

УДК 524.386

## ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА ЗАТМЕННО-ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ V505 Sgr

© 2020 г. А. И. Халиуллина<sup>1, \*</sup>

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

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

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.

После доработки 10.06.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Проведен анализ изменений орбитального периода затменно-двойной системы V505 Sgr, входящей в состав визуально-двойной системы CHR 90. Показано, что изменения периода можно представить суперпозицией векового уменьшения периода со скоростью  $2.97 \times 10^{-7}$  сут/год и светового уравнения с периодом 72.8 года. Вековое уменьшение периода можно объяснить потерей углового момента за счет магнитного торможения на вторичном компоненте, который имеет поздний спектральный класс. Световое уравнение объясняется присутствием в системе третьего тела, которое было обнаружено как из спектральных, так и из спекл-интерферометрических наблюдений.

DOI: 10.31857/S0004629920110043

### 1. ВВЕДЕНИЕ

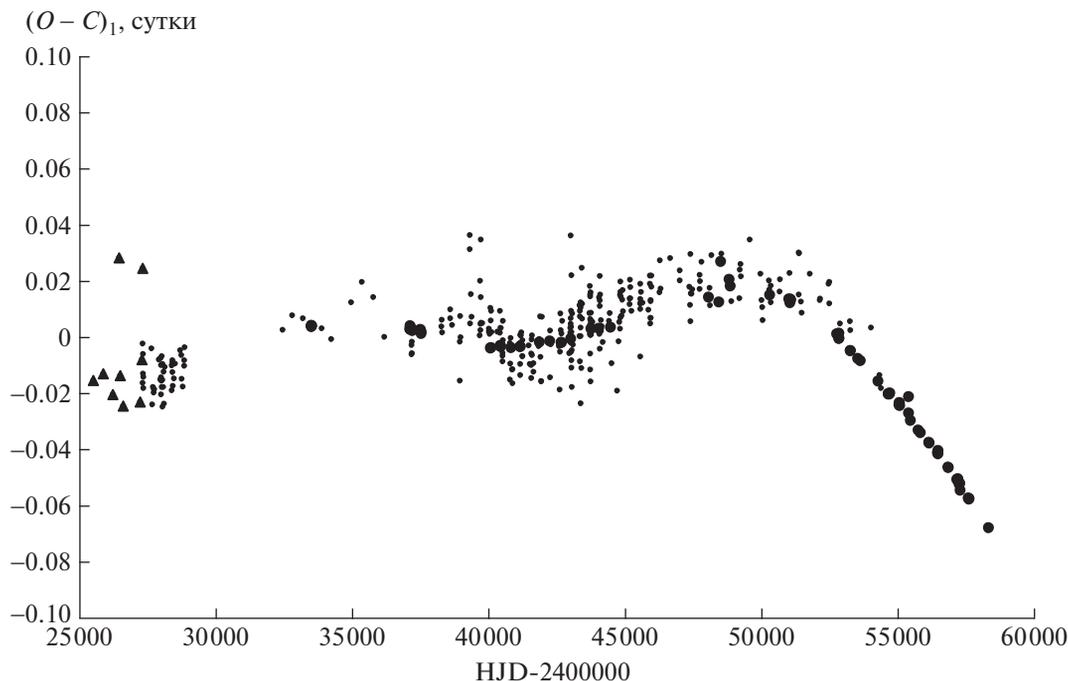
Звезда V505 Sgr (BD–145578, HD 187949,  $V_{\max} = 6.46^m$ ,  $P = 1.18287^d$ ) была открыта как затменно-переменная Хоффмайстером [1]. Впоследствии он же построил первую (фотографическую) кривую блеска, определил, что V505 Sgr является полуразделенной системой типа Алголя, и вычислил эфемериды [2]. Спектральный класс главного компонента, A2V, был определен из спектральных наблюдений [3]; спектральный класс вторичного компонента, G5IV, был оценен из фотометрических данных [4].

Поппер [5] построил первую кривую лучевых скоростей для этой системы (для главного компонента). В работе [6] были построены кривые лучевых скоростей для обоих компонентов и определены их массы. Томкин [3] не только построила кривые лучевых скоростей для обоих компонентов, но и обнаружила в спектре присутствие линий третьего тела спектрального класса F8.

