

## СПЕКТРАЛЬНОЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО ЗАТМЕННОГО ПОЛЯРА GAIA23CER

© 2024 г. А. И. Колбин<sup>1,2,5\*</sup>, Е. П. Павленко<sup>3\*\*</sup>, В. Ю. Кочкина<sup>1,2</sup>, А. С. Винокуров<sup>1</sup>, С. Ю. Шугаров<sup>4,6</sup>,  
А. А. Сосновский<sup>3</sup>, К. А. Антонюк<sup>3</sup>, О. И. Антонюк<sup>3</sup>, Н. В. Пить<sup>3</sup>, М. В. Сусликов<sup>1,2</sup>, Э. К. Галимова<sup>2</sup>,  
Н. В. Борисов<sup>1</sup>, А. Н. Буренков<sup>1</sup>, О. И. Спиридонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup> Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

<sup>4</sup> Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранска Ломница, Словакия

<sup>5</sup> Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

<sup>6</sup> Государственный астрономический институт им. Штернберга МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 10.04.2024 г.

После доработки 04.05.2024 г.; принята к публикации 06.05.2024 г.

Представлены результаты оптического исследования затменного поляра Gaia23cer. Проведен анализ орбитальной переменности блеска в высоком ( $\langle r \rangle \approx 16.5^m$ ) и низком ( $\langle r \rangle \approx 19.2^m$ ) состояниях. Система имеет орбитальный период  $P_{\text{orb}} = 102.0665 \pm 0.0015$  мин и демонстрирует глубокие затмения продолжительностью  $\Delta t_{\text{ecl}} = 401.30 \pm 0.81$  с. Спектры имеют красный циклотронный континуум с зеemanовским абсорбционным триплетом линии H $\alpha$ , формирующимся в магнитном поле с индукцией  $B = 15.2 \pm 1.1$  МГс. Источник эмиссионных линий имеет высокую поламплитуду лучевых скоростей ( $K \approx 450$  км/с), а его затмение запаздывает относительно затмения белого карлика. Путем моделирования спектрального распределения энергии получены оценки массы  $M_1 = 0.79 \pm 0.03 M_{\odot}$  и температуры  $T = 11350 \pm 650$  К белого карлика. Продолжительность затмения соответствует массе донора  $M_2 = 0.10 - 0.13 M_{\odot}$  и наклонению орбитальной плоскости  $i = 84.3 - 87.0^\circ$ . Из анализа эффектов эллипсоидальности, наблюдаемых в низком состоянии, а также блеска системы в затмении, сделана оценка температуры донора  $T \approx 2900$  К.

*Ключевые слова:* звезды: новые, катаклизмические переменные; индивидуальные: Gaia23cer; методы: фотометрия, спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0320010824050011, EDN: MYPHJ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Поляры (или звезды типа AM Her) представляют собой тесные двойные системы, состоящие из сильно замагниченного ( $B \sim 10 - 100$  МГс) белого карлика и маломассивной холодной звезды (обычно M-карлика), заполняющей свою полость Роша. Сильное магнитное поле полярных звезд препятствует образованию аккреционного диска, направляя аккрецируемое вещество по силовым линиям к окрестностям магнитных полюсов. При взаимодействии падающего газа с поверхностью белого карлика образуются горячие ( $T \sim 10$  кэВ) аккреционные пятна, которые являются источниками тормозного рентгеновского излучения и поляризованного циклотронного излучения в оптическом и инфракрасном диапазонах. Сильное магнитное поле также делает поляры синхронными системами, где период вращения белого карлика равен орбитальному периоду. Для более детального знакомства со звездами типа AM Her мы отсылаем читателя к обзорной работе Кроппер (1990).

Исследования звезд типа AM Her важны по нескольким аспектам. Во-первых, изучение полярных звезд необходимо для понимания происхождения и структуры магнитных полей белых карликов в двойных системах (Беллони и Шрайбер, 2020; Шрайбер и др., 2021). Во-вторых, из-за большого радиуса магнитосферы, сравнимого с большой полуосью, системы типа AM Her удобны для изучения физики взаимодействия аккрецируемого газа с магнитными полями аккреторов (Хамери и др., 1986; Ли, 1999). В-третьих, исследование полярных звезд важно для понимания особенностей эволюции тесных двойных систем с замагниченными компонентами (Беллони и др., 2020). Для выполнения работ по указанным направлениям особенно важны затменные системы. Затмения позволяют находить надежные параметры двойной системы (массы компонент, наклонение орбиты). Кроме того, моделирование профиля затмения в полярных звездах позволяет восстановить геометрию аккреционного течения (см, например, Харроп-Аллин и др., 1999, 2001).

Объект Gaia23cer (ZTF18abunixr, AT2023row;  $\alpha = 01^h 26^m 07.79^s$ ,  $\delta = +12^\circ 10' 48.94''$ ) обнаружен как оптический транзиент по наблюдениям обсерватории

\* Электронный адрес: kolbinalexander@mail.ru

\*\* Электронный адрес: eppavlenko@gmail.com

Gaia (Ходжкин и др., 2023). Симон и др., 2023 обнаружили фотометрическую переменность с периодом 0.065(6) сут и глубокими затмениями. Сосновский и др. (2023) выполнили многополосные фотометрические наблюдения Gaia23сег. Сообщается о двухгорбых кривых блеска с глубокими затмениями ( $\Delta B \approx \Delta V \approx \Delta R_C \approx 5^m$  и  $\Delta I_C \approx 3^m$ ) продолжительностью  $\approx 7.6$  мин. На основе анализа фотометрического поведения Gaia23сег авторами сделано предположение о принадлежности объекта к звездам типа AM Her.

В настоящей работе выполнено оптическое исследование Gaia23сег с использованием фотометрических и спектральных наблюдений. В следующем разделе описываются проведенные наблюдения и методы обработки полученного материала. Далее, в разделе 3, проводится анализ многолетней и внутрисуточной переменности поляра. В разделе 4 анализируется спектральное поведение Gaia23сег. Определение параметров белого карлика и донора проводится в разделах 5 и 6 соответственно. В заключении резюмируются результаты выполненной работы.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

### 2.1. Спектроскопия

Набор спектров Gaia23сег получен на 6м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в ночи 12/13 сентября и 19/20 октября 2023 г. Наблюдения проводились с использованием фокального редуктора SCORPIO-1<sup>1</sup> в режиме длиннощелевой спектроскопии Афанасьев и Моисеев (2005). Журнал спектральных наблюдений приведен в табл. 1.

В первую ночь использовалась объемная фазовая голографическая решетка VPHG1200B (1200 шт./мм), с которой покрывался диапазон длин волн  $\lambda = 3700\text{--}5300$  Å. Было получено 10 спектров вблизи фазы затмения<sup>2</sup> с экспозициями 120 с при ширине щели 1.2". Наблюдения выполнялись в хороших астроклиматических условиях с размером звездного изображения  $\approx 2.3''$ .

Наблюдения 19/20 октября 2023 г. проводились с решеткой VPHG1200G (1200 шт./мм) и щелью шириной 1.2", которые обеспечивают охват спектрального диапазона  $\lambda = 3900\text{--}5700$  Å, с разрешением  $\Delta\lambda \approx 5$  Å. В эту же ночь получено 4 спектра с решеткой VPHG550G (550 шт./мм), с которой покрывается диапазон  $\lambda = 4000\text{--}7200$  Å с разрешением  $\Delta\lambda \approx 8$  Å (ширина щели была также равна 1.2"). Наблюдения проводились в плохих погодных условиях с легкой облачностью и высоким (FWHM  $\approx 5''$ ) размером звезд-

ного изображения. Щель спектрографа была ориентирована по линии, соединяющей Gaia23сег и соседнюю яркую звезду (Gaia DR2 2586433433115244288,  $G = 16.76^m$ ). Из-за близкого расположения звезды-соседки к Gaia23сег (расстояние  $\approx 4.2''$ ) профили этих источников перекрывались в условиях сильно турбулентной атмосферы.

Обработка спектрального материала проводилась при помощи средств пакетов IRAF<sup>3</sup> и MIDAS. Из изображений со спектрами были удалены кадры электронного нуля, на основе снимков лампы плоского поля выполнена коррекция за неоднородную чувствительность прибора, а при помощи кадров лампы Th–Ag проведена калибровка спектров по длинам волн. Удаление следов космических частиц проводилось при помощи кода LACosmic ван Доккум (2001). Из-за низкого качества звездного изображения 19/20 октября профиль Gaia23сег перекрывался с профилем соседней яркой звезды. Для разделения спектров двух источников их профили вдоль щели аппроксимировались суммой двух гауссиан. Разделение гауссиан было зафиксировано на значении, соответствующем угловому расстоянию между источниками. Ширины гауссиан считались одинаковыми и плавно изменяющимися с длиной волны. Потоки излучения от звезды измерялись по площади вписанных гауссиан. Поскольку наблюдения выполнялись в условиях переменной облачности, найденные потоки могут содержать значительные ошибки и в настоящей работе анализировалась лишь форма спектральной плотности потока. Для каждого полученного спектра вычислены барицентрические юлианские даты BJD и барицентрические поправки к лучевой скорости.

