

УДК 524.386

ПУЛЬСАЦИИ ЗАТМЕННОЙ ДВОЙНОЙ AS CAMELOPARDALIS В КРИВЫХ БЛЕСКА TESS

© 2021 В. С. Козырева^{1*}, А. В. Кусакин², А. И. Богомазов¹, Ч. Т. Омаров²¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия²Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова Национального космического агентства, Алматы, Казахстан

Поступила в редакцию 14 апреля 2021 года; после доработки 6 августа 2021 года; принята к публикации 6 августа 2021 года

Анализ наблюдений затменной двойной AS Cam на спутнике TESS показал, что излучение объекта пульсирует на двух частотах: $\nu_1 = 0.7556 \text{ сут}^{-1}$ и $\nu_2 = 0.8658 \text{ сут}^{-1}$ с амплитудами $A_1 = 0^{\text{m}}0110$ и $A_2 = 0^{\text{m}}0087$ соответственно. Подобная переменность характерна для медленно пульсирующих звезд спектрального класса В. При помощи моделирования кривых блеска AS Cam, полученных с 1968 по 2019 г., подтверждено открытие плавного увеличения эксцентриситета орбиты системы примерно на 0.018 за 50 лет. Третий свет в качестве одного из параметров решения кривых блеска в среднем составляет около 4% от общей светимости системы. Для AS Cam это соответствовало бы спектральному классу F8–F9 для предполагаемого третьего тела — звезды главной последовательности, наличие которого следует из светового уравнения системы. Если третий свет — результат случайного наложения звезды, не связанной с AS Cam, то третье тело может оказаться вырожденным объектом или тесной двойной системой. Крайне низкая скорость вращения линии апсид в этой системе (по сравнению со значением, предсказываемым стандартной теорией) может быть объяснена гравитационным воздействием третьего тела с массой около $1.2M_{\odot}$ и наклоном орбиты примерно на 70° по отношению к картинной плоскости.

Ключевые слова: звезды: двойные: затменные — звезды: отдельные: AS Cam

1. ВВЕДЕНИЕ

Затменная переменная звезда AS Cam с 1983 г. привлекает к себе пристальное внимание: было обнаружено, что линия апсид в этой системе движется вдвое медленнее, чем следует из теоретических оценок (Khaliullin and Kozureva 1983), в то время как большинство подобных двойных систем описывается в рамках стандартных моделей с точностью до ошибок наблюдений (см., например, работу Claret et al. (2021), в которой анализируются новейшие данные). В качестве одной из гипотез медленное вращение орбиты могло бы быть объяснено гравитационным влиянием третьего тела (Zakharov et al. 1988, Khaliullin et al. 1991, Borkovits et al. 2005; 2007). И такое тело с орбитальным периодом около 2.2 лет было обнаружено (Kozureva et al. 1999). Третье тело оказывает влияние не только на скорость вращения линии апсид, но и на другие орбитальные параметры, такие как эксцентриситет и наклонение орбиты. Исследования возможных изменений этих элементов в системе AS Cam в

течение полувека фотоэлектрических наблюдений показали, что эксцентриситет и наклонение меняются, однако скорость изменения оказалась неравномерной (Kozureva et al. 2018).

Некоторые особенности, обнаруженные у изучаемой системы в данной работе, вызвали ревизию значений эксцентриситета, вычисленных из анализа кривых блеска. Начиная с 2017 г. авторами данной работы было получено несколько новых наблюдений минимумов AS Cam и вычислены моменты этих минимумов. Также использовались моменты минимумов, полученные из наблюдений изучаемой системы космическим аппаратом TESS (Ricker et al. 2014), и новые моменты минимумов, найденные при помощи наземных наблюдений другими авторами¹. После этого было проведено новое моделирование параметров системы и светового уравнения для того чтобы выяснить, изменяются ли значения параметров после добавления к анализу новых наблюдательных данных.

*E-mail: valiakozureva@gmail.com

¹См. базу данных V.R.N.O., <http://var2.astro.cz/ocgate/?lang=en>

2. АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СИСТЕМЫ

В августе 2019 г. AS Cam попала в поле зрения спутника TESS, который в течение 25 суток проводил непрерывные наблюдения системы. Аппаратом были получены полные кривые блеска звезды, из них нами было выделено семь главных и семь вторичных минимумов. Данные были загружены из архива MAST².

Хорошо видно, что у изучаемой звезды кроме затмений имеется переменность с амплитудой несколько сотых звездной величины (см. рис. 1). Для поиска пульсаций использовался пакет программ PERDET (Vreger 1990), в котором применяется анализ Фурье для поиска периодов и метод наименьших квадратов для поиска параметров найденных пульсаций в виде:

$$m = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi(\nu_i t + \varphi_i)) + c, \quad (1)$$

где m — дифференциальная звездная величина объекта, N — количество пульсаций, t — время, A_i — амплитуда пульсации, ν_i — частота пульсации, φ_i — начальная фаза пульсации, c — нормировочная константа.

На рис. 2а и 2б показан спектр мощности для этих наблюдений. В нем выделяются две доминирующие частоты: $\nu_1 = 0.7556 \text{ сут}^{-1}$ и $\nu_2 = 0.8658 \text{ сут}^{-1}$ с амплитудами $A_1 = 0^{\text{m}}0110$ и $A_2 = 0^{\text{m}}0087$. На рис. 2с показано спектральное окно, нормализованное на единицу и смещенное к доминирующей частоте 0.7556 сут^{-1} . Видно, что частота 0.8662 сут^{-1} является независимой. Еще две частоты имеют такие амплитуды, что отношение сигнал-шум $S/N = 3$ для частоты 0.5829 сут^{-1} и $S/N = 2$ для 1.4490 сут^{-1} . На рис. 1 показана сумма двух доминирующих пульсаций. Характерный период пульсаций похож на переменность медленно пульсирующих звезд спектрального класса В. Вероятно, именно такая переменность имеется в системе AS Cam, которая состоит из двух звезд спектрального класса В. Подобная переменность была обнаружена у системы DI Her (Kozyreva and Bagaev 2009), где были найдены пульсации на частоте 0.8511 сут^{-1} с амплитудой $0^{\text{m}}013$. Для поиска переменности DI Her использовались наземные наблюдения, их точность на порядок ниже, чем точность наблюдений спутника TESS.

Достоверность полученного периодического процесса можно характеризовать величиной

$\theta = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$, где в знаменателе стоит среднеквадратичная ошибка начального массива наблюдений, а в числителе — среднеквадратичная ошибка, найденная после вычитания пульсаций, достоверность наличия которых оценивается Stellingwerf (1978).

