

УДК 524.386

ЧЕТВЕРНАЯ ДВУЗАТМЕННАЯ СИСТЕМА ВU CMi

© 2021 г. И. М. Волков^{1, 2, *}, А. С. Кравцова^{1, 2, **}, Д. Хохол^{3, ***}

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

² Институт астрономии РАН, Москва, Россия

³ Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранская Ломница, Словакия

*E-mail: hwp@yandex.ru

**E-mail: kravts@yandex.ru

***E-mail: chochol@ta3.sk

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 30.04.2021 г.

Принята к публикации 30.04.2021 г.

Мы обнаружили, что известная спектрально-двойная переменная ВU CMi = HD65241 ($V = 6.4 - 6.7^m$, A0 V) состоит из двух затменных систем, каждая из которых обращается по эллиптической орбите с периодами $P_A = 2^d.94$ ($e = 0.20$), $P_B = 3^d.26$ ($e = 0.22$). Все четыре компонента обладают схожими размерами, температурами и массами, близкими к $M = 3.1 - 3.4 M_\odot$, соответствующими спектральному классу A0. Найдена возможная орбита обеих пар вокруг общего центра тяжести с периодом 6.6 года и эксцентриситетом $e = 0.7$. В обеих системах наблюдается быстрое апсидальное вращение с периодами $U_A = 25.4$ года и $R_1 = 26.3$ года. Каждая из внутренних орбит испытывает небольшие нутационные колебания в долготе периастра. Система является молодой и, возможно, находится только на пути к начальной главной последовательности (НГП). Фотометрический параллакс, вычисленный в соответствии с найденными параметрами, идеально совпадает со значением параллакса GAIA DR2 $\pi = 0.00407'' \pm 0.00006''$.

Ключевые слова: двойные системы, звезды: фундаментальные параметры, звезды: звезда (ВU CMi), методы: фотометрия, методы: лучевые скорости

DOI: 10.31857/S0004629921090085

1. ВВЕДЕНИЕ

В каталоге переменных звезд (ОКПЗ) [1] ВU CMi обозначена как затменная переменная типа EA с периодом 2.93 дня и сильно смещенным вторичным минимумом $\text{MinII} - \text{MinI} = 0.37P$, т.е. орбита системы должна обладать значительным эксцентриситетом. На этом основании звезда была включена в нашу программу исследования внутреннего строения звезд [2]. Наблюдения были начаты в 2012 г. на обсерватории в Старой Лесне (Словакия). Удалось зафиксировать только один выход из минимума блеска, момент которого совершенно не совпадал с эфемеридой, приведенной в [1]. Дальнейший поиск минимумов результата не принес, глубина наблюдавшегося затмения оказалась незначительной и система была отнесена к бесперспективным. Когда же в свободном доступе оказались данные нескольких обзоров ярких звезд, такие как MASCARA [3] и TESS [4], мы вернулись к анализу системы. Данные ASAS [5] пользы не принесли, так как были

отягощены слишком большими ошибками. Вероятно, вследствие своей яркости звезда в данном обзоре находилась в передержке. Первый же взгляд на кривую блеска, построенную нами на основании данных [3], обнаружил наличие двух групп затмений с разными, но стабильными периодами и смещенными вторичными минимумами (рис. 1). Пользуясь полученными нами новыми эфемеридами звезды, мы возобновили интенсивные наблюдения объекта на Симеизской обсерватории ИНАСАН в 2020 г. с помощью 60-см рефлектора и UVV-фотометра конструкции Волкова [6].

2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕДУКЦИЯ ДАННЫХ

Журнал наблюдений приводится в табл. 1. В ходе наблюдений 2020 г. нами были зафиксированы все четыре минимума, которые соответствуют двум главным и двум вторичным минимумам двух затменных систем, наблюдаемым одновре-

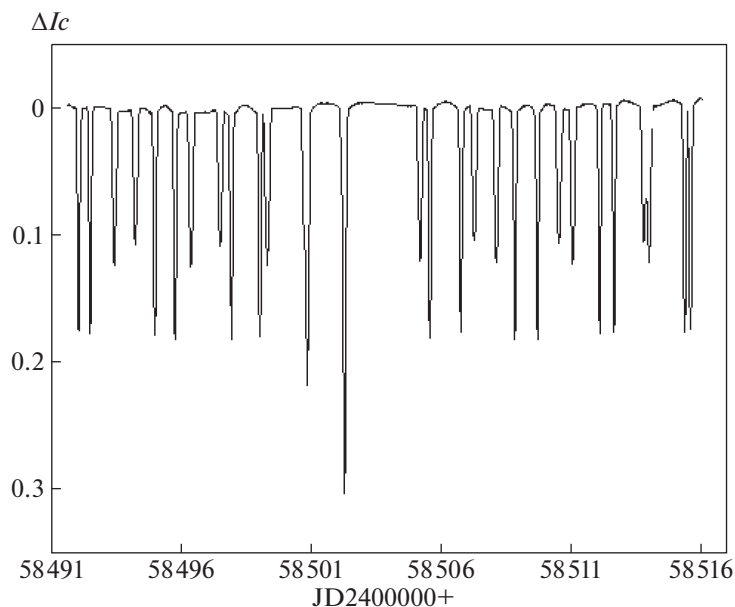


Рис. 1. Наблюдения TESS, из которых видно наличие в системе BU CMi одновременно двух затменных эксцентрических звезд “А” и “В”.

менно в виде одной звезды. В качестве звезды сравнения при наблюдениях на фотометре с фотоумножителем была использована HD64963 ($V = 8.23$, A2). Она находится на расстоянии $22'$ от переменной. Наблюдения проводились по схеме “стандарт-звезда-стандарт”. Время накопления в каждой из спектральных полос выбиралось равным 20–30 с, эпизодически измерялся фон между стандартной звездой и переменной. Использовалась диафрагма $27.5''$. Максимальное значение сигнала от звезды не превышало 200000 с^{-1} в полосе B . В остальных фотометрических полосах сигнал от звезды был меньше. Такое значение сигнала давало поправку за счет нелинейности аппаратуры не более $0^{\text{m}}005$, которая учитывалась по известной формуле нелинейности при Пуассоновском распределении импульсов в регистрируемом потоке. Мертвое время нашей приемной аппаратуры – фотоумножитель + усилитель + счетчик импульсов – составило в среднем 32.7 наносекунды за весь период наблюдений. Это значение тщательно контролировалось, оно оставалось стабильным в пределах 5% за весь интервал наблюдений. Все измерения были исправлены за атмосферную экстинкцию. Более подробно методика наших наблюдений описана в [7], инструментальная система – в [6]. Так как количество ночей на Симеизской обсерватории ИНАСАН, пригодных для наблюдений с одноканальным фотометром, ограничено погодными условиями, были предприняты попытки наблюдений звезды с помощью ПЗС-матриц, когда стандартная звезда и переменная измеряются од-

новременно. Чтобы ослабить пиковый сигнал от столь яркой звезды, изображения расфокусировались, а экспозиции выбирались короткими. Результат оказался неудовлетворительным. Не удалось достичь необходимой точности лучше $0^{\text{m}}01$, также форма минимумов была искажена систематическими ошибками. Гораздо лучше обстояло дело с ПЗС-наблюдениями в Старой Лесне (Словакия), где использовался небольшой телескоп с апертурой 15 см и не было необходимости искусственно ослаблять сигнал. К тому же большее поле зрения обеспечивало наличие достаточно яркой звезды сравнения на одном кадре с переменной. В сезоне весны 2021 г. на Симеизской обсерватории ИНАСАН вследствие неудовлетворительных погодных условий удалось получить неполные наблюдения всего в четырех минимумах. Но эти наблюдения оказались очень важными при определении параметров внешней по отношению к каждой из затменных систем орбиты.