Третий компонент этой системы был открыт в 1985 г. с помощью спекл-интерферометрии [7]. Визуально-двойная система получила название CHR 90, а в каталоге WDS ее обозначение WDS 19531-1436. Первые орбитальные элементы для визуальной пары определил Мейер [8], он нашел орбитальный период 38.4 года, комбинирова наблюдение моментов минимумов (световое уравнение) и спекл-интерферометрические данные. По мере накопления наблюдательных данных появлялись новые работы, в которых определялись

параметры визуальной орбиты: Цветкович получил период 60 лет [9], затем 70 лет [10]. В работе [11] найдены два решения для параметров визуальной орбиты с периодами 29 лет и 94 года и приводятся аргументы в пользу большего периода. Мейсон и др. [12] из тех же данных получили период 32.2 года.

Параллельно с определением параметров визуальной орбиты изучались изменения орбитального периода затменно-двойной системы V505 Sgr. Первое изучение периода V505 Sgr было проведено в работе [13]. Авторы обнаружили, что период меняется, однако из-за недостатка данных нельзя было определить характер этого изменения. Мейер [8] представил изменения орбитального периода затменно-двойной пары световым уравнением с параметрами, соответствующими полученным для визуальной орбиты. Световое уравнение с периодом  $\sim 40$  лет хорошо удовлетворяло наблюдениям моментов минимумов до 2000 г. Однако более поздние наблюдения уже не укладывались в эту модель. В работе [14] изменения периода V505 Sgr были представлены суперпозицией векового уменьшения периода и светового уравнения с периодом 44 года. Это представление плохо согласовывалось с ранними наблюдениями моментов минимумов, поэтому было предположено существование четвертого тела. В работе [15] был предложен набор допустимых решений для траектории гипотетического четвертого тела, которое оказывает возмущение



**Рис. 1.** Отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых ( $O$ ) моментов минимумов V505 Sgr от вычисленных ( $C$ ) с линейными элементами (1). Фотографические наблюдения представлены в виде треугольников, визуальные — маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС — большими точками.

на тройную систему. При этом авторы отмечают, что хотя, в принципе, все наблюдаемые величины можно объяснить наличием четвертого тела, вероятность этой гипотезы очень мала.

Было проведено несколько фотометрических исследований затменно-двойной системы V505 Sgr, в которых наряду с определением фотометрических параметров системы изучался вклад третьего тела в общую светимость [4, 16–19]. Вклад третьего тела в светимость системы в фильтре V, который был получен в этих работах, лежит в пределах от 4 до 7%. Томкин [3] из спектральных наблюдений оценила вклад третьего тела в том же фильтре в 8%. В работе [19] из анализа кривых блеска в инфракрасной области был получен вклад третьего тела 12% в фильтре J и 13% в фильтре K. Авторы отмечают, что из фотометрических кривых блеска трудно точно определить вклад третьего тела в этой системе из-за влияния на кривую блеска межзвездного вещества, особенно в фильтрах UVV. Из сочетания спектральных и фотометрических наблюдений были определены массы компонентов затменно-двойной системы, разные у разных авторов, хотя различия не очень велики:  $M_1 = 2.68M_\odot$ ,  $M_2 = 1.23M_\odot$  [6];  $M_1 = 2.20M_\odot$ ,  $M_2 = 1.15M_\odot$  [3];  $M_1 = 2.65M_\odot$ ,  $M_2 = 1.32M_\odot$  или  $1.25M_\odot$  [19].

В нашей работе исследованы изменения орбитального периода затменно-двойной системы

V505 Sgr на основе всех имеющихся к настоящему времени данных о моментах минимумов.