Величина θ обратно пропорциональна величине мощности, вычисленной с помощью анализа Фурье: чем эта величина меньше, тем достовернее процесс. В случае DI Her $\theta = 0.56$. Применение данного метода для оценки достоверности суммы двух пульсаций блеска у системы AS Cam с частотами ν_1 и ν_2 показывает высокий уровень до-

стоверности $\theta = \left(\frac{0.0022}{0.0102}\right)^2 = 0.047$. Добавление еще двух периодических процессов (с частотами 0.5829 сут^{-1} и 1.4490 сут^{-1} , см. рис. 2б) не влияет на уровень достоверности и не уменьшает расхождение кривых на рис. 1а. Обнаружить более подробный ряд спектральных частот мешает крайне короткий ряд наблюдений, он составляет всего 25 суток. Эффективная температура компонентов AS Cam: $T_{\text{eff1}} = 11\,500 \text{ K}$, $T_{\text{eff2}} = 10\,000 \text{ K}$ (Bozkurt and Değirmenci 2007). По этому критерию только главный компонент лежит в полосе нестабильности для медленно пульсирующих звезд спектрального класса В (Szewczuk et al. 2021).

На рис. 1 видно, что кривая суммы двух пульсаций в основном хорошо совпадает с кривой блеска звезды вне минимумов. Расхождение их в момент входа и выхода из минимума совпадает со среднеквадратичной ошибкой наблюдений (порядка $0^{\text{m}}001$), но для некоторых минимумов это расхождение в несколько раз больше (см. рис. 1а). Попытки устранить это расхождение добавлением других периодических пульсаций успехом не увенчались. Возможно, это происходит из-за каких-либо других процессов неперіодического характера и к переменности звезды отношения не имеет. Для устранения расхождения кривой переменности и кривой блеска тех минимумов, где оно превышает $0^{\text{m}}001$, параметры доминирующих пульсаций слегка варьировались. Наблюдения были разбиты на семь пар минимумов (соседних между собой главного и вторичного). AS Cam относится к хорошо разделенным системам, для поиска элементов орбиты и параметров таких звезд хорошо зарекомендовал себя итеративный метод дифференциальных поправок отклонений между наблюдаемыми и теоретическими значениями величин блеска звезды в затмениях (Khaliullina and Khaliullin 1984, Kozyreva and Zakharov 2001). Для каждой пары минимумов параметры вычислялись в свободном поиске. Решение считалось окончательным только в том случае, если отсутствует какая-либо систематическая зависимость невязок внутри минимумов, а

²<https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>

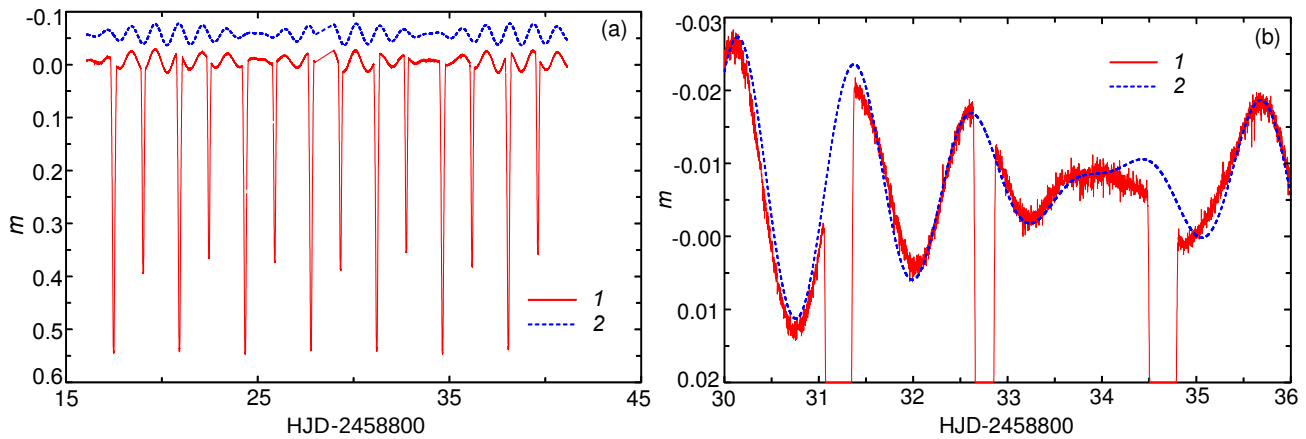


Рис. 1. (a) — кривая блеска AS Cam по данным TESS. Кривая 1 описывает дифференциальную звездную величину AS Cam, кривая 2 — сумму пульсаций (для наглядности смещенную относительно нуля) с частотами ν_1 и ν_2 и амплитудами A_1 и A_2 соответственно. (b) — то же, что и на рис. 1a, в более крупном масштабе. Сумма пульсаций не смещена.

среднеквадратичное отклонение, полученное при решении, минимально. Отсутствие подобных зависимостей дополнительно служит контролем того факта, что исправление кривой блеска внутри минимумов, описанное выше, проведено правильно.

Среднеквадратичные отклонения для каждого решения лежат в диапазоне значений от $0^{\text{m}}0012$ до $0^{\text{m}}0008$; систематические отклонения невязок не обнаружены. Параметры в этих решениях совпадают с точностью до нескольких процентов, а для некоторых параметров их совпадение между собой лучше одного процента, например, для радиусов звезд (см. таблицу 1). Радиусы не зависят от времени и фильтра, в котором проведены наблюдения. Их значения, найденные из высокоточных кривых блеска, могут быть использованы как один из дополнительных критериев достоверности решения, вычисленного по другим кривым блеска.

Момент главного минимума — один из тех параметров, которые находятся в свободном поиске решения по кривой блеска наряду с другими параметрами. Момент вторичного минимума получен в режиме поиска только этого параметра с фиксацией остальных параметров, согласно значениям, полученным для варианта свободного поиска. В таблице 1 приведены средние значения параметров для семи наборов различных кривых блеска TESS, моменты минимумов приведены в таблице 2.

