

ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ПЕРИОДОВ ЗАТМЕННО-ДВОЙНЫХ СИСТЕМ δ LIB И SX LYN

© 2024 г. А. И. Халиуллина^{1,*}

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

После доработки 14.08.2024 г.

Принята в печать 15.08.2024 г.

Проведен анализ изменений орбитального периода затменно-двойных систем δ Lib и SX Lyn. Показано, что изменения периодов этих систем с практически одинаковой точностью можно представить или суперпозицией векового уменьшения периода и циклических изменений, или только циклическими изменениями. Циклические изменения периода δ Lib в обоих случаях могут быть следствием присутствия третьего тела в системе. В случае квадратичного представления они могут быть также следствием магнитной активности вторичного компонента. Для SX Lyn выявлена суперпозиция двух циклических изменений как для линейного, так и для квадратичного представления. Циклические изменения периода с меньшим периодом в обоих случаях могут быть следствием присутствия третьего тела в системе. Циклические изменения периода с большим периодом могут быть следствием магнитной активности вторичного компонента. Вековое уменьшение периода в обеих системах может быть следствием потери углового момента за счет магнитного торможения.

Ключевые слова: двойные звезды, затменные звезды, отдельные — δ Lib, SX Lyn

DOI: 10.31857/S0004629924110033 **EDN:** JLJWRM

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда δ Lib (BD — 07 3938, HD 132742, $V_{\max} = 4.91^m$, $P = 2.3273^d$) была открыта как затменно-переменная Шмидтом [1]. Первая фотоэлектрическая кривая блеска была приведена в работе Стеббинса [2]. Кох [3] получил полные широкополосные кривые блеска в фотометрической системе UBV. Подробный анализ кривых блеска δ Lib был проведен в работе [4], в которой к наблюдениям Коха были добавлены наблюдения в фильтрах J, H и K. В работе [5] все имеющиеся к тому времени кривые блеска были решены тремя программами. Звезда δ Lib много раз наблюдалась спектроскопически, однако долгое время удавалось получить кривую лучевых скоростей только для одного компонента. Впервые лучевые скорости вторичного компонента получил Томкин [6]. Построив полную кривую лучевых скоростей, он определил отношение масс компонентов и массу каждого компонента. Впоследствии эти значения уточнялись с помощью новых наблюдений и методов. Наиболее современные решения кривых блеска и лучевых скоростей получены в работе [7], где были собраны фотометрические наблюдения δ Lib из разных источников и получено решение кривой блеска с учетом спектроскопического отношения масс, полученного

в этой же работе, а также определены абсолютные параметры компонентов. В разных работах спектральный класс главного компонента определялся в диапазоне от B9.5V до A0V, спектральный класс вторичного компонента — от раннего G до K2IV.

При наблюдении лучевых скоростей было обнаружено, что γ -скорость меняется, что может быть следствием присутствия в системе третьего тела или других причин (например, эффекта Росситера-Маклафлина). Гипотеза присутствия в системе третьего тела была подробно рассмотрена в работе [8], затем она проверялась в работе [5]. Период движения двойной системы в долгопериодической орбите, определенный в этих работах, составляет около 3-х лет. В работе [7] была пересмотрена возможность присутствия в системе третьего тела и не было найдено этому подтверждения. Моменты минимумов, имевшиеся до 2018 г., показывали только монотонное увеличение периода.

Переменность звезды SX Lyn (GSC 3799.02033, $V = 10.0^m$, $P = 2.02247^d$) открыл Киппенхан [9]. В работе [10] из фотографических наблюдений были найдены эфемериды и построена кривая блеска, из которой следовало, что это затменная переменная типа Алголя. Из наблюдений с объективной призмой

Гетц и Венцель [11] определили спектральный класс системы как A2, а МакДональд [12] — как F0. Для этой системы нет решения кривой блеска, имеются только приближенные фотометрические и абсолютные элементы, приведенные в каталоге [13]. Для SX Lup имеется довольно много наблюдений моментов минимумов, из которых следует, что период системы меняется, однако исследований изменений периода этой системы до настоящего времени не было проведено.

2. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА δ LIB

Для исследования изменений периода затменно-двойной системы δ Lib были использованы моменты минимумов из базы данных В. R. N. O. [14]. Всего имеется 179 моментов главного минимума: 160 визуальных, 3 фотографических и 16 из фотоэлектрических и ПЗС наблюдений и 3 момента вторичного минимума.

На рис. 1 приведены разности $(O - C)_1$ между наблюдаемыми (O) моментами минимумов δ Lib и вычисленными (C) с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$\begin{aligned} \text{HJD}(\text{Min I}) = & 2442960.6953(15) + \\ & + 2.3273533(3)^d \times T, \end{aligned} \quad (1)$$

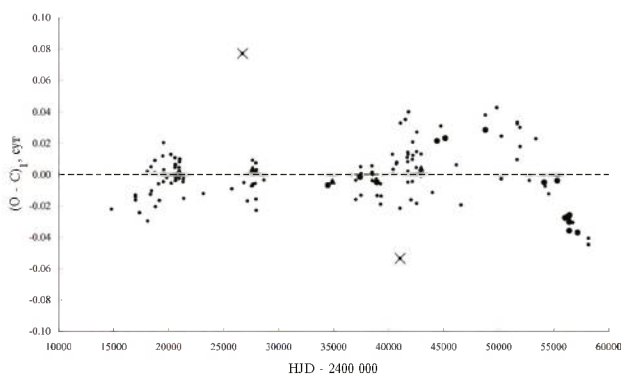


Рис. 1. Разности $(O - C)_1$ между наблюдаемыми моментами минимумов δ Lib и вычисленными с линейными элементами (1). Фотографические наблюдения представлены в виде треугольников, визуальные — маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС — большими точками. Крестиками помечены точки, которые не использовались при анализе изменений периода.

