

СВЕТОВОЕ УРАВНЕНИЕ В ИЗМЕНЕНИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА ЗАТМЕННО-ДВОЙНЫХ СИСТЕМ TT Del, EU Hyа И SV Tau

© 2022 г. А. И. Халиуллина*

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 04.04.2022 г.

После доработки 09.05.2022 г.

Принята к публикации 18.05.2022 г.

В затменно-двойных системах TT Del, EU Hyа и SV Tau изучены изменения орбитального периода. Показано, что изменения периодов этих систем можно представить в виде только циклических колебаний без векового изменения. Циклические изменения периодов EU Hyа и SV Tau можно объяснить световым уравнением вследствие присутствия третьего тела в системе. Период движения в долгопериодической орбите составляет 22.7 года в EU Hyа и 107.5 года в SV Tau. Минимальные массы дополнительных тел в этих системах равны соответственно 0.26 и 0.38 M_{\odot} . В TT Del наблюдается суперпозиция двух циклических изменений орбитального периода с периодами 21.1 и 54.5 года. Изменения периода TT Del можно объяснить как световым уравнением, так и магнитными циклами.

Ключевые слова: двойные звезды, затменные звезды, отдельные – TT Del, EU Hyа, SV Tau

DOI: 10.31857/S0004629922080072

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдательными проявлениями процессов, происходящих в тесных двойных системах, являются изменения орбитальных параметров, в частности периода. Наиболее удобным инструментом для изучения периодов ТДС служат затменно-двойные звезды. Изменения орбитального периода делятся на вековые (монотонные) и циклические. В зависимости от физических процессов, происходящих в двойной системе, период может увеличиваться или уменьшаться [1]. Количественные оценки скорости уменьшения (или увеличения) периода помогут сделать выбор среди имеющихся теоретических моделей. Поэтому важно быть уверенным, что в системе действительно происходит вековое изменение периода. При недостаточно продолжительных рядах наблюдений моментов минимумов могут возникнуть ошибки в интерпретации полученных диаграмм $O-C$. По мере накопления новых наблюдательных данных, изменения периода, считавшиеся ранее монотонными, могут оказаться циклическими [2–5]. Циклические изменения орбитального периода могут быть следствием присутствия в системе одного или нескольких дополнительных тел, вращения линии апсид эксцентричной орбиты двойной системы или влияния магнитных циклов одного из компонентов.

В настоящей работе рассматриваются три затменно-двойные системы, в которых подозревалось вековое уменьшение орбитального периода. Для исследования изменений орбитального периода каждой из затменно-двойных систем были использованы моменты минимумов из базы данных В. Р. Н. О. [6].

2. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА TT Del

Переменность звезды TT Del ($V = 10.6^m$, $P = 2.8711^d$) открыл Плаут по фотографическим наблюдениям [7]. Для нее получено довольно много моментов минимумов, большинство – из визуальных наблюдений. Для этой системы нет кривой лучевых скоростей и не опубликовано решение кривой блеска. Есть только приближенные оценки параметров, полученные Свечниковым и соавт. [8]. Спектральный класс главного компонента A1 V [9], вторичного – G7 IV [8]. Исследование изменений периода TT Del было проведено в работе [10]. К тому времени кроме фотографических и визуальных моментов минимумов имела лишь одна фотоэлектрическая точка. Автор пришел к выводу, что в системе происходит довольно быстрое уменьшение периода.

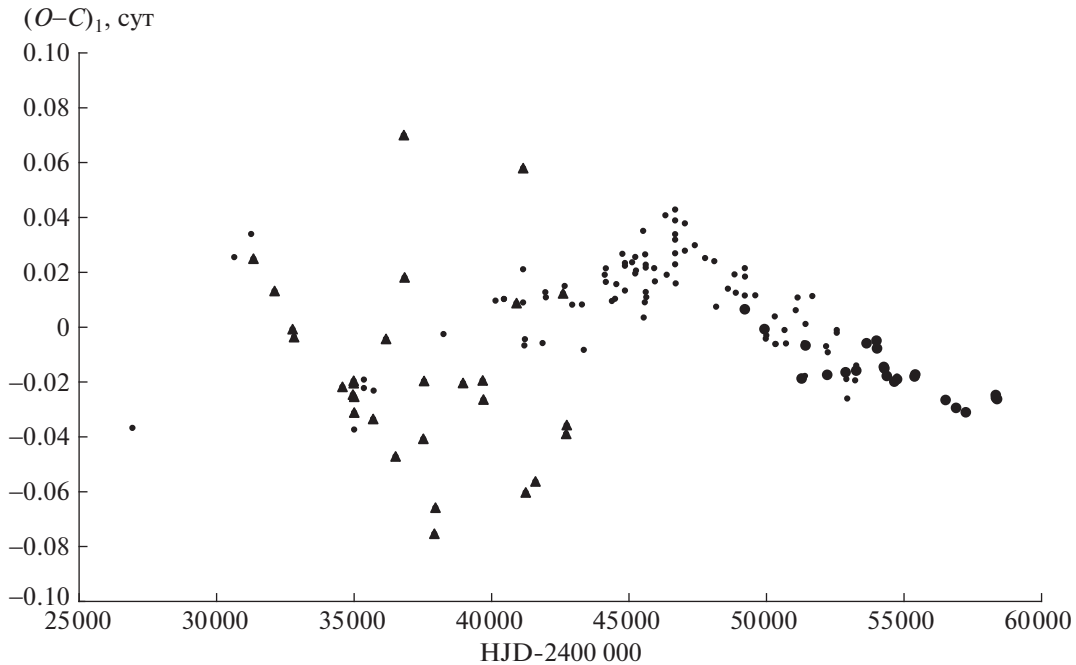


Рис. 1. Отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов TT Del от вычисленных (C) с линейными элементами (1). Фотографические наблюдения представлены в виде треугольников, визуальные – маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС – большими точками.