BU CMi была также измерена шесть раз в ходе наблюдений каталога ГАИШ [8]. Приводимые в этом каталоге ультрафиолетовые величины W мы пересчитали в стандартную систему U , а инструментальные величины B, V были приведены в соответствии с системой Джонсона. Два измерения попали на ослабление блеска, что дало нам возможность зафиксировать самый удаленный от текущей эпохи момент минимума, а четыре измерения оказались расположенными между минимумами и были усреднены. Данные о величинах

Таблица 1. Журнал наблюдений

Год	Количество дат измерений	Фотометрическая полоса	Телескоп и приемная аппаратура
2012	7	<i>V</i>	15см Максутов, Словакия, ПЗС ST-10XME
2020	20	<i>UBV</i>	Цейсс-600, Симеиз, ИНАСАН, ФЭУ ЕМІ 9789В
2021	4	<i>V</i>	Цейсс-600, Симеиз, ИНАСАН, ФЭУ ЕМІ 9789В

BU CMi на плато и звезды сравнения приводятся в табл. 2.

Также по нашей просьбе Т. Прибуллой и Р. Комжиком были выполнены спектральные наблюдения системы с помощью спектрографа высокого разрешения и 1.35-м рефлектора обсерватории Скальнате Плесо в Словакии [9]. Полученные спектры подтвердили, что в системе присутствуют движущиеся линии четырех различных звезд спектральных классов, близких к A0, и примерно одинакового блеска. Из полученных спектров удалось построить кривые лучевых скоростей каждого из компонентов.

3. МЕЖЗВЕЗДНАЯ ЭКСТИНКЦИЯ И ТЕМПЕРАТУРА КОМПОНЕНТОВ

Исследуемая звезда находится на расстоянии 250 пк и расположена достаточно далеко от Галактического экватора, $b = 18^\circ$, поэтому межзвездное поглощение можно было ожидать не слишком большим. Это подтверждается положением звезды на двуцветной диаграмме $U-B$, $B-V$. Здесь мы ее не приводим, но схожую можно видеть на рис. 3 из нашей предыдущей работы [7]. Показатели цвета стандартной звезды HD64963 также не показывают сколько-нибудь значительного межзвездного покраснения. Из обзора [10] следует нулевое межзвездное поглощение в направлении BU CMi до расстояния в несколько килопарсек. Обзоры [11, 12] предлагают для BU CMi значение $E(B-V) = 0^m007 \pm 0.0006$. Так как из двуцветной диаграммы $U-B$, $B-V$ сложно определить данное значение с такой же точностью, мы можем принять для дальнейшего анализа указанную величину, исправив за нее показатель цвета звезды из табл. 2. Несмотря на то, что найденная величина близка к нулю и, казалось бы, не играет большой роли, ее значение в данном диапазоне показателей цвета соответствует разнице температур в 140 К (см. используемые нами калибровочные таблицы [13, 14]), что существенно.

Таблица 2. Звездные величины BU CMi на плато и стандарта в системе Джонсона

Звезда	<i>V</i>	<i>U - B</i>	<i>B - V</i>
BU CMi	6.419	-0.070	-0.035
HD64963	0.002	0.006	0.001
	8.228	0.044	0.061
	0.002	0.007	0.002

Также можно заключить, что хотя некоторые молодые эллиптические системы, такие как GG Ori [15], V944 Cep [16], V2544 Cyg [17] и V839 Cep [18], демонстрируют аномально большое поглощение, BU CMi заметных отклонений в поглощении не имеет.

4. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ

В наших исследованиях мы решаем комплексную задачу по определению всей совокупности связанных между собой характеристик кратной системы, причем задача усложняется тем фактом, что затменных систем две и измеряется одновременно блеск всех четырех звезд. Таким образом, количество свободных параметров, как минимум, удваивается. Ряд естественных условий ограничивают область возможных параметров модели, что облегчает ее построение. Эти условия следующие: во-первых, совокупный блеск системы должен соответствовать показателям цвета, приводимым в табл. 2. Во-вторых, в системе должны выполняться законы Кеплера, как для каждой из затменных систем в отдельности, так и для внешней по отношению к каждой затменной системе орбите. От этих законов могут быть некоторые отклонения, так как каждая из систем не может считаться замкнутой, сами звезды не вполне могут считаться материальными точками, о чем свидетельствуют апсидальное движение и небольшие изменения блеска между минимумами (рис. 1). Но в первом приближении законы должны работать. В-третьих, фотометрически определяемое расстояние до всех четырех звезд должно быть одинаковым. Четвертое – совокупный блеск всех четырех звезд принимается за единицу. Последнее условие сразу же подразумевает, что решать кривые блеска мы будем при значительном вкладе третьего света. Так как глубины всех четырех минимумов примерно одинаковы и близки к 0^m2 , а мощность всех линий тоже примерно одинаковая, то можно ожидать, что все четыре звезды имеют схожую поверхностную яркость или, что то же самое, температуру. Также мы предполагаем, что выполняется эмпирический закон масса-светимость.

Подробно применяемая методика описана в ряде наших предыдущих статей, таких как [7, 19–22]. Здесь только отметим, что диск звезды представляется при моделировании идеальной окружностью, распределение яркости по нему учитывается концентрическими окружностями разной яркости [23] в модели линейного закона потемнения к краю, а окончательное решение ищется методом дифференциальных поправок. Коэффициенты потемнения к краю выбирались на основании теоретических моделей [24]. В рамках этой модели изменения блеска между минимумами отсутствуют. В ходе анализа выяснилось, что в очень точных наблюдениях TESS (рис. 1) такие изменения на уровне долей процента существуют, но в пределах ошибок найденных параметров влияния на решения в минимумах они не оказывают.

В нашем распоряжении имеются три независимых наблюдательных фотометрических ряда. Первый – наблюдения MASCARA [3], которые были выполнены без фильтра. Мы решали их в предположении, что средняя длина волны наблюдений соответствует полосе R Джонсона. Затем – наши собственные UBV наблюдения и наблюдения TESS [4], которым была приписана полоса I_c Кузенса. Каждый из имеющихся наблюдательных рядов анализировался отдельно, и результаты сравнивались. Мы получили примерно одинаковые независимые параметры, причем свет от компонентов “А” и “В” разделился во всех решениях поровну. Это важный момент. В начале мы получили для своих наблюдений V и точек TESS одинаковые ошибки, на уровне 0^m006 . Но после более внимательного рассмотрения остаточных уклонений в наблюдениях TESS было обнаружено, что при добавлении небольших поправок ко времени наблюдений в каждую из дат можно улучшить точность решения кривой блеска в десять раз, с 0^m006 до 0^m0006 . В дальнейшем, построив в крупном масштабе графики хода остатков $O - C$ в моментах минимумов, мы объяснили введение этих поправок нутацией (см. раздел 6). Реальный вес каждого отдельного наблюдения увеличивается при этом в 100 раз. После исправления наблюдений TESS за этот эффект мы получили наиболее точное решение, которое и было принято за окончательное. Аппроксимация наших наблюдений и наблюдений MASCARA данной моделью не ухудшает разброса точек на соответствующих кривых блеска. Результаты для всех кривых блеска приведены на рис. 2. Все эти кривые аппроксимированы одними и теми же параметрами, кроме долготы периастра, которая меняется со временем вследствие быстрого апсидального вращения. Полученные из решений параметры представлены в табл. 3. Массы звезд были оценены из фотометрических данных

с помощью косвенного метода [25]. Способ, которым мы оцениваем ошибки масс косвенного метода, описан в [7]. Полученные из фотометрии данные послужили основой для расшифровки спектральных наблюдений. В табл. 3 приведены уже уточненные из кривых лучевых скоростей массы.

