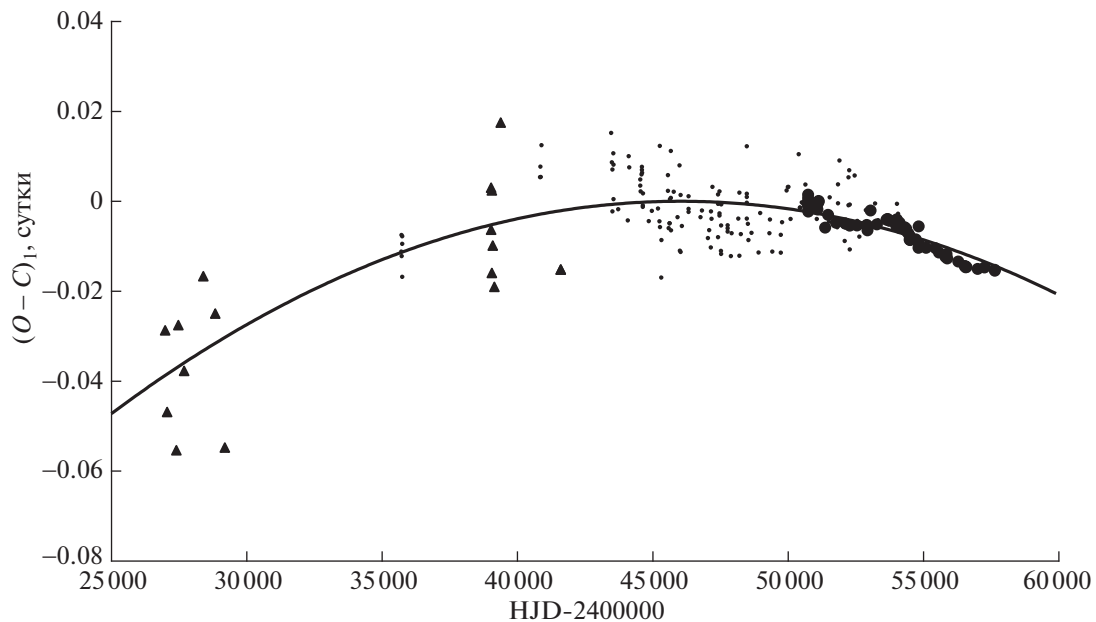
На рис. 8 приведены отклонения  $(O - C)_2$  наблюдаемых моментов минимумов RS Lep от вычисленных с линейными элементами из представления (8). Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой. Остаточные разности, полученные после исключения параболы, приведены на рис. 9. Они были представлены световым уравнением. Параметры светового уравнения вместе с квадратичными элементами приведены в табл. 3. Обозначения в этой таблице такие же, как в табл. 1. Сплошной кривой на рис. 9 проведена теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 3. Остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретической кривой с параметрами из табл. 3 приведены в нижней части рис. 9.

Параметры долгопериодической орбиты, приведенные в табл. 1, позволяют вычислить функцию масс:  $f(M_3) = 0.030M_\odot$ . Используя значения масс компонентов затменно-двойной системы из [25]:  $M_1 = 2.6M_\odot$ ,  $M_2 = 0.8M_\odot$ , получаем  $M_3 \sin i_3 = 0.8M_\odot$ , т.е. минимальная масса третьего тела совпадает с массой вторичного компонента. Если считать третье тело звездой главной последовательности, то из соотношения масса-светимость в соответствующем диапазоне масс [13] его минимальная светимость получается:  $L_3 = 0.34L_\odot$ . Согласно [25],  $L_1 = 23.44L_\odot$ ,  $L_2 = 1.12L_\odot$ . Тогда вклад третьего тела в общую светимость системы  $L_3/(L_1 + L_2 + L_3) \approx 0.014$ , то есть довольно мал и