Для затменно-двойной системы TT Del имеется 143 момента главного минимума: 91 визуальный, 29 фотографических и 23 из фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений. На рис. 1 приведены отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов TT Del от вычисленных (C) с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2445232.397(2) + 2.8711045(9)^d T, \quad (1)$$

где T – эпоха наблюдения. На этом рисунке фотоэлектрические наблюдения представлены большими точками, визуальные – маленькими точками и фотографические – треугольниками. Как видно из рисунка, фотографические точки показывают очень большой разброс, поэтому они не использовались при анализе. Не использовалась также самая первая визуальная точка: $\text{JD} = 2426946.296$. При представлении моментов минимумов TT Del квадратичными элементами остатки после исключения параболы не удалось представить какой-либо регулярной кривой. Поэтому моменты минимумов TT Del были представлены суммой линейных элементов и светового уравнения. Остатки после исключения светового уравнения показывали систематические изменения и также были аппроксимированы све-

товым уравнением. Окончательно отклонения наблюдаемых моментов минимумов от теоретических, вычисленных с линейными элементами, были представлены суперпозицией двух световых уравнений. Поиск подходящих световых уравнений осуществлялся методом последовательных приближений, подробно описанным в работе [11]. В результате изменения орбитального периода TT Del были представлены в виде:

$$\text{HJD}(\text{Min I}) = 2445232.400(5) + 2.8711027(1)^d T + LTE1 + LTE2, \quad (2)$$

где выражения для световых уравнений $LTE1$ и $LTE2$ имеют вид [12]:

$$LTE = (a_i \sin i_i / c)(1 - e_i \cos E) \sin(v + \omega_i). \quad (3)$$

В выражении для светового уравнения использованы следующие обозначения для элементов орбиты затменно-двойной системы относительно центра тяжести i -кратной системы: a_i – большая полуось, i_i – наклонение, e_i – эксцентриситет и ω_i – долгота периастра; v и E – истинная и эксцентрическая аномалии, соответственно, которые отсчитываются в той же орбите; c – скорость света. Начальные значения параметров световых уравнений определялись методом перебора в области их возможных значений вместе с линейны-

Таблица 1. Параметры гипотетических долгопериодических орбит в TT Del

Параметр	Значение	Параметр	Значение
P_L	(7700 ± 300) сут = (21.1 ± 0.8) лет	P_G	(19900 ± 600) сут = (54.5 ± 1.6) лет
A_L	(0.007 ± 0.001) сут	A_G	(0.021 ± 0.001) сут
e_L	0	e_G	0
ω_L	0	ω_G	0
JD_L	2452900 ± 300	JD_G	2441200 ± 300
$a_L \sin i_L$	$(1.8 \pm 0.3) \times 10^8$ км = (1.2 ± 0.2) а.е.	$a_G \sin i_G$	$(5.4 \pm 0.3) \times 10^8$ км = (3.6 ± 0.2) а.е.
$f(M_3)$	0.00401	$f(M_3)$	0.0162
$M_3 \sin i_3$	$0.35 M_\odot$	$M_3 \sin i_3$	$0.58 M_\odot$

ми элементами. Окончательно параметры каждого светового уравнения уточнялись методом дифференциальных поправок [13] при фиксированных линейных элементах (2). Одновременно вычислялись ошибки определения параметров. Поскольку линейные элементы определялись только методом перебора, для них в скобках указана величина шага перебора.

Параметры предполагаемых долгопериодических орбит в TT Del приведены в табл. 1. Параметры с индексом G относятся к орбите с большим периодом, а с индексом L – к орбите с меньшим периодом. Здесь P_G – период обращения в долгопериодической орбите с большим периодом, P_L – период обращения в долгопериодической орбите с меньшим периодом, $JD_{G,L}$ – момент прохождения через периастр соответствующей орбиты, $A_{G,L} = (a_{G,L} \sin i_{G,L})/c$. На рис. 2 приведены отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов TT Del от вычисленных с линейными элементами (2). Сплошная кривая – сумма теоретических кривых для световых уравнений с параметрами из табл. 1. В нижней части рис. 2 приведены значения $(O-C)_3$, полученные вычитанием из $(O-C)_2$ обоих световых уравнений. Из этого рисунка видно, что полученное представление хорошо удовлетворяет наблюдениям. На рис. 3а приведены разности $(O-C)_{23}$, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов TT Del от вычисленных с линейными элементами (2), $(O-C)_2$, теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом L, и на рис. 3б – разности $(O-C)_{24}$, полученные вычитанием из тех же значений $(O-C)_2$ теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом G. Сплошными линиями на рис. 3 показаны теоретические кривые для каждого светового уравнения с параметрами из табл. 1.

Полученные параметры долгопериодических орбит позволяют вычислить функции масс для каждого светового уравнения:

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

где G – гравитационная постоянная. Значения функции масс для каждой дополнительной орбиты также приведены в табл. 1. Используя массы компонентов затменно-двойной системы из каталога [8]: $M_1 = 2.25 M_\odot$, $M_2 = 0.65 M_\odot$, можно вычислить минимальную массу соответствующего третьего тела для каждого светового уравнения (предполагая существование только одного из дополнительных тел). Значения этих масс также приведены в табл. 1. Для иерархической четырехкратной системы функция масс связана с массами компонентов следующим соотношением:

$$f(M_4) = \frac{M_4^3 \sin^3 i_4}{(M_1 + M_2 + M_3 + M_4)^2}. \quad (5)$$

В этом случае минимальная масса тела на более далекой орбите равна $0.62 M_\odot$. То есть во всех случаях для масс дополнительных компонентов получаются небольшие значения. Оценок вклада третьего света в светимость этой системы не делалось.