где T — эпоха наблюдения. На этом рисунке фотоэлектрические и ПЗС наблюдения представлены большими точками, визуальные — маленькими точками и фотографические — треугольниками. Далее в анализе изменений периода не использовались две сильно отклоняющиеся визуальные точки: $\text{JD} = 2426720.501$ и $\text{JD} = 2441038.248$ (на рис. 1 помечены крестиками). Были рассмотрены два варианта представления изменений периода δ Lib: с линейными и с квадратичными элементами.

2.1. Линейные элементы + LTE

Так как изменения орбитального периода δ Lib имеют не монотонный характер, они были представлены в виде:

$$\begin{aligned} \text{HJD}(\text{Min I}) = & 2442960.7240(1) + 2.3273488(1)^d \times \\ & \times T + \frac{a_3 \sin i_3}{c} (1 - e_3 \cos E) \sin(v + w_3), \end{aligned} \quad (2)$$

где последний член — световое уравнение [15], описывающее циклическое изменение периода из-за движения звезды вокруг центра масс с предполагаемым третьим телом (далее LTE = light time effect). В выражении для светового уравнения использованы следующие обозначения: v и E — истинная и эксцентрическая аномалии, соответственно, a_3 — большая полуось, i_3 — наклонность, e_3 — эксцентриситет и ω_3 — долгота периаstra орбиты затменной системы относительно центра масс тройной системы, c — скорость света. Параметры светового уравнения определялись методом перебора в области их возможных значений. Одновременно (тоже перебором) уточнялись линейные элементы. Затем при фиксированных линейных элементах параметры светового уравнения уточнялись методом дифференциальных поправок [16]. Одновременно вычислялись ошибки определения параметров. Полученные нами значения параметров светового уравнения приведены в табл. 1. В таблице использованы следующие обозначения: P_3 — период обращения затменно-двойной системы вокруг центра масс тройной системы, JD_3 — момент прохождения через периастр, $A_3 = (a_3 \sin i_3)/c$.

На рис. 2 приведены разности $(O - C)_{11}$ между наблюдаемыми моментами минимумов δ Lib и вычисленными с линейными элементами (2). Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1. В нижней части рисунка приведены значения $(O - C)_{12}$, полученные вычитанием из $(O - C)_{11}$ теоретической кривой для светового уравнения.

Таблица 1. Параметры гипотетической долгопериодической орбиты в δ Lib для представления с линейными элементами.

Параметр	Значение
P_3	(78450 ± 790) сут = (215 ± 2) лет
A_3	(0.055 ± 0.003) сут
e_3	0.83 ± 0.02
ω	$127^\circ \pm 4^\circ$
JD_3	$2\,452\,100 \pm 380$
$a_3 \sin i_3$	$(1.42 \pm 0.08) \times 10^9$ км = (9.5 ± 0.5) а. е.

2.2. Квадратичные элементы + LTE

Поскольку разности $(O - C)_1$, полученные с использованием линейной зависимости, имеют значимые систематические отклонения (см. рис. 1), а в литературе имеются сообщения о возможном вековом увеличении периода, моменты минимумов δ Lib были представлены суммой квадратичных элементов и светового уравнения:

$$HJD(\text{Min I}) = 2442960.7237(1) + 2.3273439(1)^d \times \times T - 1.53(1)^d \times 10^{-9} \times T^2 + LTE. \quad (3)$$

Параметры светового уравнения определялись так же, как в предыдущем случае, они приведены в табл. 2. Отметим, что вместо подозреваемого ранее векового увеличения периода наблюдается

Таблица 2. Параметры гипотетической долгопериодической орбиты в δ Lib для представления с квадратичными элементами.

Параметр	Значение
P_3	(43000 ± 650) сут = (117.7 ± 1.8) лет
A_3	(0.052 ± 0.001) сут
e_3	0.0
ω	0.0
JD_3	$2\,440\,100 \pm 190$
$a_3 \sin i_3$	$(1.35 \pm 0.02) \times 10^9$ км = (9.0 ± 0.2) а. е.

его уменьшение. На рис. 3 приведены разности $(O - C)_{21}$ между наблюдаемыми моментами минимумов δ Lib и вычисленными с линейными элементами из представления (3). Сплошной линией показана сумма теоретических кривых для параболы и светового уравнения с параметрами из табл. 2. В нижней части рис. 3 приведены значения $(O - C)_{22}$, полученные вычитанием из $(O - C)_{21}$ параболы и светового уравнения. Обозначения те же, что на рис. 1. На рис. 4 приведены разности $(O - C)_{23}$, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов δ Lib от вычисленных с линейными элементами (3) теоретической кривой для параболы (3). Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 2. Обозначения те же, что на рис. 1.

