

## НОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ СКОРОСТИ АПСИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРОЙНОЙ ЗАТМЕННОЙ СИСТЕМЫ AS CAM

© 2023 г. И. М. Волков\*

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

\*E-mail: hwp@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 10.12.2022 г.

Принята к публикации 24.01.2023 г.

С помощью нового подхода к измерению скорости апсидального вращения в системе AS Cam ( $P = 3.43^d$ ,  $V = 8.58^m$ ,  $e = 0.17$ , Sp B7.5 V+B9.0 V) было получено значение  $\dot{\omega}_{\text{obs}} = 0.38^\circ/\text{год}$ , которое не столь значительно, как более ранние измерения, отличается от теоретического значения при условии синхронизма,  $\dot{\omega}_{\text{theor}} = 0.44^\circ/\text{год}$ . Прежнее общепринятое значение было в три раза меньше. Уточнены физические параметры компонентов:  $T_1 = 12980 \pm 150$  K,  $M_1 = 3.21 \pm 0.03 M_\odot$ ,  $R_1 = 2.46 \pm 0.01 R_\odot$ ,  $T_2 = 10850 \pm 100$  K,  $M_2 = 2.32 \pm 0.03 M_\odot$ ,  $R_2 = 1.84 \pm 0.01 R_\odot$ . Впервые определены надежная орбита и физические параметры невидимого спутника – третьего тела в системе:  $P = 2.21$  года,  $\omega = 88^\circ$ ,  $e = 0.70$ ,  $M_3 \sin i = 0.97 \pm 0.01 M_\odot$ .

*Ключевые слова:* тройные звездные системы, параметры компонентов системы, апсидальное вращение, AS Cam

DOI: 10.31857/S0004629923040059, EDN: UMSWXN

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда AS Cam в течение уже 40 лет привлекает особое внимание исследователей вследствие того, что наблюдаемая в системе скорость апсидального вращения в три раза меньше теоретического значения [1]. Рекордсменом по расхождению теории и наблюдений являлась до недавнего времени звезда DI Her, у которой наблюдаемое значение скорости апсидального вращения было ниже теоретического в четыре раза. При этом в DI Her, казалось, не оставалось места для релятивистского вклада в апсидальное вращение. Для объяснения наблюдаемой картины привлекалось множество гипотез, включая альтернативные эйнштейновской несимметричные теории гравитации, например, работы Моффата [2, 3]. Трудность в опровержении или подтверждении выдвинутой Моффатом гипотезы состояла в том, что как раз две упомянутых выше звезды, DI Her и AS Cam, и служили основой для калибровки его теории [4]. Естественно, что при таком условии теоретические предсказания Моффата совпадали с наблюдаемой скоростью вращения линий апсид. В то же самое время оставалась возможность объяснить наблюдаемое противоречие в рамках классической теории Ньютона, не затрагивая релятивистский вклад во вращение линии апсид.

Были предложены две наиболее вероятные гипотезы.

Первая – это предположение о наличии в системе третьего невидимого компонента, который мог бы влиять на эксцентриситет орбиты двойной. Эта гипотеза была высказана Мартыновым и Халиуллиным в той же работе, в которой они впервые измерили скорость апсидального вращения в DI Her [5]. Если эксцентриситет орбиты меняется, то обычные способы измерения апсидального вращения не годятся. Все они базируются на предположении постоянства эксцентриситета. Развитием гипотезы следует считать последовавшие работы, в которых было определено, что если орбита спутника значительно наклонена к плоскости орбиты двойной системы, то апсидальное вращение будет реально замедляться. Был опубликован ряд работ с численным моделированием, в которых было показано, что при некоторых условиях подобная конфигурация может оказаться устойчивой и замедлять апсидальное вращение до наблюдаемого значения [6–8]. Сложности, связанные с определением угла наклона орбиты третьего тела, не позволили пока что найти тройные системы, полностью удовлетворяющие рассчитанным критериям. Наличие третьего тела в системе должно также менять эксцентриситет и

наклон орбиты двойной системы. Последнее как раз подтверждается, например, фактом исчезновения затмений в системах SS Lac [9], QX Cas [10], а также изменением глубин минимумов в недавно открытых тройных системах DX Vel и RW CrA [11, 12], в которых третий компонент хотя и находится на значительном удалении от затменной системы, но имеет сравнимую с ней массу и вполне может оказывать влияние на параметры орбиты двойной звезды.

Другую гипотезу предложил Шакура [13]. Суть ее в том, что значительный наклон осевого вращения компонентов к орбитальной плоскости может замедлить скорость апсидального вращения. Если оси вращения обоих компонентов DI Her лежат в плоскости орбиты, то теоретическое значение скорости апсидального вращения совпадет с наблюдаемым. Для применения данной гипотезы как для DI Her, так и AS Cam, существовала та сложность, что наблюдаемые в обеих системах  $v \sin i$  осевого вращения были близки к условиям синхронизма. Поэтому получалось, что оси вращения должны быть направленными на наблюдателя. Это делало предложенную модель несколько искусственной. К тому же, такая модель противоречила гипотезе образования двойных звезд делением, при которой все моменты должны были бы быть коллинеарными. Как ни странно, но именно это предположение оказалось верным для случая DI Her. Через 24 года после публикации статьи Шакуры было проведено исследование, подтвердившее значительный наклон осей вращения компонентов DI Her к плоскости орбиты [14]. Были получены спектры высокого разрешения во время затмений и по изменению профилей линий сделана оценка величины наклона осей вращения. Наблюдение эффекта Росситера-Маклафлина является упрощенным вариантом данного подхода. Непосредственные измерения данного эффекта Маклафлиным [15] позволили Волкову [16] оценить угол наклона оси вращения главного компонента затменной звезды  $\alpha$  CrV к плоскости ее орбиты в  $40^\circ$  и объяснить этим замедление скорости апсидального вращения системы. Особого внимания данная система не привлекла, так как в этом случае расхождение с условием синхронизма было невелико. Тем не менее это было первое наблюдательное подтверждение гипотезы Шакуры.

В работе Павловского и др. [17] была сделана попытка объяснить случай AS Cam этой же гипотезой. Были получены спектры высокого разрешения, из которых следовало отсутствие вращательного уширения линий. Это могло свидетельствовать об ориентации полюсов компонентов на наблюдателя. Эти наблюдения противоречат спектральным наблюдениям Хилдитча [18] и Малони и др. [19], из которых следует, что вращение

компонентов удовлетворяет условию синхронизма. Так как система AS Cam ( $R_1/A = 0.15$ ,  $R_2/A = 0.1$ ) гораздо более тесная, чем DI Her ( $R_{1,2}/A = 0.05$ ), то отсутствие синхронизма в системе вызывает вопросы. Здесь  $A$  — большая полуось орбиты. В то же самое время, Козырева и др. [20, 21] показали, что в последовательности моментов минимумов в AS Cam наблюдается небольшое световое уравнивание, что можно отнести на счет влияния невидимого спутника. Последовавшие наблюдения других авторов подтвердили найденный эффект [22], хотя и было отмечено, что он находится на пределе обнаружения [17]. В спектральных и фотометрических наблюдениях следов спутника обнаружено не было. Хилдитч [23] при решении своих кривых блеска вручную получил существенную долю третьего света во всех фотометрических полосах наблюдений. Но этот результат не может считаться убедительным, т.к. одновременно в этом решении было получено большее, чем у других авторов, значение угла наклона орбиты. А эти параметры, как известно, сильно связаны: добавляя в решение третий свет, тем самым, увеличиваем угол наклона орбиты к лучу зрения.

Оценка угла наклона орбиты третьего тела AS Cam в  $90^\circ$ , сделанная в работе [8], является ошибочной, так как при вычислении  $\sin i$  были перепутаны большая полуось орбиты затменной системы вокруг общего центра масс тройной системы, которая определяется из светового уравнения, и большая полуось орбиты третьего тела, определяемая из третьего закона Кеплера. Для вычисления синуса угла наклона орбиты третьего тела следовало уменьшить большую полуось орбиты третьего тела на фактор отношения массы третьего тела к сумме масс компонентов затменной звезды. Тогда плоскость орбиты третьего тела в данной оценке примерно совпадает с плоскостью орбиты затменной двойной и перпендикулярна картинной плоскости. Исследование Ходыкина и др. [8] проводилось в предположении солнечной массы третьего тела. Исчезающе малая доля третьего света делает невозможным присутствие в системе одиночной дополнительной звезды массы большей, чем солнечная. Но если третьим телом является маломассивная двойная звезда или релятивистский объект, то условие малой доли третьего света будет выполнено.

Таким образом, наблюдаемое в системе AS Cam противоречие теории с наблюдениями на начало данной работы точного объяснения не имело. Кроме того, оставалась некоторая неопределенность в параметрах орбиты, размерах и температурах звезд. Разные авторы получали значения эксцентриситета орбиты от 0.10 до 0.17. При меньшем из этих значений эксцентриситета получается большее значение скорости апсидального вра-

шения [22], и противоречие исчезает. Но в дальнейшем было показано, что меньшие значения эксцентриситета ошибочны. Козырева и др. [24] предположили постепенное увеличение эксцентриситета системы, которое, вероятно, связано с влиянием третьего компонента. Хилдитчем [23], Козыревой и Захаровым [25] было отмечено, что в системе наблюдаются небольшие физические изменения блеска.

Мною была предпринята попытка разобраться в процессах, происходящих в AS Cam. Поиск по литературе показал, что на данный момент опубликовано несколько фотоэлектрических кривых блеска системы, пригодных для решения и достаточно равномерно распределенных по интервалу в 50 лет. План был получить еще одну кривую блеска, затем решить каждую из имеющихся кривых одинаковым способом, получить из всех решений средние параметры системы, их ошибки, с учетом малости выборки, и непосредственно проследить за динамикой изменений долготы периастра и, возможно, эксцентриситета и угла наклона орбиты. Также для измерения температур можно воспользоваться точным расстоянием до системы из обзора GAIA DR3, а измерения эксцентриситета и долготы периастра дополнить значениями, полученными из спектральных наблюдений Хилдитча [18] и Павловского и др. [17].