Большой удачей является определение коэффициентов потемнения к краю звезд с точностью до 10%. Значения этих коэффициентов, которые получаются в результате решения, в основном зависят от точности наблюдений отрезков кривой блеска в самом начале и в конце затмения. Даже небольшие систематические отклонения наблюдений на этих участках способны резко поменять значения коэффициентов, полученных в решении. Точность наблюдений наземных телескопов обычно не

позволяет достоверно определить эти коэффициенты, поскольку среднеквадратичная ошибка самых лучших из них в 4–5 раз больше, чем точность наблюдений TESS. Другим недостатком наземных наблюдений является то, что часто отсутствуют некоторые участки кривых блеска; они не обладают полнотой внутри минимумов (в отличие от наблюдений космического аппарата TESS). Определение коэффициентов потемнения к краю для кривых блеска, полученных на спутнике, позволило нам в дальнейшем не варьировать эти коэффициенты для остальных кривых блеска AS Cam. Коэффициенты потемнения к краю для обеих звезд фиксировались, согласно решениям кривых блеска, полученных на TESS, но с адаптацией к разным фотометрическим полосам, в которых были получены те или иные кривые блеска.

Одним из параметров свободного поиска является светимость третьего тела — величина, полученная для разных кривых блеска. Она имеет незначительный разброс около значения, равного 4% от общей светимости, что можно расценивать как одно из косвенных свидетельств в пользу существования третьего тела в системе, на которое указывает наличие светового уравнения (Kozureva et al. 1999).

3. РЕВИЗИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТЫ И НОВЫЕ НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Взаимодействие третьего тела со звездами центральной тесной пары может менять скорость вращения линии апсид, эксцентриситет и наклонение плоскости орбиты системы (Zakharov et al. 1988, Khaliullin et al. 1991). В этом процессе есть долгопериодическая составляющая с характерным временем «переключения» короткопериодических режимов («быстрым» и «медленным»)

Таблица 1. Параметры решения кривых блеска, полученных на спутнике TESS

Кривая, HJD-2458800	r_1	r_2	i , deg	e	ω , deg	L_1	L_2	L_3	U_1	U_2	σ
17–19	0.1448	0.1091	89.061	0.1701	242.43	0.6609	0.2972	0.0420	0.330	0.350	0.0007
20–22	0.1434	0.1087	89.169	0.1662	241.90	0.6665	0.2900	0.0433	0.300	0.398	0.0010
24–26	0.1440	0.1084	89.038	0.1687	242.24	0.6688	0.2917	0.0396	0.265	0.366	0.0009
27–29	0.1443	0.1085	88.963	0.1659	241.72	0.6738	0.2957	0.0305	0.300	0.353	0.0008
31–32	0.1436	0.1078	88.980	0.1662	241.71	0.6771	0.2875	0.0350	0.283	0.362	0.0010
34–36	0.1446	0.1095	89.066	0.1703	242.53	0.6630	0.2935	0.0430	0.268	0.391	0.0010
37–39	0.1452	0.1087	89.020	0.1716	242.57	0.6715	0.2895	0.0390	0.382	0.319	0.0009
Среднее											
	0.1443	0.1087	89.038	0.1687	242.24	0.6688	0.2917	0.0396	0.300	0.362	0.0009
Ошибка среднего											
	0.0002	0.0002	0.026	0.0009	0.14	0.0022	0.0013	0.0018	0.015	0.010	

около нескольких столетий. Есть также короткопериодические изменения элементов орбиты с характерными временами около нескольких десятилетий (см. работу Borkovits et al. (2007), где для AS Cam были проведены вычисления и представлены результаты изменения параметров орбиты для различных конфигураций взаимного расположения орбит центральной двойной и третьего тела). Первые фотоэлектрические наблюдения AS Cam появились около полувека назад, это достаточный срок для обнаружения изменения орбитальных параметров. На основе анализа кривых блеска системы на протяжении 1968–2017 гг. были открыты изменения эксцентриситета и наклона орбиты (Козырева et al. 2018), но скорость этих изменений получалась неравномерной и даже скачкообразной в обоих направлениях, что довольно трудно объяснить только влиянием ошибок определения значения соответствующего элемента. В частности, эксцентриситет резко увеличился на 0.02 между 1969 и 1981 гг., потом произошло уменьшение его величины в 1992–1996 гг., следом, в 2002 г., его значение вернулось к значению 1981 г.

Как показали дальнейшие исследования (см. ниже), параметры пульсаций с течением времени не остаются постоянными, поэтому требовалось понять, как подобные пульсации влияют на оценку величины эксцентриситета, которая напрямую зависит от полуширины обоих минимумов. Анализ показал, что изменение ширины каждого конкретного минимума за счет найденных в нашем исследовании пульсаций приводит к изменению оценки величины эксцентриситета всего на 0.002, что существенно меньше, чем ошибки этого элемента, полученные в решении кривых блеска. В гораздо

большей степени (примерно в шесть раз) меняется оценка значения эксцентриситета за счет изменения глубин минимумов, к которым приводят данные пульсации. Наклонение орбиты тоже влияет на глубину минимумов, но вычисления показали, что для AS Cam изменение наклона примерно на $0^\circ 5'$ приводит к изменению оценки глубины минимумов всего на $0^m 0003$. Это незначительная ошибка по сравнению с ошибками наблюдений. С учетом точности наблюдений можно считать, что наблюдаемые глубины минимумов меняются только из-за пульсаций звезды. Они были вычислены с использованием только тех кривых блеска, в которых восходящая и нисходящая ветви имеют четкие выходы на плато вне минимумов, и есть точные наблюдения вблизи «дна» минимумов.

Помимо наших наблюдений есть массив наблюдений за 1968–1972 гг. (Hilditch 1969; 1972a). Для анализа в синтетическую кривую блеска вошли наблюдения, сделанные в HJD 2440204, 2440211, 2440269 (главный минимум) и в HJD 2440147, 2440185, 2440590 (вторичный минимум), в то время как остальные кривые блеска указанного периода времени имеют грубые систематические искажения, превышающие среднеквадратическую ошибку наблюдений в несколько раз. Синтетическая кривая блеска состоит из наблюдений, у которых разница по времени составляет более двух лет, что сравнимо с периодом светового уравнения ($P_3 = 2.2$ года). Перед вычислением элементов кривая блеска была исправлена с учетом параметров светового уравнения (Козырева et al. 2018). Среднеквадратичная невязка, полученная по каждой из исследуемых кривых блеска 1968–2017 гг.,

