

УДК 524.386

## ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 21 ЗАТМЕННОЙ ДВОЙНОЙ С ЭКСЦЕНТРИЧНОЙ ОРБИТОЙ

© 2019 В. С. Козырева<sup>1\*</sup>, А. В. Кусакин<sup>2</sup>, Т. Крайчи<sup>3</sup>, А. И. Богомазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

<sup>2</sup>Национальное космическое агентство, Астрономический институт имени В. Г. Фесенкова, Алматы, 050020 Казахстан

<sup>3</sup>СВА–Нью-Мехико, PO Box 1351, Клаудкрофт, NM 88317 США

Поступила в редакцию 14 мая 2019 года; после доработки 22 июля 2019 года; принята к публикации 22 июля 2019 года

В работе описывается постановка задачи поиска апсидального движения в 21 затменной двойной звезде. Приводится оценка возможности его определения в изучаемых системах в ближайшие годы, а также результаты наблюдений за 2009–2018 годы, в ходе которых были получены моменты минимумов кривых блеска данных звезд. Точность определения орбитальных периодов изучаемых двойных повышена в 10–100 раз по сравнению с имевшимися ранее данными. Для двух систем определены фотометрические элементы. В качестве побочного продукта исследования открыта тесная затменная двойная звезда типа W UMa.

Ключевые слова: *звезды: двойные: затменные*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В течение 2009–2018 гг. были проведены наблюдения затменных двойных звезд (см. таблицу 1), большинство из которых были выбраны из списка пятидесяти звезд в работе [1]. Данные для таблицы взяты из Общего каталога переменных звезд [2], орбитальный период и фаза вторичного минимума приводятся по работе [1]. В колонках указаны: Система — название двойной,  $\alpha$  — прямое восхождение,  $\delta$  — склонение,  $T_0$  — начальная эпоха в эфемеридах из работы [1] в единицах HJD–2400000,  $P_{\text{orb}}$  — орбитальный период в днях,  $m_{\text{max}}$  — звездная величина в максимуме,  $m_{\text{min}}$  — звездная величина в главном минимуме,  $\phi_{II}$  — фаза вторичного минимума системы, приведенная в работе [1]. Склонение и прямое восхождение, определенные космическим аппаратом «Gaia», могут быть найдены в работе [3] и в базе данных SIMBAD [4], где они указаны с намного более высокой точностью. Для V1345 Aql и V0577 Ori фазы взяты из работ [5, 6], периоды и начальные эпохи — из [2].

Это разделенные двойные системы с кривой блеска типа EA или EB, имеющие заметный эксцентриситет орбиты. Изучение таких систем имеет большое значение, так как может существенно расширить список затменных двойных с известной

скоростью вращения линии апсид. Эта скорость зависит от параметра  $k_2$  (см., например, работу [7]), который связан с концентрацией вещества к центру звезд. Величина этого параметра, полученного из наблюдений, позволяет определить возраст звезд, а также сравнить полученные результаты с теоретическими расчетами, выполненными в различных моделях звездной эволюции.

Также, анализируя ряды моментов главных и вторичных минимумов кривой блеска системы, можно обнаружить световое уравнение, которое может являться результатом гравитационного воздействия третьего тела в системе на центральную двойную. Другим доказательством воздействия третьего тела на орбиту тесной двойной системы может быть изменение элементов орбиты: эксцентриситета, наклона и большой полуоси [8]. Как правило, возмущения этих величин незначительны, поэтому для того, чтобы их обнаружить, требуется много высокоточных кривых блеска в течение длительного времени.