В качестве альтернативы гипотезе о третьем теле может служить предположение, что наблюдаемые модуляции периода являются проявлением магнитной активности. Вторичный компонент в затменно-двойной системе TT Del имеет спектральный класс G7 IV, и должен иметь конвективную оболочку и, следовательно, магнитное поле. В работе [14] была предложена модель, в которой гравитационное квадрупольное взаимодействие обеспечивает механизм, посредством которого орбита реагирует на изменения внутренней структуры активной звезды. В этой моде-

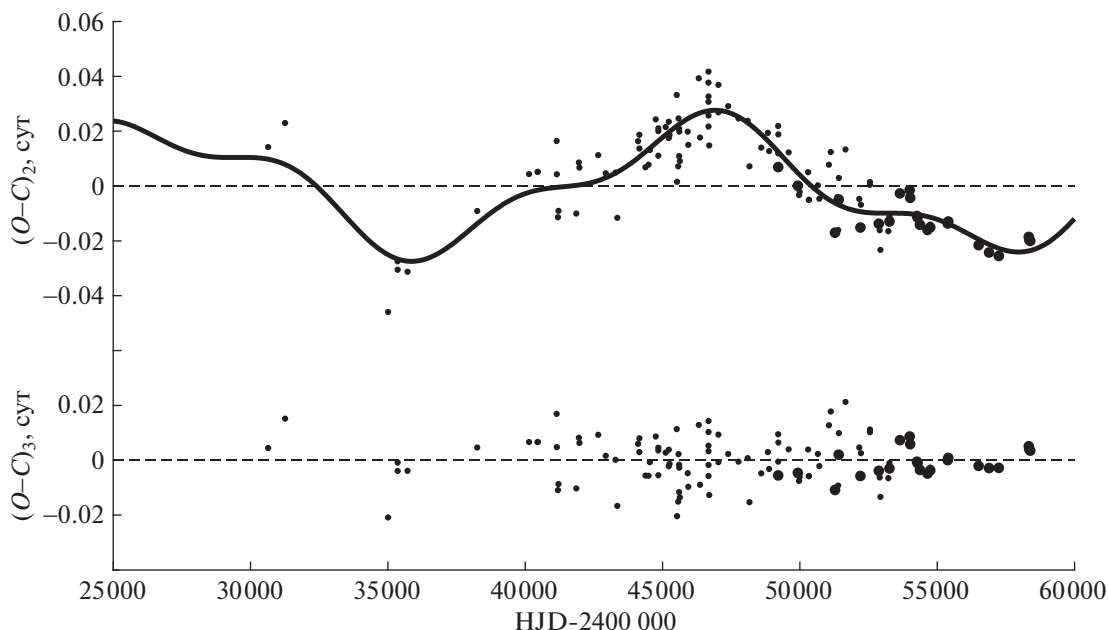


Рис. 2. Отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов ТТ Del от вычисленных с линейными элементами (2). Сплошная кривая – сумма теоретических кривых для световых уравнений с параметрами из табл. 1. В нижней части рисунка приведены значения $(O-C)_3$, полученные вычитанием из $(O-C)_2$ обоих световых уравнений. Визуальные наблюдения представлены маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС – большими точками.

ли амплитуда модуляций орбитального периода ΔP и амплитуда осцилляций $\Delta(O-C)$ на диаграмме $O-C$ связаны соотношением: $\Delta P/P_0 = 2\pi \Delta(O-C)/P_{\text{mod}}$. Принимая оценки масс компонентов и абсолютного радиуса вторичного компонента $R_2 = 3.26 R_\odot$ из [8] и используя последовательность формул, приведенную в [14], для каждого значения модулирующего периода находим оценки величины переносимого (от ядра звезды к ее оболочке и обратно) углового момента ΔJ , количества энергии, необходимого для переноса углового момента во внешнюю часть звезды, ΔE , напряженности магнитного поля B активного

компонента и изменений его светимости ΔL . Эти величины приведены в табл. 2.

Оценки напряженности магнитного поля согласуются с данными о магнитных полях звезд с конвективными оболочками, которые должны быть порядка 10^3 Гаусс. Изменения светимости вторичного компонента получаются небольшими. Кроме того, Ланца и др. [15, 16] показали, что за счет использования большей скорости вращения звезды или более эффективного механизма превращения вращательной кинетической энергии в магнитную и обратно, затраты энергии и соответствующие изменения светимости могут быть заметно меньше, чем дают соотношения из

Таблица 2. Величины, характеризующие циклы магнитной активности вторичного компонента ТТ Del для разных значений модулирующего периода

Величина	Значение	
P_{mod}	7700 сут	19900 сут
$\Delta(O-C)$	0.007 сут	0.021 сут
ΔP	1.64×10^{-5} сут = 1.42 с	1.9×10^{-5} сут = 1.64 с
ΔJ	5.10×10^{47} г см ² /с	5.92×10^{47} г см ² /с
ΔE	1.17×10^{41} эрг	1.58×10^{41} эрг
B	3.52×10^3 Гаусс	2.36×10^3 гаусс
ΔL	5.54×10^{32} эрг/с = $0.14 L_\odot = 0.042L_2$	2.89×10^{32} эрг/с = $0.075 L_\odot = 0.022L_2$