### 2.2. Фотометрия

Фотометрические наблюдения Gaia23сег проводились с сентября 2023 г. по январь 2024 г. на нескольких телескопах: 2.6-м телескопе ЗТШ и 1.25-м телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории РАН; 60-см телескопе Цейсс-600 (G2; Татранска Ломница, Словакия); 1-м телескопе Цейсс-1000 Специальной астрофизической обсерватории РАН. Они оснащались ПЗС-фотометрами с фильтрами фотометрической системы Джонсона–Коузинса. Дополнительные наблюдения выполнены без использования фильтров на телескопе К-380 Крымской астрофизической обсерватории. Журнал фотометрических наблюдений Gaia23сег представлен в табл. 2.

Обработка полученных ПЗС-кадров включала в себя вычитание электронного нуля, деление на изображения плоского поля и удаление следов космических частиц. Для изображений, полученных в полосе  $I_C$ , также выполнялось устранение фрингов.

<sup>1</sup>Описание прибора SCORPIO-1 можно найти по адресу: <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html>

<sup>2</sup>Четвертая экспозиция не используется в дальнейшем анализе, поскольку она совпала с наиболее глубокой частью затмения и на полученном спектре объект не детектируется.

<sup>3</sup>Пакет программ обработки и анализа астрономических данных IRAF доступен по адресу <https://iraf-community.github.io>

**Таблица 1.** Журнал спектральных наблюдений Gaia23cer на БТА/SCORPIO. Перечислены даты наблюдений, количество полученных спектров, использованные гризмы, спектральные диапазоны, спектральные разрешения, а также продолжительности экспозиций ( $\Delta t_{\text{exp}}$ )

Дата (UT)	$N$	Гризма	Диапазон, Å	$\Delta\lambda$ , Å	$\Delta t_{\text{exp}}$ , с
12/13 сен. 2023 г.	10	VPHG1200B	3700–5300	5.5	120
19/20 окт. 2023 г.	17	VPHG1200G	3900–5700	5.0	300
19/20 окт. 2023 г.	4	VPHG550G	4000–7200	8.0	300

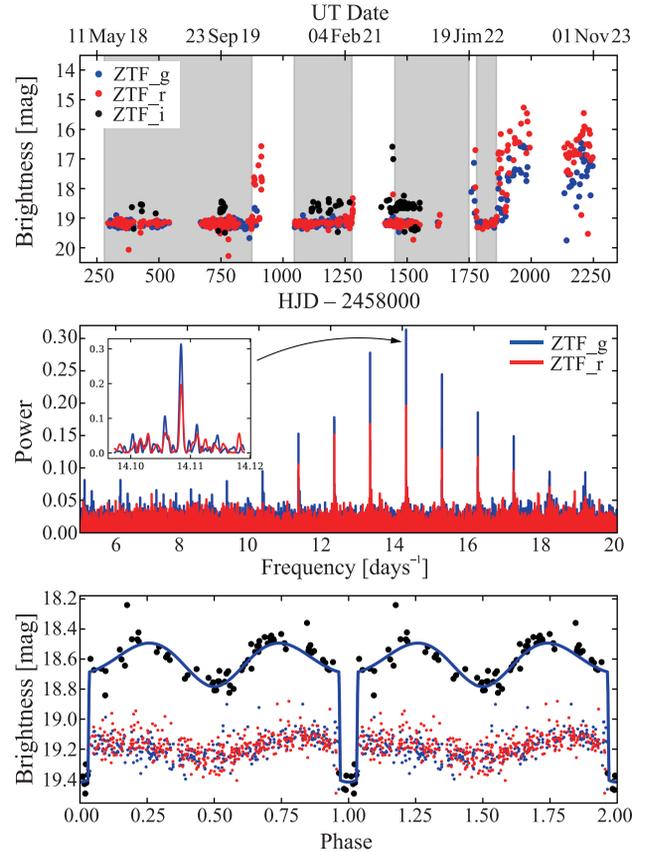
Из-за наличия яркого соседа измерение потоков Gaia23cer проводилось методом PSF-фотометрии, реализованного в программной библиотеке photutils<sup>4</sup>.

### 3. АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИИ

Для анализа долговременной переменности Gaia23cer нами использованы данные обзора ZTF Маски и др. (2018). На рис. 1 представлены кривые блеска Gaia23cer в полосах  $g$ ,  $r$ ,  $i$ , заимствованные из каталога ZTF DR20 и охватывающие  $\approx 5.5$  лет наблюдений. В них проявляются низкое ( $\langle g \rangle \approx \langle r \rangle \approx 19.2^m$ ) и высокое состояния ( $\langle r \rangle \sim 16.5^m$ ), соответствующие разным темпам аккреции. На том же рисунке представлены периодограммы Ломба–Скаргла Ван-дерПлас (2018), построенные по данным в низком состоянии. На периодограммах выделяется пик мощности на частоте  $f = 14.10845 \pm 0.0002 \text{ сут}^{-1}$  (период  $P = 102.0665 \pm 0.0015 \text{ мин}$ ), а также более слабые пики на частотах  $f \pm n$  ( $n = 1, 2, \dots \text{ сут}^{-1}$ ), обусловленные модуляцией наблюдений с суточным вращением Земли. На рис. 1 также представлены фазовые кривые блеска, полученные для найденного периода Gaia23cer. Из-за наличия выраженных затмений очевидно, что этот период является орбитальным. Имеется слабая внезатменная переменность в полосах  $g$  и  $r$  с амплитудой  $\approx 0.2^m$ . В полосе  $i$  внезатменная переменность имеет двухгорбую структуру и более высокую амплитуду ( $\Delta i \approx 0.3^m$ ). Сравнимая амплитуда внезатменной переменности ожидается для эффекта эллипсоидальности донора при типичных для  $P_{\text{orb}} \approx 100 \text{ мин}$  параметрах компонент системы (см. подробнее раздел 6).

Фазовые кривые блеска Gaia23cer, полученные на основе наших осенних наблюдений 2023 г., показаны на рис. 2. Они застали Gaia23cer в высоком состоянии с внезатменным блеском  $V = 16 - 17^m$ . Кривые блеска в полосах  $V$ ,  $R_C$ ,  $I_C$  имеют вне затмений двухгорбую форму с расстоянием между горбами  $\approx 1/2 P_{\text{orb}}$  и амплитуду блеска  $\Delta V \approx 1^m$ ,  $\Delta R_C \approx 1.2^m$ ,  $\Delta I_C \approx 1.3^m$ . Примечательно, что в кривых блеска отсутствует фаза плато с пониженным блеском и протяженностью  $\approx 1/2 P_{\text{orb}}$ . Для затменной системы (т.е. системы с высоким наклоном оси вращения белого карлика  $i \sim 90^\circ$ ) такую фазу следовало бы ожидать в случае одного аккреционного пятна, когда оно на-

<sup>4</sup>Библиотека для поиска источников и фотометрии photutils доступна по адресу <https://photutils.readthedocs.io/en/stable>



**Рис. 1.** Верхняя панель: долговременные кривые блеска Gaia23cer, полученные обзором ZTF в полосах  $g$ ,  $r$ ,  $i$  (синие, красные, черные точки соответственно). Серыми областями указаны низкие состояния объекта. Средняя панель: периодограммы Ломба–Скаргла, полученные по кривым блеска в полосах  $g$  и  $r$  (синяя и красная линии соответственно) в низком состоянии. Нижняя панель: фазовые кривые блеска в полосах  $g$ ,  $r$ ,  $i$  (синие, красные, черные точки соответственно) в низком состоянии, построенные согласно эфемеридам (1). Синей линией показана теоретическая кривая блеска, рассчитанная для модели полуразделенной двойной системы (см. раздел 6).