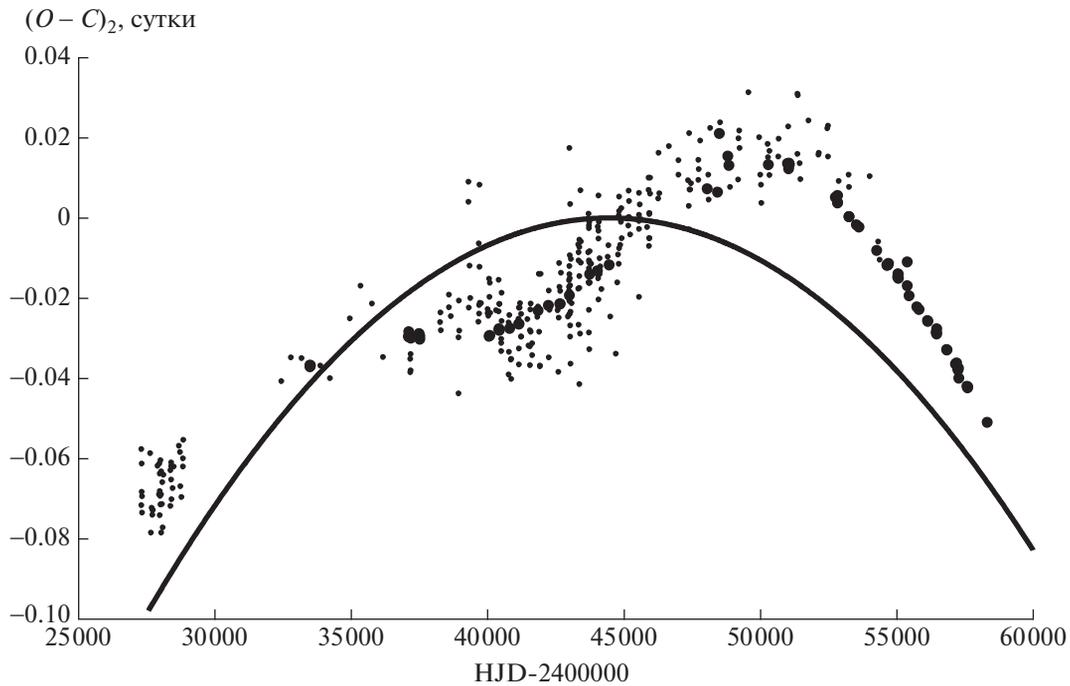
## 2. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА V505 SGR

Для исследования изменений периода затменно-двойной системы V505 Sgr были использованы моменты минимумов из базы данных В. R. N. O. [20]. Всего имеется 403 момента главного минимума: 313 визуальных, 9 фотографических и 81 из фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений — и 19 моментов вторичного минимума: 1 визуальный и 18 из фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений. Моменты вторичного минимума не использовались, так как они определяются с намного меньшей точностью, чем моменты главного минимума.

На рис. 1 приведены отклонения  $(O - C)_1$  наблюдаемых ( $O$ ) моментов минимумов V505 Sgr от вычисленных ( $C$ ) с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2444461.5865(9) + 1.18286806(13)^d T, \quad (1)$$

где  $T$  — эпоха наблюдения. На этом рисунке фотоэлектрические наблюдения представлены большими точками, визуальные — маленькими точками и



**Рис. 2.** Отклонения  $(O - C)_2$  наблюдаемых моментов минимумов V505 Sgr от вычисленных с линейными элементами из представления (2). Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой. Визуальные наблюдения представлены маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС – большими точками.

фотографические – треугольниками. При дальнейшем анализе фотографические данные не использовались, визуальным точкам был приписан вес 1, а фотоэлектрическим и ПЗС-наблюдениям – вес 5. Из рисунка видно, что в системе наблюдаются не только циклические изменения периода, которые изучались всеми предыдущими авторами, но просматривается также монотонное уменьшение периода. Поэтому мы представили изменения орбитального периода V505 Sgr в виде суперпозиции параболы и светового уравнения [21]:

$$\begin{aligned} \text{HJD}(\text{Min I}) = & 2444461.6019(7) + \\ & + 1.1828653(6)^d T - 4.81(11)^d \times 10^{-10} T^2 + \quad (2) \\ & + \frac{a_3 \sin i_3}{c} (1 - e_3 \cos E) \sin(v + \omega_3). \end{aligned}$$