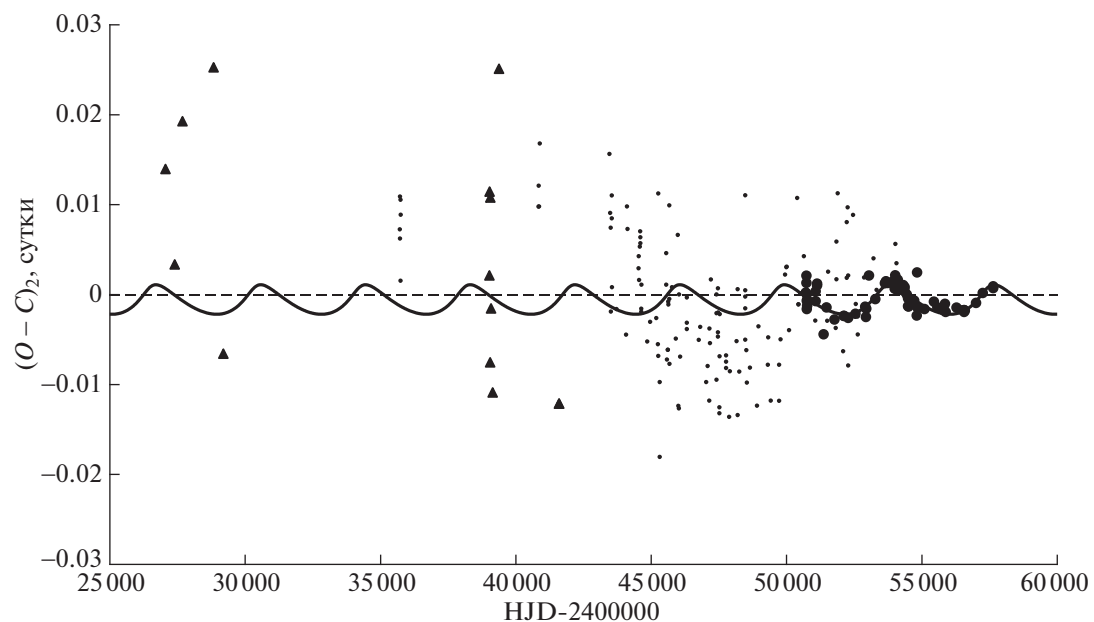
его трудно обнаружить. Для уточнения параметров компонентов необходимо получить современную высокоточную кривую блеска этой системы и современным методом определить фотометрические элементы орбиты. Нужны также высокоточные моменты минимумов для уточнения параметров изменений периода.

**Таблица 3.** Параметры гипотетической долгопериодической орбиты RS Lep

Параметр	Значение
$P_3$	$(13\,700 \pm 150)$ сут = $(37.5 \pm 0.4)$ лет
$A_3$	$(0.020 \pm 0.009)$ сут
$e_3$	$0.90 \pm 0.09$
$\omega_3$	$329^\circ \pm 13^\circ$
$JD_3$	$2\,444\,080 \pm 110$
$a_3 \sin i_3$	$(5.2 \pm 2.3) \times 10^8$ км = $(3.5 \pm 1.6)$ а.е.
$P_2$	$1.2885462(3)$
$JD_2$	$2436\,191.130(4)$
$Q$	$(-1.8 \pm 0.2) \times 10^{-10}$
$dP/dt$	$-1.02 \times 10^{-7}$ сут/год



**Рис. 10.** Отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых ( $O$ ) моментов минимумов RV Tri от вычисленных ( $C$ ) с линейными элементами из представления (10). Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой. Обозначения те же, что на рис. 1.