ходится за наблюдаемым диском белого карлика (см., например, Колбин, Борисов и др., 2022). Отсутствие фазы плато может указывать на двухполюсной режим аккреции в высоком состоянии, поскольку в случае двух или более пятен хотя бы одно из них будет видимо наблюдателю в произвольную фазу орбитального периода. На рис. 2 также показана кривая блеска Gaia23cer, полученная в низком состоянии 29/30 января 2024 г. в полосе  $V$ . В отличие от высокого со-

**Таблица 2.** Журнал фотометрических наблюдений Gaia23сер. Перечислены телескопы и ПЗС-приемники, задействованные в наблюдениях, продолжительность наблюдений, количество полученных изображений ( $N$ ), фотометрические полосы (integral — наблюдения без фильтра), а также продолжительности экспозиций ( $\Delta t_{\text{exp}}$ )

Продолжительность, BJD-2459000	$N$	Фильтр	$\Delta t_{\text{exp}}$ , с	Продолжительность, BJD-2459000	$N$	Фильтр	$\Delta t_{\text{exp}}$ , с
ЗТШ/ELSE-i 1K×1K BI MID				1215.540	1	U	825
1201.427–1201.589	83	B	30	1215.507–1215.566	6	V	60
1201.427–1201.590	81	V	30	1215.500–1215.619	43	R <sub>C</sub>	150
1201.427–1201.591	84	R <sub>C</sub>	30	1215.510–1215.569	13	I <sub>C</sub>	30
1201.426–1201.590	85	I <sub>C</sub>	30	1235.349–1235.576	53	B	180
1229.287–1229.399	283	I <sub>C</sub>	30	1235.317–1235.346	17	V	150
1230.349–1230.430	99	B	60	1236.304–1236.522	43	B	180
1258.356–1258.532	239	I <sub>C</sub>	60	1236.302–1236.308	2	V	120
Цейсс-1000/EEV 42-40 (2K × 2K)				1236.300–1236.419	72	R <sub>C</sub>	120
1201.487–1201.585	153	V	20	1339.198–1339.302	35	V	300
1202.415–1202.485	120	I <sub>C</sub>	20	АЗТ-11/ProLine PL23042			
1231.315–1231.423	168	I <sub>C</sub>	20	1207.267–1207.373	49	I <sub>C</sub>	180
Цейсс-600/FLI ML 3041				1208.256–1208.393	64	I <sub>C</sub>	180
1203.412–1203.558	19	B	60–150	1209.248–1209.411	75	I <sub>C</sub>	180
1203.417–1203.632	35	U	240	1210.269–1210.391	151	R <sub>C</sub>	60
1203.426–1203.559	8	V	30	1211.278–1211.358	197	I <sub>C</sub>	60
1203.428–1203.634	59	R <sub>C</sub>	120	1213.253–1213.339	155	I <sub>C</sub>	60
1203.412–1203.558	10	I <sub>C</sub>	30	1214.268–1214.348	195	I <sub>C</sub>	60
1205.438–1205.487	18	R <sub>C</sub>	120	1215.250–1215.414	203	I <sub>C</sub>	60
1205.439	1	I <sub>C</sub>	90	1216.264–1216.410	180	I <sub>C</sub>	60
1209.527–1209.531	2	B	120	1217.292–1217.403	134	I <sub>C</sub>	60
1209.528–1209.602	38	V	150	1221.281–1221.503	273	I <sub>C</sub>	60
1209.525–1209.530	2	R <sub>C</sub>	120	K-380/APOGEE E47			
1209.533–1209.540	2	I <sub>C</sub>	90	1208.437–1208.606	149	integral	180
1214.414–1214.533	7	B	45	1209.432–1209.582	133	integral	90
1214.510	1	U	525	1212.406–1212.597	169	integral	90
1214.412–1214.532	7	V	30	1221.365–1221.537	81	integral	180
1214.406–1214.532	10	R <sub>C</sub>	30	1223.301–1223.482	158	integral	90
1214.429–1214.647	123	I <sub>C</sub>	150				
1215.522–1215.565	4	B	45				

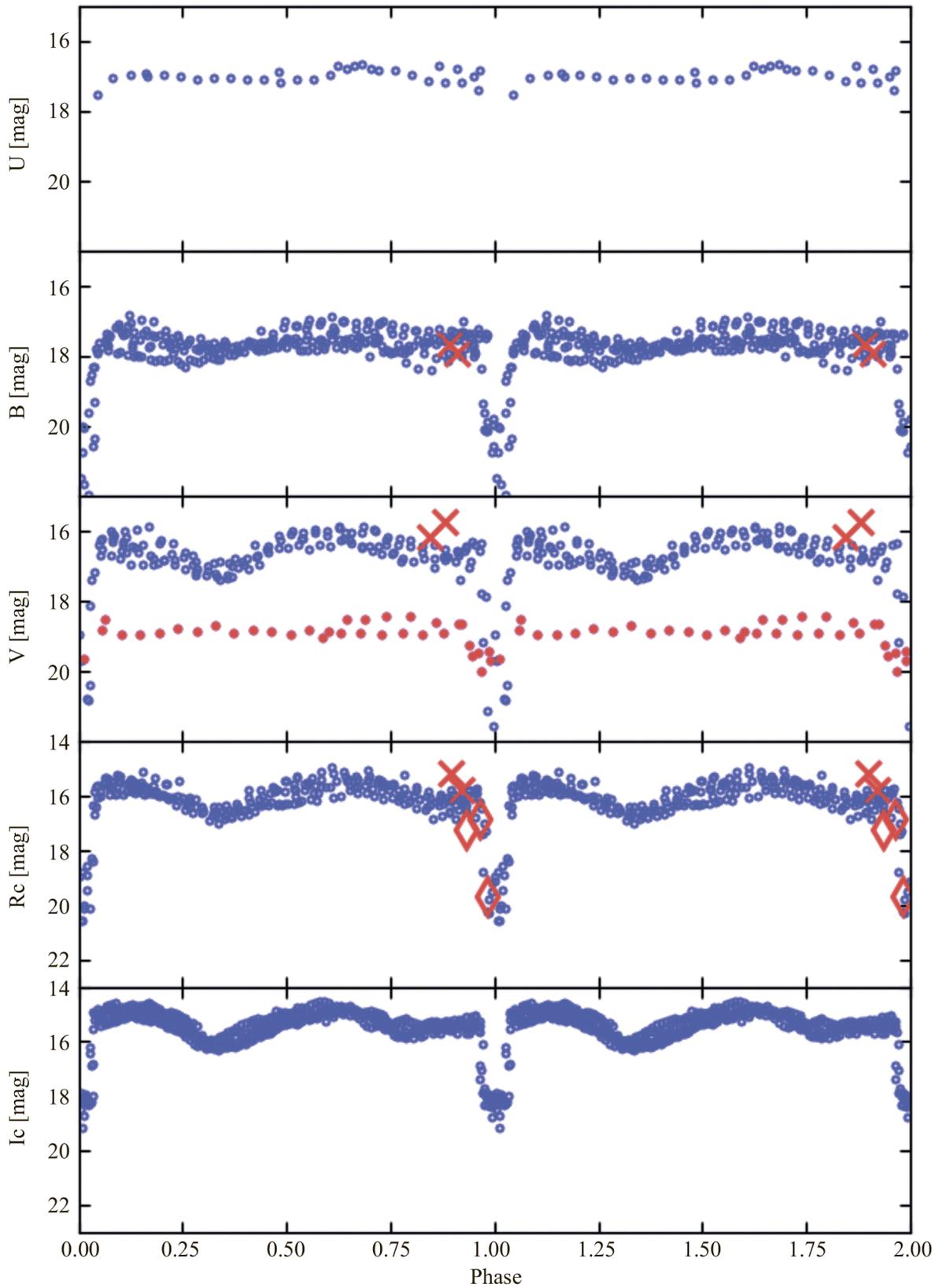
стояния, внезатменная переменность менее выражена и не превышает  $\Delta V = 0.3^m$ . Путем совместного анализа данных ZTF, ЗТШ, АЗТ-11 и Цейсс-600 получены эфемериды середины затмения

$$\text{HJD}_{\text{min}} = 2460201.43461(17) + 0.070879652(9) \times E. \quad (1)$$

На рис. 3 показаны профили затмения Gaia23сер, полученные на телескопе ЗТШ в полосах В и I<sub>C</sub>. В полосе В наблюдается асимметрия профиля затмения с плавным входом и быстрым выходом. Такое поведение блеска в затмении является типичным для полярных в высоком состоянии и интерпретируется покрытием донором яркой аккреционной струи (см., например, Родригес и др., 2023; Борисов и др., 2016). В полосе I<sub>C</sub> отношение свечения аккреционной струи к суммарному свечению аккреционного пятна и белого карлика меньше, что выражается в более слабом

проявлении струи в профиле затмения (аналогичное ослабление потока излучения от струи с длиной волны зарегистрировано, например, в NU Aqr Харроп-Аллин и др. (1999)).

Для оценки продолжительности затмения его профиль в полосе I<sub>C</sub> аппроксимировался трапециодом. За продолжительность затмения белого карлика была принята ширина трапецоида на половине глубины  $\Delta t_{\text{ecl}} = 401.30 \pm 0.81$  с. Измерение продолжительности входа в затмение  $\Delta t_{\text{ing}}$  (и равной ей продолжительности выхода) затруднительно из-за высокой длительности экспозиции, размазывающей профиль затмения. Однако из аппроксимации кривой блеска трапециодом можно наложить ограничение  $\Delta t_{\text{ing}} < 47 \pm 2$  с. Ошибки параметров затмения найдены методом Монте-Карло и соответствуют разбросу  $1\sigma$ .