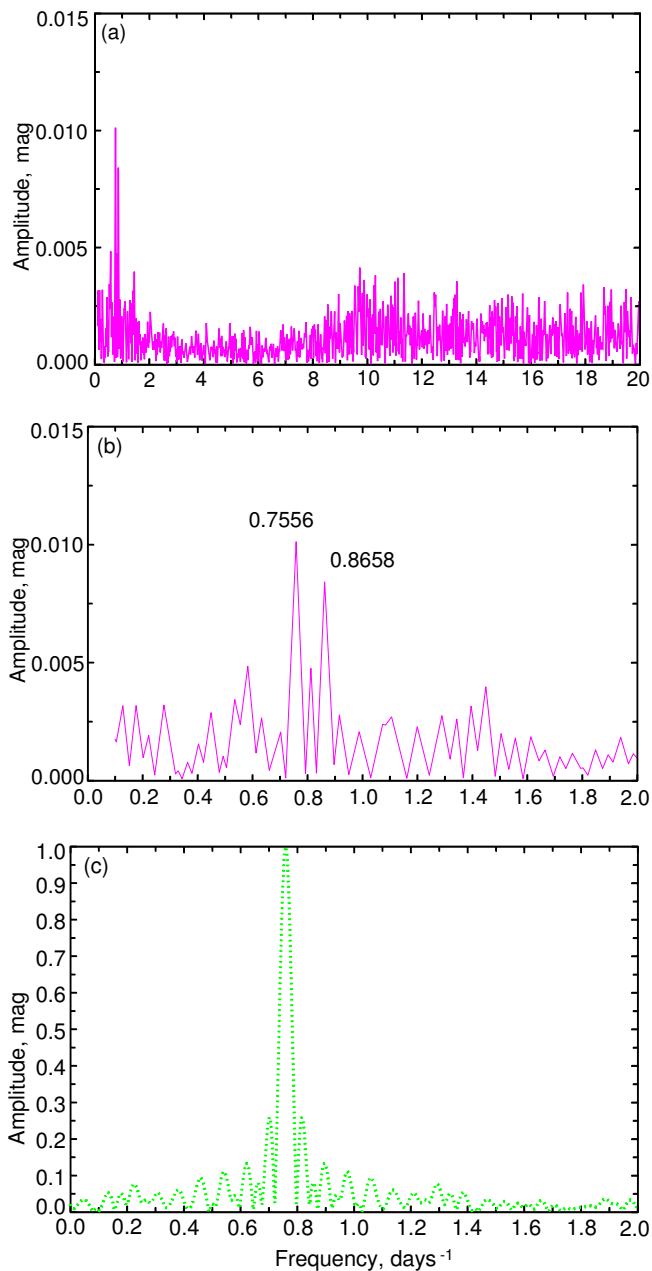


Рис. 2. (а) — преобразование Фурье кривой блеска, полученной со спутником TESS. (б) — то же, что и на рис. 2а, в более узком диапазоне. Отмечены частоты ν_1 и ν_2 . (с) — спектральное окно, нормализованное на единицу и смещенное к доминирующей частоте 0.7556 сут^{-1} .

по сравнению с предыдущими решениями для варианта нефиксированной глубины минимумов либо уменьшилась, либо осталась без изменения. Для всех решений кривых блеска уменьшился разброс значений радиусов звезд, и они стали ближе к значению радиусов, определенных по кривым блеска TESS. Например, радиусы звезд из решения по кривым блеска, полученным в работах Hilditch (1969; 1972a), совпали со значением радиусов,

Таблица 2. Моменты минимумов AS Cam, полученные на спутнике TESS и телескопе Цейсс-1000 Тянь-Шаньской обсерватории (в фильтрах *B*, *V* и *R*)

Момент, HJD – 2400000	<i>O</i> – <i>C</i> , сут	Аппарат
Min I		
58124.4350	–0.0035	<i>V</i> , Цейсс-1000
58124.4357	–0.0028	<i>R</i> , Цейсс-1000
58817.4910	–0.0021	TESS
58820.9216	–0.0025	TESS
58824.3528	–0.0023	TESS
58827.7840	–0.0021	TESS
58831.2150	–0.0020	TESS
58834.6455	–0.0024	TESS
58838.0776	–0.0013	TESS
58910.1246	–0.0045	<i>V</i> , Цейсс-1000
58910.1241	–0.0051	<i>B</i> , Цейсс-1000
Min II		
58819.0328	–0.0020	TESS
58822.4638	–0.0020	TESS
58825.8948	–0.0020	TESS
58829.3261	–0.0017	TESS
58832.7567	–0.0020	TESS
58836.1877	–0.0020	TESS
58839.6190	–0.0017	TESS

найденных по кривым блеска TESS, с точностью 0.0001 для главной звезды и 0.001 для вторичной.

В таблице 3 приведены элементы и параметры звезд, полученные по кривым блеска 1968–2017 гг. с фиксированными глубинами минимумов. В таблице 2 приведены моменты минимумов AS Cam, полученные нами из анализа наблюдений спутника TESS и наблюдений на Тянь-Шаньской обсерватории Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова (АФИ) в 2018 и 2020 гг. Эти новые наземные наблюдения проводились с камерой Arogee U900 в *B*- и *V*-фильтрах на 1-м телескопе Цейсс-1000, звезды TYC 4347-452-1 и TYC 4347-682-1 использовались в качестве звезды сравнения и контрольной звезды. Блеск указанных звезд в пределах точности проведенных наблюдений (как в 2018–2020 гг., так и ранее) был постоянным.

Таблица 3. Параметры решения наземных кривых блеска, полученных в разные годы

Параметр	1968–1970	1981	1992	1993	1994	1995	1996	2002	2017
r_1	0.144	0.146	0.145	0.145	0.144	0.144	0.145	0.145	0.143
ошибка	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
r_2	0.110	0.111	0.111	0.107	0.111	0.111	0.109	0.112	0.106
ошибка	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
e	0.153	0.157	0.147	0.152	0.154	0.168	0.162	0.166	0.173
ошибка	0.006	0.004	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.004	0.004
i , deg	88.6	88.9	89.0	88.5	89.7	89.2	89.0	89.2	89.0
ошибка	0.4	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3
ω , deg	231	234	233	234	235	238	238	239	242
ошибка	2	1	2	2	2	2	2	2	1
L_1	0.671	0.676	0.675	0.704	0.645	0.656	0.681	0.661	0.675
ошибка	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
L_2	0.286	0.283	0.289	0.286	0.293	0.283	0.287	0.289	0.280
ошибка	0.002	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
L_3	0.040	0.040	0.036	0.010	0.060	0.061	0.034	0.051	0.045
ошибка	0.004	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
u_1 , фикс.	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
u_2 , фикс.	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
σ	0.011	0.004	0.008	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.005

Таблица 4. Параметры пульсаций AS Cam (см. уравнение (1))

Годы	ν_1 , сут ⁻¹	ν_2 , сут ⁻¹	A_1 , зв. вел.	A_2 , зв. вел.	φ_1	φ_2	θ
1993–1996	0.5212	0.9459	0.0091	0.0069	0.0747	0.1317	0.29
2002–2004	$\nu = 0.9134$		$A = 0.0113$		0.4272		0.60
2019	0.7556	0.8659	0.0110	0.0087	0.3081	0.9446	0.05

Эксцентриситет со временем плавно растет (см. таблицу 5 и рис. 3а): $\Delta e = 0.018 \pm 0.006$ в течение 50 лет. Изменение наклона орбиты с точностью до ошибки величины не обнаружено, $\Delta i = 0^\circ 36 \pm 0^\circ 4$; для его анализа требуется точность, сравнимая с точностью космических наблюдений.