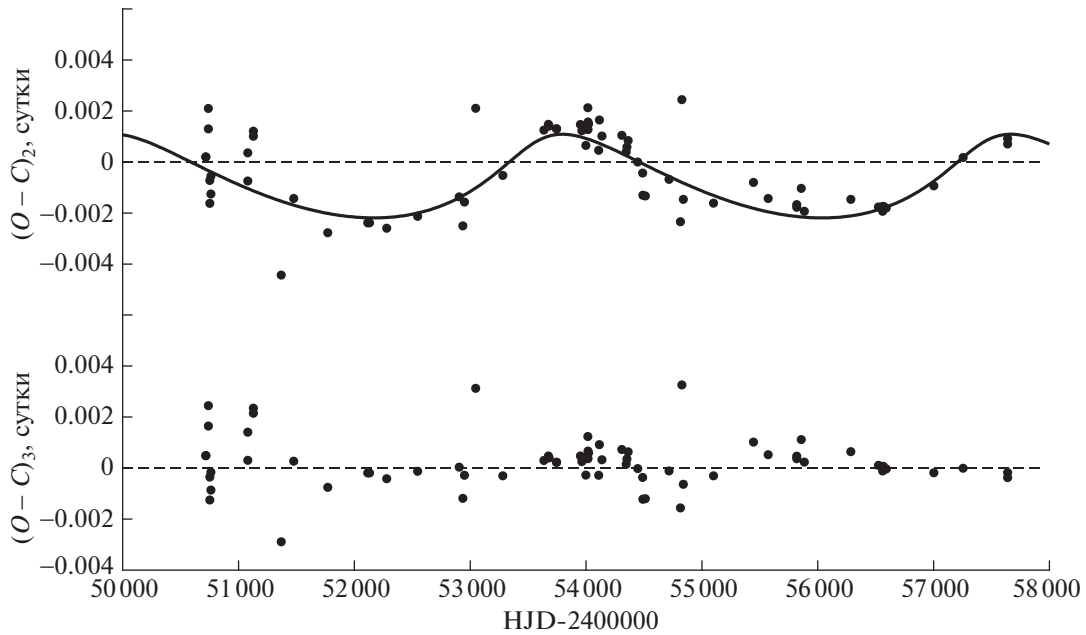


**Рис. 11.** Зависимость от времени остатков  $(O - C)_2$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов RV Tri теоретических, вычисленных с квадратичными элементами из табл. 4. Сплошной кривой проведена теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4. Обозначения те же, что на рис. 1.

### 5. ИЗМЕНЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА RV TRI

Переменность звезды **RV Tri** ( $V = 11.5^m$ ,  $P = 0.7537^d$ ) открыл Штрамайер [27]. Райм [28] из визуальных наблюдений определил линейные элементы и построил кривую блеска, а также нашел несколько фотографических моментов минимумов

из более ранних наблюдений. Спектральный класс компонентов RV Tri определили Гётц и Венцель: F9 + K2 [29]. Первое подробное исследование этой системы опубликовали Янг и Вей [30]. Эти авторы из собственных CCD наблюдений в фильтрах V и R построили кривые блеска RV Tri и определили фотометрические элементы орбиты и



**Рис. 12.** Зависимость от времени остатков  $(O - C)_2$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов RV Tr1 теоретических, вычисленных с квадратичными элементами из табл. 4, для точек, полученных из фотоэлектрических и ПЗС наблюдений. Сплошной кривой проведена теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4. Внизу приведена зависимость от времени значений  $(O - C)_3$ , полученных вычитанием из наблюдаемых значений моментов минимумов теоретических, вычисленных с учетом квадратичных элементов и светового уравнения с параметрами из табл. 4.

отношение масс компонентов. Ими были также определены абсолютные характеристики компонентов. Однако, правильно процитировав в начале статьи спектральные классы компонентов, в дальнейшем тексте они изменили спектральный класс главного компонента с F9 на F0. Поскольку масса главного компонента была ими принята согласно спектральному классу F0, абсолютные характе-

ристики компонентов, приведенные в работе [30], следует пересмотреть. Изменения периода RV Tr1 Янг и Вей определили как суперпозицию векового уменьшения периода и двух его циклических изменений, очень близких по периоду и амплитуде. К настоящему времени накопилось много фотоэлектрических моментов минимумов RV Tr1, которые позволяют более точно выделить циклическую составляющую в изменениях периода этой системы.

**Таблица 4.** Параметры гипотетической долгопериодической орбиты RV Tr1

Параметр	Значение
$P_3$	$(3870 \pm 70)$ сут = $(10.6 \pm 0.2)$ лет
$A_3$	$(0.0017 \pm 0.0002)$ сут
$e_3$	$0.42 \pm 0.06$
$\omega_3$	$51^\circ \pm 3^\circ$
$JD_3$	$2\,453\,560 \pm 50$
$a_3 \sin i_3$	$(4.4 \pm 0.5) \times 10^7$ км = $(0.29 \pm 0.03)$ а.е.
$P_2$	$0.7536651(4)$ сут
$JD_2$	$2446033.308(2)$
$Q$	$(-8.9 \pm 2.1) \times 10^{-11}$
$dP/dt$	$-8.63 \times 10^{-8}$ сут/год