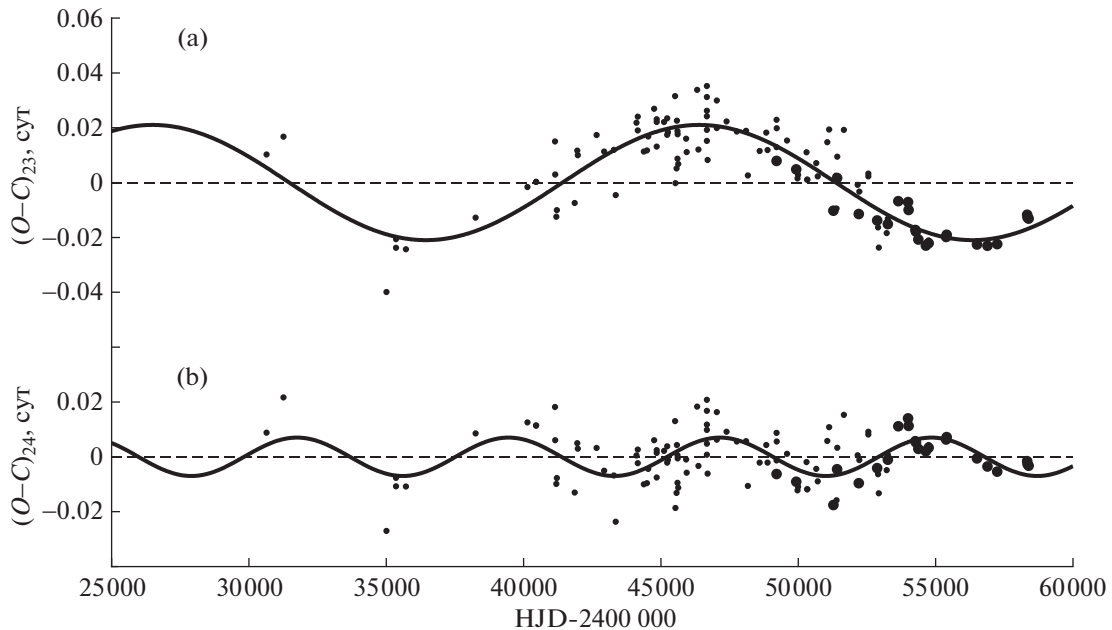


Рис. 3. а – разности $(O-C)_{23}$, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов TT Del от вычисленных с линейными элементами (2), $(O-C)_2$, теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом L, б – разности $(O-C)_{24}$, полученные вычитанием из тех же значений $(O-C)_2$ теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом G. Сплошными линиями показаны теоретические кривые для каждого светового уравнения с параметрами из табл. 1. Обозначения те же, что на рис. 2.

работы [14], так что полученные по ним оценки следует считать верхним пределом. Следовательно, магнитная активность вторичного компонента вполне может быть причиной колебаний орбитального периода TT Del, причем оба цикла могут быть следствием магнитных колебаний.

3. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА EU Нуа

Переменность звезды EU Нуа (BD –06 2694, $V = 10.1^m$, $P = 0.7782^d$) открыл Хоффмайстер [17] из фотографических наблюдений. Кордильевский [18, 19] продолжил фотографические наблюдения и определил эфемериды. В работе [20], также из фотографических наблюдений, были найдены исправленные линейные элементы. В работах [21–23] были получены первые фотоэлектрические кривые блеска этой системы в фильтрах В и V и определены фотометрические элементы орбиты. Позднее те же кривые блеска были заново решены в работе [24]. В этой же работе из фотометрических данных были определены спектральные классы компонентов: $Sp1 = F2 V$, $Sp2 = K0-4 V-IV$. Результаты обеих этих работ показали, что EU Нуа – полуразделенная система, у которой менее массивный компонент заполняет свою полость Роша. В работе [25] также были получены кривые блеска EU Нуа в фильтрах В и V,

из решения которых получалось, что это разделенная система. Новые фотоэлектрические наблюдения были получены и проанализированы в работе [26] и снова получен результат в пользу полуразделенной конфигурации.

Изменения периода EU Нуа были впервые замечены в работе [25]. К тому времени имелись в основном фотографические и визуальные моменты минимумов и всего несколько фотоэлектрических. Из этих данных следовало, что период системы уменьшается. В работе [28] было использовано уже немного больше фотоэлектрических моментов минимумов. Эти данные позволили установить, что кроме векового уменьшения периода имеются также его циклические изменения. В распоряжении авторов работы [26] было уже достаточно большое количество высокоточных данных, однако они уделили слишком большое внимание визуальным и фотографическим наблюдениям. В результате остатки, полученные ими после исключения монотонных и циклических изменений периода, в области фотоэлектрических наблюдений показывают явные дополнительные колебания, которые почему-то были оставлены без внимания. В настоящей работе показано, что изменения орбитального периода EU Нуа можно с хорошей точностью представить только циклической кривой без монотонного изменения.

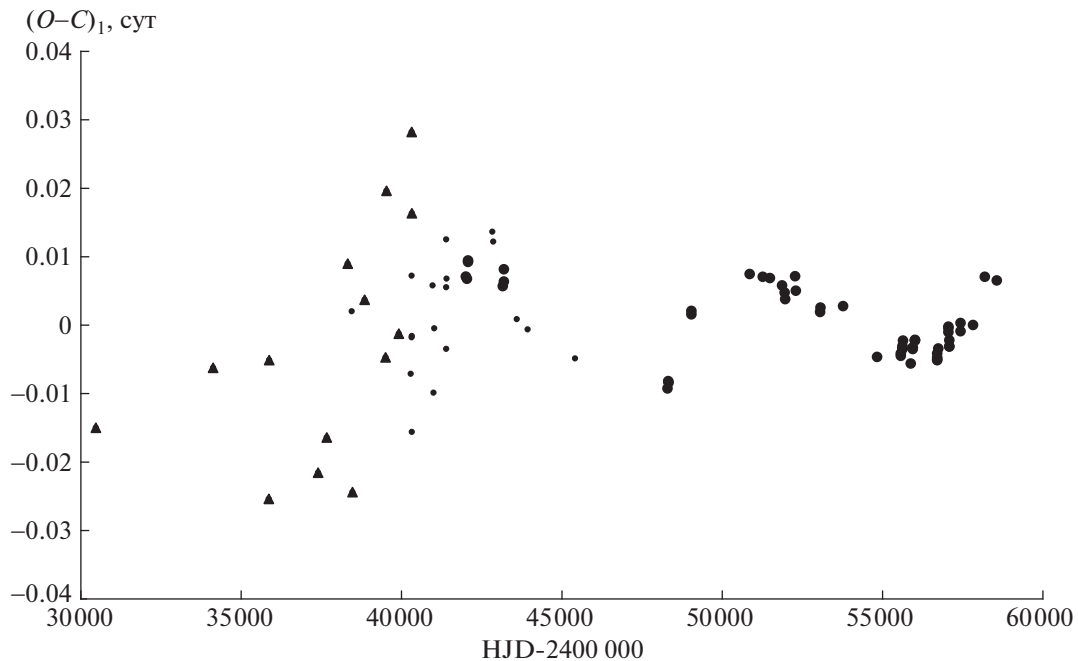


Рис. 4. Отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых моментов минимумов EU Нуа от вычисленных с линейными элементами (6). Обозначения те же, что на рис. 1.