4. ПЕРЕМЕННОСТЬ СИСТЕМЫ В РАЗНЫЕ ГОДЫ

Мы провели исследования переменности AS Cam вне минимумов для двух промежутков времени: за

1993–1996 гг. и 2002–2004 гг. Фотометрические наблюдения 1993–1996 гг. были получены на Тянь-Шаньской обсерватории АФИ при помощи 50-см телескопа АЗТ-5. Наблюдения 2002–2004 гг. были проведены на Крымской астрономической станции МГУ им. М. В. Ломоносова на телескопе Цейсс-600. Оба массива данных получены на разных инструментах и с различной приемной аппаратурой, но в одном диапазоне. В работе использовались только наблюдения с ошибками, не превышающими 1.5%.

На рис. 4 показан спектр мощности для на-

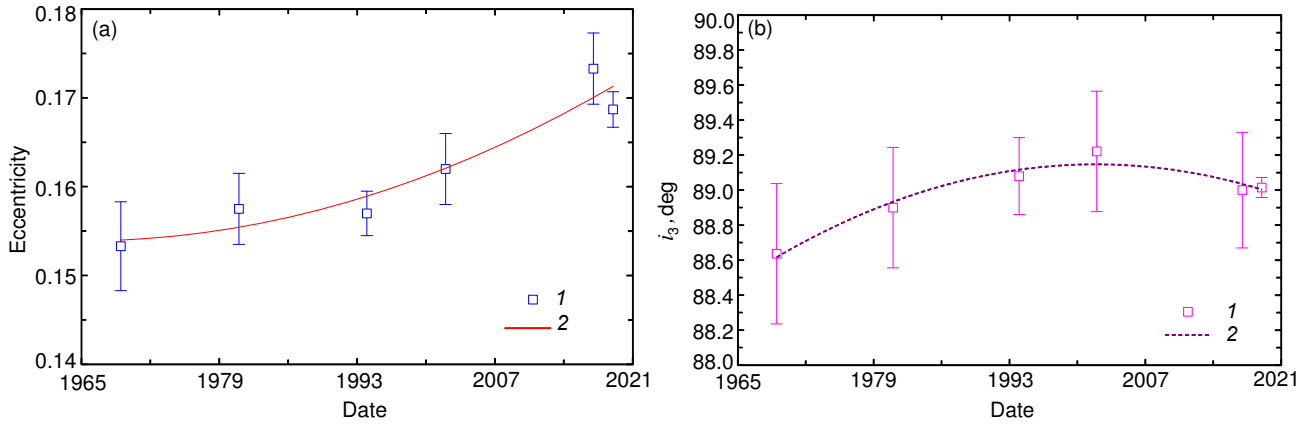


Рис. 3. (a) — изменение эксцентриситета центральной двойной со временем. При моделировании кривых блеска учтены пульсации, найденные в данной работе при помощи наблюдений с аппаратом TESS. 1 — результаты моделирования конкретных кривых блеска, 2 — аппроксимация полученных точек полиномом второй степени. (b) — то же, что и на рис. 3а, для наклона орбиты центральной двойной.

Таблица 5. Значение эксцентриситета e и наклона i для AS Cam в разные годы

Даты	1968–1970	1981	1992–1996	2002	2017	2019
e	0.153 ± 0.005	0.157 ± 0.004	0.157 ± 0.003	0.162 ± 0.004	0.173 ± 0.004	0.169 ± 0.002
i , deg	88.6 ± 0.4	88.9 ± 0.3	89.1 ± 0.2	89.2 ± 0.3	89.0 ± 0.3	89.01 ± 0.06

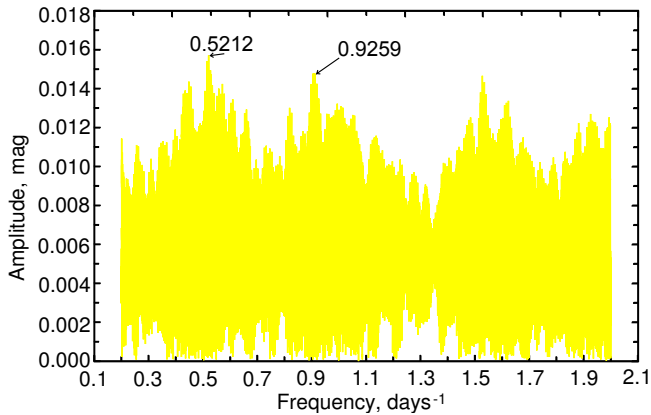


Рис. 4. Преобразование Фурье в наблюдениях в 1993–1996 гг.

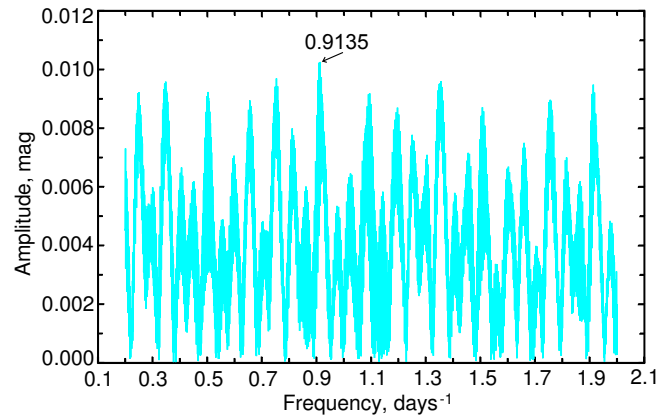


Рис. 5. Преобразование Фурье в наблюдениях в 2002–2004 гг.