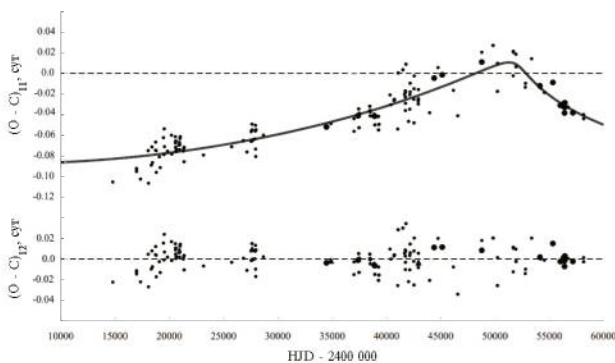


Рис. 2. Разности $(O - C)_{11}$ между наблюдаемыми моментами минимумов δ Lib и вычисленными с линейными элементами (2). Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1. В нижней части рисунка приведены значения $(O - C)_{12}$, полученные вычитанием из $(O - C)_{11}$ теоретической кривой для светового уравнения. Обозначения те же, что на рис. 1.

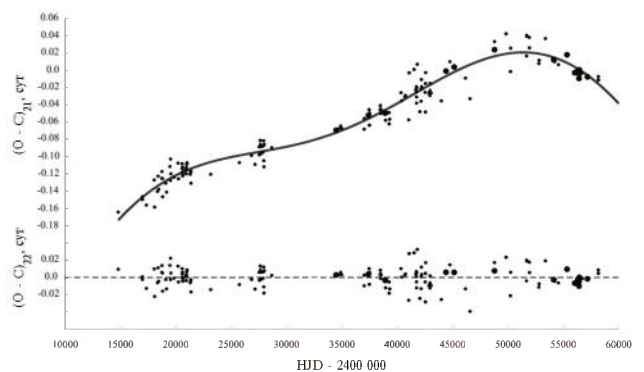


Рис. 3. Разности $(O - C)_{21}$ между наблюдаемыми моментами минимумов δ Lib и вычисленными с линейными элементами (3). Сплошная кривая — сумма теоретических кривых для параболы (3) и светового уравнения с параметрами из табл. 2. В нижней части рисунка приведены значения $(O - C)_{22}$, полученные вычитанием из $(O - C)_21$ параболы и светового уравнения. Обозначения те же, что на рис. 1.

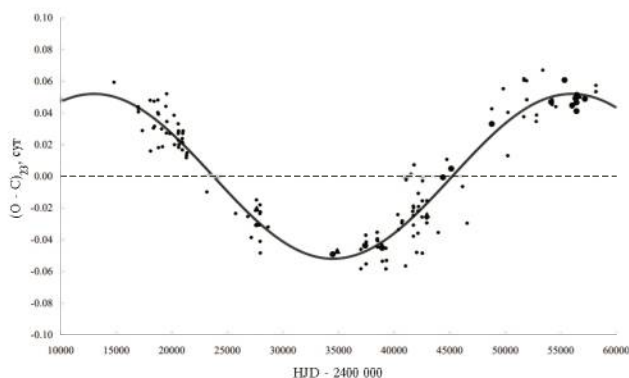


Рис. 4. Разности $(O - C)_{23}$, полученные вычитанием из отклонений $(O - C)_1$ наблюдаемых моментов минимумов δ Lib от вычисленных с линейными элементами (3) теоретической кривой для параболы (3). Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 2. Обозначения те же, что на рис. 1.

3. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЙ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА δ LIB

3.1. Линейные элементы + LTE

Если циклические колебания периода представляют собой световое уравнение, то используя найденные нами параметры долгопериодической орбиты, приведенные в табл. 1, можно вычислить функцию масс тройной системы:

$$f(M_3) = \frac{4\pi^2 a_3^3 \sin^3 i_3}{G P_3^2} = \frac{M_3^3 \sin^3 i_3}{(M_1 + M_2 + M_3)^2} = 0.0188 M_\odot. \quad (4)$$

Используя значения масс компонентов затменно-двойной системы из [7]: $M_1 = 3.60 M_\odot$, $M_2 = 1.50 M_\odot$, получаем $M_3 \sin i_3 = 0.875 M_\odot$. Считая третий компонент звездой Главной последовательности, из соотношения масса-светимость в соответствующем диапазоне масс [17] найдем светимость третьего тела: $L_3 = 0.493 L_\odot$ и третий свет в блеске системы $l_3 = 0.003$, то есть слишком мал для обнаружения. В этом случае можно предположить присутствие дополнительного тела в системе. В то же время колебания вследствие магнитной активности маловероятны из-за большого периода и большого эксцентриситета.

3.2. Квадратичные элементы + LTE

Полученное нами представление изменений орбитального периода затменно-двойной системы

δ Lib в виде суперпозиции обратной параболы и светового уравнения хорошо согласуется с наблюдениями (рис. 3). 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 [18]. Для δ Lib получаем $Q = -1.53^d \times 10^{-9}$ и $dP/dt = -4.80 \times 10^{-7}$ сут/год. Вековое уменьшение периода может быть вызвано потерей углового момента системы вследствие магнитного торможения [19, 20].

