*АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023, том 100, № 6, с. 488–499*

# ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ПЕРИОДОВ ЗАТМЕННО-ДВОЙНЫХ СИСТЕМ RX ARI И V449 OPH

**© 2023 г. А. И. Халиуллина[1,*]**

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

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

Поступила в редакцию 12.03.2023 г.
После доработки 05.05.2023 г.
Принята к публикации 18.05.2023 г.

Проведен анализ изменений орбитального периода затменно-двойных систем RX Ari и V449 Oph. Показано, что изменения периода RX Ari можно представить суперпозицией векового увеличения периода и двух циклических изменений. Вековое увеличение периода можно объяснить обменом веществом между компонентами. Циклические изменения периода могут быть следствием присутствия в системе двух дополнительных тел либо только одного дополнительного тела в сочетании с магнитной активностью главного компонента. Изменения орбитального периода V449 Oph с почти одинаковой точностью можно представить либо суперпозицией двух циклических изменений, либо суперпозицией векового увеличения периода и двух циклических изменений. Полученные параметры световых уравнений и магнитные величины приводят к выводу, что для представления изменений орбитального периода V449 Oph предпочтительнее использовать линейные элементы. В этом случае одно из циклических изменений может быть следствием светового уравнения, а второе – следствием магнитной активности вторичного компонента. Следствием магнитной активности вторичного компонента могут быть также оба вида колебаний.

*Ключевые слова:* двойные звезды, затменные звезды, отдельные – RX Ari, V449 Oph

**DOI:** 10.31857/S000462992306004X, **EDN:** ZEUYDM

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Переменность звезды RX Ari (BD+21 0306, $V = 9\overset{m}{.}40$, $P = 1.0296^d$) открыл Хоффмайстер [1] и определил ее как короткопериодическую и вероятную затменно-переменную. На основе данных фотографических наблюдений Лаузе [2] построил участок кривой блеска в главном минимуме, определил эфемериды и пришел к выводу, что это переменная типа Алголя. В работе [3] была построена кривая блеска по фотоэлектрическим наблюдениям в фильтрах B и V. Из решения этой кривой блеска методом Рассела-Меррила были найдены орбитальные элементы. В работе [4] более современным методом была проанализирована кривая блеска, полученная в [3], и получены фотометрические элементы орбиты, мало отличающиеся от результатов [3]. Третий свет в системе не был обнаружен. В этой же работе были определены абсолютные размеры компонентов системы. Для спектрального класса главного компонента в разных работах были получены оценки от F0V [5] до F8V [3]. В работе [4] при определении характеристик компонентов для главного компонента был принят спектральный класс F5V. Спектральный класс вторичного компонента по разным оценкам ~ K8–M0. Звезда RX Ari лишь однажды была включена в программу исследования изменений периода [6]. К тому времени имеющегося материала было недостаточно для получения каких-либо результатов. Более поздних исследований изменений орбитального периода этой системы, как и решений кривой блеска, опубликовано не было.

Переменность звезды V449 Oph (AN 1933.0354, $V = 11.5^m$, $P = 1.2431^d$) обнаружил Моргенрот из фотографических наблюдений [7]. Он определил, что это затменно-двойная типа Алголя. Первые эфемериды вычислил Пиотровский по визуальным наблюдениям [8]. Шафранек построил кривую блеска системы в главном минимуме из визуальных наблюдений [9]. Параметры орбиты определены не были. Спектральные классы компонентов системы A0 III + F4 V были определены в работе [10] из наблюдений со спектрографом, при этом было отмечено, что показатели цвета, полученные в [11], свидетельствуют о вкладе вторичного компонента более позднего спектрального класса. В этой же работе было высказано предположение, что период системы меняется. Изменение периода V449 Oph было отмечено также в работе [12]. Однако исследование измене-

ний периода этой системы не проводилось. Для V449 Oph нет ни решения кривой блеска, ни кривой лучевых скоростей. Для фотометрических элементов и абсолютных параметров компонентов двойной системы имеются лишь приближенные характеристики, определенные в работе [13].

## 2. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА RX Ari

Для исследования изменений периода затменно-двойной системы RX Ari были использованы моменты минимумов из базы данных B.R.N.O. [14]. Всего имеется 83 момента главного минимума: 30 визуальных и 53 из фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений. На рис. 1 приведены отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов RX Ari от вычисленных (C) с линейными элементами, полученными методом наименьших квадратов с использованием всех имеющихся моментов главного минимума:

$$C \equiv \mathrm{HJD(Min\ I)} = 2\,438\,398.579(2) + \\ + 1.0296285(2)^{\mathrm{d}}T, \quad (1)$$

где $T$ – эпоха наблюдения. На этом рисунке визуальные наблюдения представлены маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС – большими точками. Из рисунка видно, что существуют некие долговременные изменения периода, на которые накладываются периодические или квазипериодические колебания. Поэтому моменты минимумов были представлены сначала квадратичной зависимостью, а затем остатки после исключения параболы были представлены световым уравнением. При этом не использовались первые 15 визуальных точек. Сначала значения параметров долгопериодической орбиты были определены методом перебора в области их возможных значений. Одновременно (тоже перебором) уточнялись квадратичные элементы. Окончательно параметры светового уравнения уточнялись методом дифференциальных поправок [15] при фиксированных квадратичных элементах. Одновременно вычислялись ошибки определения параметров. Поскольку после исключения параболы и третьего тела график O–C показывал дополнительные малоамплитудные колебания, эти остатки также были представлены световым уравнением, без уточнения эфемерид. В результате изменения периода RX Ari были представлены в виде:

$$\mathrm{HJD(Min\ I)} = 2\,438\,398.563(1) + 1.0296280(1)^{\mathrm{d}}T + \\ + 0.8(1)^{\mathrm{d}} \times 10^{-10}T^2 + LTE1 + LTE2, \quad (2)$$

где выражения для световых уравнений $LTE1$ и $LTE2$ имеют вид [16]:

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

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 $\omega_i$ – долгота периастра; $v$ и $E$ – истинная и эксцентрическая аномалии, соответственно, которые отсчитываются в той же орбите; $c$ – скорость света. Параметры световых уравнений приведены в табл. 1. Параметры с индексом G относятся к орбите с бóльшим периодом, а с индексом L – к орбите с меньшим периодом. Здесь $P_{\mathrm{G}}$ – период обращения в долгопериодической орбите с бóльшим периодом, $P_{\mathrm{L}}$ – период обращения в долгопериодической орбите с меньшим периодом, $\mathrm{JD}_{\mathrm{G,\,L}}$ – момент прохождения через периастр соответствующей орбиты, $A_{\mathrm{G,\,L}} = (a_{\mathrm{G,L}} \sin i_{\mathrm{G,L}})/c$. На рис. 2 приведены отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов RX Ari от вычисленных с линейными элементами из выражения (2). Сплошная кривая – сумма теоретических кривых для параболы и световых уравнений с параметрами из табл. 1. В нижней части рис. 2 приведены значения $(O-C)_3$, полученные вычитанием из $(O-C)_2$ параболы и обоих световых уравнений. Из этого рисунка видно, что полученное представление неплохо удовлетворяет наблюдениям, причем остаточные разности не показывают никаких систематических изменений. На рис. 3 приведены разности $(O-C)_4$, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов от вычисленных с квадратичными элементами (2), теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом L, и на рис. 4 – разности $(O-C)_5$, полученные вычитанием из тех же значений теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом G. Сплошной линией на рис. 3 показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом G. Сплошная линия на рис. 4 – теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом L.