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ AS Cam НА ОСНОВЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

### 2.1. Звездные величины и межзвездное поглощение

Звездные величины AS Cam неоднократно определялись разными авторами. Мною были собраны все доступные из литературы  $UBV$  оценки ее блеска [1, 23, 26, 27]. Также были использованы определения температур из спектральных наблюдений [17, 18], из которых с помощью калибровок Флауэра [28] можно независимо определить непокрашенные показатели цвета  $B - V$ . Затем было проведено сравнение друг с другом всех данных, найдены и отброшены выпадающие значения и получены средние величины, наилучшим образом удовлетворяющие всей совокупности данных. Результаты представлены в табл. 1. С помощью двуцветной диаграммы  $(U - B) - (B - V)$  (рис. 1) было определено значение межзвездного поглощения  $E(B - V) = 0.086 \pm 0.008$ , близкое к величине, которую дает обзор [31],  $E(B - V) = 0.10 \pm 0.02$ . Одинаковое с обзором значение следует из  $uvby\beta$  фотометрии Лэси [32]. Величина, получаемая из  $UBV$  фотометрии, выглядит предпочтительнее, так как объединяет измерения многих авторов, полученных из привязок к большому количеству фотометрических стандартов, она и была принята за окончательную. Средние

**Таблица 1.** Звездные величины AS Cam на плато и каждого компонента в отдельности

Звезда	$V$	$U - B$	$B - V$
AS Cam	8.587	-0.269	-0.015
	0.005	0.012	0.012
AS Cam, "A"	8.955	-0.318	-0.029
	0.006	0.013	0.013
AS Cam, "B"	9.939	-0.131	0.019
	0.007	0.017	0.015

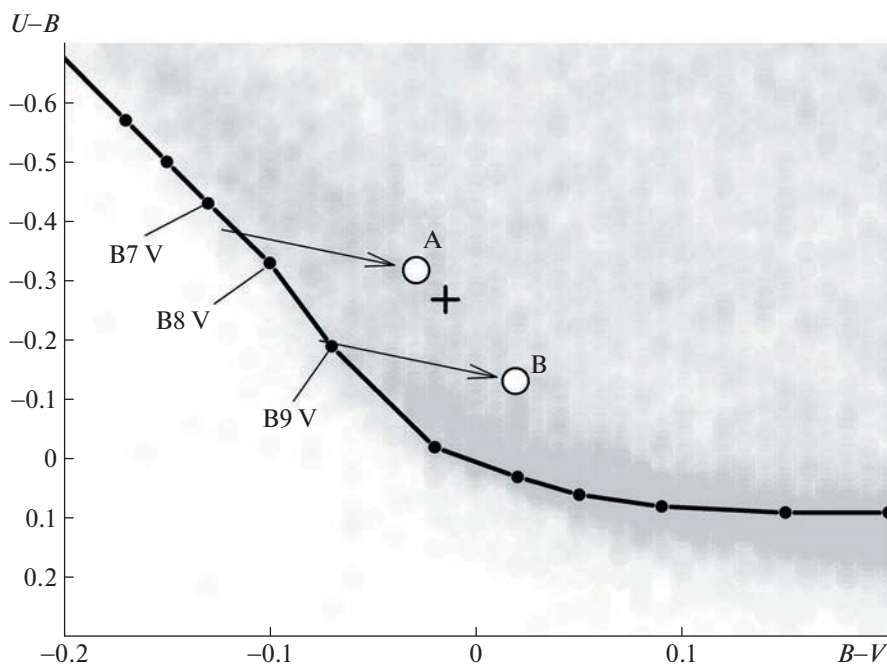
показатели цвета каждого из компонентов были определены после решения кривых блеска и обратного преобразования температур, полученных из спектров с помощью таблиц из работы [28], они также нанесены на рис. 1. Основой для их определения послужили относительные светимости компонентов, полученные из наблюдений Хилдитча, т.к. в них представлены наиболее полные кривые блеска в фотометрических полосах  $UBV$ .

### 2.2. Фотометрия AS Cam

Из литературных данных известны три полных кривых блеска [1, 23, 25]. Данные [33] неполны, но были использованы в той мере, в какой это представлялось возможным. Также были использованы данные спутника TESS [34]. И, наконец, наиболее полная кривая блеска была получена в ходе данного исследования.

Была использована такая же методика наблюдений и редукиции данных, что и в предыдущих работах [35–39]. Окончательные элементы искались методом дифференциальных поправок. Далее приводится более детальный разбор работы с каждым массивом данных.

**2.2.1. Наблюдения Хилдитча.** Наблюдения проводились с помощью фотоэлектрического одноканального фотометра, установленного в фокусе 40-см кассегрена равнинной обсерватории Сент-Эндрюсовского университета в Шотландии в 1968–1970 гг. Приемным элементом служил фотоумножитель RCA 1P21 с комплектом фильтров, обеспечивающим близкую к  $UBV$  инструментальную систему. Было получено порядка 860 измерений в каждой из трех фотометрических полос, полностью покрывших всю кривую блеска звезды. Была обнаружена внезатменная переменность звезды, синхронная с орбитальным периодом. Попытки ректификации кривой блеска за счет эффектов близости, отражения и вращения успеха не принесли, что вызвало недоумение, т.к. непонятной была связь физической переменности компонентов с движением по орбите. Разгадка была найдена в данном исследовании после



**Рис. 1.** Двухцветная диаграмма  $(U - B) - (B - V)$ . Крестиком показано положение AS Cam. Кружки A и B – главный и вторичный компоненты соответственно. Сплошная линия соответствует нормальным показателям цвета звезд пятого класса светимости согласно [29]. Стрелками показано направление линии межзвездного покраснения. Серый фон – данные каталога [30].

решения кривой блеска TESS. В работе [40] предположенная Хилдитчем физическая переменность была подтверждена. В более поздней работе [25] был предложен близкий к суткам период пульсаций. Но достоверность найденного периода невелика, подтвержден он не был. Сводка результатов решения  $UBV$  кривых блеска приведена в табл. 2. Коэффициенты потемнения к краю выбирались для каждой из фотометрических полос в соответствии с опубликованными средними длинами волн [23] с помощью интерполяции таблиц в работе [41]. Обращает на себя внимание хорошее совпадение полученных параметров во всех фотометрических полосах. В двух последних строках табл. 2 даны количество наблюдательных точек в минимумах и среднее уклонение отдельной точки от модели. Полученные параметры отличаются от тех, что приведены в работе [23], где кривые блеска решались вручную. Они также значительно отличаются от тех данных, которые приведены в работе [1], в которой было получено независимое компьютерное решение этих же наблюдений. Такое расхождение объясняется недостатками предыдущих решений. В настоящей работе учтены ночные поправки, которые фактически компенсируют физическую переменность звезды. В случае наблюдений Хилдитча поправки существенно выше ошибок, представленных в последней строке табл. 2. Для полосы  $U$  они рав-

ны  $\pm 0.035^m$ ,  $B - \pm 0.020^m$ ,  $V - \pm 0.017^m$ . Отметим тот факт, что величины поправок монотонно уменьшаются в сторону более длинных волн. Эти поправки не имеют никакого отношения к точности наблюдений в каждой из полос, так как являются средними для отдельной наблюдательной ночи, когда количество наблюдений для каждой фотометрической полосы составляло несколько десятков. Данный факт прямо свидетельствует об увеличении амплитуды физических колебаний в сторону коротких длин волн и говорит в пользу определенного ниже класса физической переменности компонентов. Средневесовые значения параметров, полученных из наблюдений Хилдитча, приведены в первом столбце табл. 3.

**2.2.2. Наблюдения Падалья и Шривастава, 1975 г.** Наблюдения [26] получены в фотометрических полосах  $UBV$ , но, к сожалению, оригинальные данные недоступны. Приведены только индивидуальные моменты минимумов, имеющие недостаточную точность. Так как эти моменты очень близки между собой по времени, то была проведена линейная регрессия этих данных и получено два значения моментов минимумов: один главный и один вторичный, имеющие более высокую точность.

**2.2.3. Наблюдения Халиуллина и Козыревой, 1983 г.** Наблюдения выполнены в Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории ГАИШ МГУ на

**Таблица 2.** Решение кривых блеска Хилдитча в трех фотометрических полосах

Параметр	<i>V</i>	<i>B</i>	<i>U</i>
$r_1$	0.1465(5)	0.1446(5)	0.1479(7)
$r_2$	0.1088(5)	0.1081(6)	0.1113(7)
$i, ^\circ$	88.339(2)	88.290(2)	88.160(2)
$e$	0.1377(20)	0.1374(24)	0.1403(31)
$\omega, ^\circ$	224.54(2)	224.94(2)	225.82(2)
$L_1$	0.7122(11)	0.7212(13)	0.7545(16)
$L_3$	0.0	0.0	0.0
$u_1$	0.345	0.414	0.424
$u_2$	0.398	0.479	0.475
$N$	341	338	341
$\sigma_{0-c}, ^m$	0.0101	0.0114	0.0138

одноканальном электрофотометре и телескопе АЗТ-14 ( $D = 48$  см,  $F = 7500$  мм) в отличных фотометрических условиях [1]. Ошибка отдельного измерения в полосе *V* составляла  $\pm 0.0040^m$ , столь высокая точность обусловила то, что хотя наблюдения были проведены всего лишь в одном главном и в одном вторичном минимумах и только в одной фотометрической полосе *V*, параметры системы определяются достоверно. Полученные параметры приводятся во втором столбце табл. 3. Эти данные отличаются от тех, что приведены в работе [1], табл. III. Полученное значительное расхождение практически во всех параметрах связано с тем, что Халиуллин и Козырева не вносили ночных поправок в свои наблюдения, а учитывая, что звезда испытывает физическую пере-

менность, это неизбежно приводило к ошибке. Уже при первом сравнении кривых блеска, приведенных в работах [23] и [1], видно, что у второй