В частности, исследование ряда высокоточных фотометрических кривых блеска за 1983–2017 гг. позволило обнаружить изменения параметров орбиты в системе AS Cam с аномально низкой скоростью вращения линии апсид [9]. Поиск таких изменений может пролить свет на причину аномально низкой скорости вращения линии апсид: (а) несоосность моментов вращения звезд пары друг относительно друга и относительно орбитального

\*E-mail: valiakozyreva@gmail.com

Таблица 1. Список исследуемых систем

Система	$\alpha$ , hh mm ss	$\delta$ , ° ' "	$m_{\max}$	$m_{\min}$	$T_0$	$P_{\text{orb}}$	$\phi_{II}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
V2778 Ori	06 03 39.49	+03 38 27.3	10.15	10.71	51629.644	14.3877	0.436
V0645 Aur	06 19 15.45	+28 26 23.1	9.72	10.26	52977.747	10.8925	0.789
DR CMi	07 24 31.43	+03 03 27.9	11.08	11.65	51557.760	23.7704	0.669
PS UMa	08 56 46.50	+69 40 32.0	12.47	12.8	51628.645	9.272	0.466
V0577 Oph	18 16 45.85	+06 54 18.2	11.36	12.00	42652.332	6.079096	0.583
V1345 Aql	19 12 39.22	+05 20 36.9	13.9	15.6	44374.427	3.0283388	0.46
V0491 Vul	19 46 22.67	+24 37 47.9	9.94	10.35	51511.507	7.6699	0.327
V2544 Cyg	20 27 17.27	+37 56 26.9	12.61	13.17	51478.596	2.09372	0.489
V0839 Cep	21 03 31.72	+59 25 50.4	9.93	10.24	51448.645	9.9634	0.511
V2647 Cyg	21 47 03.30	+50 03 17.8	11.05	11.65	53671.255	5.85527	0.334
V0898 Cep	22 35 26.86	+64 07 55.3	11.8	12.1	51364.686	2.87475	0.670
V0944 Cep	23 30 34.94	+66 33 45.7	10.86	11.21	51478.573	6.560	0.528
V0897 Cep	22 37 18.81	+70 54 28.8	11.45	11.69	51474.575	4.4871	0.518
V0922 Cep	23 01 39.22	+69 42 45.1	11.46	11.92	51606.605	3.57494	0.585
V0957 Cep	23 46 10.45	+71 29 55.3	11.52	11.96	51504.666	1.98873	0.560
V0798 Cep	01 08 31.78	+85 12 54.0	15.98	16.31	51607.605	16.080	0.232
V1141 Cas	01 38 18.01	+61 08 35.1	12.28	12.93	51542.702	6.9092	0.441
V1176 Cas	03 24 49.18	+77 20 12.3	11.18	11.72	51572.752	6.3344	0.494
OO Cam	03 32 18.38	+61 16 40.9	10.90	11.33	51578.625	8.1190	0.489
V0347 Cam	04 26 23.09	+79 13 51.5	11.37	11.8	51532.600	9.4545	0.693
V0409 Cam	05 46 43.91	+75 20 56.6	11.03	11.29	51524.605	6.6764	0.522

момента вращения (см., например, [10] для DI Her), (б) гравитационное воздействие дополнительных тел на центральную пару (см., например, [11] для AS Cam), (в) комбинация вариантов (а) и (б).

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на Тянь-Шаньской астрономической обсерватории Астрономического института им. В. Г. Фесенкова на телескопе Цейсс–1000 с ПЗС камерой Arogee U900 и на телескопе Ричи–Кретьен–360 с ПЗС камерой SBIG ST-402, на Крымской астрономической станции МГУ им. М. В. Ломоносова на телескопе Цейсс–600 с ПЗС камерой Arogee-47p, на обсерватории AAVSO в Нью-Мехико на телескопе ACP AAVSOnet Wright 30 с ПЗС камерой