Результаты решения кривой блеска RX Ari [4] свидетельствуют, что вторичный компонент заполняет свою полость Роша [17]. Следовательно, вековое увеличение периода RX Ari можно объяснить равномерным перетеканием вещества от менее массивного к более массивному компоненту без изменения общего углового момента. В этом случае [18]:

$$\dot{M}_2 = -M_2 \frac{2Q}{P^2} \frac{1}{3(1-q)}, \quad (4)$$

где $P \approx P_0$, $q = M_2/M_1$, $Q$ – коэффициент при квадратичном члене в представлении моментов минимумов. В нашем случае $Q = 0.8^{\mathrm{d}} \times 10^{-10}$,

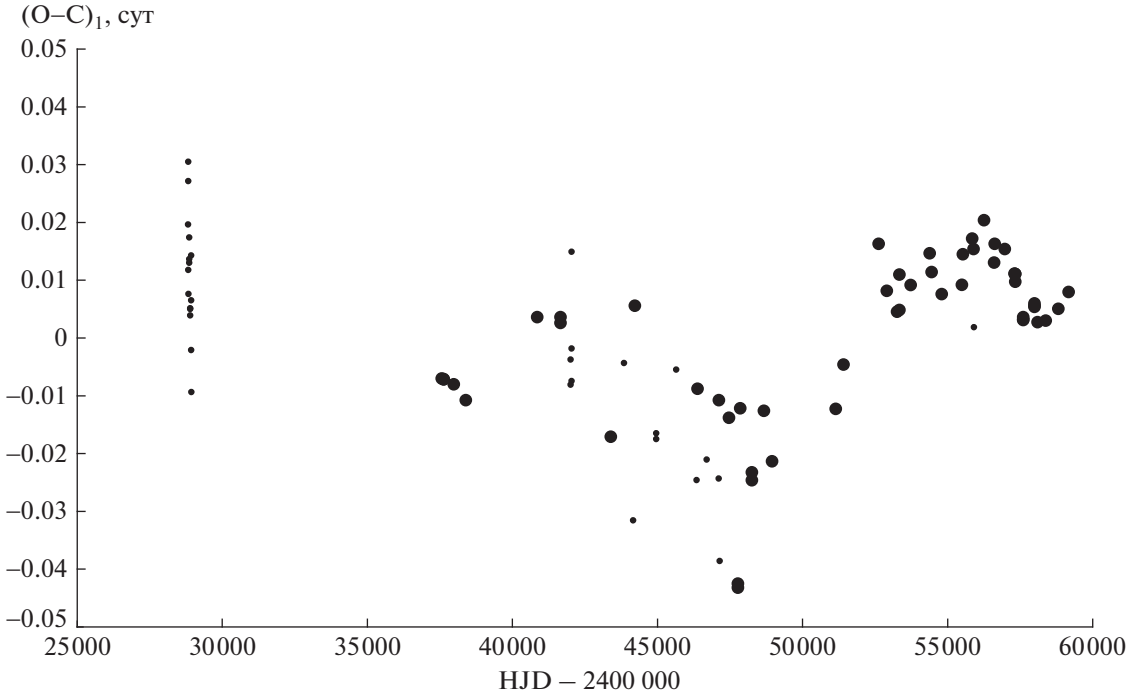



**Рис. 1.** Отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов RX Ari от вычисленных (C) с линейными элементами (1). Визуальные наблюдения представлены маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС – большими точками.

$P_0 = 1.0296280^d$. Используя оценки масс компонентов из работы [4]: $M_1 = 1.30\ M_\odot$, $M_2 = 0.36\ M_\odot$, найдем темп потери вещества вторичным компонентом RX Ari: $\dot{M}_2 = -9.15 \times 10^{-9}\ M_\odot$/год.

Полученные параметры долгопериодических орбит позволяют нам вычислить функции масс тройной $f(M_3)$ и четырехкратной $f(M_4)$ систем. При этом мы рассматриваем четырехкратную систему как иерархическую и считаем, что ближе к двойной системе расположена орбита с меньшим периодом:

$$f(M_3) = \frac{a_L \sin^3 i_L}{P_L^2} = \frac{M_3^3 \sin^3 i_L}{(M_1 + M_2 + M_3)^2}, \quad (5)$$

$$f(M_4) = \frac{a_G^3 \sin^3 i_G}{P_G^2} = \frac{M_4^3 \sin^3 i_G}{(M_1 + M_2 + M_3 + M_4)^2}. \quad (6)$$

Здесь массы выражены в массах Солнца, большие полуоси орбит – в астрономических единицах и

**Таблица 1.** Параметры гипотетических долгопериодических орбит в RX Ari

| Параметр | Значение | Параметр | Значение |
|---|---|---|---|
| $P_G$ | (13540 ± 430) сут = (37 ± 1) лет | $P_L$ | (3740 ± 160) сут = (10.2 ± 0.4) лет |
| $A_G$ | (0.014 ± 0.002) сут | $A_L$ | (0.0047 ± 0.0009) сут |
| $e_G$ | 0.34 ± 0.01 | $e_L$ | 0.26 ± 0.01 |
| $\omega_G$ | 336° ± 11° | $\omega_L$ | 340° ± 18° |
| $JD_G$ | 2450450 ± 600 | $JD_L$ | 2455140 ± 240 |
| $a_G \sin i_G$ | (3.6 ± 0.5) × $10^8$ км = (2.4 ± 0.4) a.e. | $a_L \sin i_L$ | (1.2 ± 0.2) × $10^8$ км = (0.81 ± 0.16) a.e. |
| $f(M_3)$ | 0.0104 $M_\odot$ | $f(M_3)$ | 0.0052 $M_\odot$ |
| $M_3 \sin^3 i_3$ | 0.35 $M_\odot$ | $M_3 \sin^3 i_3$ | 0.27 $M_\odot$ |
| $M_4 \sin^3 i_4$ | 0.38 $M_\odot$ | | |