кривой главный минимум на  $0.02^m$  глубже. Кроме того, в наблюдениях Халиуллина и Козыревой приняты ошибочные коэффициенты потемнения к краю. Для более горячего главного компонента линейный коэффициент потемнения к краю принят на 0.15 выше, чем для вторичного. Вероятно, такая ситуация возникла при включении коэффициентов потемнения в общий поиск решения. Формально у такого решения ошибки оказались меньше, и были приняты обратные значения коэффициентов потемнения. По какой-то причине этому факту должного внимания не уделили. Еще одной неизбежной ошибкой при решении Халиуллинским и Козыревой данных Хилдитча было то, что не учитывалось световое уравнение, которое смещало дату наблюдения до  $\pm 4$  мин. При максимальной точности определения момента минимума в 10 с [42] подобная ошибка во времени наблюдения неприемлема. В свете сказанного не удивительно, что, приняв из своего ошибочного решения относительные размеры компонентов, угол наклона и эксцентриситет, было получено сильно завышенное значение долготы периастра для кривой блеска Хилдитча,  $\omega = 235^\circ$ . Из своих данных Халиуллин и Козырева получили  $\omega = 236.9^\circ$ , что для 13 лет, прошедших со времени наблюдений Хилдитча, привело к заниженному значению скорости апсидального вращения. Указанные замечания были учтены мною при решении наблюдений Халиуллина и Козыревой и позволили получить более достоверные данные. Среднее отклонение отдельной точки в моем ре-

**Таблица 3.** Геометрические элементы для всех кривых блеска

Параметр	[23]	[1]	[25]	[34]	ДР	Среднее
2400000+	40204	44939	49341	58824	59630	
$r_1$	0.1460(5)	0.1452(2)	0.1469(4)	0.1449(3)	0.1423(3)	0.1451(8)
$r_2$	0.1088(5)	0.1079(4)	0.1099(7)	0.1094(2)	0.1080(5)	0.1088(4)
$i, ^\circ$	88.30(3)	88.5(1)	88.6(2)	88.9(1)	89.1(1)	
$e$	0.1379(9)	0.1512(11)	0.1501(13)	0.1697(12)	0.1739(6)	
$\omega, ^\circ$	224.8(4)	232.1(1)	234.0(4)	242.3(4)	243.7(1)	
$L_{V1}$		0.7036(6)	0.7065(6)	0.6991(7)	0.6804(3)	0.7007(70)
$L_{V3}$	0.00(1)	0.013(4)	0.00(1)	0.00(1)	0.034(5)	0.009(7)
$u_{V1}$		0.338	0.338	0.250	0.338	
$u_{V2}$		0.386	0.386	0.287	0.386	
$N$	1020	286	1418	177	1700	
$\sigma_{0-c}, ^m$		0.0041	0.0082	0.0026	0.0053	

Примечание. Во втором столбце приведены элементы кривой блеска Хилдитча [23], в третьем — Халиуллина и Козыревой [1], в четвертом — Козыревой и Захарова [25], в пятом — по данным TESS [34], в шестом — по данным настоящей работы (ДР). В седьмом столбце даны средние значения параметров *r* и *L*.

шении равно  $\pm 0.0041^m$ , что ниже значения  $\pm 0.0047^m$ , приводимого в статье Халиуллина и Козыревой, и практически равно заявленной ими ошибке наблюдений  $\pm 0.0040^m$ .

**2.2.4. Наблюдения Козыревой, 2006 г.** Следующей по времени кривой блеска являются наблюдения Козыревой 1991–2002 гг. в Тянь-Шаньской обсерватории. 11 лет наблюдений – это большой отрезок времени и за данный срок элементы орбиты могут измениться. Поэтому интервал наблюдений был разделен на части, для каждой было найдено свое решение. Результаты оказались практически одинаковыми. Затем было получено решение для всего интервала наблюдений. Изменение долготы периастра при этом учитывалось тем, что для вычисления фаз наблюдений использовались различные значения периодов следования главных и вторичных минимумов, которые тоже были включены в поиск решения. Полученное решение примерно совпало с решениями для отдельных интервалов времени. Поэтому для более точной привязки по времени интересующих нас в первую очередь параметров – долготы периастра и эксцентриситета, был выбран интервал времени от октября 1993 г. до марта 1995 г., в котором имелось максимальное количество измерений. Этот временной промежуток короче интервала наблюдений Хилдитча. Число наблюдательных точек сократилось в два раза, но осталось вполне достаточным для точного определения параметров (см. табл. 3). Точность индивидуального измерения в этом ряду хуже, чем в более ранних наблюдениях Халиуллина и Козыревой на той же обсерватории и с тем же телескопом, но приемная аппаратура была другой.

**2.2.5. Данные спутника TESS.** Это самые точные наблюдения, стандартное отклонение одной точки оказалось равным  $\pm 0.0025^m$ . Полоса наблюдений лежит в ближней инфракрасной области и для решения было принято, что наблюдения выполнены в системе  $I_C$  Казинса. Данные получены непрерывно в течение 25 сут в ноябре–декабре 2019 г. с равномерным распределением наблюдательных точек по времени. С одной стороны, такое распределение наблюдений уменьшило количество точек в минимумах, а с другой, позволило детально выяснить поведение звезды между минимумами. Главный компонент системы оказался физически переменной звездой. Были обнаружены накладывающиеся синусоидальные изменения блеска малой амплитуды и сделано предположение о наличии двух периодов пульсаций. Соответственно, еще шесть независимых

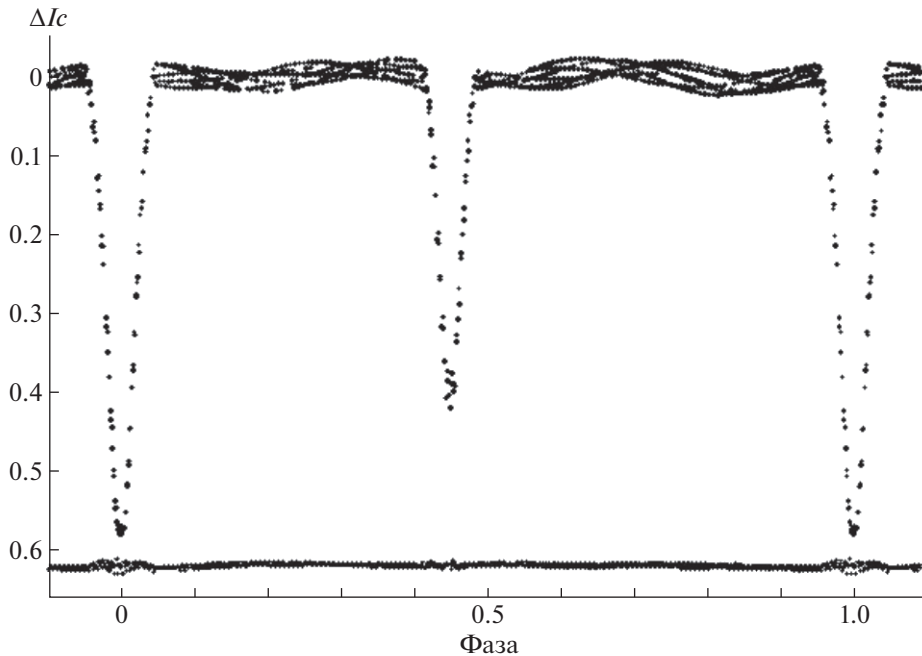
параметров были добавлены в нашу программу поиска решений в следующем виде:

$$L_1 = L_{\text{mean}}(1 - A_1 \sin(2\pi(T - T_{01})/P_1) - A_2 \sin(2\pi(T - T_{02})/P_2)), \quad (1)$$

где  $T$  – начальные эпохи, отнесенные к нулевому аргументу конкретной синусоиды,  $P$  – периоды,  $A_{1,2}$  – амплитуды. Были определены следующие значения параметров пульсаций:  $T_{01} = T_{01} = 2458818.6165(5)$ ,  $T_{02} = 2458818.8492(1)$ ,  $P_1 = 1.32273(1)$ ,  $P_2 = 1.15462(1)$ ,  $A_1 = 0.01547(2)$ ,  $A_2 = 0.01233(2)$ . Геометрические параметры, полученные из решений, приведены в пятом столбце табл. 3. Значение  $P_2$  равно  $1/3$  орбитального периода, что объясняет найденную Хилдитчем связь физической переменности с орбитальным периодом.

Тип переменности – медленно пульсирующая звезда типа  $\beta$  Сер (SBC). Звезда полностью удовлетворяет критериям данного типа, а именно, пульсирует в двух модах, периоды близки суткам, амплитуды пульсаций соответствуют звездам данного типа и растут в сторону коротких длин волн, что следует из данных Хилдитча (см. выше). На диаграмме Герцшпрунга–Рассела [43] звезда попадает в область нестабильности для звезд SBC недалеко от нижней ее границы. Полученное для наблюдений TESS решение является единственным, в котором проведен правильный учет пульсаций главного компонента. Во всех остальных решениях пульсации устраняются только в первом приближении изменением нулевого уровня блеска в данную ночь. Так как продолжительность минимумов составляет для главного примерно  $1/4$ , а вторичного примерно  $1/5$  от периодов пульсаций, то физические изменения блеска за время минимума могут достигать суммы амплитуд пульсаций главного компонента, примерно  $\pm 0.020^m$  для общего блеска системы, что значительно превышает ошибки наблюдений для всех кривых блеска. Если каждый минимум наблюдался несколько раз, то такие ошибки усредняются и на геометрические параметры влияют слабо, но вносят существенную погрешность в определение точного момента конкретного минимума. График изменений блеска и его остаточных отклонений от модели приведен на рис. 2.

Попытка использовать формулу (1) для других фотометрических рядов успеха не принесла. Вероятно, кроме ошибок, связанных с пульсациями, в них содержатся еще и инструментальные ошибки того же порядка величины, что и пульсации. Их, например, можно видеть на графике остаточных отклонений в минимумах в наблюдениях [1].



**Рис. 2.** Наблюдения TESS, свернутые с орбитальным периодом. Хорошо видны синусоидальные колебания на плато. Остаточные отклонения наблюдений от теоретической кривой блеска  $O - C$  представлены на нижней панели.

После того, как статья прошла рецензирование, стали доступны новые наблюдения TESS, которые не противоречат полученным результатам, но в данную работу не вошли. Отметим только, что в них не наблюдается периода  $P_2 = 1.155$  сут для главного компонента, но появляются пульсации вторичного компонента с похожим периодом. Возможно, данный период, равный одной трети периода затменной системы, индуцируется орбитальным движением по эллиптической орбите и иногда проявляется у вторичного компонента, который в полосу неустойчивости не попадает, но лежит близко к ее границе. Также в этих наблюдениях появилась заметная доля третьего света  $L_3 = 0.037$  в полосе  $I_c$ .