SBIG ST-9. Большинство наблюдений сделано в фильтре *V*, часть наблюдений — в фильтрах *B* и *R*. При обработке наблюдений звезды сравнения и контрольные звезды выбирались среди звезд поля, близких по величине и цвету к изучаемой звезде. Эти звезды проходили тщательную проверку с точки зрения переменности на протяжении всего периода наблюдений затменной двойной. В результате такого анализа среди контрольных звезд объекта PS UMa была открыта новая тесная двойная звезда типа W UMa. Остальные звезды с точностью  $< 0.01^m$  оставались постоянными во время наблюдений. Изображения обрабатывались программой Maxim DL5.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты работы приведены в таблицах 2 (фотометрические элементы системы V0347 Cam), 3 (фотометрические элементы системы V0409 Cam) и 4 (моменты минимумов изучаемых систем и новые, более точные, значения их орбитальных периодов). Предыдущие значения периодов этих звезд были определены как правило с точностью до четвертого (а иногда и третьего) знака после запятой. Невысокая точность этих величин за время, прошедшее между эпохами наблюдений, приводила к существенному сдвигу истинных моментов минимумов относительно вычисленных (вплоть до нескольких часов). Это сильно затруднило задачу наблюдений кривых блеска внутри минимумов, для некоторых звезд минимумы приходилось искать практически заново. Новые значения орбитальных периодов получены с точностью до шестого знака после запятой, что существенно облегчает получение кривых блеска внутри минимумов в будущем. Если не удалось получить момент главного минимума, но получен момент вторичного минимума, то мы вычисляем и приводим период звезды с использованием вторичного минимума и данных работы [1] (моменты минимумов и фазы вторичных минимумов).

Для двух звезд с достаточно полной кривой блеска внутри минимумов были получены фотометрические элементы. Для их определения использовалась программа [12] вычисления элементов орбиты и параметров звезд для разделенных систем с помощью минимизации фотометрических фаз, вычисленных для кривых блеска, которые получаются из наблюдений. Такой анализ проводился только у тех систем, кривые блеска которых обладали и восходящими и нисходящими ветвями внутри минимумов, причем одна из ветвей должна была присутствовать полностью. Наряду с радиусами звезд, эксцентриситетом, наклоном орбиты, светимостями звезд и долготой периастра орбиты в набор элементов входит и момент главного минимума. Точность моментов, полученных таким образом, получилась в пределах 1–2 единиц четвертого знака после запятой. Остальные моменты минимумов получены при помощи аппроксимации кривой блеска параболой с последующим поиском минимума. Присутствие в кривой блеска нисходящей и восходящей ветви для получения момента минимума считалось обязательным. Ошибка определения моментов минимумов этим методом на порядок величины больше, чем та, которая получается для величины момента, вычисленного в программе поиска фотометрических элементов.

Для каждой звезды из списка мы даем оценку возможности определения апсидального вращения для нее в течение нескольких ближайших лет.

*V2778 Ori.* Затменная двойная имеет эллиптическую орбиту, что позволяет надеяться получить для нее скорость вращения линии апсид в ближайшие годы.

*V0645 Aur.* Затменная двойная имеет эллиптическую орбиту. Большое отличие положения вторичного минимума от фазы 0.5 может свидетельствовать о том, что долгота периастра  $\omega$  (см. систему отсчета на рис. 2 в работе [9]) близка к одному из крайних положений ( $180^\circ$  или  $360^\circ$ ), что существенно затрудняет определение скорости вращения орбиты в ближайшие годы (см. Заключение).

*DR CMi.* Затменная двойная имеет эллиптическую орбиту. Период звезды довольно большой и требуется весьма продолжительное время для получения кривых блеска внутри минимумов на наземных телескопах. Можно порекомендовать получить наблюдения этой звезды на одном из будущих космических телескопов.

*PS UMa.* Затменная двойная имеет эллиптическую орбиту, что позволяет надеяться измерить скорость вращения линии апсид в ближайшие годы.