Для затменно-двойной системы RV Tr1 имеется 222 момента главного минимума: 136 визуальных, 17 фотографических и 69 минимумов из фотоэлектрических и ПЗС наблюдений. Для вторичного минимума имеется всего 9 моментов минимумов, имеющих намного меньшую точность. На рис. 10 приведены отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых моментов минимумов RV Tr1 от вычисленных с линейными элементами:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2446033.3066 + \quad (9)$$

$$+ 0.75366487^d T,$$

Обозначения здесь те же, что на рис. 1. Из рисунка видно, что в системе наблюдается монотонное уменьшение периода, а самые последние и самые точные наблюдения демонстрируют наличие циклических изменений. Вековое изменение периода было представлено параболой, параметры которой были определены совместно с приведенными выше

линейными элементами методом наименьших квадратов:

$$C_2 \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2446033.3066(6) + \quad (10) \\ + 0.75366487(5)^d T - (6.1 \pm 0.4)^d \times 10^{-11} T^2.$$

Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой.

Остаточные разности, полученные после исключения параболы, приведены на рис. 11. На этом рисунке видно, что фотографические и визуальные наблюдения имеют недостаточную точность для того, чтобы можно было извлечь из них какую-либо полезную информацию. Поэтому для дальнейшего анализа были использованы только данные, полученные из фотоэлектрических и ПЗС наблюдений. Они были представлены световым уравнением. Параметры светового уравнения вместе с квадратичными элементами приведены в табл. 4. Обозначения в этой таблице такие же, как в табл. 1. На рис. 12 приведены остаточные разности, полученные после исключения параболы с параметрами из табл. 4, для точек, полученных из фотоэлектрических и ПЗС наблюдений. Сплошной кривой на этом рисунке проведена теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4. В нижней части рис. 12 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретической кривой с параметрами из табл. 4. На рис. 11 среди всех наблюдаемых точек сплошной кривой проведена та же самая теоретическая кривая. Эта кривая хорошо описывает фотоэлектрические и ПЗС наблюдения. Остальные наблюдения имеют слишком большой разброс, так что по ним нельзя заметить какие-либо регулярные колебания.

Используя найденные нами параметры долгопериодической орбиты, приведенные в табл. 1, вычисляем функцию масс:  $f(M_3) = 0.00023M_\odot$ . Массы компонентов двойной системы можно оценить, приняв массу главного компонента согласно его спектральному классу F9 и используя отношение масс компонентов, полученное в работе [30]. Тогда  $M_1 = 1.12M_\odot$ ,  $M_2 = 0.34M_\odot$ . Используя полученные оценки масс компонентов затменно-двойной системы и считая  $i_3 = 90^\circ$ , находим нижнюю границу для массы третьего тела:  $M_3 \geq 0.082M_\odot$ . Считая главный компонент звездой Главной последовательности, можно оценить его светимость с помощью соотношения масса-светимость в соответствующем диапазоне масс [13]:  $L_1 = 1.62L_\odot$ . Используя значение относительной светимости из работы [30], можно оценить светимость вторичного компонента:  $L_2 = 0.086L_\odot$ . Для минимальной массы третьего тела  $0.083M_\odot$  светимость  $L_3 = 0.0012$  [31]. Тогда вклад 3-го тела

в общую светимость системы  $L_3/(L_1 + L_2 + L_3) \geq 0.0007 = 0.07\%$ , что согласуется с величиной третьего света, полученной в работе [30]. Таким образом, гипотеза о существовании третьего тела вполне подходит для объяснения циклических изменений периода затменно-двойной системы RV Tri.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения орбитальных периодов затменно-двойных систем RY Aug, GG Cas, RS Lep и RV Tri хорошо представляются суперпозицией обратной параболы и светового уравнения. При этом для масс дополнительных тел получаются приемлемые значения.

Во всех рассмотренных системах наблюдается уменьшение периода. Скорость изменения периода вычисляется по формуле:  $dP/dt = 2Q/P$ , где  $Q$  — коэффициент при квадратичном члене в представлении моментов минимумов. Значения скоростей уменьшения орбитальных периодов приведены в табл. 1–4. Вековое уменьшение периода может быть вызвано потерей углового момента системы, наиболее эффективный механизм потери углового момента — магнитное торможение [32–34].

Не исключено также, что эти затменно-двойные системы (или некоторые из них) совершают движение вокруг центра тяжести тройной системы с очень большим периодом (больше всего времени наблюдений) и то, что мы наблюдаем — часть синусоидального изменения ее периода за счет светового уравнения. В частности, изменения орбитального периода RY Aug можно представить только световым уравнением без уменьшения периода. Параметры светового уравнения для этого случая мало отличаются от тех, которые получаются для суперпозиции векового и циклического изменений. Изменения орбитального периода GG Cas тоже можно представить только световым уравнением, но в этом случае для массы третьего тела получается слишком большое значение.