**2.2.6. Современные наблюдения.** Наблюдения были проведены в 2021–2022 гг. на Звенигородской обсерватории ИНАСАН с помощью автоматического телескопа Celestron RASA 11', в кассегреновском фокусе которого установлена камера ZWO ASI 6200 MM PRO. Еще один минимум был получен в 2022 г. на обсерватории Словацкого астрономического института в Старой Лесне с помощью 60-см телескопа Цейсс-600 и ПЗС камеры G4-9000 Moravia. В качестве звезды сравнения была использована HD 35169 ( $V = 8.27^m$ , Sp K2). Эта звезда была выбрана вследствие малого расстояния до переменной (11') и близости к исследуемой звезде по яркости. Соблюдение этих условий при наблюдении с ПЗС оказывается более важным, чем близость звезд по пока-

зателю цвета, который в данном случае равен  $\Delta(B - V) = 1.5$ . Проведенные ранее эксперименты показали, что при разности показателей цвета  $\Delta(B - V) \approx 1.5$  поправки в разности блеска двух звезд для полосы  $V$  для равнинной обсерватории не превышают  $0.002^m$  при изменении воздушной массы на 1.5. При этом для полосы  $B$  они составляют в среднем  $0.06^m$ , но в этой полосе наблюдения не проводились. Так как звезда околополярная, ее воздушная масса за время самых длительных циклов непрерывных наблюдений изменялась медленно и не более чем на 0.39. Таким образом, максимальный дрейф за счет изменения воздушной массы в ходе моих наблюдений не превышал  $0.0006^m$ , что в восемь раз меньше точности наблюдений. Поэтому выбор звезды сравнения оправдан.

Экспозиции вследствие яркости звезд составляли 8–10 с. Для уменьшения влияния атмосферных мерцаний при столь коротких экспозициях было проведено усреднение всего массива данных. Усреднение проводилось так, чтобы точность среднего была не хуже  $\pm 0.005^m$ . Для выполнения данного условия обычно усреднялось 3–5 десятисекундных экспозиций. В некоторых случаях, при прохождении облаков через область, количество усредненных кадров могло доходить до 10 и даже 20, но таких точек немного. Всего получено 1908 точек, каждая из которых считается



**Таблица 4.** Журнал наблюдений

Год	JD 2459 000+	<i>N</i>	Телескоп, аппаратура
2021	558	515	1
2021	560	274	1
2022	596	495	1
2022	673	301	1
2022	690	52	1
2022	716	281	2

Примечание. *N* – количество измерений. В 4-м столбце указано под № 1 – Celestron RASA 11" (Звенигородская обсерватория ИНАСАН, ZWO ASI 6200 MM Pro); под № 2 – Цейсс-600 (Словакия, Moravia G4-9000).

отдельным измерением, имеющим одинаковую точность. Результаты решения приведены в табл. 3 в шестом столбце.

Журнал наблюдений приведен в табл. 4. Все наблюдения получены в полосе *V*, они доступны в базе данных CDS<sup>1</sup>. Образец этой таблицы представлен в табл. 5. В первом столбце табл. 5 приведена Юлианская гелиоцентрическая дата наблюдения, отнесенная к середине экспозиции, во второй – звездная величина объекта. Небольшие ночные поправки, полученные при окончательном решении кривых блеска, учтены. Поэтому искать по этим данным периоды физической периодичности не получится.

Средневзвешенные значения не меняющихся со временем параметров представлены в табл. 3 в седьмом столбце. Все индивидуальные решения считались имеющими одинаковый вес. График изменений блеска вблизи минимумов по моим наблюдениям представлен на рис. 3. Под графиком показаны остаточные отклонения от окончательной модели для всех кривых блеска участвовавших в решении.

### 3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

#### 3.1. Наблюдения Хилдитча

Фотографические спектры высокого разрешения были получены Хилдитчем в ноябре 1971–марте 1972 г. на телескопах обсерватории От Прованс и Доминионской астрофизической обсерватории. Использовались соответственно рефлекторы 152 и 180 см [18]. Данные были решены мною повторно и получены близкие к опубликованным значения параметров. Результаты решения содержатся во втором столбце табл. 6. В третьем столбце этой таблицы приведены для сравнения данные решения из работы [18]. Из

<sup>1</sup> через анонимный ftp cdsarc.u-strasbg.fr (130.79.128.5) или по ссылке <https://cdsarc.unistra.fr/viz-bin/cat/J/AZh/100>

**Таблица 5.** Таблица индивидуальных наблюдений

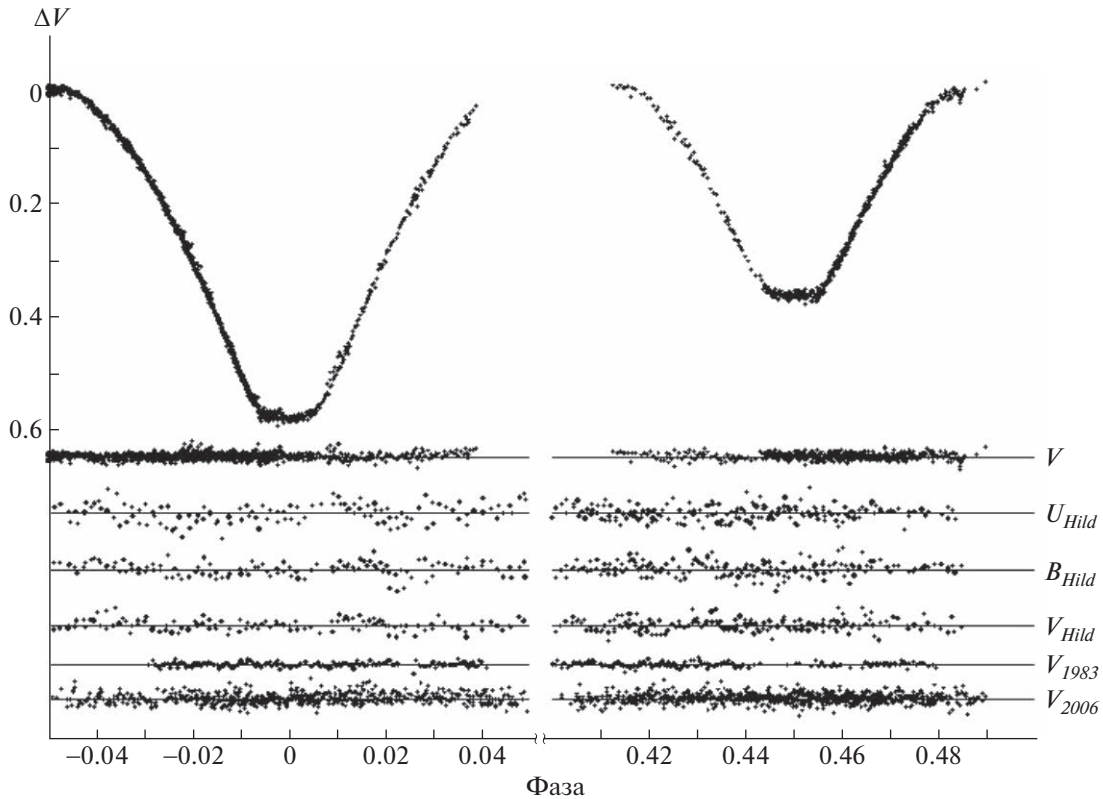
JD <sub>hel</sub>	Зв. величина
2459558.38518	8.5857
2459558.38630	8.5815
2459558.38680	8.5841
2459558.38728	8.5837
2459558.38773	8.5861

сравнения второго и третьего столбцов таблицы видно, что принципиальных отличий двух решений нет. Разве что эксцентриситет в нашем решении имеет меньшее значение. Одновременно видно, что значения эксцентриситета и долготы периастра очень близки к тем, что получаются из фотометрии Хилдитча. Это служит основанием считать, что эксцентриситет и долгота периастра для эпохи наблюдений Хилдитча определены верно.

#### 3.2. Наблюдения Павловского и др.

Авторами был получен 31 спектр высокого оптического и временного разрешения с помощью Северного оптического телескопа (2.6 м) обсерватории Ла Пальма, Канарские острова. Экспозиции составляли 10 мин, что позволило избежать искажения кривой лучевых скоростей орбитальным движением. Экспозиции при спектральных фотографических наблюдениях Хилдитча были длиннее, что, по мнению авторов, исказило профили линий орбитальным движением. Оригинальные данные о лучевых скоростях [17] опубликованы не были, в статье приведены достаточно точные значения параметров системы, которые представлены в последнем столбце табл. 6. Ошибки лучевой скорости авторами не приведены, но они, вероятно, должны быть порядка 1 км/с. Основываясь на измерениях ширины линий, авторы делают вывод о наклонном вращении компонентов AS Cam. Это довольно тенденциозно, так как наблюдений в минимумах они не представили и судить о наклоне осей вращения по изменению профилей спектральных линий нельзя. В качестве решающего аргумента в пользу гипотезы Шакуры авторы указывают на то, что осевые скорости вращения получаются из их наблюдений значительно ниже тех, что должны были бы быть при условии синхронизма. Это может указывать на то, что оси вращения компонентов перпендикулярны картинной плоскости и направлены на наблюдателя. В то же самое время данные Хилдитча [18] и Малони и др. [19] говорят о выполнении условий синхронизма. Объяснений расхождения данных разных авторов пока нет, возможна как прецессия звезд (тогда гипотеза Шакуры отчасти работает), так и невыявлен-





**Рис. 3.** Полученные в данной работе наблюдения в минимумах в полосе  $V$  (верхняя панель). Ниже представлены уклонения  $O - C$  наблюдаемых точек от модельных кривых для всех авторов, где  $V$  — наши наблюдения,  $UBV_{Hild}$  — наблюдения Хилдитча в соответствующей фотометрической полосе [23],  $V_{1983}$  — наблюдения Халиуллина и Козыревой [1],  $V_{2006}$  — наблюдения Козыревой и Захарова [25].