блюдений 1993–1996 гг. Ни одна из пульсаций, найденных из наблюдений TESS (ν_1 , ν_2), в этих наблюдениях не проявлялась. Зато выделяются пики на частотах 0.5212 сут^{-1} и 0.9259 сут^{-1} . В таблице 4 для этого временного диапазона даны две частоты: 0.5212 сут^{-1} и 0.9459 сут^{-1} , так как эта сумма пульсаций дает минимум $\theta = 0.29$, а для суммы пульсаций 0.5212 сут^{-1} и 0.9259 сут^{-1} получается $\theta = 0.32$. Остальные пики на этом рисунке являются производными предыдущих пульсаций и исчезают после их вычитания из наблюдений.

Для наблюдений 2002–2004 гг. спектр мощно-

сти приведен на рис. 5. На нем довольно много одинаковых по амплитуде пиков, но ни один из них не совпадает по частоте с обнаруженными в 1993–1996 гг. и на спутнике TESS. Достоверность этих пульсаций невелика, лучший результат ($\theta = 0.60$) можно получить для частоты 0.9135 сут^{-1} с амплитудой $0^m 0113$.

Исправление кривых блеска 1992–2002 гг. с помощью периодических процессов, вызванных пульсациями, приводит к решению, в котором среднеквадратичная невязка только увеличивается по сравнению с предыдущими решениями, указан-

ными в таблице 3. После вычитания пульсаций из кривых блеска они деформируются, что сразу становится заметно в поведении невязок внутри минимумов. Точность наблюдений 1993–1996 гг. и 2002–2004 гг. намного ниже по сравнению с показателями наблюдений TESS в 2019 г. В этих массивах наземных наблюдений по сравнению с спутником очень мало точек (95 и 260, на порядок меньше, чем космических), хотя они растянуты по времени. Это не дает никакого преимущества для поиска пульсаций с длительностью, малой по сравнению с длительностью массива. Недостаточность и меньшая точность массива наблюдений, конечно, не могли не повлиять на точность определения параметров пульсаций. Тем не менее анализ массивов наблюдений приводит к выводу о том, что и в наблюдениях 1993–1996 гг. и 2002–2004 гг. присутствует переменность системы на временах около 1–2 суток, но частоты пульсаций не совпадают с частотами, которые были получены из наблюдений TESS. Возможно, это объясняется тем, что медленно пульсирующие В-звезды могут иметь много пульсаций с различными частотами, причем амплитуды таких пульсаций со временем могут изменяться, что дает дополнительное преимущество непрерывным отрезкам космических наблюдений. Для более глубокого и точного анализа переменности AS Cam дополнительно необходимы такие же высокоточные непрерывные наблюдения, какие были проведены на спутнике TESS.

В таблице 5 даны величины эксцентриситета и наклона орбиты, которые мы вычислили по кривым блеска в разные годы. Каждая из кривых блеска 1992–1996 гг. имеет на некоторых участках искажения, вызванные атмосферной нестабильностью, поэтому для них приведены средние значения искомым величин.

5. СВЕТОВОЕ УРАВНЕНИЕ AS CAM

С учетом всех имеющихся во время написания статьи моментов минимумов системы были получены следующие эфемериды:

$$\text{Min I} = \text{HJD } 2444939.24519 + 3.43096365 \times E, \quad (2)$$

$$\text{Min II} = \text{HJD } 2444937.32569 + 3.43097112 \times E, \quad (3)$$

где E — количество орбитальных циклов от начальной эпохи. Эти эфемериды соответствуют скорости апсидального движения

$$\omega_{\text{obs}} = 15^{\circ}9 \pm 1^{\circ}5 \text{ век}^{-1},$$

что с точностью до 1% совпадает с значением этого параметра в работе Khaliullin and Kozyreva (1983). Параметры светового уравнения для всего массива моментов минимумов даны в таблице 6, где A_3 — амплитуда светового уравнения, e_3 —

Таблица 6. Параметры светового уравнения

Параметр	Значение
A_3 , мин	4.3 ± 0.3
e_3	0.42 ± 0.08
P_3 , сут	805.9 ± 1.5
ω_3 , deg	60 ± 7
E_3 , HJD	2444296 ± 30

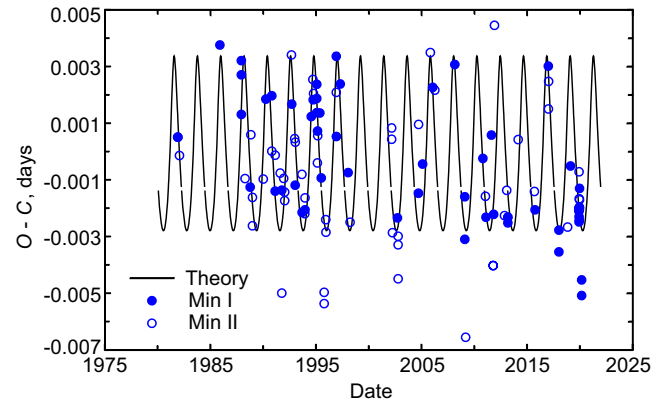


Рис. 6. Диаграмма « $O - C$ » для наблюдательных значений моментов минимумов AS Cam (главных, Min I, и вторичных, Min II) и кривая светового уравнения с параметрами из таблицы 6.

эксцентриситет орбиты предполагаемого третьего тела, P_3 — период обращения этого тела, ω_3 — долгота периастра его орбиты, E_3 — начальная эпоха светового уравнения.

Функция масс дает нижний предел массы третьего тела $M_3 \sin i_3 \approx 1.1 M_{\odot}$, угол i_3 отсчитывается от картинной плоскости. Параметры светового уравнения остались практически прежними (Kozyreva et al. 2018).

График светового уравнения, вычисленного с параметрами из таблицы 6, приведен на рис. 6. По вертикальной оси отложено значение ($O - C$) для минимумов, полученных в 1981–2020 гг. Здесь O — наблюдаемое значение минимума, C — величина, вычисляемая с помощью выражений (2) и (3). Видно, что подавляющее большинство моментов минимумов соответствует ходу светового уравнения. Важно отметить, что среднее отклонение 14 моментов минимумов, полученных на TESS, от теоретической кривой светового уравнения равно всего 0.0004 сут, в то время как среднее отклонения всех моментов в пять раз больше. Статистический критерий для 118 моментов минимумов — $\theta = 0.36$.

6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТА С ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ

Из решения светового уравнения нельзя определить наклон орбиты третьего тела, но из оценки светимости этого тела можно оценить его массу. Вклад третьего тела в общую светимость, по видимому, составляет в среднем 4% (как следует из решения кривых блеска, см. таблицы 1 и 3). Известно, что AS Cam состоит из двух звезд спектральных классов B8V и B9.5V. Указанный вклад в общую светимость системы может соответствовать звезде спектрального класса F8V–F9V, а масса таких звезд составляет около $1.1\text{--}1.2 M_{\odot}$.