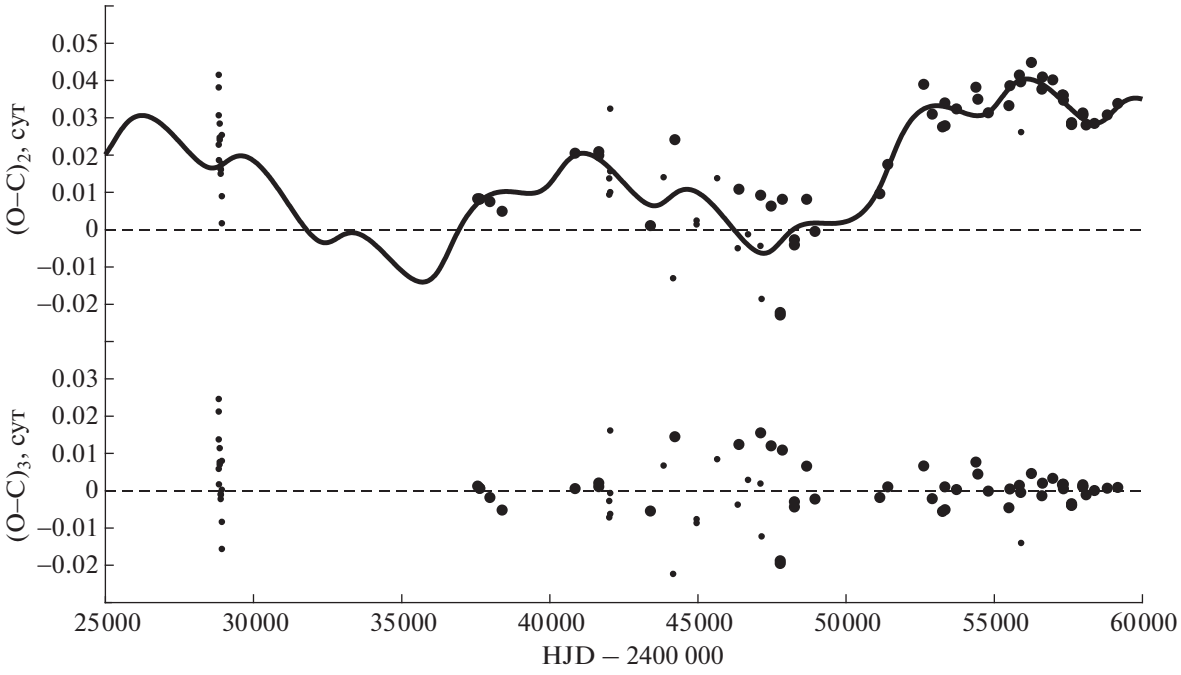



**Рис. 2.** Отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов RX Ari от вычисленных с линейными элементами из представления (2). Сплошная кривая – сумма теоретических кривых для параболы и световых уравнений с параметрами из табл. 1. В нижней части рис. 2 приведены значения $(O-C)_3$, полученные вычитанием из $(O-C)_2$ параболы и обоих световых уравнений. Обозначения такие же, как на рис. 1.

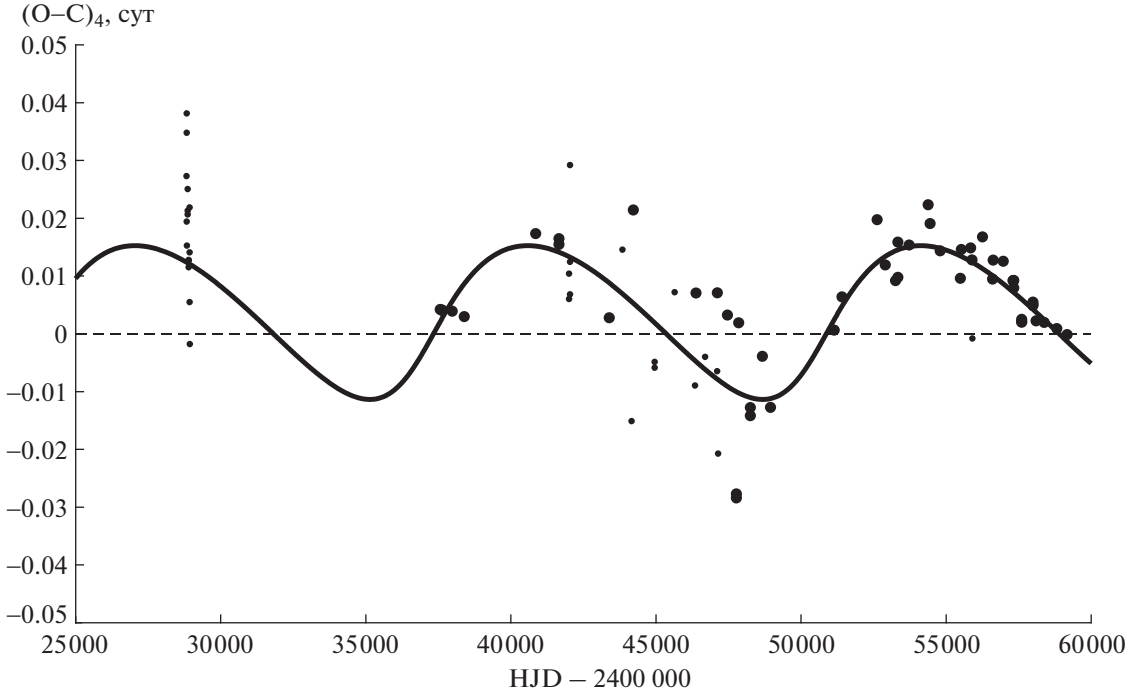



**Рис. 3.** Разности $(O-C)_4$, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов RX Ari от вычисленных с квадратичными элементами (2) теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом L. Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом G. Обозначения такие же, как на рис. 1.