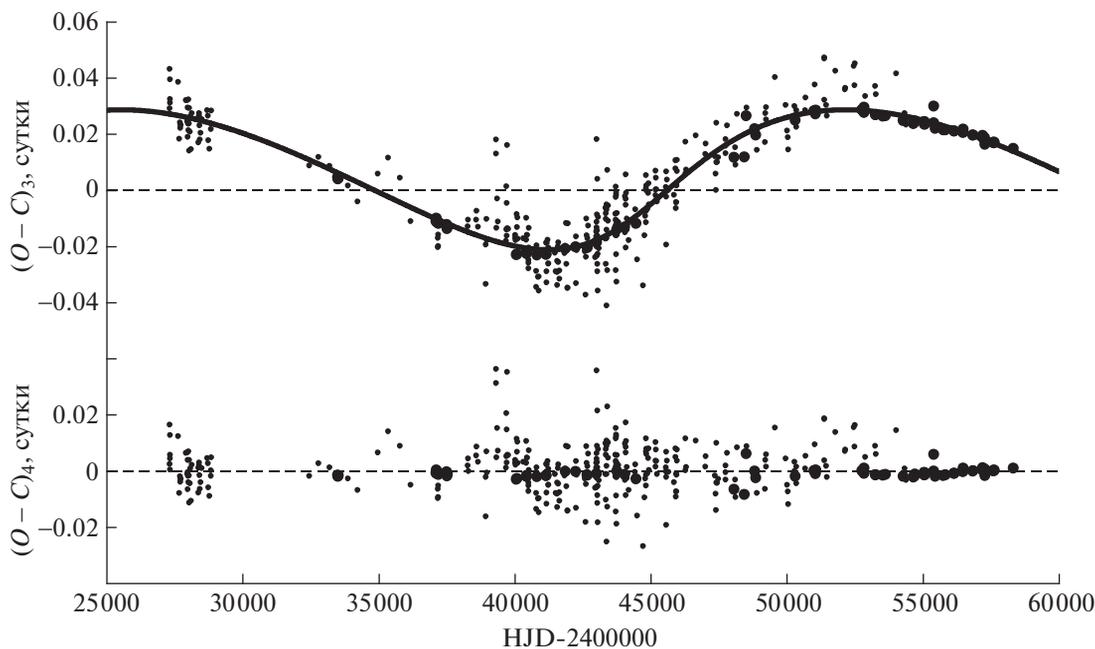
В выражении для светового уравнения использованы следующие обозначения для элементов орбиты затменно-двойной системы относительно центра тяжести тройной системы:  $a_3$  – большая полуось,  $i_3$  – наклонение,  $e_3$  – эксцентриситет,  $\omega_3$  – долгота периастра,  $v$  и  $E$  – истинная и эксцентрическая аномалии соответственно, которые отсчитываются в той же орбите,  $c$  – скорость света. Начальные значения параметров долгопериодической орбиты были определены методом перебора в области их возможных значений. Затем они уточнялись методом дифференциальных по-

правок совместно с линейными элементами и квадратичным членом [22]. Окончательные значения параметров долгопериодической орбиты приведены в табл. 1. В таблице использованы следующие обозначения:  $P_3$  – период обращения в долгопериодической орбите,  $\text{JD}_3$  – момент прохождения через периастр,  $A_3 = (a_3 \sin i_3)/c$ . На рис. 2 приведена зависимость от времени отклонений  $(O - C)_2$  наблюдаемых моментов минимумов V505 Sgr от вычисленных с линейными элементами из представления (2). Теоретическая парабола с параметрами из этого же представления показана на рисунке сплошной кривой.

Зависимость от времени остатков  $(O - C)_3$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов теоретической параболы с парамет-

**Таблица 1.** Параметры светового уравнения в затменно-двойной системе V505 Sgr

Параметр	Значение
$P_3$	$26600 \pm 130$ сут = $72.8 \pm 0.4$ года
$A_3$	$0.0261 \pm 0.0006$ сут
$e_3$	$0.32 \pm 0.03$
$\omega_3$	$333^\circ \pm 2^\circ$
$\text{JD}_3$	$2444600 \pm 100$
$a_3 \sin i_3$	$(6.76 \pm 0.16) \times 10^8$ км = $(4.52 \pm 0.10)$ a.e.



**Рис. 3.** Разности  $(O - C)_3$ , полученные вычитанием из отклонений  $(O - C)_2$  теоретической параболы из представления (2). Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1. В нижней части рисунка приведены значения  $(O - C)_4$ , полученные вычитанием из  $(O - C)_3$  теоретической кривой для светового уравнения. Обозначения такие же, как на рис. 2.