Полученным относительным светимостям и температурам в соответствии с калибровкой из [13] соответствует непокрашенный показатель цвета $B - V = -0^m031$. Это значение больше измеренного в каталоге [8] (табл. 2) на 0^m004 . Мы считаем, что такое расхождение является объективной оценкой как точности калибровок [13], так и неопределенности нашего решения, т.е. совпадение удовлетворительное.

5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Расшифровка спектров с целью измерения лучевых скоростей компонентов оказалась сложной задачей, так как почти всегда каждая из линий наблюдалась в бленде с другими. Линии всех четырех компонентов аппроксимировались гауссианами одинаковой амплитуды и ширины, и искалось наилучшее соответствие между полученной в результате сложения общей аппроксимационной функцией и наблюдаемым спектром. Использовались наиболее мощные оптически тонкие (для спектра A0) линии MgII (4481 \AA) (рис. 3). Результаты анализа представлены в табл. 4 и на рис. 4, 5. Значительный разброс связан с постоянным наложением линий в спектрах. При решении кривых лучевых скоростей учитывалось апсидальное вращение. Полученные значения масс приводятся в табл. 3. Данные результаты не являются окончательными, работа над спектрами продолжается.

6. АПСИДАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ И СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТ В МОМЕНТАХ МИНИМУМОВ

Для исследования обоих эффектов необходимо знание точных моментов минимумов. Мы определили все возможные моменты минимумов из наблюдений MASCARA, TESS и наших. По условиям видимости звезды над горизонтом на Симеизской обсерватории ИНАСАН нам не удалось наблюдать ни одного минимума целиком. Из наблюдавшихся отдельных ветвей минимумов были сконструированы средние для наших наблюдений в 2020 г. минимумы. Таким образом мы получили четыре средних момента затмений, по одному для каждой из звезд в системе. Еще один индивидуальный момент был получен из наших наблюдений 2012 г. в Старой Лесне. Поиск по литературным источникам выявил всего один опуб-

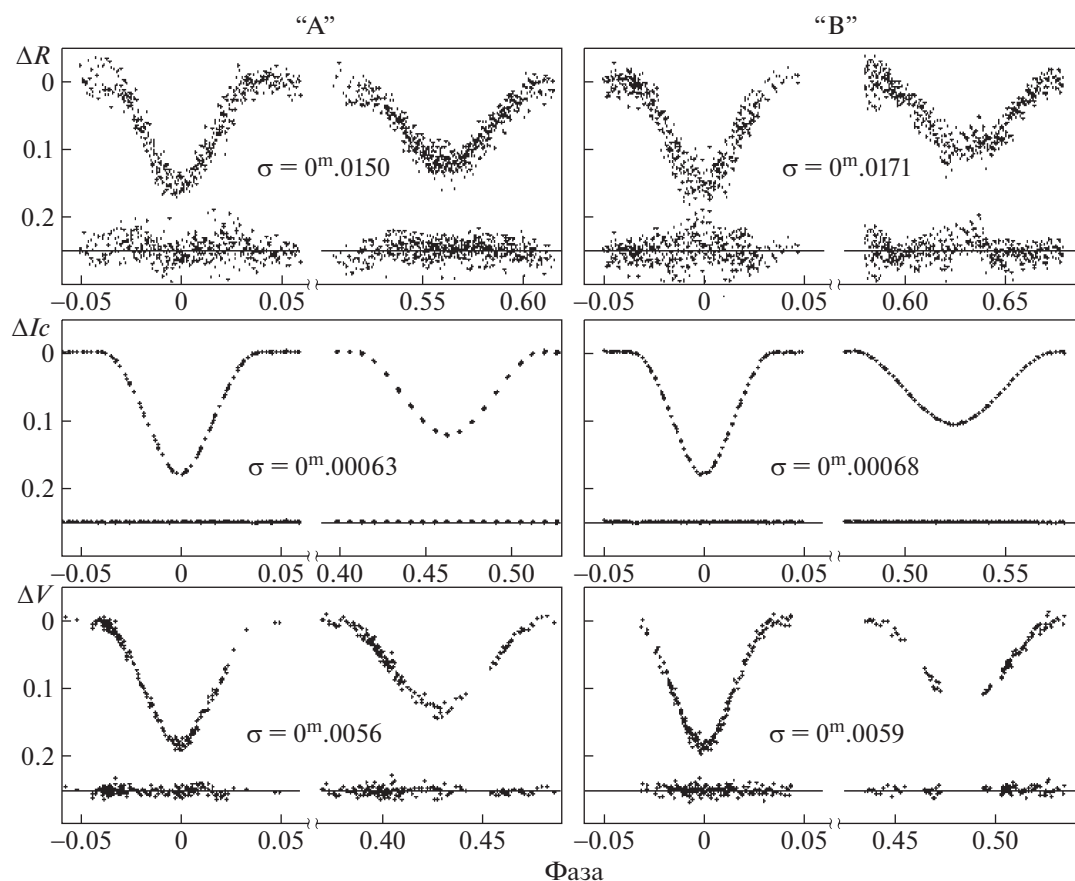


Рис. 2. Наблюдения в минимумах. Левые панели — компонент “А”, правые — “В”. Уровень блеска на плато приравнен к нулю. Под каждым из минимумов представлен ход отклонений от конкретного решения $O - C$. Величина средней ошибки указана здесь же. Наблюдения расположены в хронологическом порядке сверху вниз. Верхний ряд — MAS-CARA, затем TESS и в нижнем ряду — наши наблюдения в полосе V . Наглядно видно прогрессивное уменьшение фаз вторичных минимумов за счет быстрого апсидального движения.

ликованный момент минимума [26]. Еще один момент минимума был взят из наблюдений каталога [8]. Хотя наблюдательных точек в этом минимуме всего две, амплитуда ослабления блеска говорит о том, что они пришлись на момент времени, соответствующий дну минимума. Это наиболее отстоящее от современной эпохи наблюдение и поэтому оно наиболее точно определяет период обращения на внешней орбите. И, наконец, из наблюдений частей минимумов в 2021 г. с помощью установленной геометрической модели звезды были получены четыре последних по времени момента минимумов. Для каждого из имеющихся моментов было определено, какой именно компонент четверной системы затмевается, отброшены моменты ослабления, в которых минимумы накладывались. Все полученные данные представлены в табл. 5, 6, 7, 8.

Самый большой вклад в отклонение хода моментов от линейной формулы вносится апсидальным вращением. Амплитуда эффекта достигает 0.2 сут. Следующим по значимости является световой эффект Ремера, который обусловлен

изменением расстояний до звезд “А” и “В” при их движении по общей орбите, его амплитуда 0.022 сут. Затем идут немного меньшие по величине нутационные колебания с амплитудой примерно 0.015 сут. Задача решалась с помощью специально разработанных для данного случая программ с учетом накопленного нами опыта поиска невидимых спутников в затменных системах [25, 27–30]. Поиск решения проводился методом последовательных приближений. Искались одновременно как параметры апсидального вращения, так и орбита третьего тела. При этом обе внешние орбиты для компонентов “А” и “В” должны были быть идентичными и отличаться только долготой периастра (на 180°) и амплитудами светового эффекта — вследствие разности масс обеих систем. Именно наблюдения компонента “А” позволили наиболее надежно зафиксировать параметры внешней орбиты, так как для него количество наблюдавшихся минимумов максимально и они распределены по значительному интервалу времени в 34 года. Для апсидального