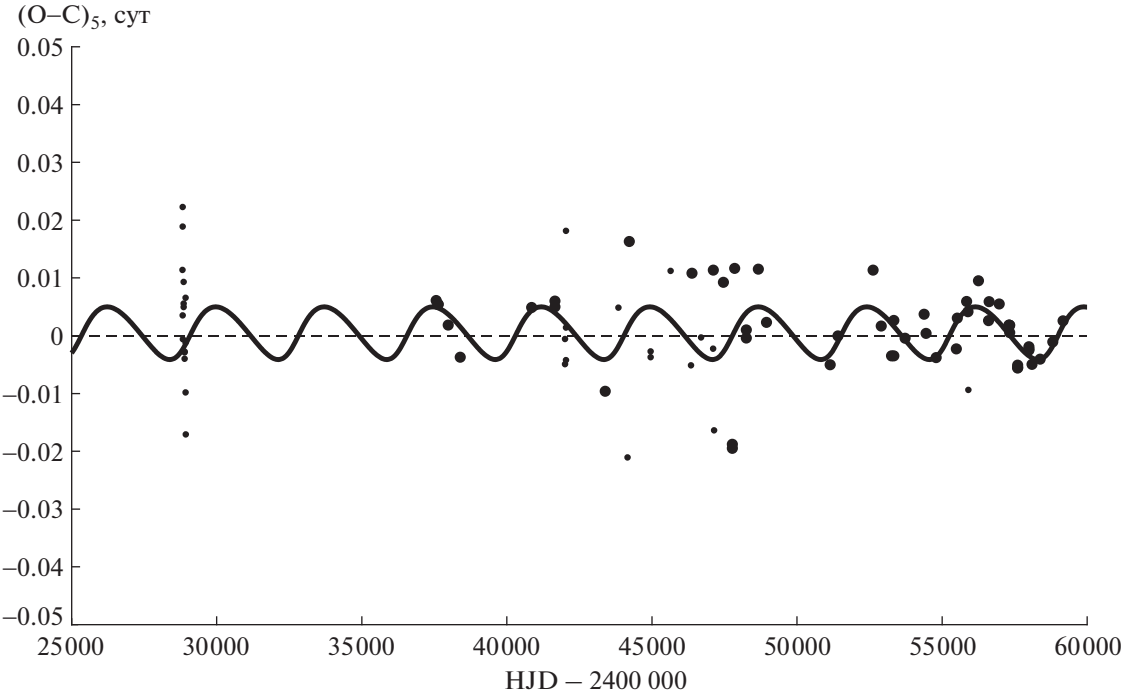



**Рис. 4.** Разности $(O-C)_5$, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов RX Ari от вычисленных с квадратичными элементами (2) теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом G. Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 1 с индексом L. Обозначения такие же, как на рис. 1.

периоды – в годах, $M_1$ и $M_2$ – массы компонентов затменно-двойной системы, $M_3$ и $M_4$ – массы дополнительных тел. Значения функций масс и минимальных масс третьего и четвертого компонентов для каждого рассмотренного случая приведены в табл. 1. Светимость наиболее массивного дополнительного компонента ($M_4 \geq 0.38\ M_\odot$) в предположении, что это звезда Главной последовательности, $L_4 \geq 0.0087\ L_\odot$ [19]. Соответствующая относительная светимость $l_4 = 0.001$. Обнаружить такой третий свет в системе практически невозможно. Однако, не зная наклонности орбит, мы имеем дело с минимальными возможными массами дополнительных тел.

В качестве альтернативы гипотезе о третьем теле может служить предположение, что наблюдаемые модуляции периода являются проявлением магнитной активности. В работе [20] 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 $\Delta P$ и амплитуда осцилляций $\Delta(O-C)$ на диаграмме O–C связаны соотношением: $\Delta P/P_0 = 2\pi\ \Delta(O-C)/P_{mod}$. Используя соответствующее значение периода двойной системы, находим $\Delta P$ для всех значений $\Delta(O-C)$ и $P_{mod}$. Оба компонента RX Ari имеют достаточно малые массы, чтобы обладать конвективной зоной и, соответственно, магнитным полем. Поэтому расчеты магнитных величин были сделаны для каждого компонента. Принимая оценки масс и радиусов компонентов из [4] и используя последовательность формул, приведенную в [20], для каждого значения модулирующего периода находим оценки величины переносимого (от ядра звезды к ее оболочке и обратно) углового момента $\Delta J$, количества энергии, необходимого для переноса углового момента во внешнюю часть звезды, $\Delta E$, напряженности магнитного поля $B$ активного компонента и изменений его светимости $\Delta L$. Результаты приведены в табл. 2 и 3. Из этих таблиц видно, что приемлемые значения магнитного поля и колебаний светимости получаются только для главного компонента и для бóльшего модулирующего периода.

## 3. ИЗМЕНЕНИЯ СО ВРЕМЕНЕМ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА V449 OPH

Для исследования изменений периода затменно-двойной системы V449 Oph также были использованы моменты минимумов из базы данных B. R. N. O [14]. Всего имеется 122 момента главно-

**Таблица 2.** Величины, характеризующие циклы магнитной активности вторичного компонента RX Ari для разных значений модулирующего периода

| Величина | Значение | |
|---|---|---|
| $P_{mod}$ | 13540 сут | 3740 сут |
| $\Delta$(O–C) | 0.014 сут | 0.0047 сут |
| $\Delta P$ | 0.58 с | 0.70 с |
| $\Delta J$ | $2.92 \times 10^{47}$ г см$^2$/с | $3.55 \times 10^{47}$ г см$^2$/с |
| $\Delta E$ | $6.09 \times 10^{41}$ эрг | $8.99 \times 10^{41}$ эрг |
| $B$ | $10.24 \times 10^3$ Гаусс | $21.47 \times 10^3$ Гаусс |
| $\Delta L$ | $1.64 \times 10^{33}$ эрг/с = 0.042 $L_\odot$ = 2.8 $L_2$ | $8.74 \times 10^{33}$ эрг/с = 2.27 $L_\odot$ = 15.13 $L_2$ |

**Таблица 3.** Величины, характеризующие циклы магнитной активности главного компонента RX Ari для разных значений модулирующего периода

| Величина | Значение | |
|---|---|---|
| $P_{mod}$ | 13540 сут | 3740 сут |
| $\Delta$(O–C) | 0.014 сут | 0.0047 сут |
| $\Delta P$ | 0.58 с | 0.70 с |
| $\Delta J$ | $6.73 \times 10^{47}$ г см$^2$/с | $8.18 \times 10^{47}$ г см$^2$/с |
| $\Delta E$ | $2.82 \times 10^{41}$ эрг | $4.17 \times 10^{41}$ эрг |
| $B$ | $6.53 \times 10^3$ Гаусс | $13.7 \times 10^3$ Гаусс |
| $\Delta L$ | $7.58 \times 10^{32}$ эрг/с = 0.20 $L_\odot$ = 0.031 $L_2$ | $4.05 \times 10^{33}$ эрг/с = 1.05 $L_\odot$ = 0.17 $L_2$ |

го минимума: 106 визуальных, 3 фотографических и 13 из фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений. На рис. 5 приведены отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых (O) моментов минимумов V449 Oph от вычисленных с линейными элементами (C), полученными по всем моментам минимумов методом наименьших квадратов:

$$C \equiv \mathrm{HJD(Min\ I)} = 2\,442\,959.5959(12) + \\ + 1.2430826(2)^{\mathrm{d}}T, \quad (7)$$

где $T$ – эпоха наблюдения. На этом рисунке фотографические наблюдения представлены в виде треугольников, визуальные – маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС – большими точками. В дальнейшем анализе мы не использовали точку JD = 2436039.400, сильно отклоняющуюся от общего тренда. Изменения периода сначала были представлены одним световым уравнением. Однако после исключения из наблюдений теоретической кривой для светового уравнения оказалось, что имеются дополнительные колебания периода, которые также можно представить световым уравнением, поэтому изменения периода V449 Oph были представлены в виде:

$$\mathrm{HJD(Min\ I)} = 2\,442\,959.6246(1) + \\ + 1.2430825(1)^{\mathrm{d}}T + LTE1 + LTE2. \quad (8)$$

Параметры световых уравнений определялись методом перебора в области их возможных значений. Одновременно (тоже перебором) уточнялись линейные элементы. Поиск подходящих световых уравнений осуществлялся методом последовательных приближений, подробно описанном в работе [21]. Окончательно параметры каждого светового уравнения уточнялись методом дифференциальных поправок [15] при фиксированных линейных элементах (8). Одновременно вычислялись ошибки определения параметров.