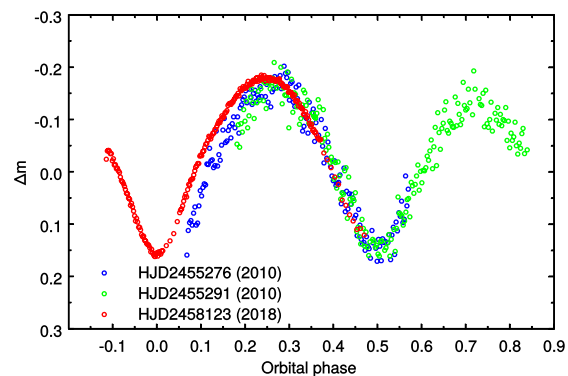


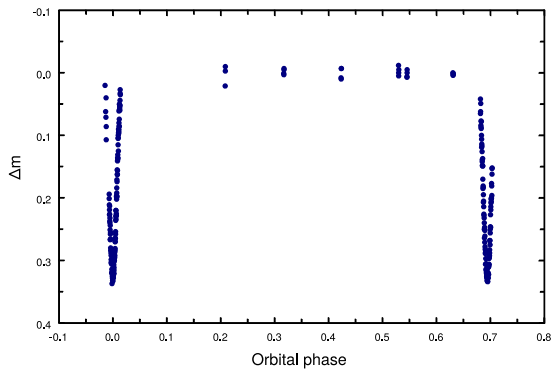
Рис. 1. Кривая блеска звезды затменной двойной 2MASS J08561386+6934210 в фильтре V, которая была открыта в окрестностях изучаемой звезды PS UMa.

Рядом с PS UMa расположена звезда 2MASS J08561386+6934210 с координатами<sup>1</sup>  $\alpha(2000) 08^{\text{h}}56^{\text{m}}13^{\text{s}}.86$ ,  $\delta(2000) +69^{\circ}34'21''.0$ . При обработке наблюдений она выступала в качестве контрольной звезды, но у нее была обнаружена переменность. Анализ данных показал, что это затменная двойная звезда. Была получена следующая эфемериды звезды:

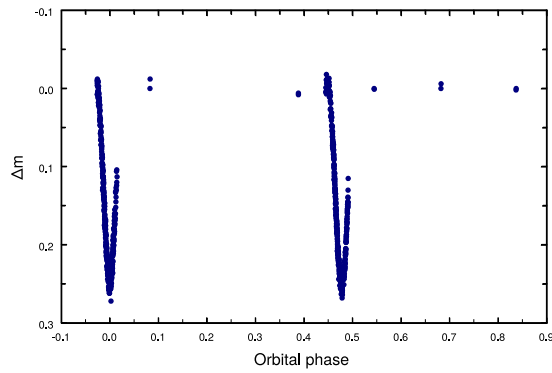
$$\text{Min I} = \text{HJD}2458123.3165 + 0.423982E, \quad (1)$$

здесь  $E$  — количество орбитальных циклов от начальной эпохи.

<sup>1</sup>См. NASA/IPAC Infrared Science Archive, <https://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/>



**Рис. 2.** Кривая блеска V0347 Cam в фильтре V, по которой были определены фотометрические параметры системы, см. таблицу 2.



**Рис. 3.** Кривая блеска V0409 Cam в фильтре V, по которой были определены фотометрические параметры системы, см. таблицу 3.

**таблица 2.** Фотометрические элементы V0347 Cam, полученные по результатам измерений 2011 г. в фильтре V. В таблице приняты следующие обозначения:  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы звезд в единицах большой полуоси,  $u_1$  и  $u_2$  — коэффициенты потемнения к краю,  $i$  — наклонение орбиты,  $e$  — эксцентриситет орбиты,  $\omega$  — долгота периастра,  $\phi_{II}$  — фаза вторичного минимума,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  — светимости компонент и величина третьего света, выраженные в единицах полной светимости системы,  $\sigma_{o-c}$  — стандартное отклонение наблюдаемых точек кривой блеска от теоретической модели

Элемент	$r_1$	$r_2$	$u_1$	$u_2$	$i$	$e$
Значение	$0.071 \pm 0.005$	$0.051 \pm 0.005$	0.56 (фикс.)	0.56 (фикс.)	$87.1^\circ \pm 0.8^\circ$	$0.31 \pm 0.01$
Элемент	$\omega$	$\phi_{II}$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$\sigma_{o-c}$
Значение	$355^\circ \pm 5^\circ$	$0.6946 \pm 0.0003$	$0.657 \pm 0.006$	$0.341 \pm 0.005$	$0.002 \pm 0.005$	$0.0091^m$