**Рис. 2.** Кривые блеска Gaia23cer, полученные по наблюдениям осенью 2023 г. в полосах U, B, V, Rc, Ic (синие полые кружочки). Красными крестиками отмечены измерения блеска перед спектральными наблюдениями 12/13 сентября 2023 г., а красными ромбами — измерения блеска перед спектральными наблюдениями 19/20 октября 2023 г. Красными кружочками отмечены наблюдения Gaia23cer в низком состоянии 29/30 января 2024 г.

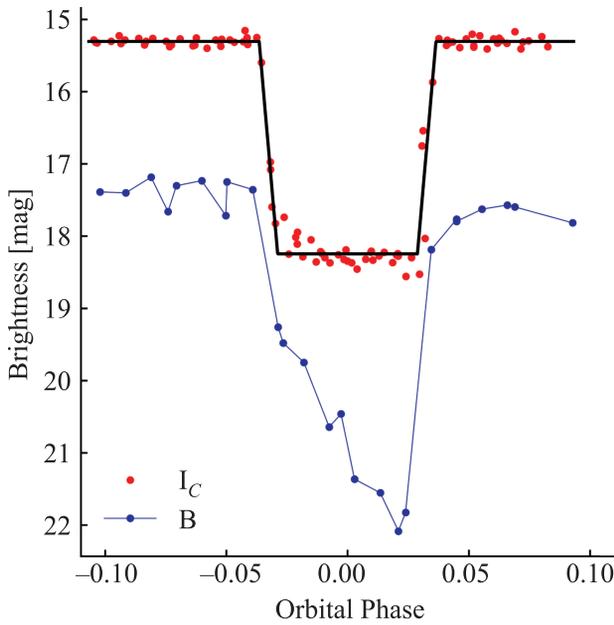


Рис. 3. Кривые блеска Gaia23cer около затмения в полосах V и  $I_C$ . Черная линия — аппроксимация профиля затмения трапецидом.

#### 4. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Усредненные спектры Gaia23cer по данным 12/13 сентября и 19/20 октября (для гризмы VPHG1200G) показаны на рис. 4а. Спектры содержат типичный для полярных звезд набор спектральных линий: бальмеровские линии водорода, линии нейтрального гелия и линию ионизованного гелия HeII  $\lambda 4686$ . Обращает на себя внимание сильное различие в остаточной интенсивности линии HeII  $\lambda 4686$  между двумя сетями спектральных наблюдений: в наблюдениях 19/20 октября эта линия практически исчезает, в то время как 12/13 сентября ее интенсивность составляет примерно половину от интенсивности линии H $\beta$ . Данное явление можно связать с переходом полярной звезды в пониженное состояние 19/20 октября. Действительно, фотометрические наблюдения на SCORPIO-1, выполненные сразу перед спектральными наблюдениями, показывают понижение блеска Gaia23cer на  $\Delta R_C = 1-1.5^m$  в ночь 19/20 октября по сравнению с ночью 12/13 сентября (см. рис. 2).

На рис. 4б показан набор профилей линий H $\beta$ , H $\gamma$  и HeII  $\lambda 4686$ , полученный около фазы затмения 12/13 сентября. Затмение источника эмиссий запаздывает относительно затмения белого карлика на  $\Delta\phi = 0.04 \pm 0.02$ . Это можно видеть из сравнения спектров, полученных в фазах  $\phi = 0.972$  и  $\phi = 0.042$ . Хотя первый спектр получен ближе к центру затмения белого карлика ( $\phi = 0$ ), чем второй, он демонстрирует значительно более сильные линии (в фазе  $\phi = 0.042$  видны лишь слабые следы линий). Отмеченное явление естественно при формировании ли-

ний в аккреционной струе. Известно, что струя, вытекающая из точки Лагранжа  $L_1$ , действием силы Кориолиса отклоняется от линии, соединяющей центры звезд двойной системы, в направлении орбитального движения донора. Соответственно, затмение струи донором происходит позднее затмения белого карлика. На рис. 4б также видна двухпиковая структура профилей линий H $\beta$  и HeII  $\lambda 4686$  на фазе  $\phi = 0.95$ . Вероятно, явление вызвано абсорбционной деталью вблизи центра линии, появившейся в результате покрытия оптически толстой аккреционной струей аккреционного пятна. Такое явление распространено у затменных полярных звезд (см., например, Кочкина и др., 2023; Родригес и др., 2023; Борисов и др., 2016).

Лучевые скорости Gaia23cer определялись путем аппроксимации гауссианой линии H $\beta$ , которая имела наилучшее отношение сигнал-шум в двух рядах спектральных наблюдений. Полученная по данным двух ночей кривая лучевых скоростей была свернута с орбитальным периодом и показана на рис. 5. Видно, что лучевые скорости модулированы с орбитальным движением и имеют высокую полуамплитуду  $K \approx 450$  км/с, свойственную переменным типа AM Her. Максимум лучевой скорости достигается около фазы орбитального периода  $\phi \approx 0$ , что также ожидаемо для системы типа AM Her (см., например, Борисов и др., 2016).

На рис. 6 показан усредненный спектр Gaia23cer, полученный при помощи гризмы VPHG550G. Он покрывает диапазон 4200–7100 Å и является довольно шумным из-за легкой облачности в период наблюдений. Спектр имеет красный циклотронный континуум без различимых циклотронных гармоник. Заметны слабые абсорбционные  $\sigma^-$ ,  $\pi$ ,  $\sigma^+$  компоненты зеемановского расщепления линии H $\alpha$ . Сравнение их положения с диаграммой расщепления линии H $\alpha$ , представленной на том же рисунке, дает значение индукции магнитного поля  $B = 15.2 \pm 1.1$  МГс. Отметим, что в представленном спектре удалена теллурическая франгоуферова линия V. Удаление линии выполнялось путем деления спектра полярной звезды на нормированный на континуум спектр звезды-стандарта. Длины волн компонентов зеемановского расщепления бальмеровских линий были рассчитаны с помощью кода Шимежек, Вуннер (2014).

#### 5. БЕЛЫЙ КАРЛИК

Спектральное распределение энергии Gaia23cer восстановлено на основе архивных наблюдений обсерватории GALEX Боселли и др. (2011) в полосах FUV ( $\lambda_{\text{eff}} \approx 1549$  Å) и NUV ( $\lambda_{\text{eff}} \approx 2303$  Å), данных обзоров SDSS (полосы  $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ; Ахумада и др., 2020) и Pan-STARRS Чамберс и др. (2016). К ним мы добавили потоки из обзора ZTF, соответствующие низкому состоянию полярной звезды. Согласно трехмер-

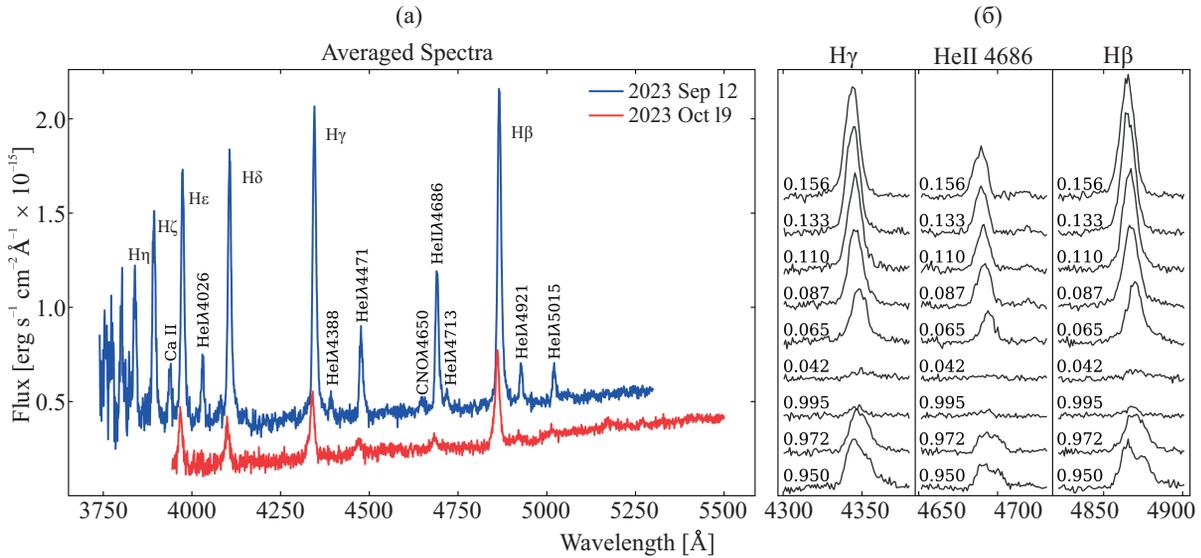


Рис. 4. а) — Усредненные спектры Gaia23cer по данным 12/13 сентября 2023 г. и 19/20 октября 2023 г. б) — Эволюция профилей линий H $\gamma$ , H $\beta$  и HeII  $\lambda$ 4686 около фазы затмения.