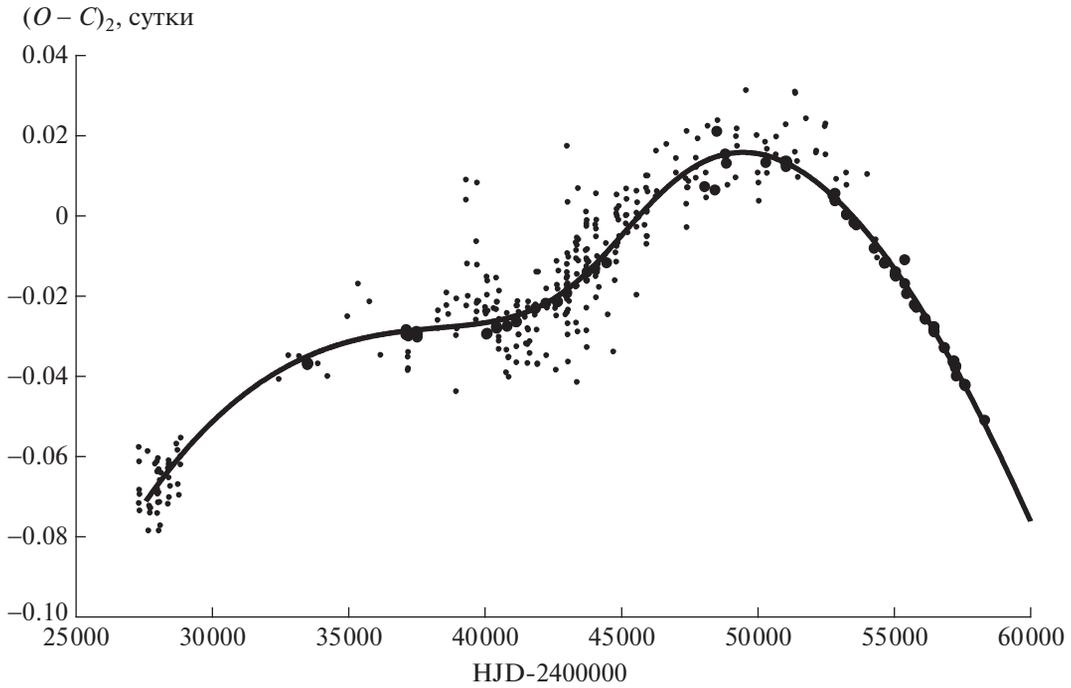
рами из представления (2), приведена на рис. 3. Теоретическая кривая для светового уравнения с найденными параметрами проведена здесь сплошной линией. Из рисунка видно, что эта кривая неплохо описывает наблюдения. В нижней части рис. 3 приведена зависимость от времени значений  $(O - C)_4$ , полученных вычитанием из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных с учетом квадратичных элементов (2) и светового уравнения. На этом рисунке не видно каких-либо регулярных изменений. На рис. 4 приведены изменения со временем отклонений  $(O - C)_2$  наблюдаемых моментов минимумов V505 Sgr от вычисленных с линейными элементами (2). Сплошная линия на этом рисунке – сумма теоретических кривых для параболы (2) и светового уравнения с параметрами из табл. 1. Из рисунка видно, что эта кривая неплохо описывает изменения орбитального периода V505 Sgr.

В работе [14] изменения орбитального периода также были представлены в виде суперпозиции параболы и светового уравнения. Однако в своем анализе авторы использовали только фотоэлектрические и ПЗС-наблюдения. В результате оказалось, что полученное теоретическое представление не согласуется с ранними фотографическими (и, добавим, визуальными) данными. Мы тоже пытались ограничиться только фотоэлектрическими и ПЗС-данными. На рис. 5 представлены остатки после вычитания из всех наблюдаемых