**таблица 3.** Фотометрические элементы V0409 Cam, полученные в фильтре V в 2010–2011 гг. Обозначения такие же, как в таблице 2. Используются эфемериды из работы [22]

Элемент	$r_1$	$r_2$	$u_1$	$u_2$	$i$	$e$
Значение	$0.096 \pm 0.006$	$0.096 \pm 0.006$	0.60 (фикс.)	0.59 (фикс.)	$85.0^\circ \pm 0.6^\circ$	$0.038 \pm 0.001$
Элемент	$\omega$	$\phi_{II}$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$\sigma_{o-c}$
Значение	$154.7^\circ \pm 0.3^\circ$	$0.4779 \pm 0.0004$	$0.480 \pm 0.004$	$0.520 \pm 0.004$	$0 \pm 0.005$	$0.0074^m$

Также определены два момента вторичных минимумов (см. таблицу 4). Положение вторичного минимума соответствует фазе 0.5. Амплитуды главного и вторичного минимумов близки и составляют  $V \approx 0.30$ . На рис. 3 приведены дифференциальные кривые блеска для этой звезды в 2010 и 2018 годах с опорой на звезду 2MASS J08560128+6936594. Система относится к короткопериодическим двойным типа W UMa.

*V0577 Oph.* Одна из компонент — звезда типа  $\delta$  Scuti (см., например, [13]), система не молодая, но все еще имеет эллиптическую орбиту и перспективна для определения вращения линии апсид (см., например, программу исследований, включающую эту звезду [14]).

*V1345 Aql.* Звезда имеет эллиптическую орбиту и перспективна для определения вращения линии апсид в ближайшее десятилетие.

*V0491 Vul.* Наши наблюдения нисходящей ветви кривой блеска свидетельствует о том, что главный минимум близок к величине, рассчитанной по эфемеридам [?]. Система имеет эллиптическую орбиту. В этой системе также имеется большое отличие положения вторичного минимума от фазы 0.5, возможно, свидетельствующее о близости долготы периастра к  $180^\circ$  или  $360^\circ$ , что может затруднить поиск апсидального движения.

*V2544 Cyg.* Система имеет эллиптическую орбиту ( $e = 0.08$ ) и довольно небольшой период, что уже позволило получить скорость движения линии апсид [15], период апсидального движения составляет  $36.6 \pm 9.8$  лет. Ранее для этой системы в ходе выполнения описываемой в данной работе программы наблюдений были получены полные кривые блеска внутри обоих минимумов, вычислены фотометрические элементы и моменты минимумов [16], моменты приводятся в таблице 4. Дальнейшие

наблюдения могут уточнить скорость апсидального движения.

*V0839 Cep.* Затменная двойная имеет эллиптическую орбиту, что позволяет надеяться получить для нее скорость вращения линии апсид в ближайшие годы.

*V2647 Cyg.* Период системы оказался примерно в 1.5 раза меньше, чем в старых эфемеридах [?]. Подробный анализ приведен в работе [17]. Система имеет практически круговую орбиту и не подходит для определения вращения линии апсид. Была получена новая эфемерида системы:

$$\text{Min I} = \text{HJD}2458127.1346 + 3.9035242E. \quad (2)$$

*V0898 Cep.* Анализ глубины минимумов в наших наблюдениях показал [18], что главный и вторичный минимумы следует поменять местами. Фаза вторичного минимума относительно главного 0.3273. Орбита звезды имеет большой эксцентриситет ( $e = 0.275$ ), но  $\omega = 177^\circ$  близка к одному из крайних положений, что существенно затруднит определение скорости вращения в течение нескольких ближайших лет.

*V0944 Cep, V0897 Cep, V1141 Cas.* Наблюдения кривых блеска во вторичном минимуме нам пока получить не удалось. Системы имеют эллиптическую орбиту (судя по сдвигу вторичного минимума относительно фазы 0.5 у предыдущих исследователей [1]), и это позволяет надеяться получить в них скорость вращения линии апсид в ближайшие годы.

