

GAIA 19CWM — ЗАТМЕННОЕ КАРЛИКОВАЯ НОВАЯ ТИПА WZ SGE С МАГНИТНЫМ БЕЛЫМ КАРЛИКОМ

© 2024 г. А. И. Колбин^{1,2*}, Т. А. Фатхуллин¹, Е. П. Павленко³, М. В. Сусликов^{1,2}, В. Ю. Кочкина¹, Н. В. Борисов¹, А. С. Винокуров¹, А. А. Сосновский³, С. С. Панарин^{1,2}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

Поступила в редакцию 24.10.2024 г.

После доработки 21.01.2025 г.; принята к публикации 21.01.2025 г.

Выполнены спектральные и фотометрические исследования катаклизмической переменной Gaia 19cwm (или ZTF19aamkwkxk). На основе анализа долговременной переменности сделан вывод о принадлежности объекта к звездам типа WZ Sge. Кривые блеска демонстрируют затмения, повторяющиеся с орбитальным периодом 86.32048 ± 0.00005 мин, а также внезатменную переменность с периодом ≈ 6.45 мин. Последний период является стабильным на протяжении ~ 4 лет и, по-видимому, соответствует вращению магнитного белого карлика, т.е. Gaia 19cwm является промежуточным поляром. В спектрах Gaia 19cwm проявляются фотосферные линии белого карлика, а доплеровские томограммы демонстрируют наличие аккреционного диска и горячего пятна. Анализ профиля затмения дает оценку массы белого карлика $M_1 = 0.66 \pm 0.06 M_\odot$, массу донора $M_2 = 0.073 \pm 0.015 M_\odot$ и наклонение орбиты $i = 83.8^\circ \pm 1.1^\circ$. Моделирование спектрального распределения энергии указывает на температуру белого карлика $T_{\text{eff}} \approx 13\,000$ К. Рентгеновская светимость $L_X = (1.6 \pm 0.3) \times 10^{31}$ эрг/с позволяет отнести Gaia 19cwm к малочисленной группе промежуточных полей с низкой светимостью.

Ключевые слова: звезды: катаклизмические переменные, карликовые новые, промежуточные поляры; индивидуальные: Gaia 19cwm (ZTF19aamkwkxk, Gaia DR3 4433651721269127552); методы: фотометрия, спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0320010824110051, EDN: LSQQOI

1. ВВЕДЕНИЕ

Катаклизмические переменные представляют собой полуразделенные двойные системы, состоящие из белого карлика и маломассивной звезды-донора спектрального класса G–L (Уорнер, 1995). Донор заполняет свою полость Роша и теряет вещество из окрестностей точки Лагранжа L_1 . В случае слабого магнитного поля белого карлика ($B \lesssim 0.1$ МГс) аккрецируемое вещество образует аккреционный диск. Вырывающаяся из точки Лагранжа L_1 аккреционная струя при взаимодействии с аккреционным диском образует горячее пятно или, как показывают гидродинамические расчеты, горячую линию (Бисикало и др., 2003). При умеренных магнитных полях ($B \sim 0.1$ – 10 МГс) диск разрушается изнутри и его вещество перетекает на аккретор вдоль линий магнитного поля. Такого рода системы называются звездами типа DQ Нег или промежуточными полярами (Паттерсон, 1994). При более сильных магнитных полях ($B \sim 10$ – 100 МГс) образуются системы типа AM Нег или поляры, где аккреционный диск не формируется (Кроппер, 1990).

При низких темпах аккреции ($\dot{M} \lesssim 10^{-9} M_\odot/\text{год}$)

катаклизмические переменные со слабым магнитным полем проявляют квазипериодические вспышки амплитудой 2 – 7^m . Такие системы называют карликовыми новыми, а их вспышки связывают с тепловой неустойчивостью аккреционного диска (Каннизо, 1993). Природа тепловой неустойчивости заключается в резком увеличении вязкости (или α -параметра в модели Шакуры и Сюняева, 1973), которая возникает при ионизации водорода после накопления диском определенного количества вещества. Считается, что в спокойном состоянии параметр вязкости диска $\alpha \sim 0.01$, а во время вспышки он выше в 4 – 10 раз. Среди карликовых новых можно выделить звезды типа SU UMa. Эти звезды демонстрируют вспышки амплитудой 2 – 5^m продолжительностью несколько дней, которые называют нормальными. Помимо нормальных вспышек наблюдаются и так называемые сверхвспышки, имеющие большую амплитуду (на 1 – 2^m) и продолжительность (около двух недель). Возникновение сверхвспышек объясняется моделью приливно-тепловой неустойчивости (Осаки, 1995), где помимо упомянутой тепловой неустойчивости учитывается приливная неустойчивость, реализуемая при достижении аккреционным диском радиуса резонанса $3 : 1$ (Уорнер, 1995). Особенностью