ные ошибки обработки. Необходимы дополнительные спектральные наблюдения.

Обращает на себя внимание значительное отличие амплитуды лучевых скоростей главного компонента в решениях Хилдитча и Павловского

и др., что приводит к довольно сильному расхождению оценок масс компонентов. Причины могут быть инструментального характера, например, в фотографических наблюдениях нередко присутствуют систематические ошибки.

**Таблица 6.** Орбитальные и физические параметры, полученные из лучевых скоростей AS Cam

Параметр	ДР для [18]	[18]	[17]
$T_0$ , HJD	2441001.6707(5)	2440205.688(33)	2454399.752(6)
$P$ , $d$	3.431075(8)	3.4309714	3.430973
$e$	0.1323(2)	0.135(7)	0.164(4)
$\omega$ , $^\circ$	225.4(5)	225.5(35)	241.5(19)
$K_a$ , км/с	110.2(2)	110.4(11)	106.2(8)
$K_b$ , км/с	145.3(2)	145.8(13)	146.9(5)
$M_a$ , $M_\odot$	3.29(3)	3.3(1)	3.21(3)
$M_b$ , $M_\odot$	2.49(3)	2.5(1)	2.32(3)
$\gamma$ , км/с	-7.30(3)	-7.1(70)	
$\sigma$ , км/с	4.03	4.2	

Примечание. Во втором столбце приведены решения, полученные автором по данным Хилдитча [18], обозначено ДР; в третьем — результаты из оригинальной работы [18]; в четвертом — результаты из работы Павловского и др. [17].

#### 4. АБСОЛЮТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ, СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ С ТЕОРИЕЙ

Средние размеры звезд, приведенные в табл. 3, расстояние до системы из обзора GAIA DR3 ( $\pi = 0.00194 \pm 0.00005$ ), а также массы из четвертого столбца табл. 6 позволили вычислить температуры звезд. Совокупность всех физических параметров приведена в табл. 7. Сравнение полученных температур с данными Павловского и др., полученных из спектральных наблюдений, говорит о хорошем совпадении. Но температура главного компонента оказалась примерно на 800 K выше, чем это следует из его показателя ( $B - V$ ) и таблиц Флауэра. При этом температура вторичного компонента совпадает с калибровкой Флауэра идеально. Для соответствия найденному значению температуры главного компонента необходимо, чтобы его показатель цвета ( $B - V$ ) был бы на  $0.02^m$  меньше. Возможно, что для горячих звезд калибровка Флауэра имеет небольшую ошибку, но не исключено, что будучи переменной звездой SBC класса, главный компонент отличается от обычных звезд по показателю ( $B - V$ ).

Данные табл. 7 получены из непосредственных измерений без каких бы то ни было предположений о температурах и массах звезд. Сравнение с эволюционными моделями [44] показывает, что параметры обоих компонентов соответствуют звездам с содержанием металлов  $Z = 0.0095$  и возрастом 141–177 млн. лет. На рис. 4 (зависимость  $\lg g - \lg T$ ) и рис. 5 ( $\lg L - \lg T$ , диаграмма Герцшпрунга–Рассела) нанесена соответствующая изохрона, полученная интерполяцией таблиц на данный химический состав и возраст главного компонента 141 млн. лет. Для вторичного компонента более подходит возраст 177 млн. лет. Можно сказать, что вторичный компонент имеет для возраста 141 млн. лет небольшую избыточную светимость и немного бóльшие размеры. Причины расхождения пока не ясны, и, учитывая высокую точность полученных параметров звезд, скорее всего, реальны.

Определяемая из моделей металличность лежит на границе интервала значений, полученного Павловским и др. из спектров высокого разрешения:  $Z = 0.01-0.02$ .

#### 5. ВРАЩЕНИЕ ЛИНИИ АПСИД

Для вычисления скорости апсидального вращения обычно используют соотношение, приведенное в книге Мартынова [45], основными аргументами которого являются эксцентриситет и долгота периастра. В более удобном виде эта фор-

Таблица 7. Абсолютные параметры AS Cam

Параметр	Главный компонент	Вторичный компонент
Масса, $M_{\odot}$	$3.214 \pm 0.03$	$2.324 \pm 0.03$
Радиус, $R_{\odot}$	$2.455 \pm 0.013$	$1.841 \pm 0.006$
Светимость, $\lg L_{\odot}$	$2.148 \pm 0.025$	$1.597 \pm 0.03$
Эффективная температура, $T_{\text{eff}}$ , K	$12980 \pm 150$	$10850 \pm 100$
Спектральный класс	B7.5 V	B9.0 V
Гравитационное ускорение, $\lg g$ , $\text{cm}/\text{c}^2$	$4.164 \pm 0.005$	$4.274 \pm 0.004$
Болометрическая поправка, $V.C.$ , $^m$	-0.826	-0.396
Абс. визуальные величины, $M_v$ , $^m$	$0.19 \pm 0.03$	$1.13 \pm 0.03$
Содержание тяжелых элементов, $Z$	$0.0095 + 0.01/-0.005$	
Большая полуось, $a$ , $R_{\odot}$	$16.92 \pm 0.06$	
Расстояние до системы, пк	$515 \pm 14$	
Фотометрический параллакс, $\pi$ , $''$	$0.00194 \pm 0.00005$	
Возраст системы, млн. лет	$140 \pm 20$	

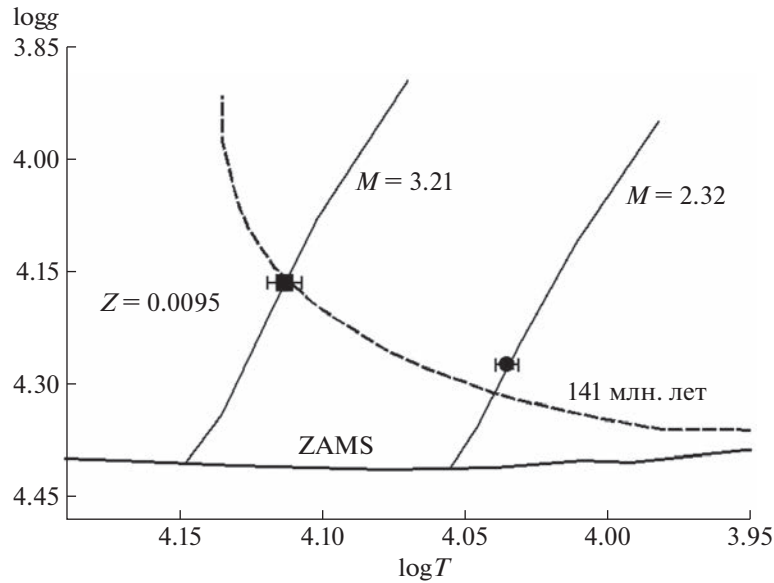
мула представлена в работе Халиуллина и Халиуллиной [46]:

$$\dot{\omega} = \frac{\Delta P}{P^2} \frac{\pi}{2e [f(e) \sin 3\omega - \sin \omega]}, \quad (2)$$

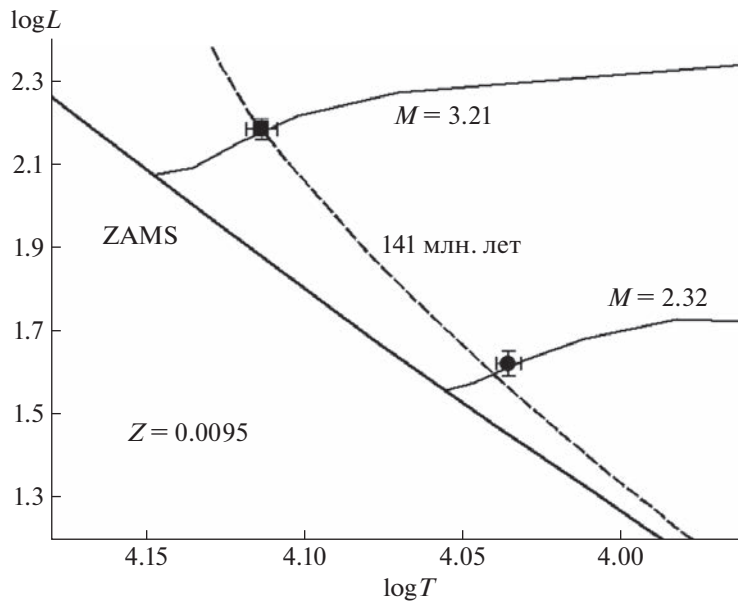
где

$$f(e) = \frac{e^2 (1 + 3\sqrt{1 - e^2})}{(1 + \sqrt{1 - e^2})^3}, \quad \Delta P = P_2 - P_1.$$

В ней используется разность периодов следования отдельно главных и отдельно вторичных минимумов, значения которых определяются по ходу остаточных уклонений моментов минимумов от линейной формулы. Все доступные моменты минимумов собраны в табл. 8, 9. Моменты минимумов, для которых доступны оригинальные наблюдения, были заново определены с использованием модели двойной затменной звезды, найденной в данном исследовании. Они помечены в таблицах звездочкой. Такой подход снизил разброс уклонений  $O - C$ . Ряд опубликованных моментов оказался ошибочным. Некоторые моменты минимумов были отброшены на основании того, что их ошибки, приводимые в литературе, слишком велики (более  $\pm 0.005^d$ ), а несколько моментов с заявленной точностью



**Рис. 4.** Эволюционные треки, показывающие зависимость ускорения свободного падения от температуры звезды, построенные по данным [44] для избранных масс звезд. Сплошной жирной линией показано положение Начальной Главной Последовательности ZAMS. Главный компонент обозначен черным квадратом, вторичный – кружком. Показаны ошибки определения параметров. Сплошная кривая линия – изохрона для возраста 141 млн. лет.



**Рис. 5.** Зависимость светимости звезд в солнечных единицах от температуры для избранных масс [44]. Обозначения те же, что и на рис. 4.