*V0922 Cep.* У этой звезды нам удалось получить полные кривые блеска внутри обоих минимумов. В работе [18] приведены фотометрические элементы и моменты минимумов. Орбита имеет довольно большой эксцентриситет ( $e = 0.13$ ), но угол долготы периастра близок к одному из крайних положений ( $360^\circ$ ), что существенно затруднит определение скорости вращения в течение нескольких ближайших лет.

*V0957 Cep.* У этой системы нам удалось получить полные кривые блеска внутри обоих минимумов. В работе [19] приведены фотометрические элементы и моменты минимумов, в работе [20] приводятся моменты минимумов и оценка скорости апсидального движения. Новые моменты минимумов, полученные нами в 2017–2018 гг., наряду с минимумами из работ [19, 20] приводятся в таблице 4. Синфазные изменения моментов главного и вторичного минимумов могут свидетельствовать о присутствии в системе третьего тела.

*V0798 Cep.* Затменная двойная имеет эллиптическую орбиту. Большое отличие положения вторичного минимума от фазы 0.5 может свидетельствовать о том, что угол долготы периастра близок к одному из крайних положений ( $180^\circ$  или  $360^\circ$ ),

что существенно затрудняет определение скорости вращения в течение нескольких ближайших лет.

*V1176 Cas.* У этой системы нам удалось получить полные кривые блеска внутри обоих минимумов. В работе [21] приведены фотометрические элементы и моменты минимумов (эти моменты приводятся в таблице 4). Орбита звезды имеет небольшой эксцентриситет ( $e = 0.0145$ ), очень близка к круговой. Это мешает получить скорость вращения линии апсид для этой системы в ближайшие годы.

*OO Cam.* Имеет эллиптическую орбиту. Ширины минимумов заметно отличаются друг от друга (вторичный минимум шире), в то время как фаза вторичного минимума близка к 0.5. Величина долготы периастра орбиты близка к  $270^\circ$ . В этом положении угол периастра из решения кривой блеска определяется с высокой точностью. Звезда очень перспективна с точки зрения определения скорости вращения линии апсид в ближайшие годы.

*V0347 Cam.* Фотометрические элементы для этой системы удалось получить с использованием программы вычисления элементов орбиты и параметров звезд для разделенных систем методом минимизации. В таблице 3 приведены элементы и их значения, которые получаются в результате расчетов. Орбита звезды имеет большой эксцентриситет, но угол долготы периастра близок к одному из крайних положений ( $360^\circ$ ), что существенно затруднит определение скорости вращения в течение нескольких ближайших лет.

*V0409 Cam.* Нам удалось по кривым блеска получить фотометрические элементы для этой системы. В работах [1] и [22] главный и вторичный минимумы переставлены местами. С целью расчета периода апсидального движения мы взяли эфемериды из работы [22] и посчитали значения элементов (см. таблицу 3), поменяв местами главный и вторичный минимумы по сравнению с работой [1]. Эксцентриситет орбиты оказался равным в пределах ошибок значению эксцентриситета в работе [22]. Для вычисления скорости вращения мы зафиксировали значение  $e = 0.038$  и получили значение долготы периастра, что позволило нам найти апсидальный период, он равен  $124 \pm 50$  года, это значение пересекается с диапазоном ошибок в работе [22], где он равен  $159 \pm 37$  лет. Так как для определения параметров в таблице 3 используется компиляционная кривая блеска, то их значения подлежат уточнению в будущем при получении длительных качественных и по-возможности непрерывных кривых блеска.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получено 43 момента минимумов кривых блеска для 21 звезды из таблицы 1. Для

**Таблица 4.** Моменты минимумов и орбитальные периоды изучаемых систем, определенные в данной работе (см. также: V2544 Cyg [16], V2647 Cyg [17], V0898 Cep и V0922 Cep [18], V0957 Cep [19, 20], V1176 Cas [21]). «New EW» — звезда 2MASS J08561386+6934210, которая в данной работе была определена в качестве затменной двойной с кривой блеска типа EW