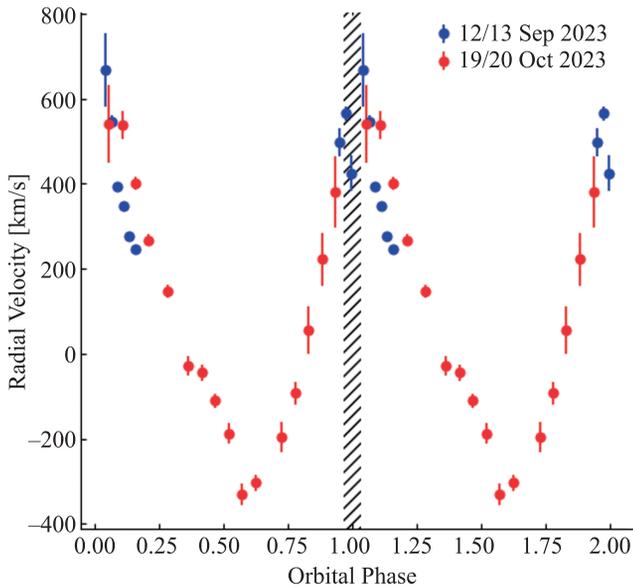


Рис. 5. Кривая лучевых скоростей Gaia23cer, построенная по данным наблюдений 12/13 сентября 2023 г. и 19/20 октября 2023 г. Заштрихованной областью указан промежуток времени, соответствующий затмению.

ным картам межзвездного поглощения STELISM<sup>5</sup> избыток цвета для Gaia23cer  $E(B - V) = 0.024 \pm 0.017^m$  с соответствующим поглощением  $A_V = 3.1E(B - V) = 0.074 \pm 0.053^m$ . Наблюдаемые потоки Gaia23cer были исправлены за межзвездную экстинкцию согласно кривой поглощения Фитцпатрик (1999). Полученное спектральное распределение энергии Gaia23cer показано на рис. 7. Из сравнения потоков ZTF с потоками SDSS и Pan-STARRS видно, что последние были из-

мерены в низком состоянии. Ввиду относительно слабого магнитного поля Gaia23cer, основным источником излучения в ультрафиолетовом диапазоне должен быть белый карлик. Также можно ожидать, что в низком состоянии основной вклад в оптическое излучение дает белый карлик.

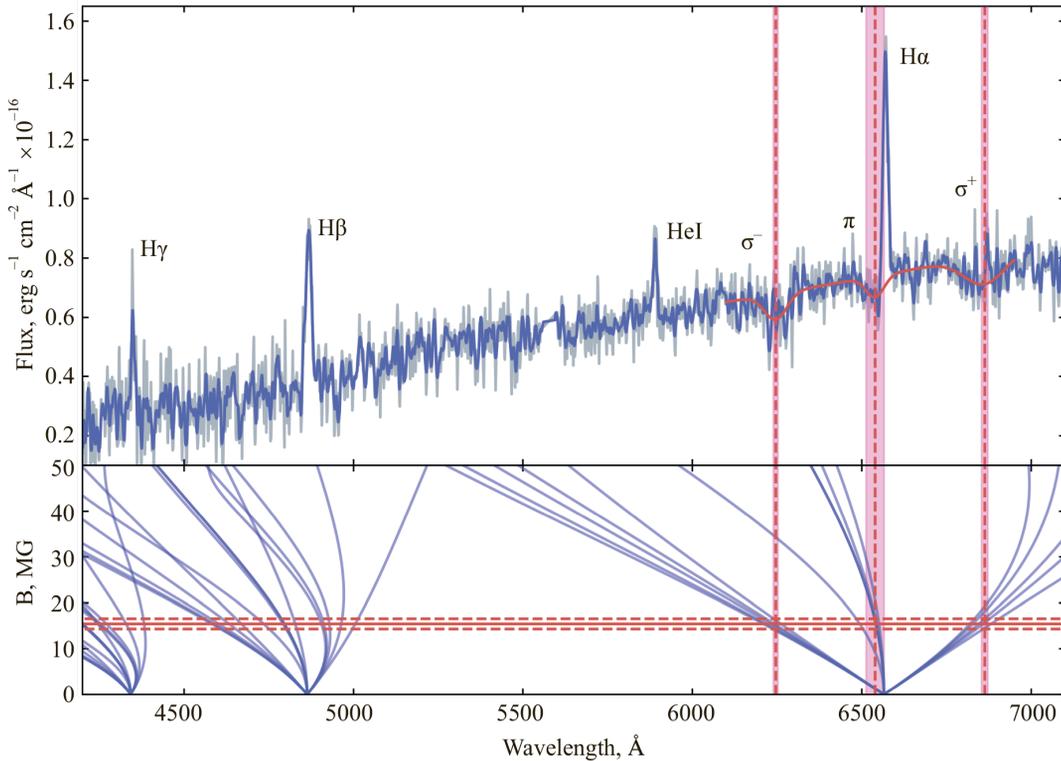
Мы попытались воспроизвести спектральное распределение энергии Gaia23cer на основе спектров моделей атмосфер водородных (DA) белых карликов, рассчитанных Кестер (2010). Теоретические спектры интерполировались по эффективной температуре  $T_{\text{eff}}$  и ускорению силы тяжести  $\log g$  при вычислении потоков для заданных параметров звезды. Теоретические потоки в фотометрических полосах вычислялись сверткой спектра белого карлика с соответствующими функциями пропускания<sup>6</sup>. Определение параметров белого карлика проводилось минимизацией квадратов отклонений наблюдаемых потоков  $F_V$  в фотометрических полосах от их теоретических оценок, т.е.

$$\chi^2 = \sum_i \left( \frac{F_i - \theta^2 \hat{F}_i / 4}{\sigma_i} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\theta$  — угловой диаметр белого карлика,  $\hat{F}$  — теоретический поток у поверхности звезды,  $\sigma$  — ошибка измерения потока. При свободном параметре  $\theta$  минимум  $\chi^2$  достигается при температуре  $T_{\text{eff}} = 11350 \pm 650$  К и  $\log g = 7.60 - 8.47$  (разброс параметров соответствует 95% уровню доверия). Диаграмма  $O-C$  для наилучшего решения представлена на рис. 7. На том же рисунке представлено сравнение оценок наблюдаемых потоков в центральных длинах волн фотометрических фильтров с теоретическим спектром белого карлика.

<sup>5</sup><https://stilism.obspm.fr>, см. подробнее Лальемен и др. (2014); Капитанио и др. (2017); Лальемен и др. (2018).

<sup>6</sup>Функции пропускания использованных фильтров доступны на сайте <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/>



**Рис. 6.** Верхняя панель: спектр Gaia23cer (серая линия), результат его сглаживания методом Савицкого–Голея (синяя линия), а также аппроксимация окрестностей линии H $\alpha$  суммой полинома низкой степени и трех гауссиан (красная линия). Нижняя панель: длины волн компонентов зеемановского расщепления линий H $\alpha$ , H $\beta$ , H $\gamma$  для диапазона индукции магнитного поля 0 – 50 МГс. Вертикальными линиями указано положение компонент зеемановского триплета H $\alpha$ , горизонтальными линиями – оценка индукции магнитного поля и ее неопределенность.

Карта распределения  $\chi^2$  с 95% доверительной областью представлена на рис. 8.

Приведенные выше параметры атмосферы белого карлика найдены из описания формы спектрального распределения энергии, при котором угловой диаметр  $\theta$  считался свободным параметром. Уточненное значение  $\log g$  можно найти из связи углового диаметра  $\theta$  с радиусом белого карлика  $R_1$ , который, в свою очередь, связан с массой как

$$R_1 = 0.78 \times 10^9 \text{ cm} \left[ \left( \frac{M_{\text{ch}}}{M_1} \right)^{\frac{2}{3}} - \left( \frac{M_1}{M_{\text{ch}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $M_{\text{ch}} = 1.44 M_{\odot}$  Нойнберг (1972). Требование согласованности вычисленного углового диаметра белого карлика с его радиусом можно сформулировать в виде уравнения

$$2 \frac{R_1(\log g)}{D} = \underset{\theta}{\text{argmin}} \chi^2(\theta, \log g, T_{\text{eff}}). \quad (4)$$

Таким образом, зная расстояние до объекта  $D$ , мы можем для набора температур решить последнее уравнение относительно  $\log g$ . Это дает нам еще одно решение в плоскости  $T_{\text{eff}} - \log g$ , показанное на рис. 8. По каталогу Gaia DR3 параллакс Gaia23cer  $p'' = (4.3261 \pm$

$\pm 0.2) \times 10^{-3}$  (расстояние  $D = 231 \pm 11$  Пк). В пределах доверительного интервала температур угловые диаметры соответствуют  $\log g = 8.26\text{--}8.38$  или массе белого карлика  $M_1 = 0.79 \pm 0.03 M_{\odot}$ . Этой массе соответствует радиус  $R_1 = 0.0101 \pm 0.0003 R_{\odot}$ . Отметим, что продолжительность входа в затмение для белого карлика с таким радиусом равна  $\Delta t_{\text{ing}} \approx 30$  с (при наклоне орбиты  $i = 85^\circ$ , см. следующий раздел). Это значение согласуется с ограничением на продолжительность входа в затмение  $\Delta t_{\text{ing}} < 47$  с, найденным из анализа фотометрии Gaia23cer (см. раздел 3).