*Электронный адрес: kolbinalexander@mail.ru

Таблица 1. Журнал наблюдений Gaia 19cwm

Телескоп/ Приемник	Дата, UT	Продолжительность, HJD – 2460000	<i>N</i>	Полоса	$\Delta\lambda$, Å	Δt_{exp} , с
БТА/SCORPIO	24/25 Апр. 2023	059.40950–059.42361	3	3500–7200 Å	12	600
Цейсс-1000/ЕМ	15/16 Апр. 2024	416.47349–416.50841	601	Clear	—	5
ЗТШ/FLI	02/03 Мая 2024	433.42028–433.56291	516	Clear	—	20
ЗТШ/FLI	03/04 Мая 2024	434.42025–434.55609	801	Clear	—	10
ЗТШ/FLI	05/06 Мая 2024	436.40507–436.56092	970	Clear	—	10
Цейсс-1000/ЕМ	16/17 Мая 2024	446.37578–446.42804	680	Clear	—	5
Цейсс-1000/ЕМ	16/17 Мая 2024	446.48884–446.51660	240	Clear	—	10
ЗТШ/FLI	31 Мая/ 01 Июн. 2024	462.31258–462.54260	307	I _C	—	60
ЗТШ/FLI	01/02 Июн. 2024	463.31177–463.54355	314	I _C	—	60
ЗТШ/FLI	02/03 Июн. 2024	464.30822–464.53970	251	I _C	—	60
ЗТШ/FLI	03/04 Июн. 2024	465.30126–465.54177	324	I _C	—	60
БТА/SCORPIO	01/02 Июл. 2024	493.33950–493.46849	36	3600–5400 Å	5.5	300
Цейсс-1000/ЕМ	03/04 Июл. 2024	495.28914–495.36397	3080	Clear	—	2

Примечание. Перечислены телескопы и приборы, задействованные в наблюдениях, даты наблюдений, количество полученных кадров (*N*), спектральные полосы (Clear — наблюдения без фильтра), спектральные разрешения $\Delta\lambda$ (для спектральных наблюдений), а также экспозиции (Δt_{exp}).

сверхвспышек являются так называемые сверхгорбы — небольшие колебания блеска с периодом P_{sh} , на несколько процентов превышающим орбитальный период P_{orb} . Предполагается, что во время сверхвспышки диск является вытянутым и медленно прецессирующим по направлению орбитального движения донора. В результате приливного взаимодействия краев вытянутого диска с донором возникают поярчания (т.е. сверхгорбы), повторяющиеся с периодом биений прецессионного и орбитального движения.

Среди звезд типа SU UMa выделяют подкласс звезд типа WZ Sge, которые демонстрируют только сверхвспышки амплитудой 6–8^m, повторяющиеся с интервалом (так называемым сверхциклом) десятки лет (см. подробнее о звездах типа WZ Sge Като, 2015). Отсутствие или редкость нормальных вспышек, а также большая длительность сверхцикла в звездах типа WZ Sge в настоящее время не имеет однозначной интерпретации. Для воспроизведения вспышечной активности теория приливо-тепловой неустойчивости требует низкой и трудно объяснимой вязкости диска ($\alpha \lesssim 10^{-4}$). Активность звезд типа WZ Sge можно объяснить и в рамках “стандартных” значений вязкости, однако для этого требуется удерживание внутреннего края диска на значительном расстоянии от аккректора за счет испарения или магнитного поля белого карлика (Хамери и др., 1997; Мэттьюз и др., 2007).