Функция масс для этого случая $f(M_3) = 0.0529 M_\odot$ и $M_3 \sin i_3 = 1.29 M_\odot$. Соответственно светимость $L_3 = 3.0 L_\odot$ и третий свет в блеске системы должен быть не менее $l_3 = 0.02$. В работе [5] из решения кривых блеска была получена большая доля третьего света в блеске системы — до 19% в фотометрической системе H. В то же время в работе [7] третий свет вообще не был найден. В работе [4] авторы также отмечают, что результаты решения кривых блеска в ИК области не показывают заметной доли третьего света. Таким образом, вопрос о наличии третьего света в блеске δ Lib пока остается открытым. Нужны новые фотометрические наблюдения и решения кривых блеска.

В качестве альтернативы гипотезе о третьем теле может служить предположение, что наблюдаемые модуляции периода являются проявлением магнитной активности. Вторичный компонент в затменно-двойной системе δ Lib имеет достаточно поздний спектральный класс, чтобы иметь конвективную оболочку и, следовательно, магнитное поле. В работе [21] была предложена модель, в которой гравитационное квадрупольное взаимодействие обеспечивает механизм, посредством которого орбита реагирует на изменения внутренней структуры активной звезды. В этой модели 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 из [7] и используя последовательность формул, приведенную в [21], 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 в активного компонента и изменений его светимости ΔL . Эти величины приведены в табл. 3. Оценки напряженности магнитного поля согласуются с данными о магнитных полях звезд с конвективными оболочками, которые должны быть порядка 10^3 Гаусс. Изменения светимости вторич-

Таблица 3. Величины, характеризующие циклы магнитной активности вторичного компонента δ Lib.

Величина	Значение
P_{mod}	43000 сут = 117.7 лет
ΔP	1.77×10^{-5} сут = 1.53 с
ΔJ	2.05×10^{48} г см ² /с
ΔE	6.09×10^{41} эрг
B	2.38×10^3 Гаусс
ΔL	5.15×10^{32} эрг/с = $0.13 L_{\odot} = 0.015 L_2$

ного компонента получаются небольшими. Кроме того, в работах [22, 23] было показано, 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 работы [21], так что полученные по ним оценки следует считать верхним пределом. Следовательно, магнитная активность вторичного компонента вполне может быть причиной колебаний орбитального периода δ Lib.

4. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА SX LYN

Для исследования изменений периода затменно-двойной системы SX Lyn были использованы моменты минимумов из базы данных В. R. N. O. [14]. Всего имеется 124 момента главного минимума: 81 визуальный, 18 фотографических и 25 из фотоэлек-

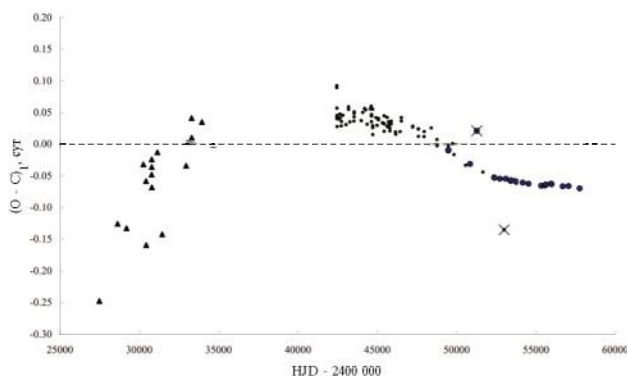

Рис. 5. Разности $(O - C)_I$ между наблюдаемыми (O) моментами минимумов SX Lyn и вычисленными (C) с линейными элементами (5). Обозначения те же, что на рис. 1. Крестиками помечены точки, которые не использовались при анализе изменений периода.

Таблица 4. Параметры гипотетических долгопериодических орбит в SX Lyn для представления с линейными элементами.

Параметр	Значение	
P_3	(32300 ± 300) сут = (88.4 ± 0.8) лет	(7800 ± 70) сут = (21.4 ± 0.2) лет
A_3	(0.160 ± 0.005) сут	(0.0114 ± 0.0008) сут
e_3	0.58 ± 0.03	0.53 ± 0.06
ω_3	$324^\circ \pm 2^\circ$	$159^\circ \pm 4^\circ$
JD_3	$2\,426\,700 \pm 240$	$2\,456\,950 \pm 70$
$a_3 \sin i_3$	$(4.14 \pm 0.13) \times 10^9$ км = (27.4 ± 0.9) а. е.	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^8$ км = (1.97 ± 0.14) а. е.

трических и ПЗС наблюдений и 1 момент вторичного минимума.

На рис. 5 приведены разности $(O - C)_I$ между наблюдаемыми (O) моментами минимумов SX Lyn и вычисленными (C) с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$\begin{aligned} \text{HJD (MinI)} = & 2445439.392(5) + \\ & + 2.0224929(14)^d \times T, \end{aligned} \quad (5)$$

где T — эпоха наблюдения. Обозначения на этом рисунке такие же, как на рис. 1. В анализе изменений периода не использовались две сильно отклоняющиеся точки: $JD = 2451274.305$ и $JD = 2452997.3127$. Как и в случае δ Lib, были рассмотрены два варианта представления изменений периода SX Lyn: с линейными и с квадратичными элементами.