## 6. ДОНОР

Ограничение на массу донора можно сделать из продолжительности затмения. На рис. 9 (верхняя панель) представлено решение в плоскости  $i - M_2$  ( $i$  – наклонение орбитальной плоскости), обеспечивающее наблюдаемую продолжительность затмения  $\Delta t_{\text{ecl}} = 401.30 \pm 0.81$  с. При его построении предполагалось, что форма донора описывается поверхностью его полости Роша. Из рисунка следует, что масса донора должна быть не менее  $0.09 M_{\odot}$ . Представленное решение получено из предположения затмения белого карлика, т.е. соответствует покрытию его центра. В действительности, из-за высокой светимости аккреционного пятна, в высоком состоянии про-

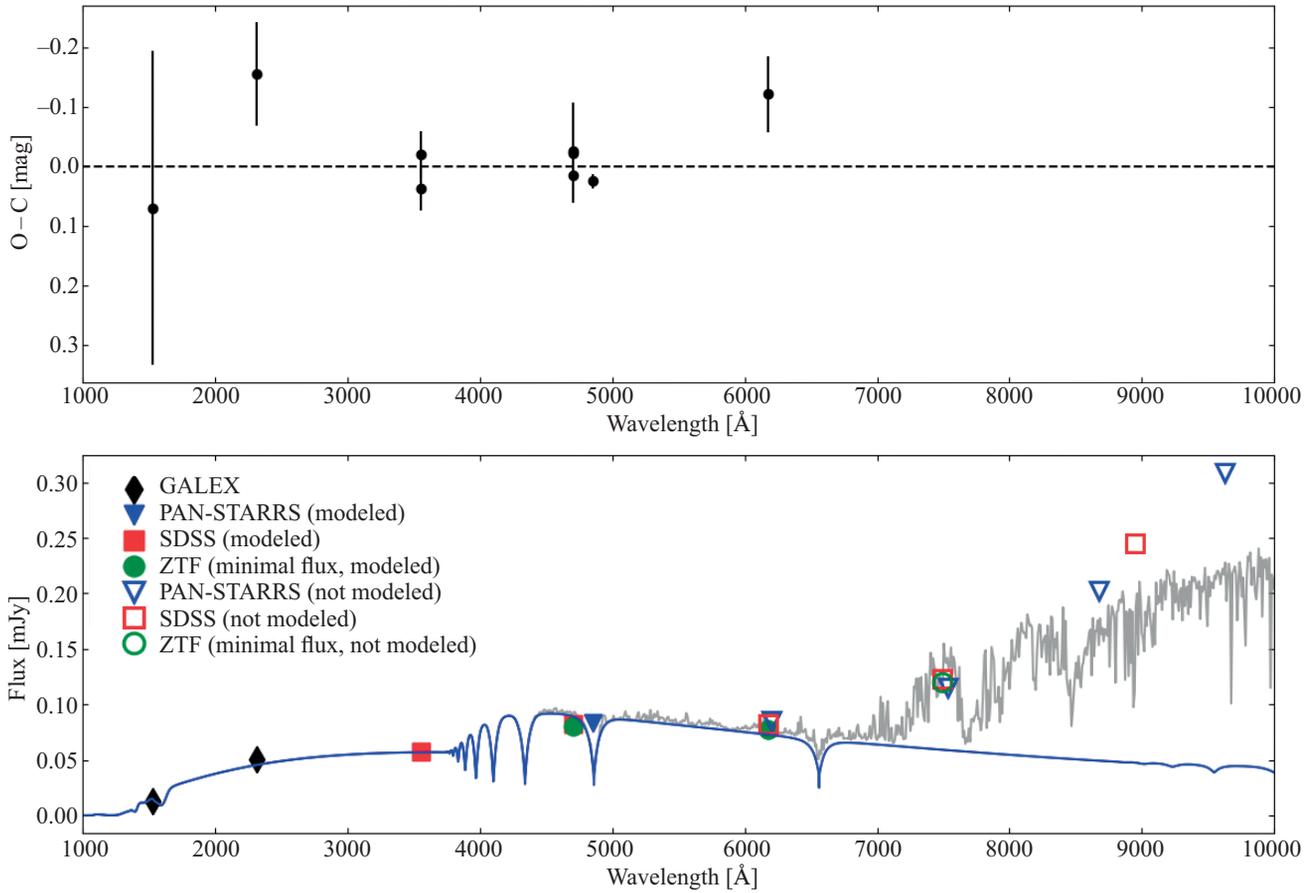


Рис. 7. Верхняя панель: диаграмма  $O - C$  для моделируемых потоков в полосах ультрафиолетового и оптического диапазонов. Нижняя панель: сравнение наблюдаемых потоков Gaia23cer с теоретическим спектром белого карлика (синяя линия) и суммы спектров белого карлика и донора (серая линия).

филь затмения может отображать покрытие аккреционного пятна, а не белого карлика. Получить решение для затмения аккреционного пятна сложно из-за отсутствия информации о его координатах на поверхности звезды. Однако, чтобы оценить неопределенности, вызванные вкладом аккреционного пятна, на рис. 9 мы отобразили решение, соответствующее затмению точки поверхности белого карлика, обращенной в сторону донора. Видно, что масса донора может быть завышена на  $\Delta M_2 = 0.004 M_\odot$ , а наклонение — на  $\Delta i = 0.5^\circ$ .

Дополнительные ограничения на параметры системы можно наложить из полуэмпирической зависимости радиуса донора в катаклизмических переменных от его массы, данной МакАллистер и др., 2019 (см. также Книгге и др., 2011). В интервале масс  $M_2 \in 0.063 - 0.2 M_\odot$  эта зависимость аппроксимируется степенной функцией

$$\frac{R_2}{R_\odot} = 0.225 \pm 0.008 \left( \frac{M_2}{0.2 M_\odot} \right)^{0.636 \pm 0.012}, \quad (5)$$

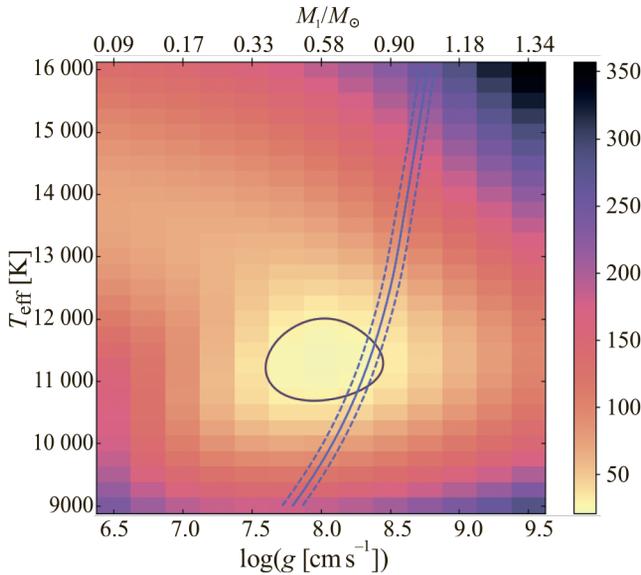
которая показана на рис. 9 (нижняя панель). С другой стороны, эффективный радиус полости Роша доно-

ра  $R_L$  (т.е. радиус сферы, объем которой равен объему полости Роша) может быть оценен как

$$R_L = A \frac{0.5126q^{0.7388}}{0.6710q^{0.7349} + \ln(1 + q^{0.3983})}, \quad (6)$$

где  $A = (M_2(1 + 1/q)P_{\text{orb}}^2)^{1/3}$  — большая полуось системы,  $q = M_2/M_1$  — отношение масс компонент. Формула (6) справедлива для полностью конвективных звезд Сироткин, Ким (2009); Книгге и др. (2011), описываемых политропными моделями с индексом  $n = 3/2$ . Поскольку наша система находится ниже пробела периодов ( $P_{\text{orb}} < 2$  ч), она должна содержать полностью конвективный донор Книгге и др. (2011). Из рис. 9 следует, что эффективный радиус полости Роша согласуется с полуэмпирической зависимостью  $R_2 - M_2$  в диапазоне масс  $M_2 \in 0.10 - 0.13 M_\odot$  и диапазоне радиусов  $R_2 \in 0.152 - 0.164 R_\odot$ . Возвращаясь к решению в плоскости  $i - M_2$ , видим, что этому диапазону масс соответствует наклонение орбитальной плоскости  $84.3^\circ \leq i \leq 87.0^\circ$ .