Параметры световых уравнений в V449 Oph для представления с линейными элементами приведены в табл. 4. Обозначения такие же, как в табл. 1. На рис. 6 приведены отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов V449 Oph от вычисленных с линейными элементами из представления (8). Сплошная кривая – сумма теоретических кривых для параболы и световых уравнений с параметрами из табл. 4. В нижней части рис. 6 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. 7 приведены разности $(O-C)_4$, полученные вычитанием из отклонений наблюдаемых моментов минимумов от вычисленных с линейными элементами (8), $(O-C)_2$, теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом L, и на рис. 8 – разности $(O-C)_5$, полученные вычитанием из тех же значе-

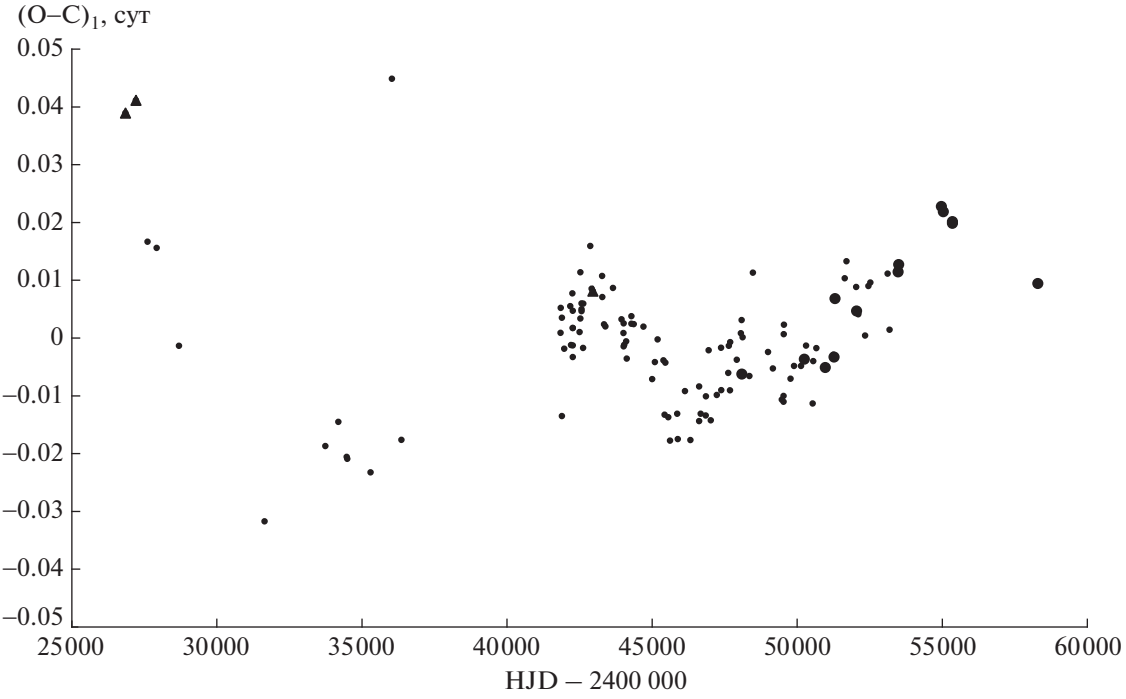



**Рис. 5.** Отклонения $(O-C)_1$ наблюдаемых моментов минимумов V449 Oph от вычисленных с линейными элементами (7). Фотографические наблюдения представлены в виде треугольников, визуальные – маленькими точками, фотоэлектрические и ПЗС – большими точками.

ний $(O-C)_2$ теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом G. Сплошной линией на рис. 7 показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом G. Сплошная линия на рис. 8 – теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом L.

Изменения периода V449 Oph были также представлены суперпозицией квадратичных элементов и двух световых уравнений:

$$\begin{aligned}\mathrm{HJD(Min\ I)} &= 2\,442\,959.6210(1) + \\ &+ 1.2430826(1)^{d}T + 4.45(1)^{\mathrm{d}} \times 10^{-11}T^{2} + \\ &+ LTE1 + LTE2\end{aligned} \qquad (9)$$

**Таблица 4.** Параметры гипотетических долгопериодических орбит в V449 Oph для представления с линейными элементами

| Параметр | Значение | Параметр | Значение |
|---|---|---|---|
| $P_G$ | (29800 ± 740) сут = (81.6 ± 2.0) лет | $P_L$ | (16300 ± 250) сут = (44.6 ± 0.7) лет |
| $A_G$ | (0.050 ± 0.006) сут | $A_L$ | (0.016 ± 0.003) сут |
| $e_G$ | 0.96 ± 0.01 | $e_L$ | 0.83 ± 0.06 |
| $\omega_G$ | 164° ± 2° | $\omega_L$ | 144° ± 10° |
| $JD_G$ | 2457200 ± 750 | $JD_L$ | 2443750 ± 200 |
| $a_G \sin i_G$ | (1.3 ± 0.3) × $10^9$ км = (8.7 ± 2.1) a.e. | $a_L \sin i_L$ | (4.1 ± 0.8) × $10^8$ км = (2.8 ± 0.5) a.e. |
| $f(M_3)$ | 0.098 $M_\odot$ | $f(M_3)$ | 0.0107 $M_\odot$ |
| $M_3 \sin^3 i_3$ | 0.97 $M_\odot$ | $M_3 \sin^3 i_3$ | 0.41 $M_\odot$ |
| $L_3$ | 0.81 $L_\odot$ | $L_3$ | 0.0126 $L_\odot$ |
| $l_3$ | 0.09 | $l_3$ | 0.0014 |
| $M_4 \sin^3 i_4$ | 1.08 $M_\odot$ | | |
| $L_4$ | 1.39 $L_\odot$ | | |
| $l_4$ | 0.15 | | |