Для EU Нуа имеется 88 моментов главного минимума: 20 визуальных, 14 фотографических и 54 из фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений. Отметим, что фотоэлектрические наблюдения из работы [21] в базе данных В. Р. Н. О. ошибочно помечены как фотографические. Из анализа сразу же был исключен момент минимума 2442452.33, так как соответствующее значение $O-C$ слишком сильно отклоняется от общего тренда. На рис. 4 приведены отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов EU Нуа от вычисленных (C) с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2434126.342(2) + 0.77820716(9)^d T. \quad (6)$$

Обозначения на этом рисунке такие же, как на рис. 1. В дальнейшем анализе мы не использовали данные фотографических наблюдений. Моменты минимумов EU Нуа были представлены выражением:

$$\text{HJD}(\text{Min I}) = 2434126.3454(5) + 0.77820718(1)^d T + LTE. \quad (7)$$

Начальные значения параметров долгопериодической орбиты были определены методом перебора в области их возможных значений. Одновременно (тоже перебором) уточнялись ли-

нейные элементы. Окончательно параметры светового уравнения уточнялись методом дифференциальных поправок [13] при фиксированных линейных элементах (7). Одновременно вычислялись ошибки определения параметров. Поскольку линейные элементы определялись только методом перебора, для них в скобках указана величина шага перебора. Параметры долгопериодической орбиты в EU Нуа приведены в табл. 3. На рис. 5 приведены отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов EU Нуа от вычисленных с линейными элементами из представления (7). Обозначения те же, что на рис. 2. Сплошная линия на этом рисунке – теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 3. В нижней части рис. 5 приведены

Таблица 3. Параметры гипотетической долгопериодической орбиты EU Нуа

Параметр	Значение
P_3	(8300 ± 110) сут = (22.7 ± 0.3) лет
A_3	(0.0081 ± 0.0013) сут
e_3	0.63 ± 0.14
ω_3	$18^\circ \pm 9^\circ$
JD_3	2449700 ± 170
$a_3 \sin i_3$	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^8$ км = (1.4 ± 0.2) a.e.

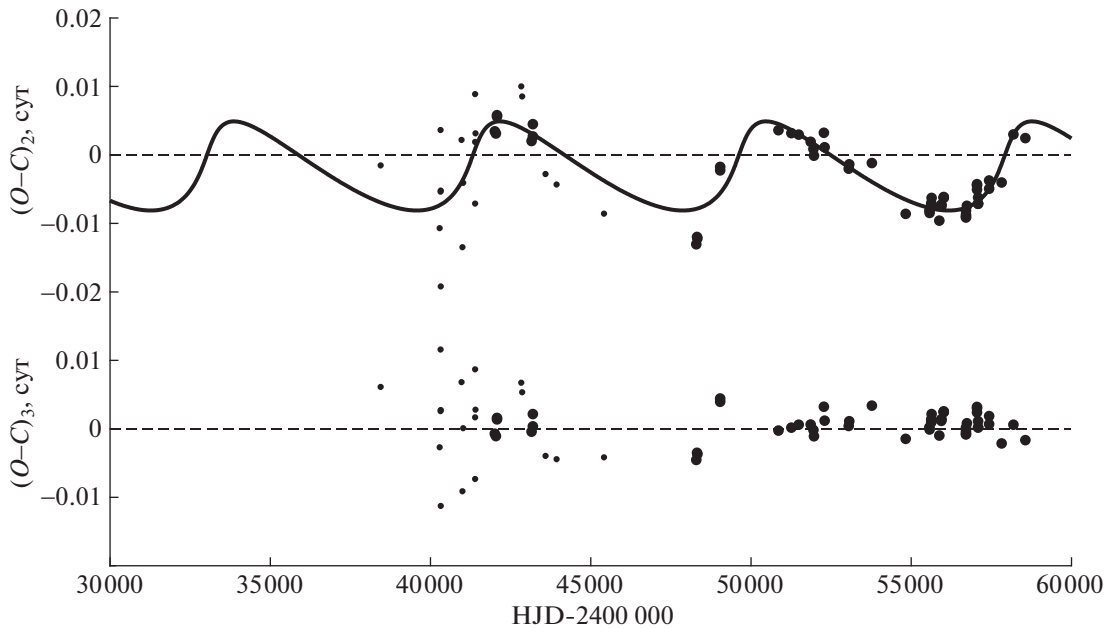


Рис. 5. Отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов EU Нуа от вычисленных с линейными элементами из представления (7). Сплошная линия — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 3. В нижней части рисунка приведены остатки $(O-C)_3$ после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (7). Обозначения те же, что на рис. 2.

остатки $(O-C)_3$ после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (7). Из этого рисунка видно, что теоретическая кривая хорошо удовлетворяет фотоэлектрическим наблюдениям, и не видно систематического хода. На рис. 6 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (7), полученные для всех моментов минимумов, включая фотографические данные. Разброс фотографических точек довольно велик, однако и на этом рисунке не наблюдается никакого систематического хода. То есть можно сделать вывод, что в системе нет векового уменьшения периода, которое предполагалось в предыдущих работах.

Используя найденные нами параметры долгопериодической орбиты, приведенные в табл. 3, можно вычислить функцию масс $f(M_3) = 0.00537 M_\odot$. Для оценки массы третьего тела были использованы массы компонентов двойной системы из работы [26]: $M_1 = 1.39 M_\odot$, $M_2 = 0.19 M_\odot$. Принимая $i_3 = 90^\circ$, находим нижнюю границу для массы 3-го тела: $M_3 > 0.26 M_\odot$. При такой малой массе вклад третьего тела в светимость системы очень мал (если это звезда Главной последовательности). При решении кривых блеска третий свет в этой системе не был найден [26].

4. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА SV Tau

Переменность звезды SV Tau (BD +28 0921, $V = 9.68^m$, $P = 2.1669^d$) открыла А. Кэннон по негативам Гарвардской обсерватории [29]. Вскоре из визуальных наблюдений было установлено, что это затменная переменная типа Алголя [30]. Впоследствии эти наблюдения были использованы для вычисления фотометрических элементов орбиты [31, 32]. Визуальную кривую блеска построил также Ласовский [33], а фотографическую — Кошкина [34]. Лавров и Лаврова [35] своим методом обработали наблюдения Ласовского и нашли, что орбита слегка эксцентрична. В работе [36] была построена первая кривая блеска SV Tau по фотоэлектрическим наблюдениям в фильтрах UVB и определены фотометрические элементы орбиты. Эти результаты свидетельствуют о том, что орбита круговая, а вторичный компонент заполняет свою полость Роша или близок к ее заполнению. Из показателей цвета был определен спектральный класс главного компонента как B8 V, а вторичного — G5 IV.

Мергенталер [37] пришел к выводу о циклических изменениях периода SV Tau. Однако последующие наблюдения не подтвердили существование синусоидального члена [33, 38]. Приходько [39] опубликовала сообщение о скачкообразном изменении периода SV Tau вблизи

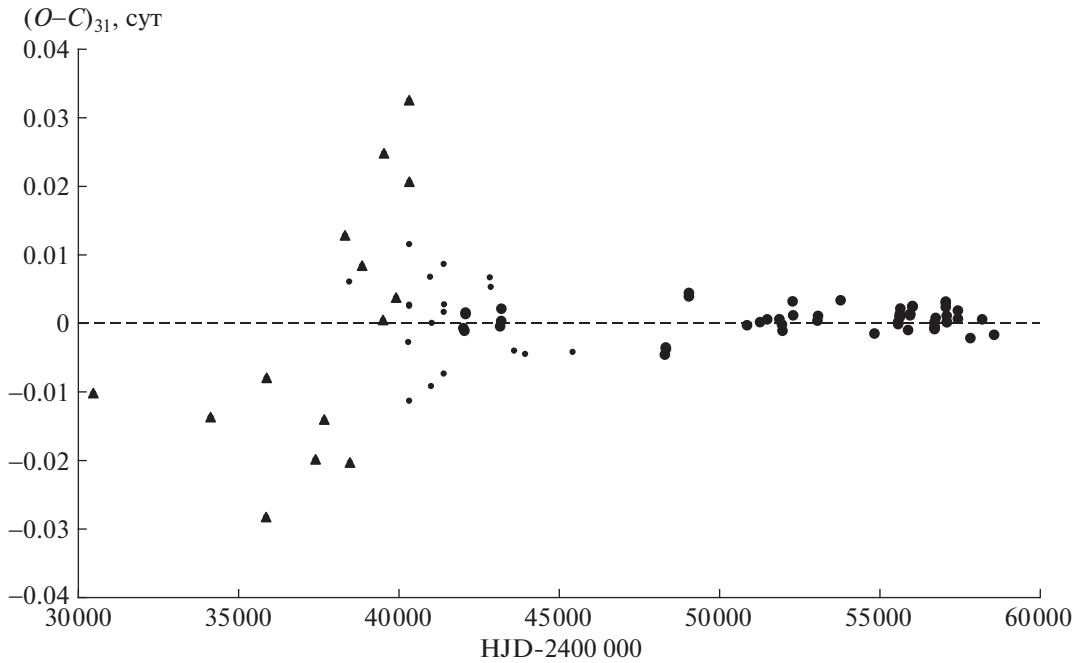


Рис. 6. Остатки $(O-C)_{31}$ после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов EU Нуа теоретических, вычисленных по формуле (7), полученные для всех моментов минимумов, включая фотографические данные. Обозначения те же, что на рис. 1.

эпохи JD 2429403 и о небольших циклических колебаниях периода. Кошкина [34] пришла к выводу о постоянстве периода SV Tau. В работе [40] был проведен подробный анализ периода SV Tau на основе имеющихся к тому времени данных и сделан вывод, что период слабо увеличивается. Однако автор тут же оговорился, что это может быть из-за неточности визуальных наблюдений. После этих работ и до настоящего времени было получено много моментов минимумов SV Tau, большинство из визуальных наблюдений, но имеется и некоторое количество из фотоэлектрических наблюдений. Однако ни новой кривой блеска, ни исследований периода не было опубликовано.

Для затменно-двойной системы SV Tau имеется 165 моментов главного минимума: 112 визуальных, 26 фотографических и 27 из фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений. На рис. 7 приведены отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов SV Tau от вычисленных (C) с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$C \equiv \text{HJD}(\text{Min I}) = 2434423.7452(12) + 2.1669046(2)^d T. \quad (8)$$

Обозначения на этом рисунке такие же, как на рис. 1. Из рисунка видно, что имеется боль-

шой разброс почти всех точек, кроме фотоэлектрических данных для $\text{JD} > 2453000$. В дальнейшем анализе не использовались наиболее отклоняющиеся визуальные точки: 2426679.271, 2427071.475, 2439054.384, 2446519.3808, 2450556.316, 2451078.541 и фотографические: 2435860.367, 2436287.325, 2438753.270, остальные моменты минимумов SV Tau были представлены выражением:

$$\text{HJD}(\text{Min I}) = 2434423.738(5) + 2.1669033(1)^d T + LTE. \quad (9)$$

Параметры светового уравнения определялись так же, как для EU Нуа. При этом фотоэлектрическим точкам с $\text{JD} > 2453000$ был приписан вес 10.

Таблица 4. Параметры гипотетической долгопериодической орбиты SV Tau

Параметр	Значение
P_3	(39250 ± 550) сут = (107.5 ± 1.5) лет
A_3	(0.019 ± 0.001) сут
e_3	0.61 ± 0.05
ω_3	$213^\circ \pm 5^\circ$
JD_3	2418550 ± 550
$a_3 \sin i_3$	$(4.9 \pm 0.3) \times 10^8$ км = (3.3 ± 0.2) а.е.