4.1. Линейные элементы + LTE

Изменения орбитального периода SX Lyn были представлены в виде:

$$\begin{aligned} \text{HJD (Min I)} = & 2445439.315(1) + \\ & + 2.0225098(1)^d \times T + \text{LTE}. \end{aligned} \quad (6)$$

Параметры светового уравнения определялись так же, как в предыдущем случае, они приведены в первом столбце табл. 4. На рис. 6 приведены разности $(O - C)_{II}$ между наблюдаемыми моментами минимумов SX Lyn и вычисленными с линейными элементами из представления (6). Обозначения те же, что на рис. 1. Сплошная линия на этом ри-

сунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 4. В нижней части рис. 6 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (6). На этом рисунке видно, что самые последние наблюдения указывают на существование еще одной волны в изменениях периода. Поэтому наблюдения с $JD > 2445000$ были также представлены световым уравнением, при этом фотоэлектрическим и ПЗС наблюдениям был приписан вес 10. Элементы этого светового уравнения определялись так же, как в предыдущем случае, но при фиксации линейных элементов (6). На рис. 7 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов теоретических, вычисленных по формуле (6), для наблюдений с $JD > 2445000$. Здесь маленькие точки — визуальные наблюдения, большие точки — фотоэлектрические и ПЗС. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из второго столбца табл. 4. В нижней части рис. 7 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (6), и второго светового уравнения. Визуальные точки показывают довольно большой разброс, однако не видно каких-либо систематических изменений.

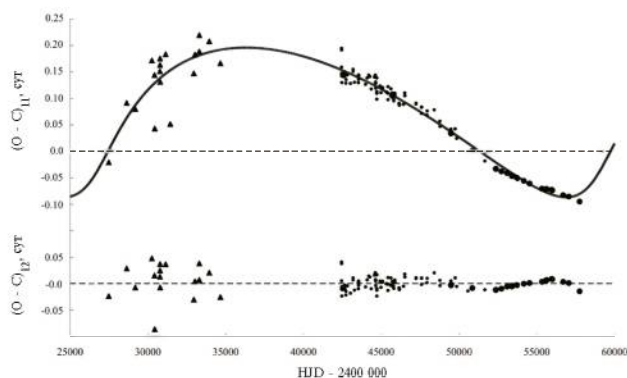


Рис. 6. Разности $(O - C)_{11}$ между наблюдаемыми моментами минимумов SX Lyr и вычисленными с линейными элементами из представления (6). Обозначения те же, что на рис. 1. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 4. В нижней части рисунка приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (6).

4.2. Квадратичные элементы + LTE

Изменения периода SX Lyr можно представить и квадратичной зависимостью, параметры которой также определялись методом наименьших квадратов:

$$HJD (\text{Min I}) = 2445439.428(3) + 2.0224852(8)^d \times T - 3.03(14)^d \times 10^{-9} \times T^2. \quad (7)$$

Остатки, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов от теоретических, вычисленных по формуле (7), теоретической параболы с параметрами из представления (7) были представлены световым уравнением. Параметры светового уравнения определялись так же, как в предыдущем случае. Напомним, что при этом уточнялись и квадратичные элементы. В результате получается следующее представление для моментов минимумов:

$$HJD (\text{Min I}) = 2445439.5304(1) + 2.0224854(1)^d \times T - 5.56(1)^d \times 10^{-9} \times T^2 + LTE. \quad (8)$$

Параметры светового уравнения для этого случая приведены в табл. 5. На рис. 8 приведены разности $(O - C)_{21}$ между наблюдаемыми моментами минимумов SX Lyr и вычисленными с квадратичными элементами из представления (8). Обозначения те

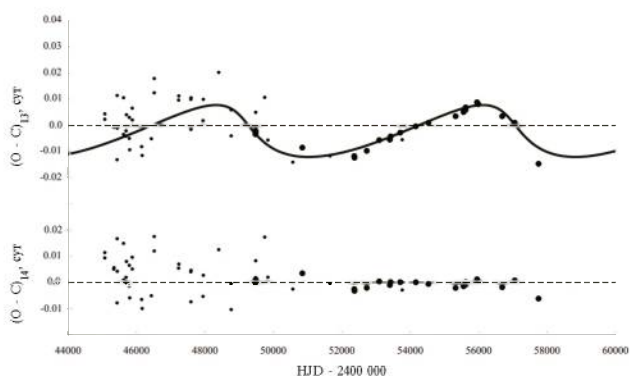


Рис. 7. Остатки $(O - C)_{13}$ после вычитания из наблюдаемых моментов теоретических, вычисленных по формуле (6), для наблюдений с $JD > 2445000$. Здесь маленькие точки — визуальные наблюдения, большие точки — фотоэлектрические и ПЗС. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из второго столбца табл. 4. В нижней части рисунка приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (6), и второго светового уравнения.