Система	Минимум	HJD–2400000	$P_{orb}$ (новые)	Система	Min	HJD–2400000	$P_{orb}$ (новые)
V2778 Ori	I	55571.8641	14.387665	V0922 Cep	I	55807.1987	3.574973
	I	55600.6396			II	55809.2886	
V0645 Aur	I	55243.3841	10.892486	V0957 Cep	I	55122.1578	1.988728
	I	56975.2912			II	55121.3150	
DR CMi	I	56977.3613	23.77018		I	55806.2827	
PS UMa	I	56088.3233	9.271680		II	55819.3656	
New EW	II	55276.9115	0.423982		II	56533.3261	
	II	55291.7546		I	56536.1521		
V0577 Oph	I	55789.253	6.079093		II	57557.5182	
V1345 Aql	I	58359.1881	3.0283155		I	58123.1545	
V0491 Vul	II	57197.4175	7.669901	V0798 Cep	II	57030.3476	16.08015
V2544 Cyg	I	55004.4386	2.093731	V1141 Cas	I	58362.3166	6.909437
	II	55066.3026		V1176 Cas	II	55050.3522	6.334431
V0839 Cep	I	58124.1031	9.963370		I	55192.8441	
	II	58358.3541		OO Cam	II	55244.2907	8.119048
V2647 Cyg	I	55043.3510	3.903524		I	55540.7203	
	II	55193.6373			II	55617.7658	
	I	58127.1346		V0347 Cam	II	55746.4375	9.454541
	II	58129.0864			II	55585.7106	
V0898 Cep	I	55437.2944	2.8747744		I	55531.8708	
	II	55438.2353		V0409 Cam	II	55226.8570	6.676472
V0944 Cep	I	55434.2968	6.560007		I	55510.4590	
	II	55434.2968			II	55533.9750	
V0897 Cep	I	55791.2774	4.487217				

двух звезд определены фотометрические элементы. Одна из контрольных звезд оказалась ранее неизвестной короткопериодической переменной типа W UMa, найден ее период и глубина минимумов в фильтре V, а также приведено 2 момента минимумов. Для большого количества звезд моменты минимумов оказались сильно смещены (вплоть до 5–6 часов) относительно вычисленного по эфемеридам из работы [1] из-за неточного периода, взятого при расчетах. После получения моментов минимумов для каждой звезды вычислено новое значение периода с точностью до шестого знака

после запятой. В дальнейшем для расчетов моментов минимумов можно использовать эфемериды из работы [1] (см. начальные эпохи в таблице 1), но с уточненным значением периода, который мы вычислили для этих звезд (в таблице 4).

Для 5 звезд из 21 звезды по нашим оценкам долгота периастра орбиты  $\omega$  близка к  $180^\circ$  или  $360^\circ$ , то есть, орбита находится в одном из крайних положений, в этом случае отличие фазы вторичного минимума от фазы 0.5 максимальное. Скорость изменения смещения  $\varphi$  вторичного минимума относительно фазы 0.5 задается соотношением:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{e}{\pi} \sin \omega \left( 1 - \frac{1}{\sin^2 i} \right) \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

из которого видно, что максимальная скорость изменения фазы вторичного минимума достигается при  $\sin \omega \approx 1$  (то есть,  $\omega = 90^\circ, 270^\circ$ ), минимальная скорость соответствует  $\sin \omega \approx 0$  (то есть,  $\omega = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ ). Чем дальше фаза от значений  $180^\circ$  и  $360^\circ$ , тем точнее можно найти изменение фазы вторичного минимума, а значит, точнее можно определить долготу периастра и эксцентриситет орбиты.

К настоящему моменту различными авторами получены оценки скорости апсидального движения для V2544 Cyg, V0957 Cyg, V0409 Cam. Наиболее перспективны звезды с точки зрения возможности определения апсидального вращения в течение нескольких ближайших лет системы OO Cam и PS UMa. Также интерес представляют V2778 Ori, V1066 Cas, V0839 Cep, V1141 Cas, V0944 Cep. Для остальных звезд, рассмотренных в этой работе, получение быстрого и надежного результата затруднено либо из-за очень маленького эксцентриситета орбиты, либо из-за положения долготы периастра, близкого к углам  $180^\circ$  или  $360^\circ$ .