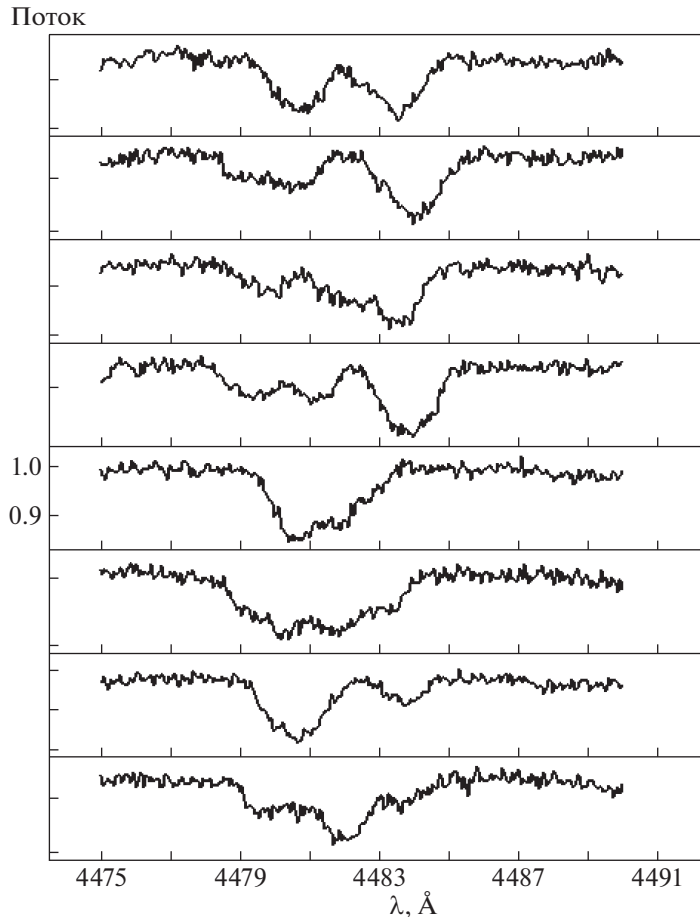


Рис. 3. Участок спектра ВU CMi, соответствующий области линии MgII(4481 Å). По оси ординат – относительный поток, нормированный на континуум. Масштаб всех графиков одинаков и показан для одного из спектров. Если считать бленды наложением минимально двух линий, то отлично видно присутствие движущихся линий от четырех компонентов, примерно одинаковой интенсивности.

вращения обеих затменных систем были получены параметры, представленные в табл. 9.

После вычета апсидального вращения, графики которого представлены на рис. 6, 7, наблюдаемому ходу остатков *O–C* (рис. 8, 9) наиболее хорошо удовлетворяют следующие параметры орбиты третьего тела:

$$P_3 = 2420 \pm 40 \text{ дней, или } 6.62 \text{ года,}$$

$$T_0 = \text{J.D. } 2454490 \pm 20,$$

$$(A \sin i)_A = 4.21 \pm 0.08 \text{ а.е.,}$$

$$(A \sin i)_B = 4.14 \pm 0.08 \text{ а.е.,}$$

$$e = 0.70 \pm 0.03,$$

$$\omega_A = 132^\circ \pm 3^\circ,$$

$$\omega_B = 312^\circ \pm 3^\circ,$$

$$f(M_3)_A = 1.6877 \pm 0.0005 M_\odot,$$

$$f(M_3)_B = 1.6086 \pm 0.0005 M_\odot.$$

Представленные ошибки являются заниженными, они соответствуют конкретной модели, а каждая модель соответствует локальному минимуму невязок. Приводимые здесь параметры не являются окончательными. Наблюдательных данных пока недостаточно, период внешней орбиты охвачен наблюдениями не полностью. Исследование всей области допустимых решений показало, что существует набор похожих моделей, которые отличаются друг от друга больше, чем приведенные выше ошибки. Из нашего исследования следует, что реальный период внешней орбиты заключен в интервале 5.9–7.7 года. Также мы можем оценить, что отношение масс системы “А” к системе “В” равно примерно 1.0. Этот результат хорошо соответствует фотометрическим решениям, в которых светимости компонентов “А” и “В” разделились поровну. Применение третьего закона Кеплера к полученным параметрам внешних орбит дает суммарное значение массы всей системы в $M(\sin i)^3 = 13.3 M_\odot$. Реше-

Таблица 3. Абсолютные и относительные параметры ВU CMi

	Компонент “А”	Компонент “В”
r_1	0.1712 ± 0.005	0.1461 ± 0.005
r_2	0.1229 ± 0.005	0.1287 ± 0.005
i°	83.89 ± 0.05	83.40 ± 0.05
e	0.204 ± 0.007	0.218 ± 0.007
ω° , (JD 2,458,921)	121.4 ± 0.1	96.05 ± 0.1
l_{1v}	0.336 ± 0.001	0.288 ± 0.001
l_{2v}	0.163 ± 0.001	0.213 ± 0.001
l_{1b}	0.335 ± 0.002	0.288 ± 0.002
l_{2b}	0.164 ± 0.002	0.213 ± 0.002
l_{1u}	0.343 ± 0.003	0.289 ± 0.003
l_{2u}	0.158 ± 0.003	0.210 ± 0.003
T_1	$10130 \pm 80K$	$10180 \pm 80K$
T_2	$9740 \pm 80K$	$9890 \pm 80K$
Болометрическая поправка В.С. ₁	-0.277	-0.286
Болометрическая поправка В.С. ₂	-0.196	-0.227
Масса, M_1	$3.40 \pm 0.1 M_\odot$	$3.29 \pm 0.1 M_\odot$
Масса, M_2	$3.11 \pm 0.1 M_\odot$	$3.29 \pm 0.1 M_\odot$
Радиус, R_1	$2.51 \pm 0.05 R_\odot$	$2.31 \pm 0.05 R_\odot$
Радиус, R_2	$1.804 \pm 0.05 R_\odot$	$2.04 \pm 0.05 R_\odot$
Гравитационное ускорение, $\lg g_1$, см/с ²	4.088 ± 0.01	4.148 ± 0.01
Гравитационное ускорение, $\lg g_2$, см/с ²	4.338 ± 0.01	4.259 ± 0.01
Большая полуось, a а.е.	16.1 ± 0.1	17.3 ± 0.1
Фотометрический параллакс, π_{ph}	$0.00407'' \pm 0.00005''$	$0.00407'' \pm 0.00005''$

Таблица 4. Лучевые скорости компонентов ВU CMi

Дата, JD 2,400,000+	“А” главный, км/с	“А” вторичный, км/с	“В” главный, км/с	“В” вторичный, км/с
59163.6152	-30	40	110	-100
59164.6629	125	-120	-45	35
59166.6279	25	-45	80	-50
59177.6483	-175	145	10	70
59178.6138	5	-45	-85	115
59179.6430	70	-115	110	-45
59180.5556	-180	145	105	-75
59185.6611	55	-100	-5	55
59196.5649	65	-110	155	-70
59197.5586	-5	-40	-80	165
59203.5284	-25	25	130	-30
59216.4063	-40	55	165	-55
59224.4806	-145	150	-25	100
59226.4283	130	-115	75	-20
59246.3586	60	-95	-95	165
59246.3844	70	-95	-95	170