Все рассмотренные затменно-двойные системы плохо изучены. Для них нет ни современных высокоточных кривых блеска, ни кривых лучевых скоростей. Большинство наблюдений сводится к определению моментов минимумов. Следует восполнить этот пробел для получения надежных оценок абсолютных характеристик компонентов. Дальнейшие наблюдения моментов минимумов позволят уточнить характер изменений их орбитальных периодов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. **92**, 587 (2015).
2. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. **93**, 795 (2016).
3. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. **94**, 619 (2017).
4. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. **94**, 849 (2017).
5. B. R. N. O. Project — Eclipsing Binaries database, <http://var2.astro.cz/EN/brno/index.php>.
6. А. И. Халиуллина и Х. Ф. Халиуллин, Астрон. журн. **61**, 393 (1984).
7. W. Ceraski, Astron. Nachr. **174**, 285 (1907).
8. M. Luizet, Astron. Nachr. **182**, 99 (1909).
9. R. Szafraniec Acta Astron. **20**, 25 (1970).
10. V. V. Nesterov, A. V. Kuzmin, N. T. Ashimbaeva, A. A. Volchkov, S. Röser, and U. Bastian, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **110**, 367 (1995).
11. Д. Я. Мартынов, в кн. М. С. Зверев, Б. В. Кукаркин, Д. Я. Мартынов, П. П. Паренаго, Н. Ф. Флоря и В. П. Цесевич, *Переменные звезды*, т. 3, Гостехиздат (1947), стр. 464–490.
12. М. А. Свечников и Э. Ф. Кузнецова, *Каталог приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд*, Свердловск, Изд-во Урал. ун-та (1990).
13. Z. Eker, F. Soudugan, E. Soydugan, S. Bilir, E. Yaz Gökçe, I. Steer, M. Tüysüz, T. Şenyüz, and O. Demircan, Astron. J. **149**, 131 (2015).
14. E. Leiner, Astron. Nachr. **294**, 181, (1944).
15. G. H. Herbig, Trans. IAU **8**, 807 (1954).
16. D. M. Popper, Publs Astron. Soc. Pacif. **68**, 133 (1956).
17. С. М. Азимов, Сообщения Шемахинской Специальной астрофизической обсерватории, вып. 4, 30 (1969).
18. U. S. Chaubey, and Mahendra Singh, Astrophys. and Space Sci. **151**, 335 (1989).
19. М. И. Лавров, Казан. труды **33**, 104 (1961).
20. J. B. Srivastava, and C. D. Kandpal, Bull. Astron. Inst. Czech. **21**, 353 (1970).
21. U. S. Chaubey, Bull. Astr. Soc. India **12**, 237 (1984).
22. R. K. Srivastava, Astrophys. and Space Sci. **132**, 331 (1987).
23. C. Hoffmeister, Astron. Nachr. **242**, 129 (1931).
24. W. J. Klepczynski, and B. F. Wood, Astron. J. **69**, 92 (1964).
25. G. Giuricin, and F. Mardirossian, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **45**, 85, (1981).
26. Gu Shenghong, Liu Quingyao, Yang Yulan, Wang Bi, Huang Zhankui, Inform. Bull. Var. Stars, № 4089,1 (1994).
27. E. Geyer, R. Kippenhahn, W. Strohmeier, Kleine Veröffentlichungen der Remeis — Sternwarte Bamberg, № 11, (1955).
28. W. Reim, Kleine Veröffentlichungen der Remeis — Sternwarte Bamberg, № 17, (1957).
29. W. Götz and W. Wenzel, Mitt. Veränder. Sterne **1**, № 627, (1962).
30. Y.-G. Yang, and J.-Y. Wei Astron. J. **137**, 226 (2009).
31. К. У. Аллен, *Астрофизические величины* (Москва, “Мир”, 1977).
32. S. Rappaport, F. Verbunt, and P. C. Joss, Astrophys. J. **275**, 713 (1983).
33. N. Ivanova and R. E. Taam, Astrophys. J. **599**, 516 (2003).
34. C. Knigge, I. Baraffe, and J. Patterson, Astrophys. J. Suppl. **194**, 28 (2011).