лучше  $\pm 0.001^d$  показали гораздо большее уклонение, хотя близкие по времени моменты минимумов других авторов уклонений не показывают. Исходя из сказанного было решено опубликовать таблицы всех вошедших в данное решение моментов минимумов. Всего было использовано

83 индивидуальных момента минимумов, 38 из которых были либо получены, либо перевычислены в данном исследовании. Все полученные за более чем 50 лет наблюдений моменты минимумов хорошо представляются линейными формулами, что при обычном рассмотрении говорит о

возможности нахождения с высокой точностью периодов  $P_1$  и  $P_2$  (см. рис. 6). Линейная регрессия табл. 8, 9 приводит к следующим формулам:

$$\text{HJD Min I} = 2459558.5803(8) + 3.4309634(2)^d E, \quad (3)$$

$$\text{HJD Min II} = 2459560.1243(7) + 3.4309711(2)^d E. \quad (4)$$

Видимо поэтому динамике изменений отдельно эксцентриситета и отдельно долготы периастра должно внимания не уделялось. Предполагалось, что изменения эксцентриситета кажущиеся, обусловлены ошибками определения. Скорость увеличения долготы периастра определялась при фиксированном эксцентриситете по формуле (2). Поэтому все работы по определению скорости апсидального вращения сводились, по сути, к уточнению значения эксцентриситета. Чтобы достичь совпадения теории и наблюдения в работах Бозкурт и Дежирменчи [22], а также Кшесиньского и др. [47], эксцентриситет был уменьшен до  $e = 0.10$ . Учитывая надежно определенное значение эксцентриситета в работе 1983 г. Халиуллина и Козыревой [1], следует признать, что меньшее значение эксцентриситета было принято исключительно с целью примирить теорию с наблюдениями. По мере добавления новых измерений моментов минимумов периоды  $P_1$ ,  $P_2$  практически не менялись и все опубликованные работы подтверждали полученное Халиуллиным и Козыревой заниженное значение скорости апсидального вращения.

В современную эпоху значения эксцентриситета у разных исследователей получаются равными 0.16–0.18, что лишь немного превышает обычный разброс определения эксцентриситета из высокоточных фотометрических наблюдений. Вполне можно было бы предположить несовпадение значений разных авторов ошибками измерений. В пределах такой же ошибки в 4% отличаются и выводимые разными авторами значения скорости вращения линии апсид.

В данной работе было предположено, что небольшие реальные изменения эксцентриситета могут привести к значительному просчету в вычислении скорости апсидального вращения. Все измерения эксцентриситета и долготы периастра собраны для наглядности в табл. 10 и построен соответствующий график (см. рис. 7).

Сначала, наряду с монотонным изменением долготы периастра, была использована гипотеза о постоянной скорости изменения эксцентриситета. В соответствии с линейной регрессией данных из табл. 10 она была определена в +0.03 за 50 лет. При меняющемся эксцентриситете формулу (2) применять нельзя. Следует пользоваться исход-

**Таблица 8.** Индивидуальные моменты главных минимумов, использованные в работе

HJD	$\epsilon_1,^d$	$\epsilon_2,^d$	Ссылка
2440204.51391	0.00010	0.00086	[23]*
2440269.70010	-0.00209	-0.00067	[23]*
2440626.52230	-0.00045	-0.00000	[48]
2440959.32643	-0.00009	-0.00007	[26]*
2441007.36000	-0.00005	0.00067	[48]
2441580.33340	0.00201	-0.00090	[40]
2444939.24564	0.00044	-0.00047	[1]*
2446397.40850	0.00396	0.00159	[47]
2447138.49560	0.00307	0.00235	[47]
2447443.84804	-0.00019	0.00040	[33]*
2447982.51180	0.00212	0.00049	[47]
2448191.80069	0.00217	0.00184	[49]
2448308.45010	-0.00122	0.00004	[50]
2448538.32323	-0.00271	-0.00092	[20]*
2448881.42389	0.00151	-0.00167	[20]*
2448998.07400	-0.00117	-0.00149	[20]
2449238.24048	-0.00220	-0.00027	[20]*
2449341.17014	-0.00147	0.00033	[20]*
2449557.32364	0.00128	0.00053	[20]*
2449622.51240	0.00172	-0.00071	[20]
2449749.45810	0.00174	0.00026	[51]
2449773.47322	0.00011	-0.00082	[20]*
2449852.38650	0.00121	0.00168	[52]
2449900.41770	-0.00108	-0.00002	[52]
2450418.49750	0.00313	0.00099	[20]
2450425.35691	0.00061	-0.00173	[20]*
2450562.59700	0.00214	0.00084	[53]
2450833.64000	-0.00102	0.00087	[53]
2452542.25841	-0.00258	-0.00070	[25]*
2453252.46730	-0.00314	-0.00124	[25]
2453266.19250	-0.00179	0.00014	[25]
2453410.29400	-0.00075	0.00084	[54]
2453760.25497	0.00195	0.00000	[55]
2454391.54986	-0.00040	-0.00114	[56]
2457757.32840	0.00365	0.00080	[24]
2458824.35300	-0.00101	0.00057	[34]*
2459558.57861	-0.00128	-0.00034	ДР
2459596.31717	-0.00330	-0.00198	ДР
2459716.40118	-0.00296	-0.00103	ДР

Примечание. Обозначено: ДР – данная работа; \* – моменты минимумов, заново определенные из оригинальных наблюдений с использованием модели двойной затменной звезды, найденной в данном исследовании.

**Таблица 9.** Индивидуальные моменты вторичных минимумов, использованные в работе

HJD	$\epsilon_1, ^d$	$\epsilon_2, ^d$	Ссылка
2439890.36633	-0.00082	-0.00162	[23]*
2440147.68926	-0.00059	-0.00067	[23]*
2440185.43170	0.00118	0.00169	[23]*
2440545.68050	-0.00183	-0.00046	[23]*
2440590.28390	-0.00104	-0.00012	[23]*
2441988.27557	-0.00189	-0.00142	[26]*
2441547.52780	0.00216	0.00022	[40]
2444578.40650	0.00213	-0.00072	[40]
2447937.32623	0.00012	-0.00084	[1]*
2447002.51400	-0.00056	-0.00031	[57]
2447465.95088	-0.00095	-0.00008	[33]*
2447524.27580	-0.00252	-0.00108	[51]
2447898.25280	-0.00124	-0.00109	[47]
2448193.31730	-0.00016	-0.00046	[50]
2448306.53920	-0.00028	0.00096	[50]
2448481.51810	-0.00085	0.00110	[52]
2448536.41409	-0.00038	0.00142	[20]*
2448601.60190	-0.00100	0.00039	[49]
2448639.34195	-0.00162	-0.00059	[51]
2448869.22185	0.00328	-0.00014	[20]*
2448982.44110	0.00051	-0.00011	[20]
2449003.02680	0.00039	0.00016	[20]
2449236.33162	-0.00076	0.00116	[20]*
2449243.19312	-0.00120	0.00074	[25]*
2449332.39750	-0.00205	-0.00021	[20]
2449339.26000	-0.00149	0.00032	[20]*
2449610.31099	0.00285	0.00078	[20]*
2449634.32720	0.00227	-0.00052	[20]
2449771.56360	-0.00014	-0.00111	[52]
2449778.42637	0.00069	-0.00013	[20]*
2450056.33201	-0.00226	-0.00031	[20]*
2450063.19370	-0.00252	-0.00057	[20]
2450423.45052	0.00242	0.00013	[20]*
2450519.51780	0.00252	0.00008	[58]
2452365.37530	-0.00214	-0.00065	[59]
2452547.21702	-0.00186	0.00001	[25]*
2452564.37100	-0.00274	-0.00094	[22]
2453679.44360	0.00434	0.00110	[55]
2453830.40500	0.00302	0.00266	[60]
2457762.29730	0.00227	-0.00044	[24]
2457769.16020	0.00323	0.00072	[24]
2458825.89474	-0.00150	0.00009	[34]*
2459560.12284	-0.00136	-0.00041	ДР
2459673.34424	-0.00203	-0.00022	ДР

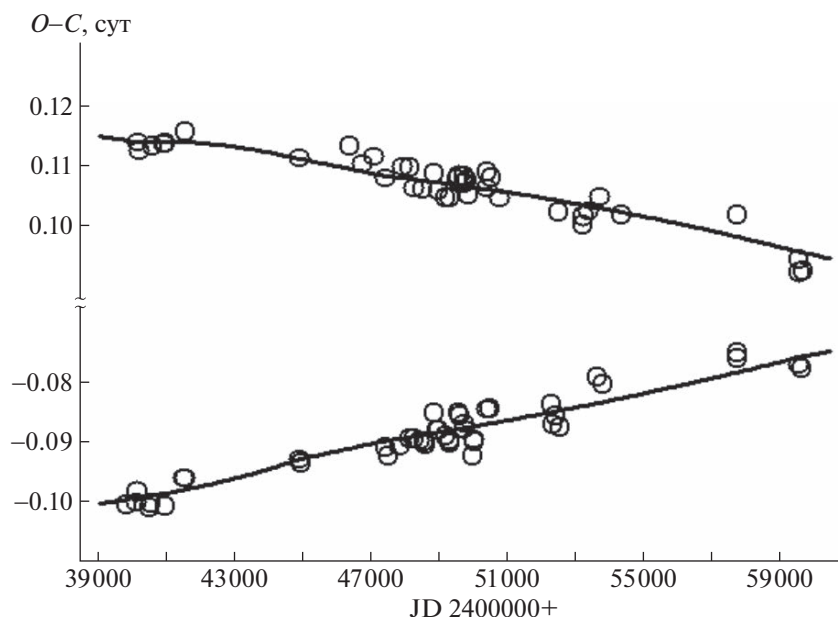
Примечание. Обозначено: ДР – данная работа; \* – моменты минимумов, заново определенные из оригинальных наблюдений с использованием модели двойной затменной звезды, найденной в данном исследовании.