Таблица 5. Параметры гипотетических долгопериодических орбит в SX Lyn для представления с квадратичными элементами.

Параметр	Значение	
P_3	$(28700 \pm 410) \text{ сут} = (78.6 \pm 1.1) \text{ лет}$	$(7250 \pm 150) \text{ сут} = (19.8 \pm 0.4) \text{ лет}$
A_3	$(0.091 \pm 0.005) \text{ сут}$	$(0.0052 \pm 0.0005) \text{ сут}$
e_3	0.64 ± 0.05	0.51 ± 0.12
ω_3	$35^\circ \pm 4^\circ$	$17^\circ \pm 7^\circ$
JD_3	$2\,428\,100 \pm 380$	$2\,453\,600 \pm 120$
$a_3 \sin i_3$	$(2.36 \pm 0.13) \times 10^9 \text{ км} = (15.8 \pm 0.9) \text{ а. е.}$	$(1.35 \pm 0.13) \times 10^8 \text{ км} = (0.90 \pm 0.09) \text{ а. е.}$

же, что на рис. 1. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 5. В нижней части рис. 8 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (8).

Эти остатки так же, как и в предыдущем случае, были представлены световым уравнением с использованием наблюдений с $JD > 2445\,000$, с весами 10 для фотоэлектрических и ПЗС наблюдений и для фиксированных квадратичных элементов (8). На рис. 9 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов теоретических, вычисленных по формуле (8), для наблюдений с $JD > 2445000$.

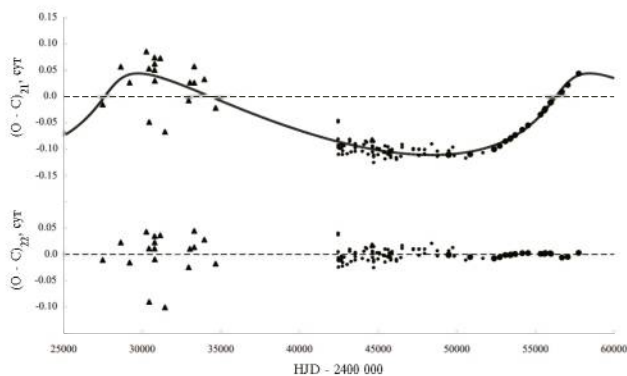


Рис. 8. Разности $(O - C)_{21}$ между наблюдаемыми моментами минимумов SX Lyn и вычисленными с квадратичными элементами из представления (8). Обозначения те же, что на рис. 1. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из первого столбца табл. 5. В нижней части рисунка приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (8).

Обозначения такие же, как на рис. 7. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из второго столбца табл. 5. В нижней части рис. 9 приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (8), и второго светового уравнения.

5. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЙ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА SX LYN

5.1. Линейные элементы + LTE

Используя значения масс компонентов затменно-двойной системы из [13]: $M_1 = 2.15 M_\odot$, $M_2 = 0.69 M_\odot$ и предполагая наличие только одного дополнительного тела, получаем для третьего тела с меньшим периодом $f(M_3) = 0.0168 M_\odot$, соответствующая минимальная масса третьего тела равна $0.58 M_\odot$. Для предполагаемого третьего тела с большим периодом $f(M_3) = 2.73 M_\odot$, а минимальная масса $5.95 M_\odot$. Если же предположить четырехкратную систему, минимальная масса более удаленного тела получается равной $6.41 M_\odot$. Следовательно, только циклические изменения периода с меньшим периодом могут происходить из-за присутствия в системе дополнительного тела. Чтобы найти вклад этого тела в общую светимость системы, определим светимости компонентов затменно-двойной системы, исходя из оценок массы и относительной светимости главного компонента, приведенных в [13]. Главный компо-

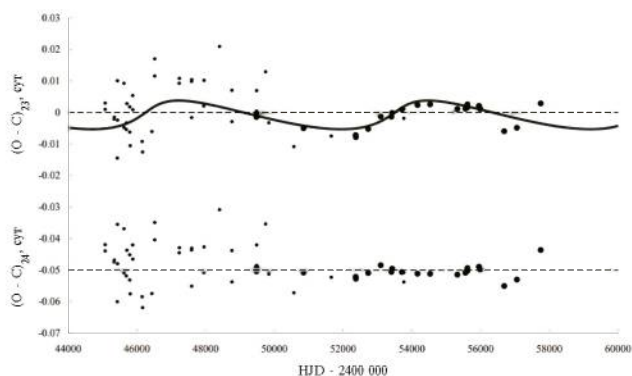


Рис. 9. Остатки после вычитания из наблюдаемых моментов теоретических, вычисленных по формуле (8), для наблюдений с $JD > 2445000$. Обозначения такие же, как на рис. 7. Сплошная линия на этом рисунке — теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из второго столбца табл. 5. В нижней части рисунка приведены остатки после вычитания из наблюдаемых моментов минимумов теоретических, вычисленных по формуле (8), и второго светового уравнения.