В полосе  $i$  в низком состоянии значителен вклад от донора в интегральное излучение системы. На



**Рис. 8.** Карта распределения  $\chi^2$  в плоскости  $T_{\text{eff}} - \log g$ , полученная при моделировании спектрального распределения энергии Gaia23cer моделью белого карлика. Черная замкнутая линия соответствует 95% уровню доверия. Синяя линия представляет собой зависимость  $\log g - T_{\text{eff}}$ , выведенную из соответствия углового диаметра белого карлика его параметрам атмосферы (см. подробнее текст).

это указывает двухгорбая кривая блеска, показанная на рис. 1 (нижняя панель). Такое поведение блеска ожидается для эффекта эллипсоидальности вторичной компоненты. Данная кривая блеска была промоделирована нами моделью полуразделенной двойной системы с использованием программного кода РНОЕВЕ<sup>7</sup> Прша и др. (2016). Моделирование проводилось при найденных в предыдущем разделе параметрах белого карлика ( $M_1 = 0.79M_{\odot}$ ,  $R_1 = 0.01R_{\odot}$ ,  $T_{\text{eff}} = 11350$  К). Масса донора была принята равной  $0.12M_{\odot}$ , а наклонение орбитальной плоскости зафиксировано на значении  $i = 85^\circ$ . Интенсивность излучения обеих компонент вычислялась в чернотельном приближении, а потемнение диска к краю для донора учитывалось в рамках линейного закона (выбор чернотельного приближения обусловлен выходом за пределы сетки параметров моделей атмосфер, используемых в РНОЕВЕ, вблизи точки Лагранжа  $L_1$ ). Параметры потемнения находились интерполяцией таблиц Кларет и др., 2016, рассчитанных для моделей атмосфер РНОЕВИХ. Наилучшее описание наблюдений было достигнуто для температуры донора  $T \approx 2850$  К. Сравнение наблюдаемой и модельной кривой показано на рис. 1.

Блеск Gaia23cer в затмении в низком состоянии составляет  $i = 19.41 \pm 0.02^m$  и может быть использован для оценки температуры донора. Мы рассчитали модельные потоки у поверхности звезды в полосе  $i$  пу-

тем свертки синтетических спектров холодных звезд BT-Settl (CIFIST) Аллард и др. (2003, 2011) с функцией пропускания фотометрического фильтра. Химический состав атмосферы донора был принят равным солнечному. Согласие наблюдаемого и модельного потока при расстоянии до Gaia23cer  $D = 231 \pm 11$  Пк и радиусе донора  $R \in 0.152 - 0.164R_{\odot}$  достигается для температуры  $T_{\text{eff}} = 2900 \pm 40$  К. Эта оценка температуры близка к температуре, найденной из моделирования кривой блеска Gaia23cer в низком состоянии. На рис. 7 показано сравнение спектрального распределения энергии Gaia23cer в низком состоянии с суммарным спектром белого карлика и донора. Видно, что донор дает слабый вклад в полосы  $g$  и  $r$  (не более 8%). В полосах  $z$  и  $y$  потока от звездных компонент недостаточно для описания наблюдаемого потока. Вероятно, для длин волн  $\lambda \gtrsim 9000$  Å существенен вклад циклотронного излучения даже в низком состоянии.

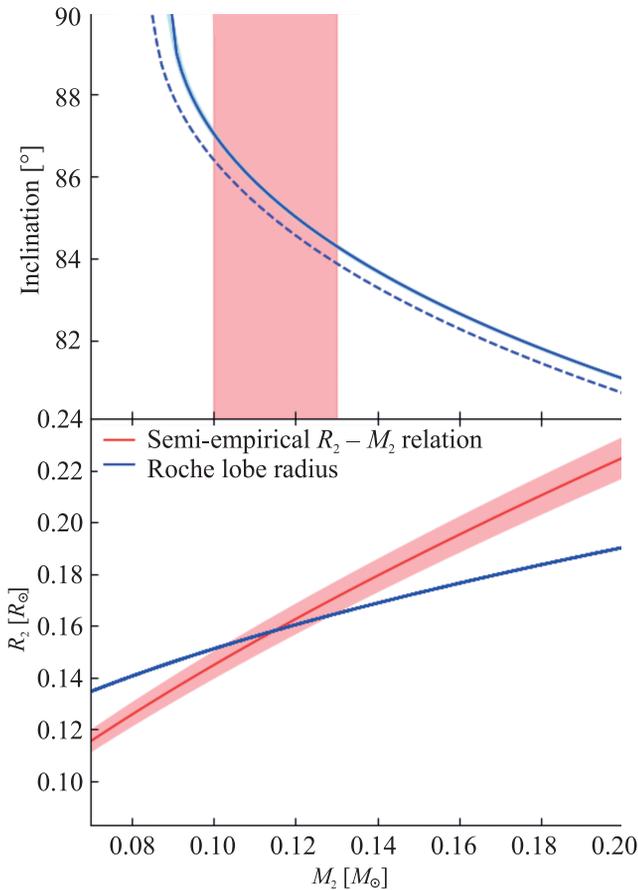
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнено фотометрическое и спектральное исследование нового затменного поляра Gaia23cer. Ниже мы резюмируем основные выводы проведенной работы.

В долговременных кривых блеска Gaia23cer выделяются низкие и высокие состояния, различающиеся по блеску на  $\Delta r \approx 2.5^m$  и обусловленные сменой темпа аккреции. Орбитальный период поляра составляет  $P_{\text{orb}} = 102.0665 \pm 0.0015$  мин. Имеются глубокие затмения, продолжительностью  $401.30 \pm 0.81$  с. В высоком состоянии профиль затмения имеет асимметрию, вызванную затмением аккреционной струи. В этом же состоянии оптические кривые блеска имеют двухгорбую внезатменную переменность, по-видимому обусловленную двухполюсной аккрецией. В низком состоянии значителен вклад донора в полосу  $i$ , что проявляется в виде эффектов эллипсоидальности.

Спектры Gaia23cer демонстрируют красный циклотронный континуум без различных циклотронных гармоник, который часто встречается у поляров с низким магнитным полем  $B \lesssim 20$  МГс Швопе и др. (1995); Швопе и Менгель (1997); Колбин и др. (2023). На слабое магнитное поле белого карлика указывает оценка индукции магнитного поля  $B = 15.2 \pm 1.1$  МГс, полученная по зеемановскому абсорбционному триплету линии  $\text{H}\alpha$ . Нужно отметить, что в отличие от линии  $\text{H}\alpha$ , зеемановские компоненты  $\text{H}\beta$  и  $\text{H}\gamma$  при более чем в два раза слабой циклотронной подложке не наблюдаются. Вероятно, зеемановское расщепление  $\text{H}\alpha$  образуются в холодном гало, окружающем аккреционное пятно (Ахиллеос и др., 1992), см. также Швопе и др., 1995; Колбин и др., 2023. Поведение эмиссионных линий типично для систем типа AM Her. Лучевые скорости модулированы с орбитальным периодом и имеют высокую по-

<sup>7</sup>Код РНОЕВЕ доступен по адресу: <http://www.phoebe-project.org>



**Рис. 9.** Верхняя панель: решение в плоскости  $i - M_2$ , обеспечивающее продолжительность затмения Gaia23cer (синяя линия). Пунктирной линией указано решение, соответствующее затмению точки поверхности белого карлика (аккреционного пятна), наиболее близкой к донору. Красной областью указан диапазон возможных масс донора, полученный из требования равенства радиуса полости Роша эволюционному радиусу (см. нижнюю панель). Нижняя панель: полуэмпирическая зависимость радиус–масса для доноров в катаклизмических переменных (красная линия), а также зависимость эффективного радиуса полости Роша донора  $R_L$  от его массы (синяя линия). Радиус  $R_L$  слабо зависит от массы аккретора  $M_1$  при фиксированном периоде  $P_{\text{orb}}$ , а представленная кривая  $R_L(M_2)$  является семейством неразличимых решений для  $M_1 \in 0.4 - 1.44 M_\odot$ .

луамплитуду  $K \approx 450$  км/с. Заметно различие во времени затмения белого карлика и источника эмиссии на  $\Delta\phi \approx 0.04$ , ожидаемого при формировании линий в аккреционной струе.

Путем моделирования спектрального распределения энергии в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах сделана оценка параметров атмосферы белого карлика  $T_{\text{eff}} = 11\,350 \pm 650$  К и  $\log g = 8.26 - 8.38$ . Температура  $T \sim 10\,000$  К типична для белых карликов катаклизмических переменных ниже пробела периодов  $P_{\text{orb}} \lesssim 2$  ч Таунсли и Гэнзике (2009); Пала и др. (2022). Указанному диапазону логарифмов ускорения силы тяжести соответствует масса белого карлика  $M_1 = 0.79 \pm 0.03 M_\odot$  и радиус  $R_1 \approx 0.01 R_\odot$ . Полученная масса близка к средней

массе белого карлика в катаклизмических переменных  $\langle M_1 \rangle = 0.83 \pm 0.23 M_\odot$  Зоротович и др. (2011).