ными формулами для предвычисления моментов минимумов при эллиптических орбитах:

$$T_{\min} = M_0 + PE \mp 2 \frac{P}{2\pi} e \cos \omega + \frac{P}{2\pi} \frac{1 + 2\sqrt{1 - e^2}}{(1 + \sqrt{1 - e^2})^2} \sin 2\omega \pm \pm \frac{2}{3} \frac{P}{2\pi} e^3 \frac{1 + 3\sqrt{1 - e^2}}{(1 + \sqrt{1 - e^2})^3} \cos 3\omega \quad (5)$$

В результате было получено несколько большее значение скорости апсидального вращения  $\dot{\omega}_{\text{obs}} = 0.27^\circ/\text{год}$ . При этом ситуация с разбросом остаточных уклонений  $O - C$  не улучшилась. Если брать скорость изменения эксцентриситета постоянной, то аппроксимирующая линия в пределах интервала времени наблюдений по-прежнему остается прямой линией. Прогрессивное увеличение эксцентриситета уменьшает ее наклон при постоянной скорости увеличения долготы периастра. Остаточные уклонения по-прежнему показывали систематические уклонения. Поэтому вместо каких-либо гипотез о законах изменения эксцентриситета и долготы периастра были взяты эмпирические значения эксцентриситета и долготы периастра для каждой эпохи наблюдений (табл. 10) и построен соответствующий график (см. рис. 7).

Из этого графика видно, что в эпоху, лежащую между наблюдениями Хилдитча (1969 г.) и Халиуллина и Козыревой (1983 г.), эксцентриситет и долгота периастра менялись быстрее, чем в последующую эпоху, т.е. скорость изменения указанных параметров меняется. Этот факт подтверждается и графиком  $O - C$  для моментов минимумов. При включении в расчет  $O - C$  текущих значений  $e$  и  $\omega$ , получаемых интерполяцией табл. 10, разброс уменьшается. Таким образом, в каждый момент времени мгновенная скорость апсидального вращения разная. За весь период фотоэлектрических наблюдений среднюю скорость апсидального вращения можно вычислить линейной регрессией табл. 10. Получено среднее значение  $\dot{\omega}_{\text{obs}} = 0.38 \pm 0.02^\circ/\text{год}$ . Это значение на 14% меньше теоретического значения, вычисленного для параметров звезд-компонентов, полученных в данном исследовании, и для условия синхронизма в периастре:  $\dot{\omega}_{\text{theor}} = 0.44 \pm 0.03^\circ/\text{год}$ . Расхождение, как видим, уже не такое критическое. К тому же это значение является средним для последних 54 лет наблюдений. Значение скорости апсидального вращения для другого интервала времени может оказаться ближе к теоретическому. Например, в интервале между наблюдениями Хилдитча (1970 г.) и



**Рис. 6.** Остаточные уклонения моментов минимумов AS Cam от линейной формулы при  $P_1 = P_2 = P_s$ , где  $P_s$  – сидерический период. Главные минимумы лежат выше, вторичные – ниже. Ошибки определения моментов меньше размеров кружков. Сплошные линии соответствуют эмпирическому закону изменений эксцентриситета и долготы периастра и визуально близки к прямым линиям. Световое уравнение на данном графике немного увеличивает разброс наблюдательных точек.

Халиуллина и Козыревой (1983 г.) скорость апсидального вращения была выше теоретической:  $\dot{\omega}_{\text{obs}} = 0.56 \pm 0.05^\circ/\text{год}$ .

## 6. ПАРАМЕТРЫ ОРБИТЫ ТРЕТЬЕГО ТЕЛА

Остаточные уклонения  $O - C$  после вычета апсидального вращения приведены в столбце  $\epsilon_1$  табл. 8, 9 и на рис. 8. Воспользовавшись программой поиска периодов [61], в этих уклонениях был найден период, близкий к 805 сут, который, вероятно, связан с присутствием в системе третьего тела. После этого была применена программа поиска параметров орбиты спутника, как это было сделано при поиске невидимого спутника в работе [62]. В результате были получены параметры

орбиты третьего тела и оценка его массы. Данные приведены в табл. 11. Остаточные уклонения после вычета светового уравнения в моментах минимумов приведены в столбце  $\epsilon_2$  табл. 8, 9. Вероятно, наблюдаемые изменения эксцентриситета и угла наклона орбиты системы являются следствием влияния третьего тела. Причем в данном случае совсем не обязательно, чтобы орбиты третьего тела и двойной затменной системы были взаимно перпендикулярны. Замедления апсидального вращения нет. Реально наблюдаемое движение близко теоретическому. Вследствие того, что угол наклона двойной тоже меняется, орбита третьего тела скорее всего не лежит в одной плоскости с орбитой затменной системы. В спектральных наблюдениях линии спутника пока не обнаружены. Небольшое количество третьего

**Таблица 10.** Долгота периастра и эксцентриситета AS Cam, полученные в разные эпохи

JD	$\omega, ^\circ$	$e$	Ссылка
2440204	224.8(4)	0.1379(9)	[23], фотометрия
2441000	225.4(5)	0.1323(10)	[18], спектры
2444939	232.1(1)	0.1512(11)	[1], фотометрия
2449341	234.0(4)	0.1501(13)	[25], фотометрия
2454400	241.5(19)	0.164(4)	[17], спектры
2458824	242.3(4)	0.1697(12)	TESS [34], фотометрия
2459600	243.7(1)	0.1739(6)	ДР, фотометрия

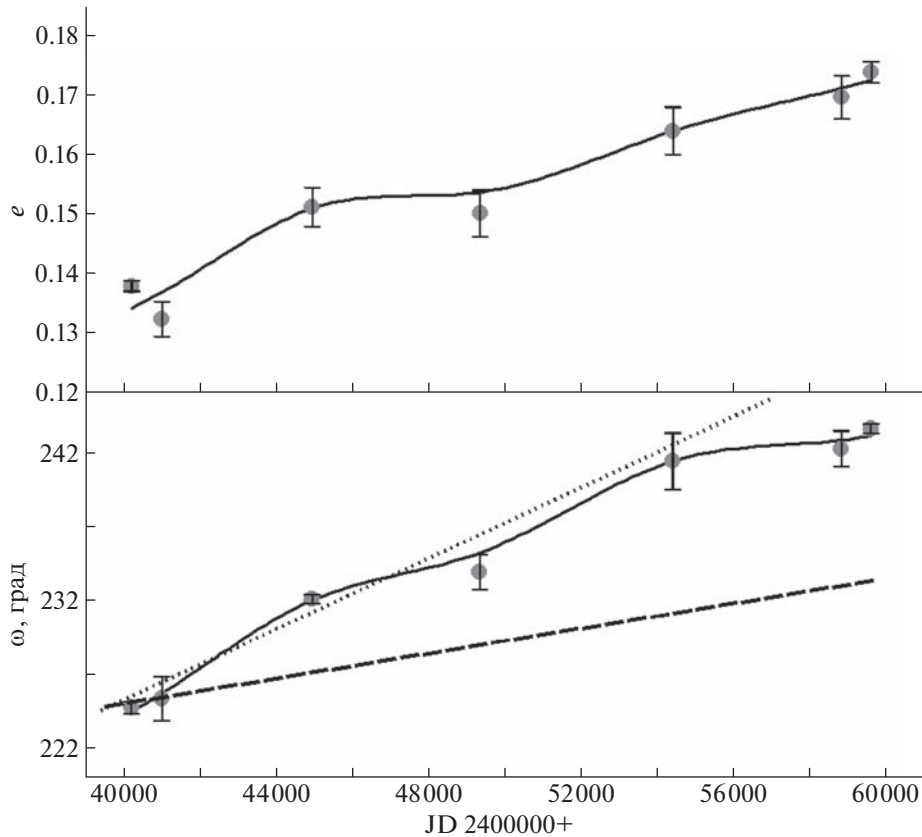


Рис. 7. Изменения эксцентриситета и долготы периастра со временем. Короткий пунктир – теоретическое значение скорости апсидального движения. Пунктир – старое значение.

света, обнаруженное в настоящей работе, возможно, действительно принадлежит невидимому спутнику. Исходя из светимостей компонентов двойной из табл. 7, доля третьего тела сол-

нечной массы должна была бы быть  $L_{3Y} = 0.01$ . Среднее значение из полученных решений равно  $L_{3Y} = 0.009$ , что на первый взгляд говорит о коллинеарности орбит. Но если принять возраст третьего тела равным возрасту двойной системы (140 млн. лет), то светимость тела солнечной массы будет меньше, и тогда масса третьего тела вполне может быть больше солнечной, и его орбита будет наклонена к орбите двойной. Противоречий в полученной динамической модели системы нет и для объяснения надежно измеренного в данной работе светового уравнения не нужно привлекать гипотезы с релятивистским объектом или выстраивать сложные четверные конструкции. Достаточно присутствия в системе обычной молодой звезды относительно небольшой массы.

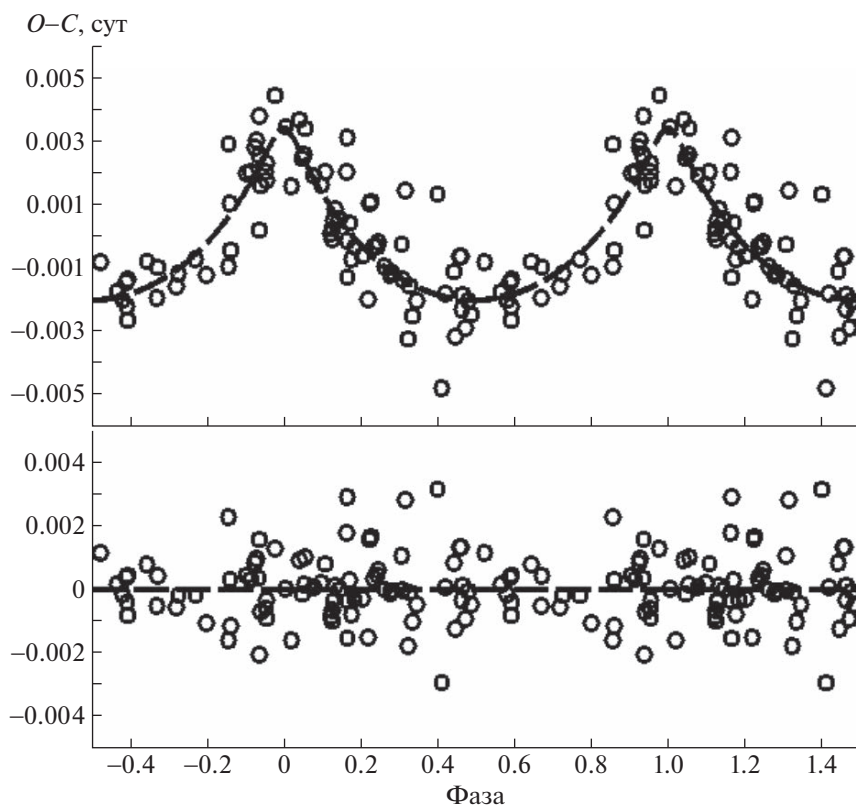
Таблица 11. Параметры апсидального движения и орбиты третьего тела AS Cam