нент затменно-двойной системы является звездой Главной последовательности, и его светимость можно найти из соотношения масса-светимость в соответствующем диапазоне масс [17]: $L_1 = 27.34 L_{\odot}$. Согласно [13], его относительная светимость равна 0.84, тогда абсолютная светимость вторичного компонента получается равной $L_2 = 5.21 L_{\odot}$. Если третий компонент является звездой Главной последовательности, из соотношения масса-светимость в соответствующем диапазоне масс [17] найдем его светимость: $L_3 = 0.067 L_{\odot}$. Вклад дополнительного тела в общую светимость системы составит всего 0.2%. Для циклических изменений с большим периодом следует искать другие причины.

5.2. Квадратичные элементы + LTE

Обратная парабола означает, что происходит вековое уменьшение периода. Для SX Lyn коэффициент при квадратичном члене $Q = -5.56^d \times 10^{-9}$ и скорость уменьшения периода $dP/dt = -2.0 \times 10^{-6}$ сут/год. Вековое уменьшение периода может быть вызвано потерей углового момента системы вследствие магнитного торможения [19, 20].

Сначала предполагаем, что циклические изменения периода можно описать световыми уравнениями вследствие присутствия в системе дополнительных тел. Для меньшего периода функция масс равна $0.0019 M_{\odot}$ и минимальная масса третьего тела $0.26 M_{\odot}$. Для большего периода функция масс равна $0.635 M_{\odot}$ и минимальная масса $2.69 M_{\odot}$. Если же предположить четырехкратную систему, минимальная масса более удаленного тела получается равной $2.81 M_{\odot}$. Здесь также только колебания периода с меньшим периодом могут быть следствием присутствия в системе дополнительного тела. Для предполагаемого дополнительного тела с большим периодом масса получается меньше, чем в предыдущем случае, но все же довольно велика.

Согласно [13], вторичный компонент в затменно-двойной системе SX Lyn имеет спектральный класс G2 и должен иметь конвективную оболочку и, следовательно, магнитное поле. Принимая оценки масс компонентов и абсолютного радиуса вторичного компонента $R_2 = 2.60 R_{\odot}$ из [13] и используя последовательность формул, приведенную в [21], для каждого значения модулирующего периода находим величины, характеризующие циклы магнитной активности вторичного компонента. Эти величины приведены в табл. 6. Из таблицы видно, что для обоих случаев получается приемлемое значение величины магнитного поля. Возможные колебания светимости получаются довольно большими. Од-

Таблица 6. Величины, характеризующие циклы магнитной активности вторичного компонента SX Lyn.

Величина	Значение	
	Линейное представление	Квадратичное представление
P_{mod}	32300 сут	28700 сут
ΔP	5.44 с	3.48 с
ΔJ	$2.69 \times 10^{48} \text{ г см}^2/\text{с}$	$1.72 \times 10^{48} \text{ г см}^2/\text{с}$
ΔE	$4.83 \times 10^{42} \text{ эрг}$	$1.98 \times 10^{42} \text{ эрг}$
B	$5.54 \times 10^3 \text{ Гаусс}$	$4.70 \times 10^3 \text{ Гаусс}$
ΔL	$5.43 \times 10^{33} \text{ эрг/с} = 1.41 L_{\odot} = 0.27 L_2$	$2.50 \times 10^{33} \text{ эрг/с} = 0.65 L_{\odot} = 0.12 L_2$

нако, как уже говорилось выше, оценки требуемой энергии и, следовательно, изменений светимости, основанные на формулах из [21], следует рассматривать как верхние пределы.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеих рассмотренных систем изменения периода с практически одинаковой точностью можно представить или суперпозицией векового уменьшения периода и циклических изменений или только циклическими изменениями. Отклонение наблюдаемых точек от теоретической 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. Для δ Lib при линейном представлении (2) $\sigma = 0.0120$, при квадратичном представлении (3) $\sigma = 0.0124$. Для SX Lyn при линейном представлении (6) $\sigma = 0.0187$, при квадратичном представлении (8) $\sigma = 0.0184$. Остаточные разности в обоих случаях не показывают каких-либо дополнительных изменений. В случае квадратичного представления получаем обратную параболу, которая может быть следствием магнитного торможения.

Для δ Lib в случае квадратичного представления после исключения параболы получаем синусоиду, для которой наиболее приемлемое объяснение — магнитная активность вторичного компонента.

В случае линейного представления получается световое уравнение для довольно удаленного тела с небольшой массой. Для выбора между этими двумя возможностями нужны какие-то дополнительные данные.

Для SX Lyn при использовании линейных элементов изменения периода очень хорошо представляются суммой двух синусоидальных кривых. Если предположить четырехкратную систему, то масса более удаленного тела получается слишком большой. Поэтому можно допустить существование только одного дополнительного тела, с меньшим периодом. Тогда второе колебание, по-видимому, является следствием магнитной активности вторичного компонента. В случае квадратичного представления моментов минимумов остаточные изменения периода после исключения параболы так же хорошо представляются синусоидами. В этом случае масса более удаленного тела также получается слишком большой. Поэтому, как и в случае линейного представления, возможно присутствие только одного дополнительного тела — с меньшим периодом, а второе колебание следует отнести на счет магнитной активности вторичного компонента.