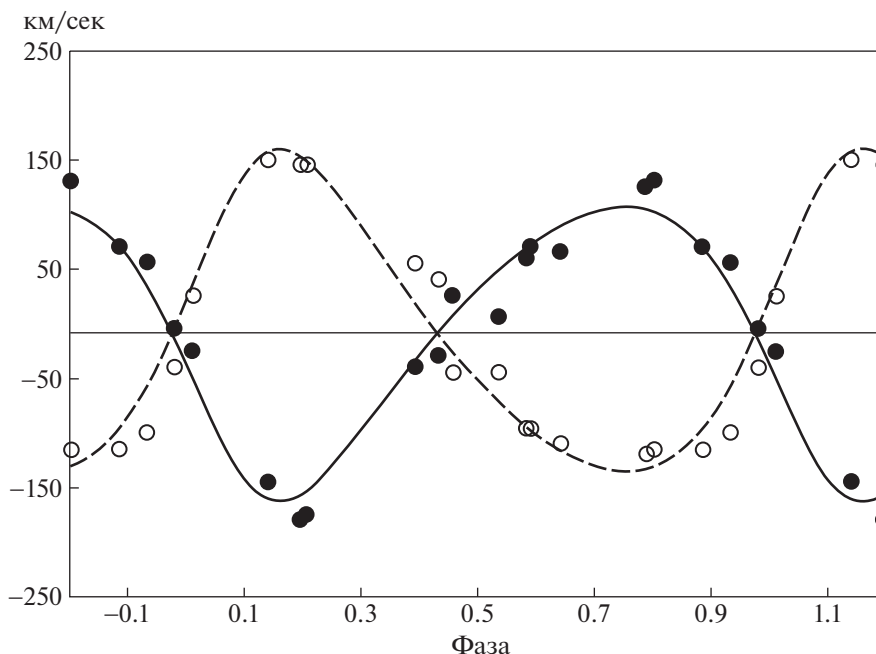


Рис. 4. График лучевых скоростей звезды “А”. Заполненные кружки – главный компонент, открытые кружки – вторичный. Сплошная линия соответствует решению кривой лучевых скоростей для главного компонента, прерывистая линия – для вторичного. Средняя ошибка отдельного измерения 13.3 км/с.

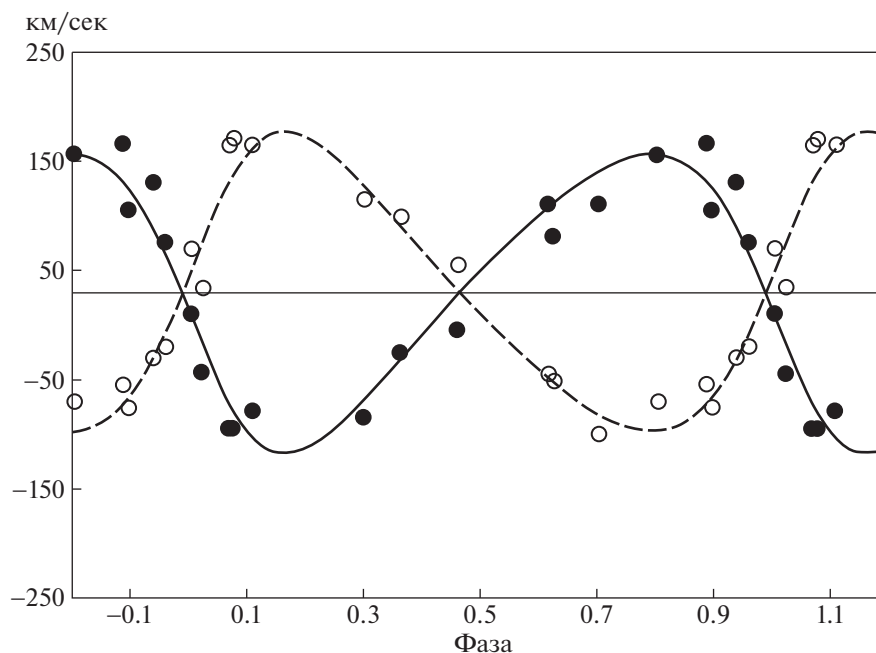


Рис. 5. График лучевых скоростей звезды “В”. Заполненные кружки – главный компонент, открытые кружки – вторичный. Сплошная линия соответствует решению кривой лучевых скоростей для главного компонента, прерывистая линия – для вторичного. Средняя ошибка отдельного измерения 15.5 км/с.

ния кривых лучевых скоростей предполагают, что $M = 13.1 M_{\odot}$ (углы наклона орбит известны с высокой точностью из фотометрических решений).

Отсюда заключаем, что $\sin i \approx 1$, т.е. угол наклона внешней орбиты близок к нормали и соответствует углам наклона каждой из затменных систем к

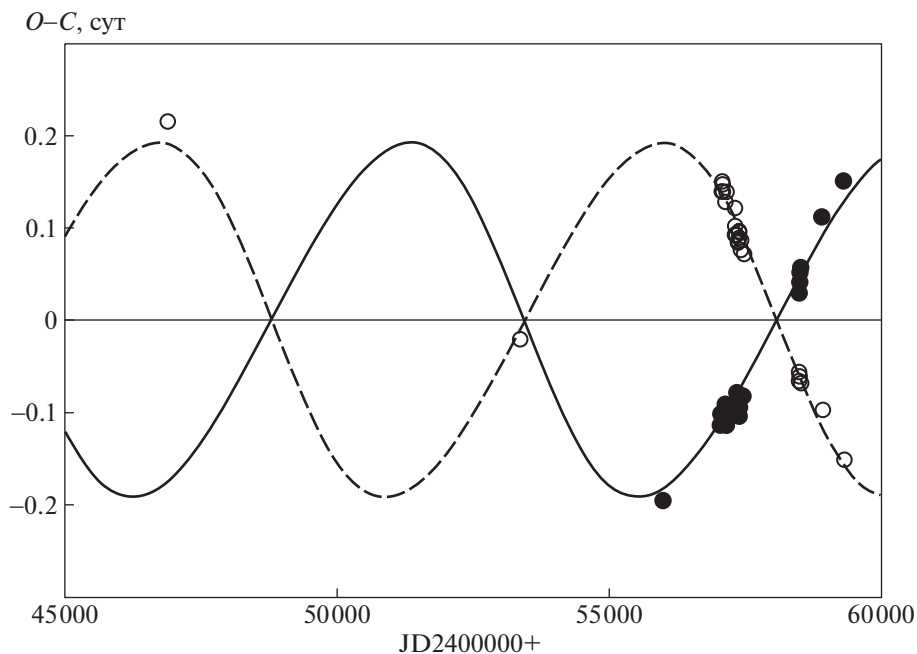


Рис. 6. График $O-C$, построенный с одинаковым для главных и вторичных минимумов периодом для компонента “А”. Главные минимумы и вторичные минимумы показаны одинаковыми кружками. Сплошная линия соответствует обнаруженному в системе апсидальному вращению для главных минимумов, штриховая – для вторичных минимумов.

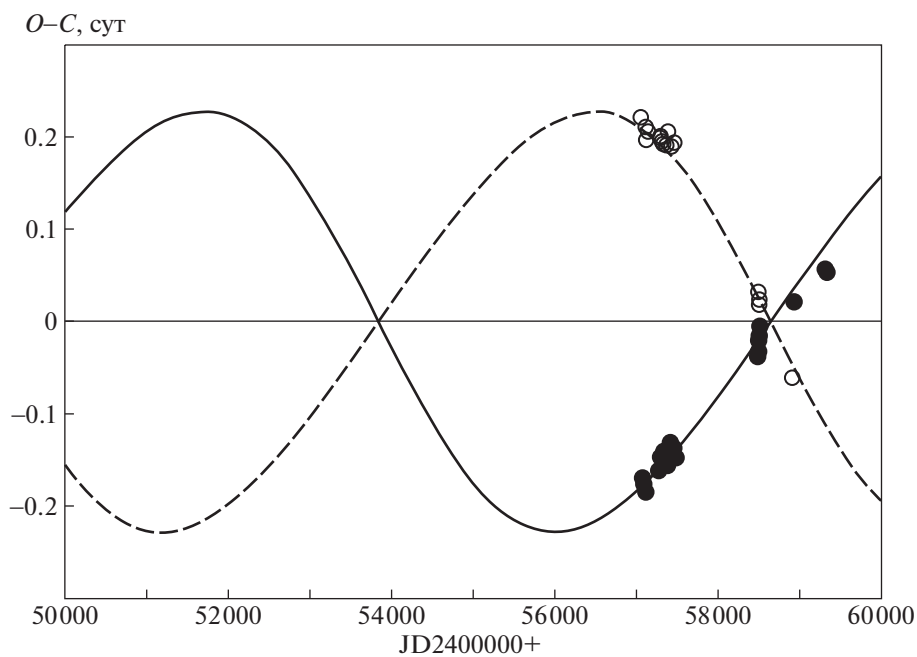


Рис. 7. График $O-C$, построенный с одинаковым для главных и вторичных минимумов периодом для компонента “В”. Главные минимумы и вторичные минимумы показаны одинаковыми кружками. Сплошная линия соответствует обнаруженному в системе апсидальному вращению для главных минимумов, штриховая – для вторичных минимумов.