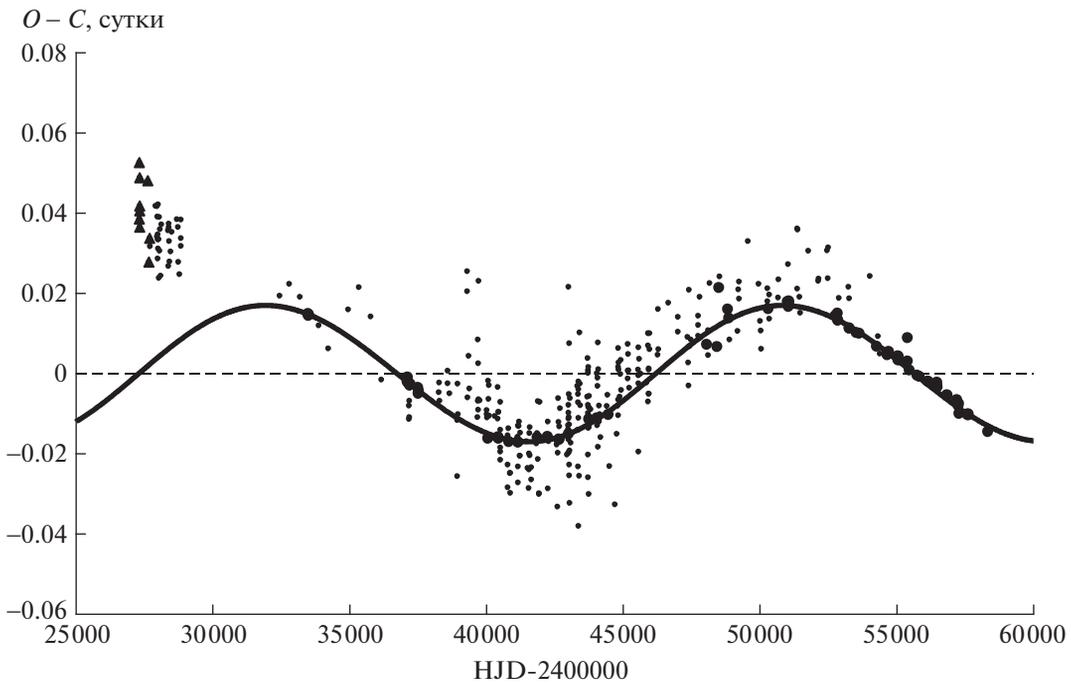
моментов минимумов теоретической параболы, полученной только по фотоэлектрическим и ПЗС-данным ( $Q = -4.0 \times 10^{-10}$ ), и их представление световым уравнением, полученным по тем же данным ( $P = 52$  года,  $e = 0$ ). Из этого рисунка видно, что теоретическая кривая очень хорошо проходит по фотоэлектрическим и ПЗС-точкам, неплохо представляет визуальные наблюдения с  $JD > 2430000$  и оставляет в стороне самые ранние наблюдения. Поэтому в своем анализе мы использовали все визуальные наблюдения.

### 3. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЙ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА V505 SGR

Полученное нами представление изменений орбитального периода затменно-двойной системы V505 Sgr в виде суперпозиции обратной параболы и светового уравнения хорошо согласуется с наблюдениями (рис. 4). Обратная парабола означает, что происходит вековое уменьшение периода. Его скорость вычисляется по формуле:  $dP/dt = 2Q/P$ , где  $Q$  – коэффициент при квадратичном члене в представлении моментов минимумов [23]. Для V505 Sgr получаем  $Q = -4.81^d \times 10^{-10}$  и  $dP/dt = -2.97 \times 10^{-7}$  сут/год. Вековое уменьшение периода может быть вызвано потерей углового момента системы вследствие магнитного торможения [24, 25].



**Рис. 4.** Изменения со временем отклонений  $(O - C)_2$  наблюдаемых моментов минимумов V505 Sgr от вычисленных с квадратичными элементами (2). Сплошная линия на этом рисунке – сумма теоретических кривых для параболы (2) и светового уравнения с параметрами из табл. 1. Обозначения как на рис. 2.



**Рис. 5.** Остатки после вычитания из всех наблюдаемых моментов минимумов V505 Sgr параболы, полученной только по фотоэлектрическим и ПЗС-данным и их представление световым уравнением, полученным по тем же данным.

**Таблица 2.** Параметры визуальной орбиты третьего тела в V505 Sgr, определенные разными авторами

	$P$ , год	$i$ , град	$\sin i$	$a''$	$a$ , а.е.
Мейер [8]	38.4	26.9	0.452		
Цветкович [9]	60	137.1	0.681	0.268	22.6
Цветкович [10]	71	121.9	0.849	0.281	23.6
Цветкович и др. [11] I	29.14	145.3	0.574	0.167	14.0
Цветкович и др. [11] II	94	120.4	0.862	0.333	28.0
Мейсон и др. [12]	32.2	136.0	0.695	0.181	15.2