Продолжительность затмения в Gaia23cer дает ограничение на массу донора  $M_2 \geq 0.09 M_\odot$ . Таким образом, масса донора в Gaia23cer превышает предельную массу  $M_{\text{bounce}} = 0.063^{+0.005}_{-0.002} M_\odot$  МакАллистер и др. (2019), начиная с которой эволюция системы изменяется с уменьшающегося периода на увеличивающийся. Из требования равенства эволюционного радиуса донора эффективному радиусу полости Роша масса донора должна лежать в диапазоне  $M_2 \in 0.10 - 0.13 M_\odot$ . Продолжительность затмения для этого диапазона масс обеспечивается для интервала наклонов орбиты  $i \in 84.3 - 87.0^\circ$ . Путем моделирования кривой блеска в  $i$ -полосе в низком состоянии сделана оценка температуры донора  $T \approx 2850$  К. Температура донора также определена из блеска в затмении и известного расстояния до Gaia23cer. Полученная таким образом оценка  $T = 2900 \pm 40$  К согласуется с результатом моделирования кривой блеска. Отметим, что температура  $T = 2900$  К ожидаема для эволюционного статуса Gaia23cer, в котором система, теряя угловой момент, успела пройти пробел периодов ( $2 \text{ ч} \lesssim P_{\text{orb}} \lesssim 3 \text{ ч}$ ), но еще не достигла предельного периода  $P_{\text{min}} \approx 76 - 82$  мин Книгге и др. (2011); МакАллистер и др. (2019).

В заключение отметим, что возможность надежного определения параметров компонентов Gaia23cer и, особенно, таких эволюционных индикаторов как температура белого карлика и радиус донора, делают его интересным объектом для понимания особенностей эволюции двойных систем с замагниченными компонентами. Кроме того, благодаря довольно высокой яркости ( $r = 16.5 - 18.5^m$  вне затмений) и наличию затмений, Gaia23cer является интересным объектом для исследования магнитоконтролируемой аккреции методами доплеровского картирования Марш, Швопе (2016), Стокс-картирования Колбин, Борисов (2020) и затмненного картирования Харроп-Аллин и др. (1999, 2001).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа Колбина А. И., Кочкиной В. Ю., Суликова М. В. (анализ спектров и фотометрии, определение параметров компонент двойной системы) выполнена при поддержке гранта Российского фонда научных исследований № 22-72-100064 (<https://rncf.ru/projects/22-72-10064>). Наблюдения А. А. Сосновского были выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01080, <https://rscf.ru/project/23-72-01080>. Наблюдения С. Ю. Шугарова на телескопе Цейсс-600 (Татранска Ломница, Словакия) поддержаны грантом Словацкого Агентства Исследований и Развития APVV № 20-0140, а также грантом Словацкой академии наук

VEGA № 2/0030/21. Наблюдения на телескопах CAO РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука и университеты”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллард и др. (F. Allard, T. Guillot, H.-G. Ludwig, et al.), *IAUS* **211**, 325 (2003).
2. Аллард и др. (F. Allard, D. Homeier, B. Freytag), *ASPC* **448**, 91 (2011).
3. Афанасьев и Моисеев (A. V. Moiseev, V. L. Afanasiev), *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005).
4. Ахиллеос и др. (N. Achilleos, D.T. Wickramasinghe, K. Wu.), *MNRAS* **256**, 80 (1992).
5. Ахумада и др. (R. Ahumada, C. Allende Prieto, A. Almeida, F. Anders, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **249**, 3 (2020).
6. Беллони и Шрайбер (D. Belloni, M. R. Schreiber), *MNRAS* **492**, 1523 (2020).
7. Беллони и др. (D. Belloni, M. R. Schreiber, A. F. Pala, et al.), *MNRAS* **491**, 5717 (2020).
8. Борисов и др. (N. V. Borisov, M. M. Gabdeev, V. V. Shimansky, N.A. Katysheva, et al.), *Astrophys. Bull.* **71**, 101 (2016).
9. Боселли, Бойссиер и др. (A. Boselli, S. Boissier, S. Heinis, et al.), *Astron. Astrophys.*, **528**, 107 (2011).
10. ВандерПлас (J. T. VanderPlas), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **236**, 16 (2018).
11. ван Доккум (P. G. van Dokkum), *PASP* **113**, 1420 (2001).
12. Зоротович и др. (M. Zorotovic, M. R. Schreiber, B. T. Gänsicke), *Astron. Astrophys.* **536**, 42 (2011).
13. Капитанио и др. (L. Capitanio, R. Lallement, J. L. Vergely, M. Elyajouri, A. Monreal-Ibero), *Astron. Astrophys.* **606**, A65 (2017).
14. Кестер (D. Koester), *Memorie della Societa Astronomica Italiana* **81**, 921 (2010).
15. Кларет и др. (A. Claret, P. H. Hauschildt, S. Witte), *Astron. Astrophys.* **546**, A14 (2012).
16. Книгге и др. (C. Knigge, I. Baraffe, J. Patterson), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **194**, 28 (2011).
17. Колбин, Борисов (A. I. Kolbin, N. V. Borisov), *Astron. Lett.* **46**, 812 (2020).
18. Колбин, Борисов и др. (A. I. Kolbin, N. V. Borisov, N. A. Serebriakova, et al.), *MNRAS* **511**, 20 (2022).
19. Колбин и др. (A. I. Kolbin, N. V. Borisov, A. N. Burenkov, et al.), *Astron. Lett.* **49**, 129 (2023).
20. Кочкина и др. (V. Yu. Kochkina, A. I. Kolbin, N. V. Borisov, I.F. Bikmaev), *Astron. Lett.* **49**, 706 (2023).
21. Кроппер (M. Cropper), *Space Science Reviews* **54**, 195 (1990).
22. Лальемен и др. (R. Lallement, J.-L. Vergely, B. Valette et al.), *Astron. Astrophys.* **561**, A91 (2014).
23. Лальемен и др. (R. Lallement, L. Capitanio, L. Ruiz-Dern et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A132 (2018).
24. Ли (J. Li), *ASPC* **157**, 235 (1999).
25. МакАллистер и др. (M. McAllister, S. P. Littlefair, S. G. Parsons, V. S. Dhillon, et al.), *MNRAS* **486**, 5535 (2019).
26. Марш, Швопе (T. R. Marsh, A. D. Schwope), *ASSL* **439**, 195 (2016).
27. Маски и др. (F. Masci, R. Laher, B. Rusholme, et al.), *PASP* **131**, 995 (2018).
28. Нойнберг (M. Nauenberg), *Astrophys. J.* **175**, 417 (1972).
29. Пала и др. (A. F. Pala, B. T. Gänsicke, D. Belloni, S. G. Parsons, T. R. Marsh, et al.), *MNRAS* **510**, 6110 (2022).
30. Прша и др. (A. Prša, K. E. Conroy, M. Horvat, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **227**, 29 (2016).
31. Родригес и др. (A. Rodriguez, S. Kulkarni, T. Prince, et al.), *Astrophys. J.* **945**, 141 (2023).
32. Симон и др. (A. O. Simon, A. V. Grytsai, V. O. Ponomarenko, et al.), *Astron. Telegram #* 16240 (2023).
33. Сироткин, Ким (F. Sirotkin, W.-T. Kim), *Astrophys. J.* **698**, 715 (2009).
34. Сосновский и др. (A. Sosnovskij, E. Pavlenko, A. Simon, S. Shugarov), *Astron. Telegram #* 16249 (2023).
35. Таунсли и Гэнзике (D. M. Townsley, B. T. Gänsicke), *Astrophys. J.* **693**, 1007 (2009).
36. Фитцпатрик (E. L. Fitzpatrick), *PASP* **111**, 63 (1999).
37. Хамери и др. (J.-M. Hameury, A. R. King, J.-P. Lasota), *MNRAS* **218**, 695 (1986).
38. Харроп-Аллин и др. (M. K. Harrop-Allin, M. Cropper, P. J. Nakala, C. Hellier, et al.), *MNRAS* **308**, 807 (1999).
39. Харроп-Аллин и др. (M. K. Harrop-Allin, S. B. Potter, M. Cropper), *MNRAS* **326**, 788 (2001).
40. Ходжкин и др. (S. T. Hodgkin, E. Breedt, A. Delgado, et al.), *TNSTR* **2023-2191**, (2023).
41. Чамберс и др. (K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, H. A. Flewelling, et al.), arXiv:1612.05560.
42. Швопе и др. (A. D. Schwope, K. Beuermann, S. Jordan), *Astron. Astrophys.* **301**, 447 (1995).
43. Швопе и Менгель (A. D. Schwope, S. Mengel), *Astronomische Nachrichten* **318**, 25 (1997).
44. Шимежек, Вуннер (C. Schimeczek, G. Wunner), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **212**, 26 (2014).
45. Шрайбер и др. (M. R. Schreiber, D. Belloni, B. T. Gänsicke, et al.), *Nature Astron.* **5**, 648 (2021).