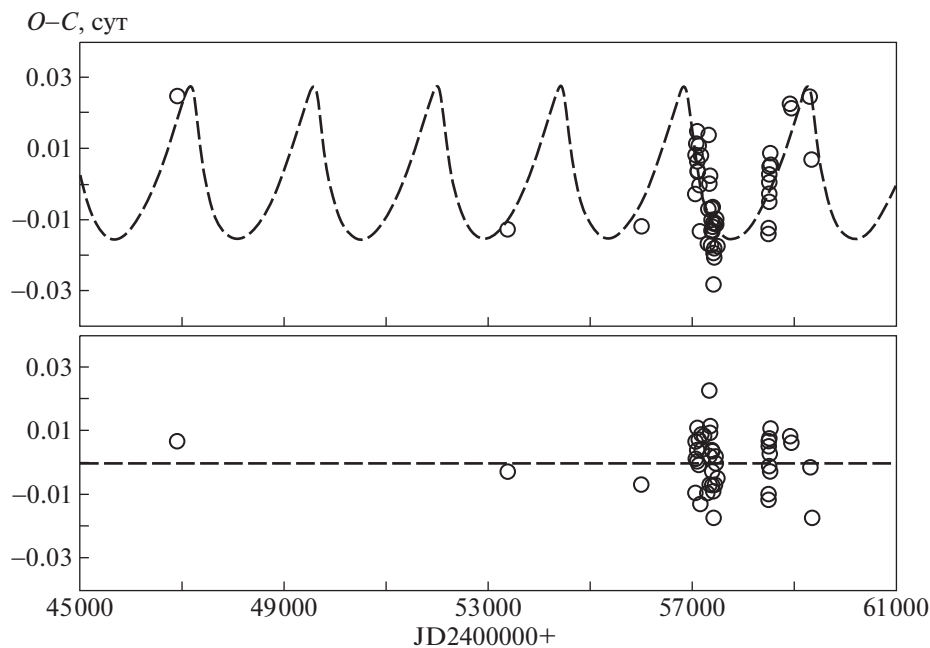


Рис. 8. График $O-C$ после вычета апсидального движения для компонента “А”. Штриховая линия на верхней панели соответствует параметрам найденной внешней орбиты компонента “А” вокруг общего с компонентом “В” центра тя- жести. Остаточные отклонения после вычета апсидального и орбитального движений представлены на нижней панели. Остаточный разброс связан с нутационным покачиванием орбиты в долготе периастра.

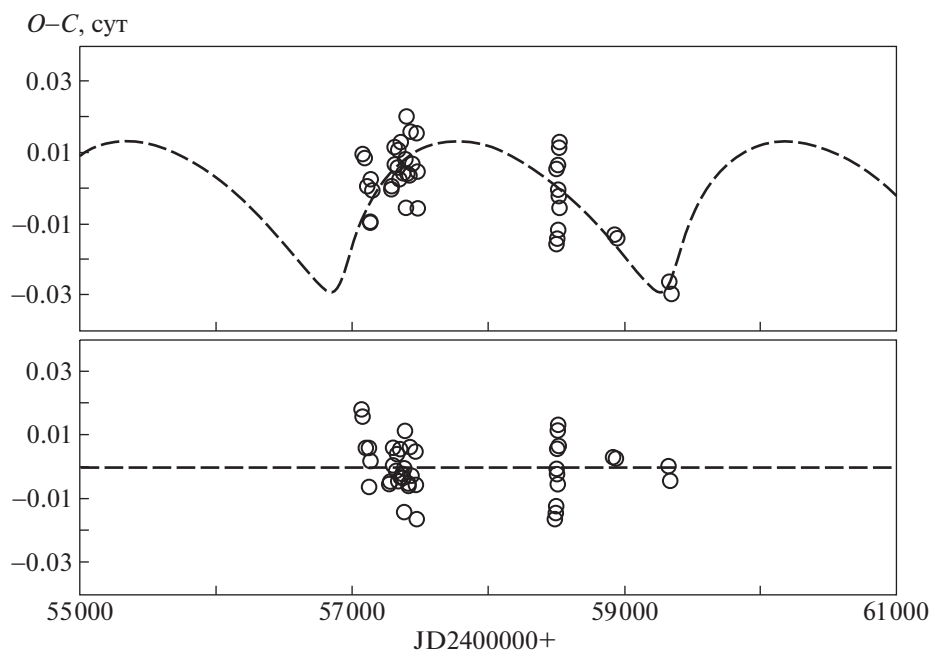


Рис. 9. График $O-C$ после вычета апсидального движения для компонента “В”. Штриховая линия на верхней панели соответствует параметрам найденной внешней орбиты компонента “В” вокруг общего с компонентом “А” центра тя- жести. Остаточные отклонения после вычета апсидального и орбитального движений представлены на нижней панели. Остаточный разброс связан с нутационным покачиванием орбиты в долготе периастра.

Таблица 5. Моменты главных минимумов компонента “А”

HJD (2,400,000+)	$(O - C)_1$ (сут)	$(O - C)_2$ (сут)	$(O - C)_3$ (сут)	Примечание
55993.22965	-0.19522	-0.01182	-0.00674	3
57057.439	-0.101	+0.008	+0.001	4
57060.367	-0.112	-0.003	-0.010	4
57098.591	-0.103	+0.003	-0.000	4
57107.419	-0.099	+0.006	+0.004	4
57110.357	-0.095	+0.010	+0.007	4
57151.492	-0.114	-0.013	-0.013	4
57160.332	-0.092	+0.008	+0.009	4
57286.721	-0.104	-0.017	-0.009	4
57336.715	-0.082	+0.000	+0.009	4
57342.596	-0.080	+0.002	+0.011	4
57380.802	-0.088	-0.010	+0.001	4
57386.674	-0.095	-0.018	-0.007	4
57389.618	-0.090	-0.013	-0.003	4
57392.552	-0.096	-0.020	-0.009	4
57395.494	-0.094	-0.018	-0.007	4
57398.423	-0.104	-0.028	-0.017	4
57436.658	-0.083	-0.011	+0.001	4
58492.06999	+0.03187	-0.01361	-0.00995	5
58495.00849	+0.03083	-0.01398	-0.01142	5
58497.94830	+0.03109	-0.01403	-0.01156	5
58506.77686	+0.04101	-0.00507	-0.00289	5
58509.72214	+0.04675	+0.00034	+0.00242	5
58512.66719	+0.05226	+0.00553	+0.00752	5
58515.61030	+0.05582	+0.00877	+0.01066	5
58921.32411	+0.11242	+0.02265	+0.00838	6
59312.3220	+0.1508	+0.0242	-0.0015	6

лучу зрения. Все три орбиты скорее всего расположены в одной плоскости. Но для окончательных выводов о параметрах внешней орбиты системы требуются дальнейшие наблюдения. Мы не можем исключить, что приведенный выше набор параметров соответствует только локальному минимуму.