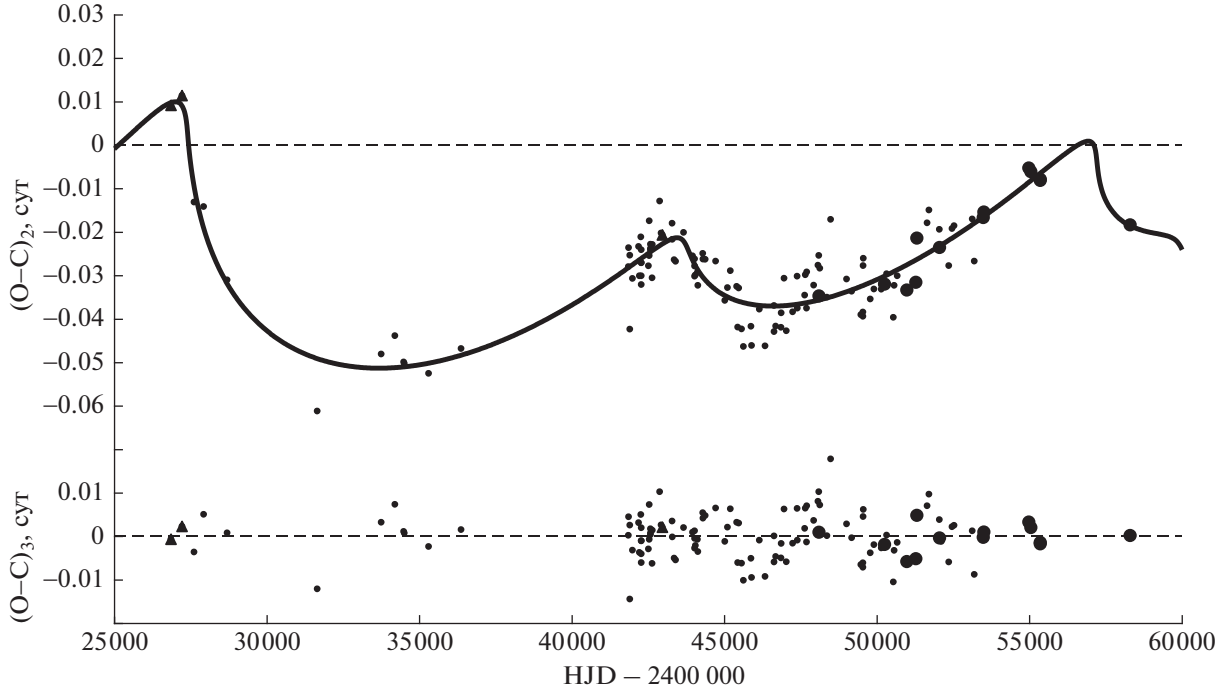



**Рис. 6.** Отклонения $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов V449 Oph от вычисленных с линейными элементами (8). Сплошная кривая – сумма теоретических кривых для световых уравнений с параметрами из табл. 4. В нижней части рисунка приведены значения $(O-C)_3$, полученные вычитанием из $(O-C)_2$ обоих световых уравнений. Обозначения такие же, как на рис. 5.

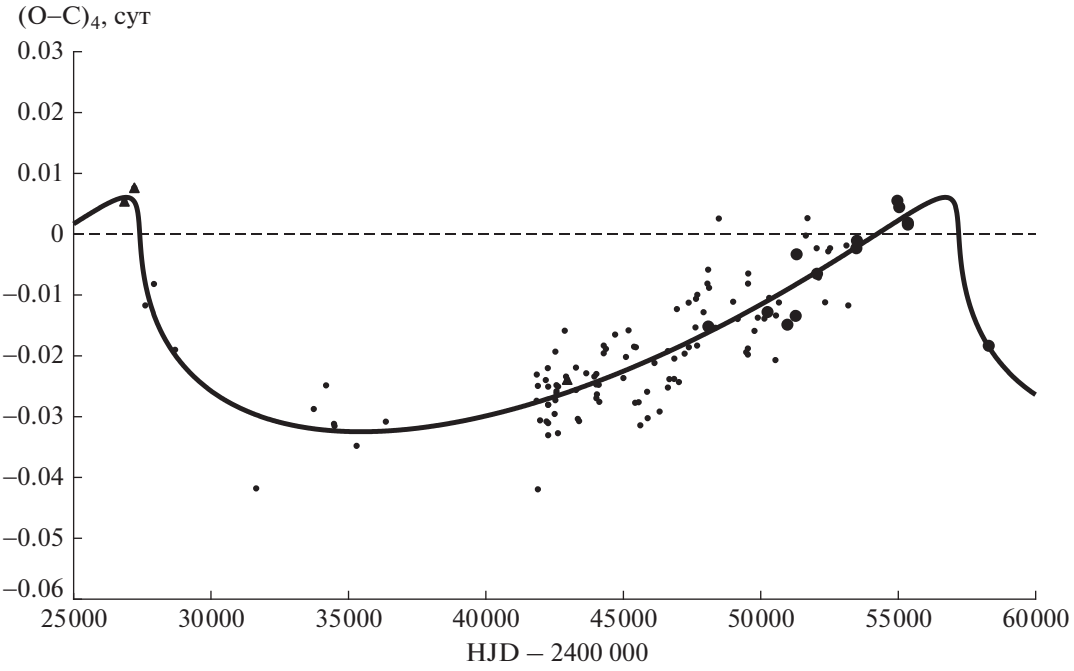



**Рис. 7.** Разности $(O-C)_4$, полученные вычитанием из отклонений $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов от вычисленных с линейными элементами (8) теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом L. Сплошной линией показана теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом G. Обозначения такие же, как на рис. 5.