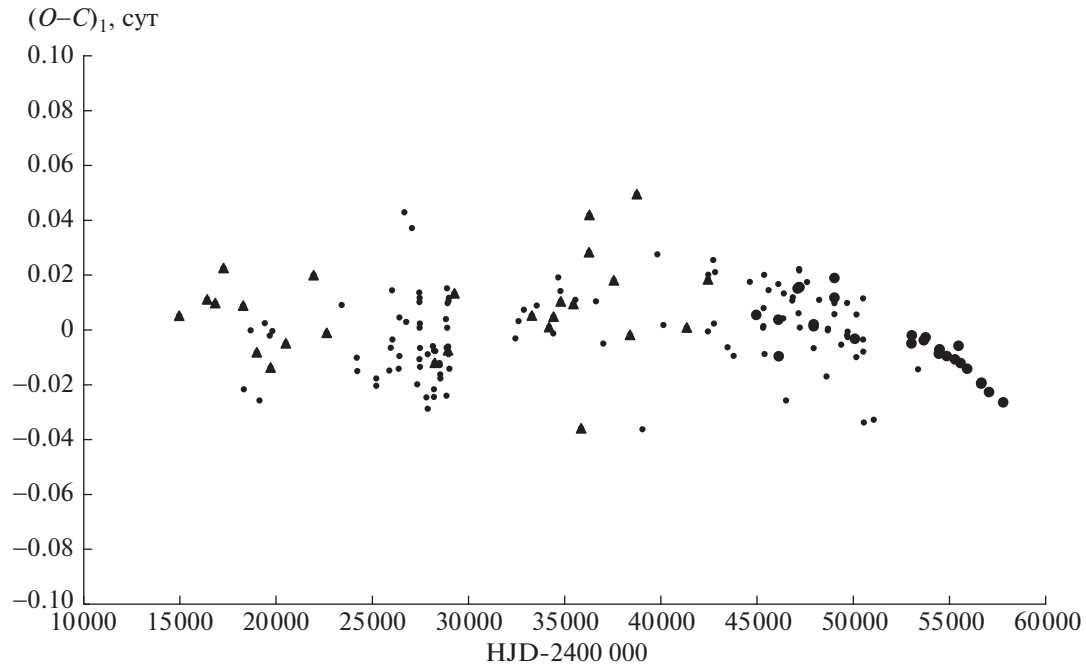


Рис. 7. Отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов SV Тау от вычисленных (C) с линейными элементами (8). Обозначения те же, что на рис. 1.

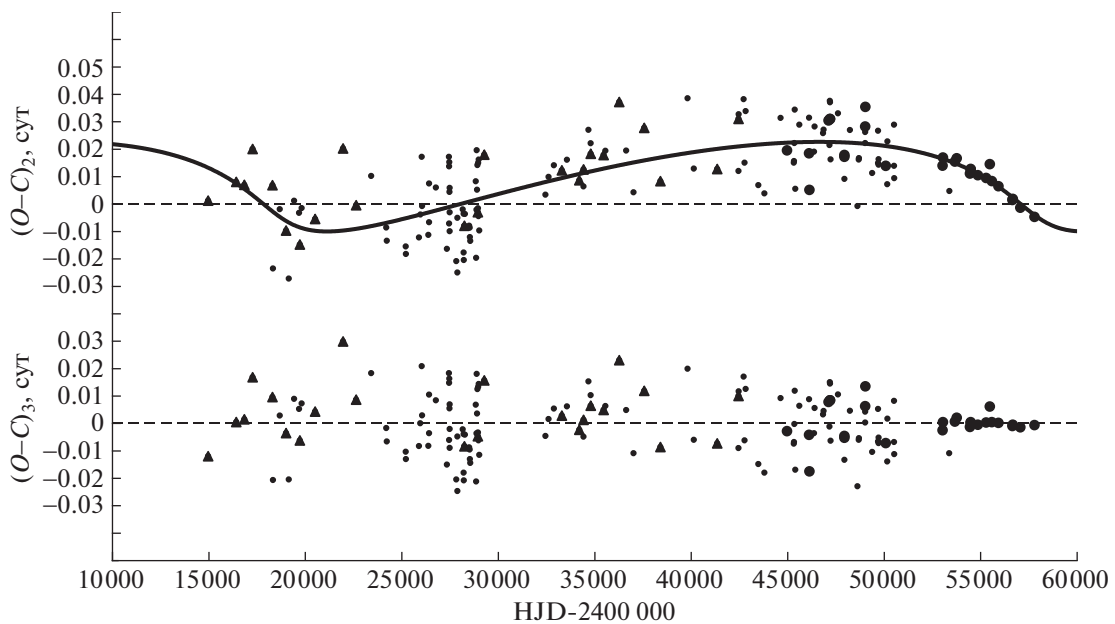


Рис. 8. Отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов SV Тау от вычисленных с линейными элементами из представления (9). Сплошная линия – теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4. В нижней части рисунка приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (9). Обозначения те же, что на рис. 1.

Поскольку линейные элементы определялись только методом перебора, для них в скобках указана величина шага перебора. Параметры долгопериодической орбиты в SV Tau приведены в табл. 4. На рис. 8 приведены отклонения ($O - C$)₂ наблюдаемых моментов минимумов SV Tau от вычисленных с линейными элементами из представления (9). Обозначения те же, что на рис. 7. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4. В нижней части рис. 8 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (9). Из этого рисунка видно, что теоретическая кривая хорошо удовлетворяет наблюдениям, и нет никаких систематических изменений.