Системы PS Uma, V0839 Cep, V0409 Cam также изучались в работе [22].

### БЛАГОДАРНОСТИ

This research has made use of the NASA/ IPAC Infrared Science Archive, which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration. This research has made use of the SIMBAD database, operated at CDS, Strasbourg, France. This research has made use of NASA's Astrophysics Data System.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа А. В. Кусакина поддержана в рамках Проекта №BR05236322 «Исследования физических процессов во внегалактических и галактических объектах и их подсистемах» Министерства образования и науки Республики Казахстан.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. A. Otero, P. Wils, G. Hoogeveen, and P. A. Dubovsky, *Information Bulletin on Variable Stars* **5681**, 1 (2006).
2. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, et al., *Astronomy Reports* **61**, 80 (2017).
3. L. Lindegren, J. Hernández, A. Bombrun, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A2 (2018).
4. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, et al., *Astron. and Astrophys.* **143**, 9 (2000).
5. N. E. Kurochkin, *Astronomicheskij Tsirkulyar* **1131**, 7 (1980).
6. S. Y. Shugarov, *Astronomicheskij Tsirkulyar* **1359**, 4 (1985).
7. T. E. Sterne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **99**, 662 (1939).
8. K. F. Khaliullin, S. A. Khodykin, and A. I. Zakharov, *Astrophys. J.* **375**, 314 (1991).
9. V. Kozyreva, A. Kusakina, and A. Bogomazov, *Res. Astron. and Astrophys.* **18**, 010 (2018).
10. N. I. Shakura, *Sov. Astron. Lett.* **11**, 224 (1985).
11. T. Borkovits, E. Forgács-Dajka, and Z. Regály, *Astron. and Astrophys.* **473**, 191 (2007).
12. V. S. Kozyreva and A. I. Zakharov, *Astronomy Letters* **27**, 712 (2001).
13. K. Szatmary, *Journal of the American Association of Variable Star Observers* **19**, 52 (1990).
14. F. Kahraman Aliçavuş, E. Soyduğan, B. Smalley, and J. Kubát, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **470**, 915 (2017).
15. İ. Bulut and A. Bulut, *Acta Astronomica* **65**, 127 (2015).
16. V. S. Kozyreva, A. V. Kusakina, and L. A. Bagaev, *Information Bulletin on Variable Stars* **5909**, 1 (2009).
17. V. S. Kozyreva and et al., *Information Bulletin on Variable Stars*, in press (2019).
18. V. S. Kozyreva and A. V. Kusakina, *Astrophysics* **59**, 38 (2016).
19. V. S. Kozyreva, A. V. Kusakina, and J. Menke, *Information Bulletin on Variable Stars* **6020**, 1 (2012).
20. V. S. Kozyreva and A. V. Kusakina, *Astrophysics* **57**, 221 (2014).
21. V. S. Kozyreva, A. V. Kusakina, T. Krajci, et al., *Astrophysics* **56**, 19 (2013).
22. P. Zasche, M. Wolf, R. Uhlař, et al., *Astron. and Astrophys.* **619**, A85 (2018).

**Photometric Studies of 21 Eclipsing Binaries with Eccentric Orbits****V. S. Kozyreva, A. V. Kusakin, T. Krajci, and A. I. Bogomazov**

The paper describes a target setting of searching for apsidal motion in 21 eclipsing binaries. We estimate the capability of its determination for the systems of interest in the coming years, as well as present results of observations in 2009–2018, in which the minima of the light curves of these stars have been obtained. The accuracy of orbital period determination of the studied binaries is 10–100 times greater in comparison with the previously available data. For two systems, photometric elements are determined. As a by-product of the study, a close eclipsing binary of the W UMa type was discovered.

Keywords: *stars: binaries: eclipsing*