При сравнении оценки массы третьего тела из функции масс и из предполагаемого верхнего предела на вклад светимости третьего тела в общую светимость системы можно определить наклон орбиты третьего тела по отношению к картинной плоскости. Он должен быть не меньше 65° , иначе вклад третьего тела в светимость звезды превысит значение, найденное из решения кривых блеска. Данное утверждение делается в предположении, что третье тело является звездой главной последовательности (что наиболее вероятно). Если же это тело представляет собой вырожденный остаток или тесную двойную систему, а 4%-й вклад в светимость системы обусловлен случайным наложением далекой звезды, то эта оценка может быть неверной и зависеть от типа остатка (белый карлик, нейтронная звезда или даже черная дыра) или от возможной двойственности третьего тела.

Для системы AS Cam были проведены вычисления параметров массы и орбиты третьего тела (Borkovits et al. 2007) с тем, чтобы можно было объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической скоростями вращения линии апсид системы. Следствием влияния третьего тела на центральную двойную является изменение эксцентриситета и наклона орбиты. Одна из предложенных в работе Borkovits et al. (2007) конфигураций орбиты AS Cam описывала ситуацию, когда угол между плоскостями орбит центральной двойной и третьего тела $i_m = 20^{\circ}$ (он соответствует наклону орбиты третьего тела $i_3 = 70^{\circ}$ по отношению к картинной плоскости). Вычисления показали, что в этом случае величина изменения эксцентриситета оказалась близка к тем значениям, которые мы нашли при анализе всех кривых блеска за 50 лет: $\Delta e \approx 0.05 \text{ век}^{-1}$.

Вычисленное изменение наклона орбиты тесной двойной Δi меньше, чем ошибки элемента, которые получаются в результате нашего анализа, поэтому сравнение теории с наблюдениями для него пока невозможно.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ высокоточных наблюдений, выполненных с помощью космического аппарата TESS, позволил впервые установить, что у одной из звезд пары AS Cam или даже у обоих компонентов системы наблюдаются вариации блеска, подобные соответствующим изменениям характеристик медленно пульсирующих звезд спектрального класса В. В наблюдениях 2019 г. выделяются две частоты: $\nu_1 = 0.7556 \text{ сут}^{-1}$ и $\nu_2 = 0.8658 \text{ сут}^{-1}$ с амплитудами $A_1 = 0^{\text{m}}0110$ и $A_2 = 0^{\text{m}}0087$ соответственно. Достоверность полученного результата достаточно высока: для суммы пульсаций статистический критерий Stellingwerf (1978) дает величину $\theta = 0.05$. Анализ наблюдений AS Cam, проведенных на наземных телескопах Тянь-Шаньской астрофизической обсерватории в 1993–1996 гг. и Крымской станции МГУ им. М. В. Ломоносова в 2002–2004 гг., не подтвердил наличие пульсаций с этими частотами. Исследования переменности звезды вне минимума показали, что вариации ее яркости происходили и в эти годы с периодами порядка 1–2 сут. Для того чтобы проследить динамику изменения пульсаций AS Cam, необходимы дальнейшие наблюдения с высокой точностью.

Моменты минимумов, полученные из наблюдений, проведенных начиная с 2017 г., находятся в хорошем согласии со световым уравнением, найденным для этой звезды ранее: статистический критерий Stellingwerf (1978) для 118 моментов минимумов с 1981 г. составляет $\theta = 0.36$. Одной из гипотез, которая объясняет медленное вращение линии апсид в системе AS Cam, является гравитационное воздействие третьего тела, параметры орбиты и масса которого соответствуют найденному ранее и подтвержденному в данной работе световому уравнению. Определенная нами скорость изменения эксцентриситета тесной двойной соответствует вычисленному значению скорости изменения эксцентриситета для такой конфигурации орбит, в которой угол между их плоскостями составляет около 20° (Borkovits et al. 2007). Вклад светимости предполагаемого третьего тела в общую светимость системы не будет превышать 4% (если третье тело — это звезда главной последовательности), что следует из решения кривых блеска.

Таким образом, медленное вращение линии апсид в системе AS Cam можно объяснить влиянием на орбиту центральной тесной двойной звезды со стороны третьей звезды массой порядка $1.2 M_{\odot}$. Для подтверждения этой гипотезы желательно провести исследования, основанные на измерениях лучевых скоростей звезд. На данный момент имеются ограниченные по времени кривые лучевых скоростей (Hilditch 1972b, Pavlovski et al. 2011), на основании которых удалось сделать оценки масс компонентов системы ($3.2 M_{\odot}$).

и $2.3 M_{\odot}$, см. Pavlovski et al. (2011)), при этом ввиду недостаточной продолжительности наблюдений нельзя сделать вывод о наличии или отсутствии третьего тела. Возможно, спектральные линии третьей звезды будут обнаружены в общем спектре с более массивными звездами центральной пары. Особенно важно было бы обратить внимание на спектры, получаемые во время затмения, когда должен наблюдаться свет только одного компонента. Необходимо провести спектральные исследования так, чтобы можно было обнаружить эффект Росситера—Маклафлина. Если такие наблюдения будут проведены, то, скорее всего, можно будет установить истинную причину замедления вращения линии апсид в системе AS Cam. В частности, подобная работа была выполнена Pavlovski et al. (2011), которые нашли скорости осевого вращения компонентов, оказавшиеся более низкими, чем скорости вращения этих звезд, синхронные с орбитальным вращением. Эта разница была интерпретирована как несовпадение экваториальных плоскостей звезд и орбитальной плоскости (Pavlovski et al. 2011), что и вызывает замедление апсидального вращения системы (Shakura 1985). По мнению Pavlovski et al. (2011), наличие третьего тела в системе маловероятно, но не может быть исключено.

В настоящее время существуют две основных гипотезы³, которые могли бы объяснить аномально низкую скорость вращения линии апсид в системе AS Cam:

- плоскости осевого вращения компонентов системы не совпадают друг с другом и с плоскостью орбиты, при этом существует большая разница между скоростями орбитального и осевого вращения звезд;
- в системе есть третье тело, оказывающее гравитационное воздействие на центральную двойную звезду.