Используя найденные нами параметры долгопериодической орбиты, приведенные в табл. 4, можно вычислить функцию масс $f(M_3) = 0.00324 M_\odot$. Для оценки массы третьего тела были использованы массы компонентов двойной системы из работы [36]: $M_1 = 3.0 M_\odot$, $M_2 = 0.8 M_\odot$. Принимая $i_3 = 90^\circ$, находим нижнюю границу для массы 3-го тела: $M_3 > 0.38 M_\odot$. При такой малой массе вклад третьего тела в светимость системы очень мал (если это звезда Главной последовательности). При решении кривых блеска оценок вклада третьего света в светимость этой системы не делалось.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ изменений орбитального периода затменно-двойных систем TT Del, EU Hyа и SV Tau показал, что в этих системах нет монотонного уменьшения периода.

Изменения орбитального периода затменно-двойной системы TT Del можно представить суперпозицией двух циклических изменений. Предполагаемые светимости дополнительных тел малы и вряд ли могут быть обнаружены из фотометрических наблюдений. Не исключено, что существует только одно дополнительное тело, причем годится любое из двух. Второе колебание можно отнести на счет магнитной активности вторичного компонента. Следствием магнитной активности вторичного компонента могут быть также оба вида колебаний.

Причиной изменения орбитального периода затменно-двойных систем EU Hyа и SV Tau является световое уравнение вследствие движения в долгопериодической орбите. Форма диаграмм $O - C$ имеет вид, характерный для движения в долгопериодической орбите с большим эксцентриситетом. Теоретические кривые для светового уравнения, построенные с найденными нами параметрами, неплохо описывают наблюдения.

При этом остатки после вычитания из наблюдений теоретических кривых для светового уравнения не показывают никакого систематического изменения.

Для уточнения характера изменений орбитального периода в рассмотренных затменно-двойных системах нужны дальнейшие наблюдения моментов минимумов, а также решение высокоточных кривых блеска для уточнения орбитальных параметров и прояснения вопроса о третьем свете в их блеске. Желательно также получение кривых лучевых скоростей для надежного определения масс компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Х. Ф. Халиуллин, *Астрон. журн.* **51**, 395 (1974).
2. А. И. Халиуллина, *Астрон. журн.* **92**, 587 (2015).
3. А. И. Халиуллина, *Астрон. журн.* **93**, 795 (2016).
4. А. И. Халиуллина, *Астрон. журн.* **94**, 619 (2017).
5. А. И. Халиуллина, *Астрон. журн.* **94**, 849 (2017).
6. В. R. N. O. Project — Eclipsing Binaries database. URL: <http://var2.astro.cz/EN/brno/index.php>.
7. L. Plaut, *Astron. Nachr.* **244**, 289 (1932).
8. М. А. Свечников, Э. Ф. Кузнецова *Каталог приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд* (Свердловск, Изд-во Урал. ун-та, 1990).
9. E. M. Halbedel, *Inform. Bull. Var. Stars* **2549**, 1 (1984).
10. S. Qian, *Astron. J.* **119**, 3064 (2000).
11. А. И. Халиуллина, *Астрон. журн.* **96**, 196 (2019).
12. Д. Я. Мартынов *Переменные звезды* (Гостехиздат, т. 3, 464—490 с., 1947).
13. А. И. Халиуллина, Х. Ф. Халиуллин, *Астрон. журн.* **61**, 393 (1984).
14. J. H. Applegate, *Astrophys. J.* **385**, 621 (1992).
15. A. F. Lanza, M. Rodono, and R. Rosner, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **296**, 893 (1998).
16. A. F. Lanza and M. Rodono, *Astron. and Astrophys* **349**, 887 (1999).
17. C. Hoffmeister, *Astron. Nach.* **242**, 129 (1931).
18. K. Kordylewski, *Rocznik Astronomiczny Obserwatorium Krakowskiego* **18** (1947).
19. K. Kordylewski, *Rocznik Astronomiczny Obserwatorium Krakowskiego* **24** (1953).
20. H. Busch and K. Haussler, *Inf. Bull. Variable Stars* **639** (1972).
21. A. G. Kulkarni, C. Raghavender Rao, R. Swaminathan, *Contributions of the Nizamiah and Japal-Rangapur Observatories* **6** (1978).
22. A. G. Kulkarni, *Contributions of the Nizamiah and Japal-Rangapur Observatories* **7** (1978).
23. A. G. Kulkarni, *Photometric Study of EU Hydrae* (Doctoral Thesis, Osmania University, 1979).
24. P. V. Rao, M. B. K. Sarma, and K. D. Abhyankar, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **108**, 967 (1996).
25. S.-H. Gu, Q.-Y. Liu, Y.-L. Yang, and B. Wang, *Astrophys. and Space Sci.* **203**, 189 (1993).

26. *Y.-G. Yang, Q. Li, H.-L. Li, and H.-F. Dai*, Res. Astron. and Astrophys. **16**, 35 (2016).
27. *S.-H. Gu*, Inf. Bull. Variable Stars, **4078** (1994).
28. *S.-B. Qian and S. Boonruksar*, Publ. Astron. Soc. Japan **55**, 499 (2003).
29. *E. Pickering*, Astron. Nachr. **179**, 39 (1908).
30. *S. Enebo*, Astron. Nachr. **184**, 255 (1910).
31. *E. Zinner*, Astron. Nachr. **187**, 177 (1911).
32. *H. Shapley*, Astrophys. J. **38**, 158 (1913).
33. *K. Lassovszky*, Abhandlungen der Sternwarte Budapest-Svabbadsaghegy, **6** (1938).
34. *Л. Н. Кошкина*, Переменные звезды **13**, 412 (1961).
35. *М. И. Лавров, Н. В. Лаврова*, Труды Казанской городской АО **49**, 18 (1985).
36. *C. R. Chambliss and R. L. Walker*, Astron. J. **102**, 1409 (1991).
37. *J. Mergentaler*, Acta Astron. ser. c **2**, 65 (1934).
38. *J. M. Kreiner*, Acta Astron. **21**, 365 (1971).
39. *А.Е. Приходько*, Астрон. цирк. 191 (1958).
40. *C. R. Chambliss*, Info. Bull. Var. Stars, **2164** (1982).