Известно, что V505 Sgr входит в состав визуально-двойной системы, так что циклические изменения орбитального периода затменно-двойной системы вполне логично отнести на счет светового уравнения из-за присутствия в системе третьего тела. Используя найденные нами параметры долгопериодической орбиты, приведенные в табл. 1, можно оценить массу третьего тела, вычислив функцию масс:

$$f(M_3) = \frac{4\pi^2 a_3^3 \sin^3 i_3}{G P_3^2} = \frac{M_3^3 \sin^3 i_3}{(M_1 + M_2 + M_3)^2} = 0.0173M_\odot. \quad (3)$$

Здесь  $M_1$  и  $M_2$  — массы компонентов затменно-двойной системы,  $M_3$  — масса третьего тела,  $G$  — гравитационная постоянная. Для оценки массы третьего тела нужно знать массы компонентов двойной системы. Были использованы оценки масс, полученные в работе [19]:  $M_1 = 2.65M_\odot$ ,  $M_2 = 1.25M_\odot$ , тогда  $M_3 \sin i_3 = 0.717M_\odot$ . Если принять для массы третьего тела оценку, полученную из спектральных наблюдений [3],  $M_3 = 1.2M_\odot$ , то получим  $\sin i_3 = 0.5975$ ,  $i_3 = 36.7^\circ$  (или  $143.3^\circ$ ).

Из светового уравнения получаются параметры видимой орбиты затменно-двойной системы относительно центра масс тройной системы, т.е. проекции истинной орбиты на картинную плоскость. Используя найденное выше значение  $\sin i_3$ , найдем величину большой полуоси истинной орбиты:  $a_3 = 7.56$  а.е. Величину большой полуоси орбиты третьего тела,  $a_3'$  можно найти из соотношения (которое следует из третьего закона Кеплера):  $(M_1 + M_2)/M_3 = (a_3'/a_3)^3$ . Используя приведенные выше величины, находим:  $a_3' = 11.20$  а.е. Большая полуось относительной орбиты равна сумме больших полуосей абсолютных орбит:  $a_{23} = a_3 + a_3' = 18.76$  а.е. Это размер большой полуоси истинной относительной орбиты. Разумеется, это предварительная оценка. Единственное, что можно считать надежно определенным, — это параметры светового уравнения, приведенные в табл. 1. Все последующие оценки зависят от

значений масс компонентов, которые еще требуют уточнения.

В табл. 2 приведены параметры визуальной (относительной) орбиты третьего тела в V505 Sgr, определенные разными авторами. Здесь использованы следующие обозначения:  $P$  — период обращения по орбите;  $a''$  — большая полуось, выражаемая в секундах дуги;  $i$  — угол между плоскостью орбиты и плоскостью, перпендикулярной к лучу зрения (картинной плоскостью). В последнем столбце приведены значения большой полуоси относительной орбиты,  $a$ , вычисленные с использованием значения параллакса, полученного спутником Gaia [26],  $\pi_{\text{Gaia}} = 11.8788$  mas.

Из таблицы видно, что ни один из наборов параметров визуальной орбиты не совпадает с полученными нами параметрами светового уравнения. Между собой эти наборы параметров также значительно различаются. В работе [3] период орбиты третьего тела был оценен по смещению спектральных линий  $\sim 100$  лет. Довольно долгое время период светового уравнения в затменно-двойной системе V505 Sgr считался  $\sim 40$  лет, что не согласовывалось с оценкой из спектральных наблюдений, однако при вычислении визуальной орбиты исследователи ориентировались именно на это значение периода. В последнее время стало ясно, что световое уравнение с таким периодом не удовлетворяет наблюдениям, а также появилась тенденция к увеличению периода визуальной орбиты. Однако последние определения параметров визуальной орбиты с использованием одних и тех же наблюдательных данных сильно расходятся между собой. В работе [11] получены два разных набора параметров, и авторы приводят аргументы в пользу орбиты с большим периодом. В работе [12] опять получена орбита с маленьким периодом.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рис. 3 и 4 видно, что полученное нами представление изменений орбитального периода затменно-двойной системы V505 Sgr в виде суперпозиции векового уменьшения периода и светового уравнения хорошо удовлетворяет всем