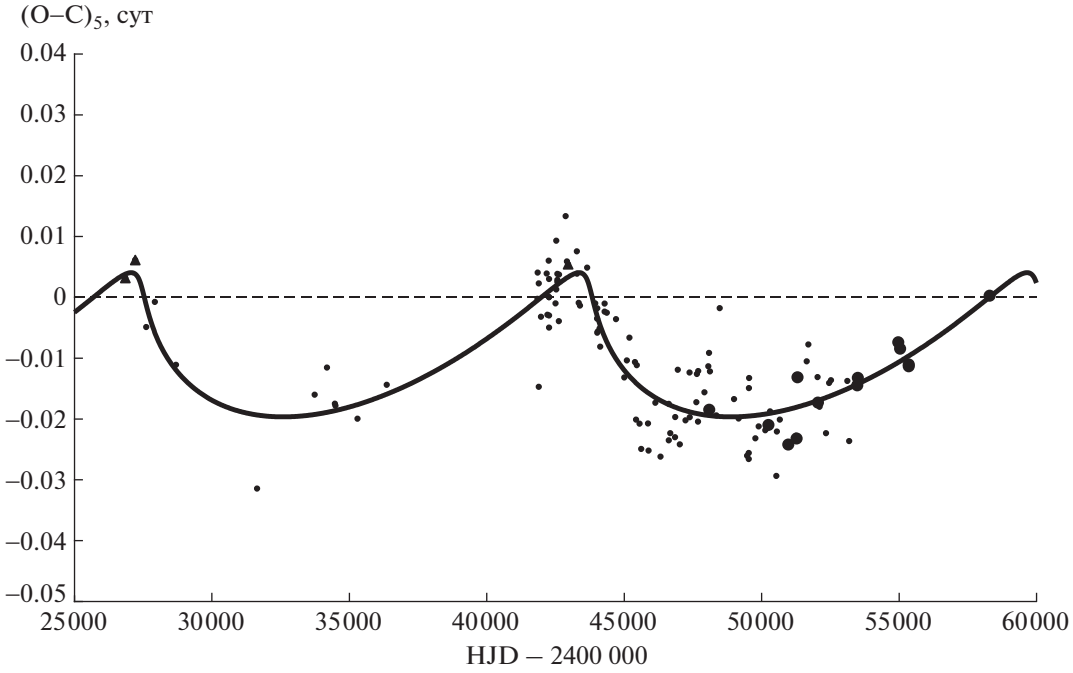



**Рис. 8.** Разности $(O-C)_5$, полученные вычитанием из отклонений $(O-C)_2$ наблюдаемых моментов минимумов от вычисленных с линейными элементами (8) теоретической кривой для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом G. Сплошная линия – теоретическая кривая для светового уравнения с параметрами из табл. 4 с индексом L. Обозначения такие же, как на рис. 5.

Параметры световых уравнений определялись так же, как и в предыдущем случае и приведены в табл. 5. Обозначения в этой таблице такие же, как в табл. 1.

Предполагая, что оба циклические изменения периода V449 Oph являются следствием присутствия в системе дополнительных тел и рассматривая четырехкратную систему как иерархическую, можно, как и в предыдущем случае, найти функции масс. Для этого были использованы оценки масс компонентов из [13]: $M_1 = 1.65\ M_\odot$, $M_2 = 0.44\ M_\odot$. Значения функций масс и минимальных масс третьих и четвертых компонентов для каждого рассмотренного случая

**Таблица 5.** Параметры гипотетических долгопериодических орбит в V449 Oph для представления с квадратичными элементами

| Параметр | Значение | Параметр | Значение |
|---|---|---|---|
| $P_G$ | (28600 ± 860) сут = (78.3 ± 2.4) лет | $P_L$ | (16530 ± 275) сут = (45.2 ± 0.8) лет |
| $A_G$ | (0.023 ± 0.004) сут | $A_L$ | (0.033 ± 0.003) сут |
| $e_G$ | 0.80 ± 0.08 | $e_L$ | 0.97 ± 0.01 |
| $\omega_G$ | 151° ± 8° | $\omega_L$ | 158° ± 2° |
| $JD_G$ | 2445600 ± 820 | $JD_L$ | 2443850 ± 60 |
| $a_G \sin i_G$ | (6.0 ± 1.0) × $10^8$ км = (4.0 ± 0.7) a.e. | $a_L \sin i_L$ | (8.5 ± 1.8) × $10^8$ км = (5.7 ± 1.2) a.e. |
| $f(M_3)$ | 0.0103 $M_\odot$ | $f(M_3)$ | 0.0914 $M_\odot$ |
| $M_3 \sin^3 i_3$ | 0.40 $M_\odot$ | $M_3 \sin^3 i_3$ | 0.94 $M_\odot$ |
| $L_3$ | 0.0112 $L_\odot$ | $L_3$ | 0.70 $L_\odot$ |
| $l_3$ | 0.0012 | $l_3$ | 0.08 |
| $M_4 \sin^3 i_4$ | 0.51 $M_\odot$ | | |
| $L_4$ | 0.036 $L_\odot$ | | |
| $l_4$ | 0.004 | | |

**Таблица 6.** Величины, характеризующие циклы магнитной активности вторичного компонента V449 Oph для разных значений модулирующего периода для представления с линейными элементами

| Величина | Значение | |
|---|---|---|
| $P_{\rm mod}$ | 29800 сут | 16300 сут |
| $\Delta$(O–C) | 0.050 сут | 0.016 сут |
| $\Delta P$ | 1.13 с | 0.662 с |
| $\Delta J$ | $3.79 \times 10^{47}$ г см$^2$/с | $2.22 \times 10^{47}$ г см$^2$/с |
| $\Delta E$ | $3.74 \times 10^{41}$ эрг | $1.28 \times 10^{41}$ эрг |
| $B$ | $4.28 \times 10^{3}$ Гаусс | $4.43 \times 10^{3}$ Гаусс |
| $\Delta L$ | $4.56 \times 10^{32}$ эрг/с $= 0.119\ L_\odot = 0.33 L_2$ | $2.86 \times 10^{32}$ эрг/с $= 0.074\ L_\odot = 0.20 L_2$ |

**Таблица 7.** Величины, характеризующие циклы магнитной активности вторичного компонента V449 Oph для разных значений модулирующего периода для представления с квадратичными элементами

| Величина | Значение | |
|---|---|---|
| $P_{\rm mod}$ | 28600 сут | 16530 сут |
| $\Delta$(O–C) | 0.023 сут | 0.033 сут |
| $\Delta P$ | 0.543 с | 1.35 с |
| $\Delta J$ | $1.82 \times 10^{47}$ г см$^2$/с | $4.51 \times 10^{47}$ г см$^2$/с |
| $\Delta E$ | $8.59 \times 10^{40}$ эрг | $5.30 \times 10^{41}$ эрг |
| $B$ | $3.03 \times 10^{3}$ Гаусс | $6.27 \times 10^{3}$ Гаусс |
| $\Delta L$ | $1.09 \times 10^{32}$ эрг/с $= 0.028\ L_\odot = 0.077\ L_2$ | $1.16 \times 10^{33}$ эрг/с $= 0.30\ L_\odot = 0.84\ L_2$ |

приведены в табл. 4 и 5. Там же приведены значения светимостей, соответствующих этим массам, вычисленные в предположении, что дополнительные компоненты – звезды Главной последовательности [19].

Как отмечено выше (см. Введение), спектральный класс вторичного компонента V449 Oph был определен как F4 V [10] с оговоркой, что согласно показателям цвета, полученным в [11], вторичный компонент должен иметь более поздний спектральный класс. В работе [13] вторичному компоненту V449 Oph приписан спектральный класс K6 IV. Так что он вполне может иметь конвективную оболочку и, следовательно, магнитное поле. Используя те же соотношения, что и в предыдущем разделе, и принимая оценки масс компонентов и абсолютного радиуса вторичного компонента $R_2 = 1.65\ R_\odot$ из [13], находим оценки величин, характеризующих циклы магнитной активности. Эти величины приведены в табл. 6 для представления с линейными элементами и в табл. 7 для квадратичного представления изменений периода. Светимости компонентов затменно-двойной системы определим, исходя из оценок массы и относительной светимости главного компонента, приведенных в [13]. Главный компонент затменно-двойной системы является звездой Главной последовательности, и его светимость можно найти из соотношения масса-светимость в соответствующем диапазоне масс [19]: $L_1 = 8.7\ L_\odot$. Согласно [13], его относительная светимость равна 0.96, тогда абсолютная светимость вторичного компонента получается равной $L_2 = 0.36\ L_\odot$.