Параметр	Величина
$T_0$ , HJD	2459716.4227(9)
$P_3$ , сут	3.4309669(1)
$e$	0.1739(6)
$\dot{\omega}$ , °/год	0.38(2)
$\omega_0$ , °	243.5(1)
$U$ , годы	$950 \pm 50$
$P_3$ , сут	805.8(2)
$\omega_3$ , °	88.0(3)
$e_3$	0.70(1)
$T_3$ , HJD	2459336.0(5)
$a_{12} \sin i_3$ , a.e.	0.471(6)
$M_3 \sin i_3$ , $M_\odot$	0.968(6)
$\sigma$ , сут	0.00093

### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ фотоэлектрических и спектральных наблюдений AS Cam показал, что в системе наблюдается увеличение эксцентриситета и долготы периастра и, возможно, угла наклона орбиты к лучу зрения. Ответственность за изменения параметров несет третье тело с массой, несколько пре-





**Рис. 8.** Фазовая кривая остаточных уклонений моментов минимумов после вычитания апсидального вращения (верхняя панель). Черная штриховая линия соответствует полученным в данном исследовании параметрам орбиты третьего тела. Остаточные уклонения после вычитания светового эффекта представлены на нижней панели, разброс соответствует Гауссовому распределению ошибок с  $\sigma = 0.00093$  сут. Отметим, что при линейной аппроксимации моментов минимумов среднее уклонение было в два раза больше:  $\sigma_{\text{лин}} = 0.0020$  сут.

вышающей солнечную. Определены надежные геометрические и физические параметры затменной звезды, найдены параметры орбиты третьего тела. Показано, что противоречий между теоретической и наблюдаемой скоростями апсидального вращения не наблюдается. Непосредственные измерения долготы периастра показали, что долгота периастра увеличивается неравномерным образом и в среднем за 54 года наблюдений примерно соответствует теоретическому значению в условиях синхронизма. Главный компонент системы оказался переменной звездой типа SBC, пульсирующей в двух обортонах, один из которых может временами исчезать. Для мониторинга изменений параметров орбиты с целью построения точной математической модели требуются дальнейшие систематические наблюдения системы.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения выполнены в основном на 27-см автоматическом телескопе обсерватории ИНАСАН. В работе использовались база данных SIMBAD Страсбург-

ского центра астрономических данных (Франция) и служба библиографических ссылок ADS (NASA, США). Приношу свою искреннюю благодарность анонимному рецензенту, чьи замечания позволили значительно улучшить качество статьи.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была выполнена при поддержке стипендии Словацкого академического информационного агентства SAIA ([www.saia.sk](http://www.saia.sk)).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *K. F. Khaliullin and V. S. Kozlyeva*, *Astrophys. Space Sci.* **94**, 115 (1983).
2. *J. W. Moffat*, *Phys. Rev. D* **19**, 3554 (1979).
3. *J. W. Moffat*, *Astrophys. J. Letters* **287**, L77 (1984).
4. *J. W. Moffat*, *Phys. Rev. D* **39**, 474 (1989).
5. *D. I. Martynov and K. F. Khaliullin*, *Astrophys. Space Sci.* **71**, 147 (1980).
6. *K. F. Khaliullin, S. A. Khodykin, and A. I. Zakharov*, **375**, 314 (1991).
7. *S. A. Khodykin and V. G. Vedeneyev*, **475**, 798 (1997).

8. *S. A. Khodykin, A. I. Zakharov, and W. L. Andersen*, *Astron. Rep.* **615**, 506 (2004).
9. *L. V. Mossakovskaya*, *Astron. Letters* **19**, 35 (1993).
10. *E. Guinan, M. Bonaro, S. Engle, and A. Prsa*, *J. AAVSO* **40**, 417 (2012).
11. *I. M. Volkov, D. Chochol, J. Grygar, M. Jelinek, et al.*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 6066, 1 (2013).
12. *I. M. Volkov, D. Chochol, J. Grygar, M. Mašek, and J. Juryšek*, *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso* **47**, 29 (2017).
13. *N. I. Shakura*, *Soviet Astron. Letters* **11**, 224 (1985).
14. *S. Albrecht, S. Reffert, I. A. G. Snellen, and J. N. Winn*, *Nature* **461**, 373 (2009).
15. *D. B. McLaughlin*, *Publ. Michigan Observ.* **5**, 91 (1934).
16. *I. M. Volkov*, *Astrophys. Space Sci.* **296**, 105 (2005).
17. *K. Pavlovski, J. Southworth, and V. Kolbas*, *Astrophys. J. Letters* **734**, id. L29 (2011).
18. *R. W. Hilditch*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **84**, 519 (1972).
19. *F. P. Maloney, E. F. Guinan, and P. T. Boyd*, *Astron. J.* **98**, 1800 (1989).
20. *V. S. Kozyreva, A. I. Zakharov, and K. F. Khaliullin*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 4690, 1 (1999).
21. *V. S. Kozyreva and K. F. Khaliullin*, *Astron. Rep.* **43**, 679 (1999).
22. *Z. Bozkurt and Ö. L. Değirmenci*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **379**, 370 (2007).
23. *R. W. Hilditch*, *Mem. Roy. Astron. Soc.* **76**, 1 (1972).
24. *V. Kozyreva, A. Kusakin, and A. Bogomazov*, *Res. Astron. and Astrophys.* **18**(1), id. 010 (2018).
25. *V. S. Kozyreva and A. I. Zakharov*, *Astron. Letters* **32**, 313 (2006).
26. *T. D. Padalia and R. K. Srivastava*, *Astrophys. Space Sci.* **38**, 87 (1975).
27. *C. H. Lacy*, *Astron. J.* **104**, 801 (1992).
28. *P. J. Flower*, **469**, 355 (1996).
29. *V. Straižys*, *Multicolor stellar photometry* (Tucson: Pachart Pub. House, 1992).
30. *J. C. Mermilliod, M. Mermilliod, and B. Hauck*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 349 (1997).
31. *G. M. Green, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, H.-W. Rix, et al.*, *Astrophys. J.* **810**, id. 25 (2015).
32. *C. H. S. Lacy*, *Astron. J.* **124**, 1162 (2002).
33. *H. C. Lines, R. D. Lines, Z. Glownia, and E. F. Guinan*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **101**, 925 (1989).
34. *K. G. Stassun, R. J. Oelkers, M. Paegert, G. Torres, et al.*, *Astron. J.* **158**(4), id. 138 (2019).
35. *I. M. Volkov, N. S. Volkova, and D. Chochol*, *Astron. Rep.* **54**, 418 (2010).
36. *I. M. Volkov, N. S. Volkova, I. V. Nikolenko, and D. Chochol*, *Astron. Rep.* **55**, 824 (2011).
37. *I. M. Volkov, D. Chochol, and A. S. Kravtsova*, *Astron. Rep.* **61**, 440 (2017).
38. *I. M. Volkov and A. S. Kravtsova*, *Astron. Rep.* **64**, 211 (2020).
39. *M. A. Burlak, I. M. Volkov, and N. P. Ikonnikova*, *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso* **48**, 536 (2018).
40. *O. Gulmen, C. Ibanoglu, S. Bozkurt, and N. Gudur*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 1090, 1 (1976).
41. *R. A. Wade and S. M. Rucinski*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **60**, 471 (1985).
42. *L. A. Bagaev, I. M. Volkov, and I. V. Nikolenko*, *Astron. Rep.* **62**, 664 (2018).
43. *P. De Cat*, in *IAU Colloq. 185 Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Physics*, edited by C. Aerts, T. R. Bedding, and J. Christensen-Dalsgaard, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **259**, 196 (2002).
44. *L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 371 (2000).
45. *D. Y. Martynov*, *Eclipsing Variable Stars* (New York: John Wiley and Sons, 1973).
46. *K. F. Khaliullin and A. I. Khaliullina*, *Astron. Rep.* **33**, 41 (1989).
47. *J. Krzesinski, E. Kuczawska, and G. Pajdosz*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 3495, 1 (1990).
48. *P. Battistini, A. Bonifazi, and A. Guarnieri*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 951, 1 (1974).
49. *D. B. Caton and W. C. Burns*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 3900, 1 (1993).
50. *W. Ogoza*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 4263, 1 (1995).
51. *T. Hegedus, I. B. Biro, T. Borkovits, and Z. Paragi*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 4340, 1 (1996).
52. *M. Wolf, L. Sarounova, and R. Diethelm*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **116**, 463 (1996).
53. *G. Samolyk*, *J. AAVSO* **39**, 177 (2011).
54. *R. Diethelm*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 5653, 1 (2005).
55. *I. B. Biro, T. Borkovits, S. Csizmadia, T. Hegedus, et al.*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 5684, 1 (2006).
56. *L. Brát, L. Šmelcer, H. Kuèáková, R. Ehrenberger, et al.*, *Open European J. Var. Stars* **0094**(1), 1 (2008).
57. *E. Pohl, E. Hamzaoglu, N. Gudur, and C. Ibanoglu*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 2385, 1 (1983).
58. *I. B. Biro, T. Borkovits, T. Hegedus, and Z. Paragi*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 4555, 1 (1998).
59. *T. Borkovits, I. B. Biro, T. Hegedus, S. Csizmadia, et al.*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 5313, 1 (2002).
60. *I. B. Biro, T. Borkovits, T. Hegedus, Z. T. Kiss, et al.*, *Inform. Bull. Var. Stars* № 5753, 1 (2007).
61. *I. M. Volkov*, *Peremennye Zvezdy* **42**, 1 (2022).
62. *I. M. Volkov, A. S. Kravtsova, and D. Chochol*, *Astron. Rep.* **65**, 184 (2021).