наблюдательным данным. Вековое уменьшение периода можно объяснить потерей углового момента за счет магнитного торможения на вторичном компоненте, который имеет поздний спектральный класс и должен иметь конвективную оболочку и магнитное поле. Световое уравнение объясняется присутствием в системе третьего тела, которое было обнаружено как из спектральных, так и из спекл-интерферометрических наблюдений. Параметры светового уравнения и имеющиеся к настоящему времени параметры визуальной орбиты не согласуются между собой. К тому же последние сильно различаются у разных авторов. Скорее всего, это связано с трудностями построения визуальной орбиты, тем более что спекл-интерферометрические наблюдения покрывают, по-видимому, лишь около половины периода орбиты третьего тела. Очевидно, визуальная орбита требует пересмотра с учетом полученного нами светового уравнения, нового значения параллакса, а также нужны новые измерения положения третьего тела.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке грантом Программы развития МГУ “Ведущая научная школа “Физика звезд, релятивистских объектов и галактик”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *C. Hoffmeister*, *Astron. Nachr.* **250**, 47 (1933).
2. *C. Hoffmeister*, *Astron. Nachr.* **251**, 321 (1934).
3. *J. Tomkin*, *Astrophys. J.* **387**, 631 (1992).
4. *C. R. Chambliss*, *R. L. Walker*, *J. H. Karle*, *H. B. Snodgrass*, and *Y. A. Vrasko*, *Astron. J.* **106**, 2058 (1993).
5. *D. M. Popper*, *Astrophys. J.* **109**, 100 (1949).
6. *B. Khalleseh* and *G. Hill*, *Astron. Astrophys.* **244**, 75 (1991).
7. *H. A. McAlister*, *W. I. Hartkopf*, *D. J. Hutter*, *M. M. Shara*, and *O. G. Franz*, *Astrophys. J.* **93**, 183 (1987).
8. *P. Mayer*, *Astron. Astrophys.* **324**, 988 (1997).
9. *Z. Cvetković*, *IAU Commission 26 Inf. Circ.*, 160 (2006).
10. *Z. Cvetković*, *IAU Commission 26 Inf. Circ.*, 167 (2009).
11. *Z. Cvetković*, *R. Pavlović*, and *S. Ninković*, *Astron. J.* **140**, 25 (2010).
12. *B. D. Mason*, *W. I. Hartkopf*, and *A. Tokovinin*, *Astron. J.* **140**, 735 (2010).
13. *E. Rovithis-Livanou*, and *P. Rovithis*, *Inform. Bull. Var. Stars*, № 3608, 1 (1991).
14. *D. Chochol*, *T. Pribulla*, *M. Vaňko*, *P. Mayer*, *M. Wolf*, *P. G. Niarchos*, *K. D. Gazeas*, *V. N. Maniannis*, *L. Brát*, and *M. Zejda*, *Astrophys. and Space Sci.* **304**, 93 (2006).
15. *M. Brož*, *P. Mayer*, *T. Pribulla*, *P. Zasche*, *D. Vokrouhlický*, and *R. Uhlář*, *Astron. J.* **139**, 2258 (2010).
16. *R. L. Walker*, *Astron. J.* **106**, 2051 (1993).
17. *E. Rovithis-Livanou*, and *P. Rovithis*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser* **105**, 47 (1994).
18. *C. İbanoglu*, *Ö Çakirli*, *Ö Değirmenci*, *S. Saygan*, *B. Ulaş*, and *N. Erkan*, *Astron. Astrophys.* **354**, 188 (2000).
19. *C. Lázaro*, *M. J. Arévalo*, and *E. Antonopoulou*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **368**, 959 (2006).
20. *B. R. N. O. Project* – Eclipsing Binaries database, <http://var2.astro.cz/EN/brno/index.php>
21. *Д. Я. Мартынов*, в кн. *М. С. Зверев*, *Б. В. Кукаркин*, *Д. Я. Мартынов*, *П. П. Паренаго*, *Н. Ф. Флоря*, *В. П. Цесевич*, *Переменные звезды*, т. 3, Гостехиздат (1947), стр. 464–490.
22. *А. И. Халиуллина* и *Х. Ф. Халиуллин*, *Астрон. журн.* **61**, 393 (1984).
23. *Х. Ф. Халиуллин*, *Астрон. журн.* **51**, 395 (1974).
24. *N. Ivanova* and *R. E. Taam*, *Astrophys. J.* **599**, 516 (2003).
25. *N. Nanouris*, *A. Kalimeris*, *E. Antonopolou*, and *H. Rjvithis-Livaniou*, *Astron. Astrophys.* **535**, 126 (2011).
26. *Gaia Collaboration*, *VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2* (2018).