Из табл. 6 и 7 видно, что для всех модулирующих периодов полученные оценки магнитных и энергетических величин вполне укладываются в допустимые рамки. А вот возможные колебания светимости получаются довольно большими, кроме случая, когда модулирующий период равен 28600 при квадратичном представлении эфемерид. Однако оценки требуемой энергии и, следовательно, изменений светимости, основанные на формулах из [20], следует рассматривать как верхние пределы. 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.

### *Линейные элементы*

На рис. 6 и 7 видно, что каждое из синусоидальных представлений хорошо описывает наблюдения, причем наблюдения охватывают два периода меньшей волны и один полный период большей волны. Присутствие сразу двух допол-

нительных тел маловероятно, как из-за очень вытянутых орбит, так и из-за мало различающихся периодов. Предполагаемый вклад третьего тела в светимость системы довольно мал для обоих тел, однако до сих пор ничего не известно о наличии или отсутствии третьего света в системе. При интерпретации изменений периода циклами магнитной активности также получаются приемлемые величины для каждого цикла (если учитывать результаты работ [22, 23]). Таким образом, в этом случае одно из циклических изменений (любое) может быть следствием светового уравнения, однако более приемлемые параметры светового уравнения получаются для меньшей волны, а второе – следствием магнитной активности вторичного компонента. Следствием магнитной активности вторичного компонента в этом случае могут быть также оба вида колебаний.

### *Квадратичные элементы*

После исключения параболы получается суперпозиция двух синусоидальных колебаний, на первый взгляд, мало отличающихся от случая линейных элементов. Однако в данном случае, в то время как колебания с бóльшим периодом хорошо представляются как световым уравнением, так и магнитными колебаниями, для колебаний с меньшим периодом получаем световое уравнение с очень большим эксцентриситетом, а для магнитных колебаний получаются очень большие колебания светимости вторичного компонента. Поэтому этот вариант кажется маловероятным. Графики для квадратичного представления не приводятся, так как они мало отличаются от соответствующих графиков для линейного представления.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование изменений орбитального периода затменно-двойной системы RX Ari показало, что их можно представить суперпозицией векового увеличения периода и двух циклических изменений. Вековое увеличение периода можно объяснить перетеканием вещества от вторичного компонента к главному, при этом темп потери вещества $\dot{M}_2 = -9.15 \times 10^{-9}\ M_\odot$/год. Циклические изменения с большой вероятностью являются следствием присутствия двух дополнительных тел в системе с массами $M_3 \geq 0.27\ M_\odot$ и $M_4 \geq 0.38\ M_\odot$ и соответствующими периодами 10.2 года и 37 лет. Магнитные колебания подходят для объяснения циклических изменений с бóльшим периодом, только если в качестве активной звезды выступает главный компонент. В этом случае получается тройная система с дополнительным телом массой $M_3 \geq 0.27\ M_\odot$ и периодом долгопериодической орбиты $P_3 = 10.2$ года.

Для уточнения характера изменений орбитального периода в затменно-двойной системе RX Ari нужны дальнейшие наблюдения моментов минимумов, а также решение высокоточных кривых блеска для уточнения орбитальных параметров и выяснения вопроса о третьем свете в блеске системы. Желательно также получение кривой лучевых скоростей для надежного определения масс компонентов.

Исследование изменений орбитального периода затменно-двойной системы V449 Oph показало, что их можно представить суперпозицией двух циклических изменений либо суперпозицией векового увеличения периода и двух циклических изменений с мало различающейся точностью ($\sigma = 0.00509^d$ в первом случае и $\sigma = 0.00521^d$ во втором случае). В обоих случаях присутствие двух дополнительных тел в системе маловероятно как из-за очень вытянутых орбит, так и из-за не на много различающихся периодов. При линейных элементах возможно сочетание светового уравнения с периодом 44.6 лет и магнитных колебаний с периодом 81.6 лет. Возможно также представление обоих циклов как следствие магнитных колебаний. При квадратичном представлении для колебаний с меньшим периодом получаем световое уравнение с очень большим эксцентриситетом, а для магнитных колебаний получаются довольно большие колебания светимости вторичного компонента. Поэтому для представления изменений орбитального периода V449 Oph предпочтительнее использовать линейные элементы.

К сожалению, для затменно-двойной системы V449 Oph имеются только приближенные значения абсолютных параметров. Поэтому выводы о природе изменений ее орбитального периода следует считать предварительными. Для уточнения характера изменений орбитального периода в затменно-двойной системе V449 Oph нужны дальнейшие наблюдения моментов минимумов, а также решение высокоточных кривых блеска для уточнения орбитальных параметров и выяснения вопроса о третьем свете в блеске системы. Желательно также получение кривой лучевых скоростей для надежного определения масс компонентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *C. Hoffmeister*, Astron. Nachr. **235**, 195 (1934).
2. *F. Lause*, Astron. Nachr. **266**, 237 (1938).
3. *G. E. McCluskey*, Astron. J. **71**, 527 (1966).
4. *R. E. Wilson and J. B. Rafert*, Astron. and Aph. Suppl. Ser. **42**, 195 (1980).
5. *W. Götz and W. Wenzel*, Mitt. Veränder. Sterne **1,** №504 (1960).

6. *T. J. Herczeg*, IAU Symp. **88**, 89 (1980).
7. *O. Morgenroth*, Astron. Nachr. **250**, 75 (1933).
8. *S. Piotrowsk*i, Acta Astron. ser. c **2**, 79 (1934).
9. *R. Szafraniec*, Acta Astron. **22**, 273 (1972).
10. *E. M. Halbedel*, Publ. Astron. Soc. Pacif. **96**, 98 (1984).
11. *R. W. Hilditch and G. Hill*, Mem. Roy. Astron. Soc. **79**, 101 (1975).
12. *A. D. Mallama*, Astrophys. J. Suppl. **44**, 241 (1980).
13. *M. A. Svechnikov and Eh. F. Kuznetsova*, Vizier 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. *И. Халиуллина, Х. Ф. Халиуллин*, Астрон. журн. **61**, 393 (1984).
16. *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* (Гостехиздат, т. 3, стр. 464–490, 1947).
17. *P. P. Eggleton*, Astrophys. J. **268**, 368 (1983).
18. *Х. Ф. Халиуллин*, Астрон. журн. **51**, 395 (1974).
19. *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).
20. *J. H. Applegate*, Astrophys. J. **385**, 621 (1992).
21. *А. И. Халиуллина*, Астрон. журн. **96**, 196 (2019).
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).