Первая гипотеза предполагает существование довольно молодой системы, в которой процесс синхронизации вращения компонентов еще не наступил. Такие системы либо родились в очень неоднородном и турбулентном облаке газа с разными скоростями и даже различными направлениями вращения в разных его частях, где появились звезды тесной пары, либо возникли в результате близкого взаимодействия с достаточно массивной звездой, которая при сближении не разрушила пару, но изменила вращательные моменты звезд. В

³Экзотические варианты вроде ревизии теории гравитации не упоминаются. Общая теория относительности дает практически идеально соответствующие наблюдаемым значениям оценки скорости вращения линии апсид для большинства систем (Varoich et al. 2021), за исключением некоторых, среди которых AS Cam.

скоплениях звезд такие события должны происходить. Получить доказательство наличия такой конфигурации можно только при непосредственном измерении скорости вращения звезд. Кривая лучевых скоростей должна быть измерена с большой точностью, в том числе в моменты начальных и конечных контактов звезд при затмениях, с тем чтобы наблюдать эффект Росситера—Маклафлина. В некоторых системах такой эффект был обнаружен, например, в EP Cru, CV Vel, DI Her (Dyomova and Dyomov 2019), но в системе AS Cam его пока наблюдать не удалось.

Другой причиной замедления скорости вращения линии апсид может быть влияние на нее третьего тела в системе. Доказательством присутствия такого тела является световое уравнение. Для AS Cam световое уравнение было обнаружено (Kozyreva et al. 1999) и подтверждено (Bozkurt and Değirmenci 2005; 2007). Сохраняется также возможность совместного влияния обеих причин: и несоосности вращения компонентов системы, и кратности системы. Также сама несоосность вращения компонентов может быть вызвана действием механизма Лидова—Козаи в системе с третьим телом, плоскость орбиты которого сильно наклонена по отношению к плоскости орбиты центральной двойной (Lidov 1962, Kozai 1962), в этом случае система может не быть молодой.

БЛАГОДАРНОСТИ

В данном исследовании используется база данных SIMBAD (Страсбургский центр астрономических данных, Франция) и система NASA ADS. Часть данных, представленных в работе, была получена в Архиве для космических телескопов им. Б. Микульской (MAST). Авторы благодарны анонимному рецензенту за замечания, позволившие улучшить оформление статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № ИРН AP09259383).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Baroch, A. Giménez, I. Ribas, et al., *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A64 (2021).
2. T. Borkovits, E. Forgács-Dajka, and Z. Regály, *ASP Conf. Ser.* **333**, 128 (2005).
3. T. Borkovits, E. Forgács-Dajka, and Z. Regály, *Astron. and Astrophys.* **473** (1), 191 (2007).
4. Z. Bozkurt and Ö. L. Değirmenci, *ASP Conf. Ser.* **335**, 277 (2005).
5. Z. Bozkurt and Ö. L. Değirmenci, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **379** (1), 370 (2007).
6. M. Breger, *Delta Scuti Star Newsletter* **2**, 21 (1990).
7. A. Claret, A. Giménez, D. Baroch, et al., *arXiv:2107.10765* (2021).
8. G. N. Dryomova and V. V. Dryomov, *Research Astron. Astrophys.* **19** (3), id. 035 (2019).
9. R. W. Hilditch, *Observatory* **89**, 143 (1969).
10. R. W. Hilditch, *Memoirs of the Royal Astronomical Society* **76**, 1 (1972a).
11. R. W. Hilditch, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **84** (500), 519 (1972b).
12. K. F. Khaliullin, S. A. Khodykin, and A. I. Zakharov, *Astrophys. J.* **375**, 314 (1991).
13. K. F. Khaliullin and V. S. Kozyreva, *Astrophys. and Space Sci.* **94** (1), 115 (1983).
14. A. I. Khaliullina and K. F. Khaliullin, *Sov. Astron.* **28**, 228 (1984).
15. Y. Kozai, *Astron. J.* **67**, 591 (1962).
16. V. Kozyreva, A. Kusakin, and A. Bogomazov, *Research Astron. Astrophys.* **18** (1), id. 010 (2018).
17. V. S. Kozyreva and L. A. Bagaev, *Astronomy Letters* **35** (7), 483 (2009).
18. V. S. Kozyreva and A. I. Zakharov, *Astronomy Letters* **27** (11), 712 (2001).
19. V. S. Kozyreva, A. I. Zakharov, and K. F. Khaliullin, *Inform. Bull. Variable Stars* **4690**, 1 (1999).
20. M. L. Lidov, *Planetary Space Sci.* **9** (10), 719 (1962).
21. K. Pavlovski, J. Southworth, and V. Kolbas, *Astrophys. J.* **734** (2), L29 (2011).
22. G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9143**, id. 914320 (2014).
23. N. I. Shakura, *Pis'ma Astron. Zh.* **11**, 536 (1985).
24. R. F. Stellingwerf, *Astrophys. J.* **224**, 953 (1978).
25. W. Szewczuk, P. Walczak, and J. Daszyńska-Daszkiewicz, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503**, 5894 (2021).
26. A. I. Zakharov, K. F. Khaliullin, and S. A. Khodykin, *Astron. Tsirkular*, No. 1529, 13 (1988).

Pulsations of the AS Cam Eclipsing Binary in TESS Light Curves
V. S. Kozyreva¹, A. V. Kusakin², A. I. Bogomazov¹, and Ch. T. Omarov²
¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²National Center for Space Research and Technologies, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, 050020 Kazakhstan

An analysis of TESS satellite observations of the AS Cam eclipsing binary has shown that the light of this source pulsates at two frequencies: $\nu_1 = 0.7556 \text{ days}^{-1}$ and $\nu_2 = 0.8658 \text{ days}^{-1}$ with the amplitudes $A_1 = 0^m0110$ and $A_2 = 0^m0087$, correspondingly. Such variations are typical for slowly pulsating B-type stars. We modeled the light curves of AS Cam obtained from 1968 to 2019 to confirm the discovery of a gradual increase in the orbit eccentricity of the system by approximately 0.018 over 50 years. A third light, as one of the light curve solution parameters, on average, amounts to approximately 4% of the total luminosity of the system. For AS Cam this would correspond to an F8–F9-type suggested third body—a main sequence star, the presence of which follows from the light equation of the system. If the third light is a result of a random overlapping of a star unrelated to AS Cam, then the third body may turn out to be a degenerate object or a close binary system. The extremely slow apsidal motion in this system (compared to the value predicted by the standard theory) can be explained by the gravitational influence of a third body with a mass of about $1.2M_{\odot}$ and an orbital inclination of about 70° with respect to the image plane.

Keywords: *stars: binaries: eclipsing—stars: individual: AS Cam*