Для уточнения характера изменений орбитального периода в затменно-двойной системе SX Lyn нужны дальнейшие наблюдения моментов минимумов, а также высокоточные кривые блеска для уточнения орбитальных параметров и прояснения вопроса о третьем свете в блеске системы. Желательно также получение кривой лучевых скоростей для надежного определения масс компонентов.

Изменения орбитальных периодов затменно-двойных систем δ Lib и SX Lyn одинаково хорошо представляются либо суперпозицией нисходящей параболы и циклических колебаний, либо только циклическими колебаниями. Практически одинаковые значения полученных σ не позволяют отдать предпочтение какой-либо одной модели, представляющей изменения периода, как для одной, так и другой звезды. Аналогичные результаты были получены для нескольких других систем [24–27]. Проблема заключается в том, что когда мы хотим сравнить наблюдаемые скорости векового уменьшения периода с теоретическими, чтобы сделать выбор в пользу какой-либо теории, нельзя использовать подобные системы, так как мы не можем быть уверены в достоверности полученных результатов. Для каждой такой системы надо искать дополнительные подтверждения наличия (или отсутствия) векового уменьшения периода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. F. J. Schmidt*, *Astron. Nachr.* 63, 39 (1865).
2. *J. Stebbins*, *Publ. Wahsburns Obs.*, 15, 33 (1928).
3. *R. H. Koch*, *Astron. J.* 67, 130 (1962).
4. *C. Lazaro, M. J. Arevalo, and A. Claret*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 334, 542 (2002).
5. *V. Bakis, E. Budding, A. Erdem, H. Bakis, O. Demircan, and P. Hadrava*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 370, 1935 (2006).
6. *J. Tomkin*, *Astrophys. J.* 221, 608 (1978).
7. *A. Dervisoglu, K. Pavlovski, H. Lehmann, J. Southworth, and D. Bewsher*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 481, 5660 (2018).
8. *T. F. Worek*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 113, 964 (2001).
9. *E. Geyer, R. Kippenhahn, and W. Strohmeier*, *Kleine Veröffentlichungen der Remeis — Sternwarte Bamberg* № 9, (1955).
10. *B. Wedel and W. Wenzel*, *Mitt. Veränder. Sterne* 1, № 206 (1955).
11. *W. Götz and W. Wenzel*, *Mitt. Veränder. Sterne* 1, № 570, (1961).
12. *D. MacDonald*, *McCormick Publ.* 12, part 5, 51 (1964).
13. *M. A. Svechnikov and Eh. F. Kuznetsova*, *Vizie On-line Data Catalog: Approximate elements of eclipsing binaries* (1990).
14. *B. R. N. O. Project—Eclipsing Binaries database*, <http://var2.astro.cz/EN/brno/index.php>.
15. *Д. Я. Мартынов* Переменные звезды (в кн. М. С. Зверев, Б. В. Кукаркин, Д. Я. Мартынов, П. П. Паренаго, Н. Ф. Флоря и В. П. Цесевич, т. 3, Гостехиздат, 464–490, 1947).
16. *А. И. Халиуллина и Х. Ф. Халиуллин*, *Астрон. журн.* 61, 393 (1984).
17. *Z. Eker, F. Soudugan, E. Soyugan, S. Bilir, E. Yaz Gökçe, I. Steer, M. Tüysüz, T. Şenyüz, and O. Demircan*, *Astron. J.* 149, 131 (2015).
18. *Х. Ф. Халиуллин*, *Астрон. журн.* 51, 395 (1974).
19. *N. Ivanova and R. E. Taam*, *Astrophys. J.* 599, 516 (2003).
20. *N. Nanouris, A. Kalimeris, E. Antonopolou, and H. Rjvithis-Livaniou*, *Astron. and Astrophys.* 535, 126 (2011).
21. *J. H. Applegate*, *Astrophys. J.* 385, 621 (1992).
22. *A. F. Lanza, M. Rodono, and R. Rosner*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 296, 893 (1998).
23. *A. F. Lanza and M. Rodono*, *Astron. and Astrophys.* 349, 887 (1999).

24. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. 93, 795 (2016).

26. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. 98, 149 (2021).

25. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. 94, 849 (2017).

27. А. И. Халиуллина, Астрон. журн. 98, 550 (2021).

VARIATIONS IN THE ORBITAL PERIODS OF ECLIPSING BINARIES δ LIB AND SX LYN

A. I. Khaliullina^{1,*}

¹*Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

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

Variations in the orbital period of eclipsing binaries δ Lib and SX Lyn are studied. It is shown that these variations can be represented with equal accuracy in two ways: either in the form of a superposition of secular decrease and cyclic variations or only in the form of cyclic fluctuations. Cyclic variations in the period of δ Lib in both cases can be due to the presence of a third body in the system. In the case of a quadratic representation, they can be also a consequence of the magnetic activity of the secondary component. For SX Lyn a superposition of two cyclic variations is found for both linear and quadratic representation. The lower-period variations in both cases can be due to the presence of a third body in the system. The longer-period variation can be a consequence of the magnetic activity of the secondary component. The secular decrease in the periods of both systems could be due to a loss of angular momentum due to magnetic braking.

Keywords: binary stars, eclipsing stars, individual — δ Lib, SX Lyn