Построенный в большом масштабе график $O-C$ для индивидуальных моментов минимумов TESS представлен на рис. 10. Из этих графиков

Таблица 6. Моменты вторичных минимумов компонента “А”

HJD (2,400,000+)	$(O - C)_1$ (сут)	$(O - C)_2$ (сут)	$(O - C)_3$ (сут)	Примечание
46897.220	+0.215	+0.025	+0.007	1
53378.6805	-0.0209	-0.0128	-0.0028	2
57085.615	+0.147	+0.011	+0.007	4
57091.497	+0.150	+0.015	+0.011	4
57094.425	+0.139	+0.004	+0.002	4
57097.371	+0.145	+0.010	+0.007	4
57144.388	+0.129	-0.000	-0.000	4
57147.335	+0.137	+0.008	+0.008	4
57323.673	+0.102	-0.007	+0.002	4
57329.542	+0.092	-0.016	-0.007	4
57332.511	+0.122	+0.014	+0.023	4
57367.750	+0.086	-0.017	-0.007	4
57370.690	+0.086	-0.017	-0.006	4
57373.628	+0.085	-0.018	-0.007	4
57376.578	+0.096	-0.007	+0.004	4
57379.511	+0.089	-0.013	-0.003	4
57382.456	+0.095	-0.007	+0.004	4
57385.393	+0.091	-0.010	+0.001	4
57423.591	+0.076	-0.021	-0.009	4
57426.541	+0.086	-0.010	+0.002	4
57429.478	+0.084	-0.012	+0.000	4
57432.411	+0.077	-0.018	-0.006	4
57479.438	+0.072	-0.017	-0.004	4
58493.45422	-0.05545	+0.00465	+0.00726	5
58496.39330	-0.05591	+0.00461	+0.00713	5
58499.33059	-0.05816	+0.00277	+0.00519	5
58505.20707	-0.06078	+0.00100	+0.00323	5
58508.14223	-0.06516	-0.00296	-0.00082	5
58511.07922	-0.06772	-0.00510	-0.00306	5
58934.34435	-0.09707	+0.02100	+0.00613	6
59331.1291	-0.1509	+0.0068	-0.0172	6

видно, что главные и вторичные минимумы для каждого из компонентов “А” и “В” уклоняются в противофазе. Такую картину можно получить, если предположить, что эллиптические орбиты каждой из звезд “А” и “В” покачиваются в преде-

Таблица 7. Моменты главных минимумов компонента “B”

HJD (2,400,000+)	$(O - C)_1$ (сут)	$(O - C)_2$ (сут)	$(O - C)_3$ (сут)	Примечание
57076.560	-0.170	+0.009	+0.016	4
57099.390	-0.176	+0.001	+0.006	4
57125.480	-0.184	-0.010	-0.006	4
57278.830	-0.161	-0.000	-0.005	4
57301.680	-0.147	+0.012	+0.006	4
57327.780	-0.145	+0.011	+0.004	4
57350.620	-0.141	+0.013	+0.005	4
57386.490	-0.156	-0.006	-0.014	4
57399.550	-0.145	+0.004	-0.005	4
57412.600	-0.144	+0.004	-0.006	4
57422.400	-0.131	+0.016	+0.006	4
57461.540	-0.138	+0.005	-0.006	4
57474.580	-0.147	-0.006	-0.016	4
58492.51817	-0.03701	-0.01660	-0.01620	5
58495.78232	-0.03513	-0.01414	-0.01464	5
58499.04752	-0.03220	-0.01162	-0.01202	5
58505.58412	-0.02014	-0.00039	-0.00058	5
58508.85361	-0.01292	+0.00642	+0.00634	5
58512.12118	-0.00762	+0.01130	+0.01132	5
58515.38576	-0.00531	+0.01320	+0.01333	5
58936.24470	+0.02080	-0.01410	+0.00261	6
59321.22804	+0.05628	-0.02604	+0.00051	6
59334.27505	+0.05421	-0.02967	-0.00437	6

Таблица 8. Моменты вторичных минимумов компонента “B”

HJD (2,400,000+)	$(O - C)_1$ (сут)	$(O - C)_2$ (сут)	$(O - C)_3$ (сут)	Примечание
57065.570	+0.221	+0.010	+0.018	4
57124.280	+0.210	+0.003	+0.006	4
57127.530	+0.198	-0.009	-0.006	4
57137.325	+0.206	-0.001	+0.002	4
57280.855	+0.196	+0.000	-0.005	4
57303.695	+0.200	+0.007	+0.001	4
57329.790	+0.197	+0.006	-0.001	4
57342.835	+0.193	+0.003	-0.005	4
57365.670	+0.192	+0.004	-0.004	4
57375.460	+0.195	+0.008	-0.000	4
57388.520	+0.206	+0.020	+0.012	4
57427.650	+0.189	+0.007	-0.003	4
57463.540	+0.194	+0.015	+0.005	4
58494.25583	+0.03357	+0.00528	+0.00573	5
58497.51828	+0.03275	+0.00603	+0.00558	5
58507.29522	+0.02288	-0.00213	-0.00226	5
58510.55370	+0.01909	-0.00535	-0.00538	5
58921.52009	-0.06054	-0.01305	+0.00300	6

Сноски к табл. 5, 6, 7, 8: Ошибки моментов минимумов примерно соответствуют 5 единицам последней значащей цифры. $(O - C)_1$ – отклонения от линейной формулы. $(O - C)_2$ – остатки после вычета апсидального движения. $(O - C)_3$ – остатки после вычета апсидального движения и светового эффекта. Примечания. (1) – данные, полученные из каталога ГАИШ [8], (2) – [25], (3) – ПЗС наблюдения Старая Лесна, Словакия, (4) – наблюдения MASCARA, (5) – наблюдения TESS, (6) – наблюдения с фотоумножителем Симеизская обсерватория ИНАСАН.

лах одного градуса в долготе периастра. Периоды таких покачиваний мы оцениваем в 60 сут, причем для обеих затменных звезд они примерно одинаковы. Получается, что кроме обычных эффектов, наблюдаемых в двойных эллиптических системах, таких как апсидальное движение, световое уравнение за счет влияния третьего тела, может наблюдаться еще и нутация.

Мы не приводим здесь расчеты теоретически ожидаемого апсидального вращения. Оно для таких орбит и масс компонентов заведомо меньше измеренных величин. Причины быстрого апсидального вращения должны быть связаны со взаимным влиянием обеих систем друг на друга. В системе явно наблюдается синхронизация в ор-

Таблица 9. Элементы апсидального движения компонентов BU CMi. Значения эксцентриситетов зафиксированы из фотометрических решений

	“A”	“B”
T0[HJD]	2458092.260	2457076.730
P_A [сут]	2.939545(2)	3.26227(1)
e	0.20425	0.2181
$\dot{\omega}$ [градус/год]	14.2(5)	13.7(5)
ω_0 [градусы]	90	30.65
U [год]	25.4(1)	26.3(1)

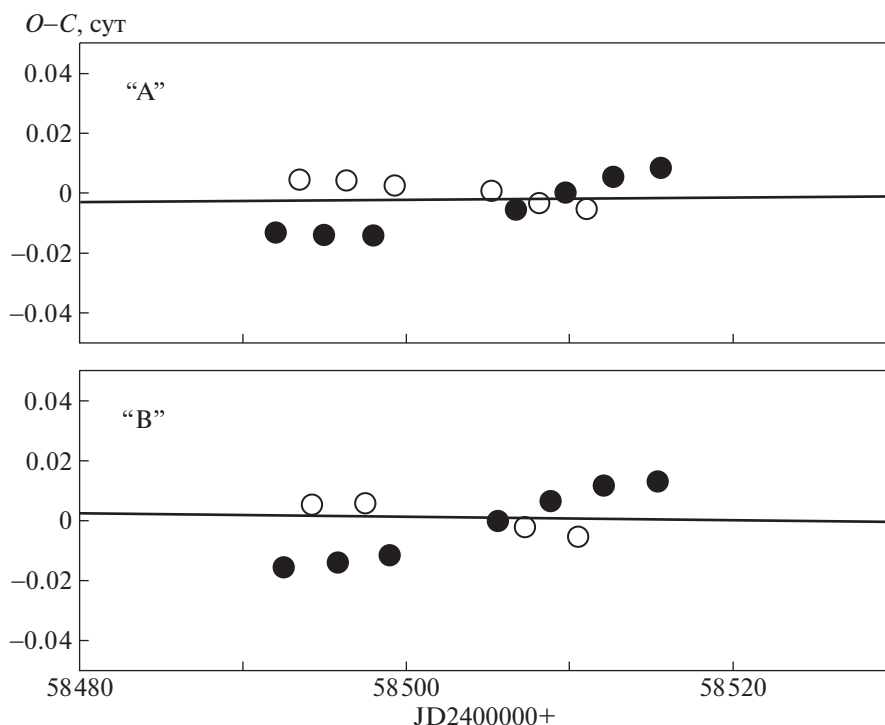


Рис. 10. Область рис. 8, 9 в увеличенном масштабе в районе TESS наблюдений. Заполненные кружки – главные минимумы, пустые – вторичные. Наклонная линия соответствует эффекту Ремера за счет орбитального движения компонентов “А” и “В”. Объяснением наблюдаемых колебаний в противофазе для главных и вторичных минимумов может служить нутационное покачивание орбит компонентов “А” (верхняя панель) и “В” (нижняя панель).

битальном, нутационном и апсидальном движениях компонентов “А” и “В”, так как периоды затменных относятся $P_A/P_B = 0.9$, периоды нутации примерно равны, апсидальные периоды тоже одинаковые, $P_{\text{апсид}}/P_3 \sim 4$. Плоскости орбит обеих затменных систем возможно коллинеарны. Можно заключить, что данная кратная система уже пришла в равновесное состояние и является стабильной.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами раскрыта природа необычной затменной системы BU CMi, которая оказалась состоящей из двух затменных звезд. Периоды обеих систем связаны резонансом 9/10. В каждой наблюдается быстрое апсидальное вращение, построена предварительная орбита, по которой обе системы обращаются вокруг общего центра масс. Найдены физические характеристики всех четырех звезд – температуры, размеры, массы. Все звезды, по-видимому, являются весьма молодыми, до 200 млн. лет. Предварительное сравнение полученных параметров с теоретическими моделями указывает, что химический состав звезд не соответствует солнечному, а вторичные компоненты моложе главных. При условии общности происхождения для молодых звезд скорее всего так и

должно быть, так как менее массивные звезды при общности происхождения должны “садиться” на НГП позже более массивных. Для окончательного уточнения параметров взаимной орбиты и исследования нутации необходимы дальнейшие интенсивные фотометрические и спектральные наблюдения. Мы оцениваем угловое расстояние между компонентами “А” и “В” на текущий момент примерно в $0.01''$, что делает возможным прямые измерения компонентов двойной звезды методами спекл-интерферометрии. Система представляет огромный интерес с точки зрения теории образования и эволюции звезд, а также для исследования динамики тесных кратных систем.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения выполнены на 60-см телескопе Симеизской обсерватории ИНАСАН. В работе использовались база данных SIMBAD Страсбургского центра астрономических данных (Франция) и служба библиографических ссылок ADS (NASA, США). В этот документ включены данные, собранные миссией TESS. Финансирование миссии TESS обеспечивается Управлением научных миссий НАСА. Приносим нашу благодарность сотрудникам Астрономического института

Словацкой академии наук Т. Прибулле и Р. Комжику за проведенные по нашей просьбе спектральные наблюдения. Также мы благодарны анонимному рецензенту, чьи ценные замечания привели к значительному улучшению статьи.

9. ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была выполнена при поддержке стипендии Словацкого информационного агентства SAIA (АСК, ИМВ), грантов РФФИ № 11-02-01213а и 18-502-12025 (ИМВ), при поддержке гранта Программа развития МГУ “Ведущая научная школа Физика звезд, релятивистских объектов и галактик” (ИМВ), а также при поддержке Словацкого агентства развития и исследований по контракту № APVV-15-0458(ДХ) и гранта VEGA 2/0031/18 (ДХ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *N. N. Samus, E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova*, General Catalogue of Variable Stars: Version GCVS 5.1, *Astronomy Reports* **61**, 80 (2017).
2. *И. М. Волков, Н. С. Волкова*, *Астрон. журн.* **86**, 158 (2009).
3. *O. Burggraaff, G. J. J. Talens, J. Spronck, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **617**, A32 (2018).
4. *K. G. Stassun, R. J. Oelkers, M. Paegert, et al.*, *Astron. J.* **158**, 158 (2019).
5. *G. Poymanski*, *Acta Astron.* **52**, 397 (2002).
6. *I. M. Volkov and N. S. Volkova*, *Astron. and Astrophys. Trans.* **26**, 129 (2007).
7. *И. М. Волков, А. С. Кравцова, Д. Хохол*, *Астрон. журн.* **98**, 212 (2021).
8. *В. Г. Корнилов, И. М. Волков, А. И. Захаров, и др.*, *WBVR Каталог ярких северных звезд* (МГУ, Москва, 1991).
9. *T. Döhning, T. Pribulla, R. Komžik, M. Mann, P. Sivanič and M. Stollenwerk*, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **49**, 154 (2019).
10. *G. M. Green, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, H.-W. Rix, et al.*, *Astrophys. J.* **810**, 25 (2015).
11. *E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner*, *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
12. *D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis*, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
13. *P. J. Flower*, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996).
14. *D. M. Popper*, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **18**, 115 (1980).
15. *И. М. Волков, Х. Ф. Халиуллин*, *Астрон. журн.* **79**, 747 (2002).
16. *I. Volkov, D. Chochol, and L. Bagaev*, in *Living Together: Planets, Host Stars and Binaries*, Ed. by S. M. Rucinski, G. Torres, and M. Zejda, Proc. Conference, Sept. 8–12, 2014, Litomysl, Czech Republic, ASP Conf. Ser. **496**, 266 (2015).
17. *I. Volkov, D. Chochol, and L. Bagaev*, presented on the conference “The IMPACT of BINARIES on STELLAR EVOLUTION”, July 3–7, 2017, ESO Garching, Germany.
18. *I. M. Volkov, L. A. Bagaev, A. S. Kravtsova, and D. Chochol*, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **49**, 434 (2019).
19. *И. М. Волков, Д. Хохол, А. С. Кравцова*, *Астрон. журн.* **94**, 436 (2017).
20. *Л. А. Багаев, И. М. Волков, И. В. Николенко*, *Астрон. журн.* **95**, 702 (2018).
21. *А. С. Кравцова, И. М. Волков, Д. Хохол*, *Астрон. журн.* **96**, 508 (2019).
22. *И. М. Волков, А. С. Кравцова*, *Астрон. журн.* **97**, 190 (2020).
23. *Х. Ф. Халиуллин, А. И. Халиуллина*, *Астрон. журн.* **61**, 393 (1984).
24. *R. A. Wade and S. M. Rucinski*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **60**, 471 (1985).
25. *I. M. Volkov, D. Chochol, J. Grygar, M. Mašek, and J. Jurysěk*, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **47**, 29 (2017).
26. *W. Ogloza, W. Niewiadomski, A. Barnacka, M. Biskup, K. Malek, and M. Sokolowski*, *Inform. Bull. Variable Stars* **5843**, 1 (2008).
27. *I. M. Volkov, D. Chochol, N. S. Volkova, and I. V. Nikolenko*, *Proc. IAU* **282**, 89 (2012).
28. *I. M. Volkov and N. S. Volkova*, *ASP Conf. Ser.* **435**, 323 (2010).
29. *N. Volkova and I. Volkov*, *IBVS Inform. Bull. Variable Stars* **5976**, 1 (2011).
30. *I. M. Volkov*, *ASP Conf. Ser.* **496**, 109 (2015).