Переменная Gaia 19cwm (ZTF19aamkwkx, AT2019kww; $\alpha_{2000} = 16^{\text{h}}27^{\text{m}}16.77^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = +04^{\circ}06'02.58''$) была обнаружена как оптический транзиент космической обсерваторией Gaia. На основе анализа данных ZTF Шкоди и др. (2021) включили Gaia 19cwm в кандидаты в катаклизми-

ческие переменные. Из анализа данных ZTF нами был сделан вывод о возможной принадлежности Gaia 19cwm к звездам типа WZ Sge. Также нами были обнаружены затмения, что делает Gaia 19cwm очень интересным объектом для исследования природы звезд WZ Sge (в списке Като (2015) имеется лишь четыре затменные системы из почти сотни звезд типа WZ Sge). Кроме того, данные ZTF демонстрировали признаки внезатменной переменности, которая могла бы быть ассоциирована с вращением белого карлика или с его нерадиальными пульсациями. Все это сделало Gaia 19cwm интересным объектом для проведения его детального фотометрического и спектрального исследования, результаты которого приведены в настоящей работе.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Фотометрия

Фотометрические наблюдения Gaia 19cwm проводились на 1-м телескопе Цейсс-1000 Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН). Телескоп был оснащен фотометром с матрицей Andor iXon Ultra 888 EMCCD. Также наблюдения Gaia 19cwm проводились на 2.6-м телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории РАН, оснащенным фотометром FLI PL-4240 с ПЗС-матрицей E2V CCD 42-40¹. Журнал фотометрических наблюдений включен в табл. 1.

Полученный наблюдательный материал обработан согласно стандартной методике работы с

¹См. подробнее на сайте <http://crao.ru/ru/telescopes>

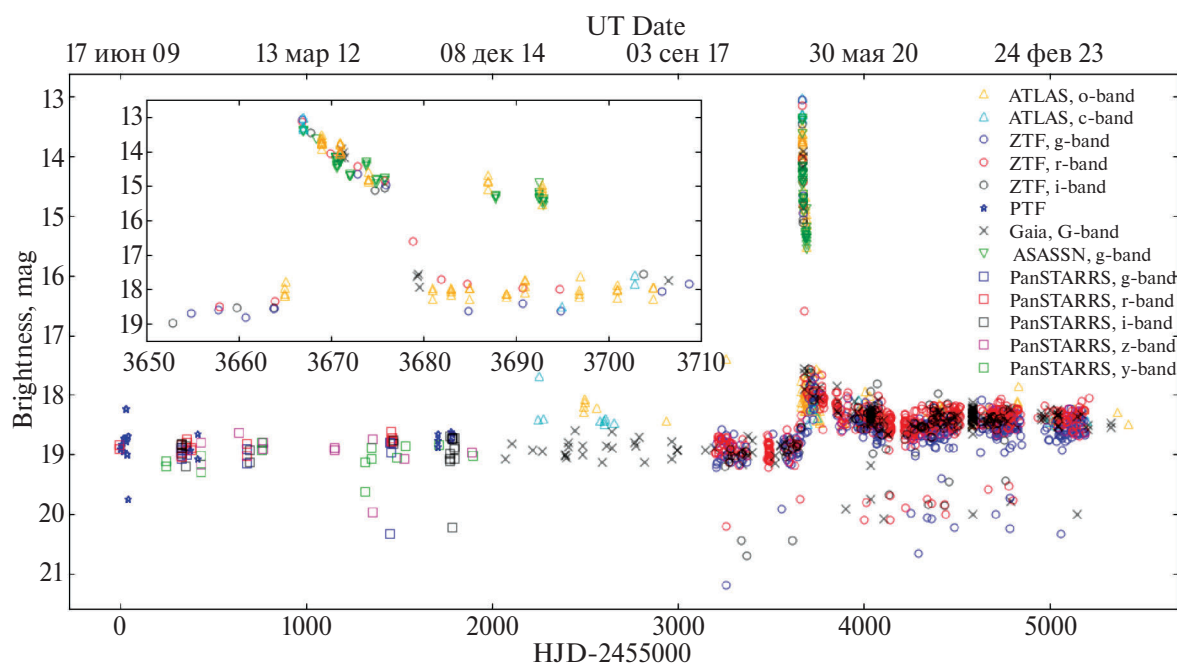


Рис. 1. Долговременная кривая блеска Gaia 19cwm, построенная по данным обзоров ATLAS (полосы *o*, *c*), ZTF (полосы *g*, *r*, *i*), PTF, Gaia (полоса *G*), ASAS-SN (полоса *g*), Pan-STARRS (полосы *g*, *r*, *i*, *z*, *y*).

ПЗС-кадрами, включающей в себя вычитание кадров электронного нуля, деление на плоские поля, удаление следов космических частиц. Апертурная фотометрия выполнена с помощью программной библиотеки photutils².

Спектроскопия

Набор спектров Gaia 19cwm получен в ночи 24/25 апреля 2023 г. и 01/02 июля 2024 г. на 6-м телескопе БТА CAO РАН. Телескоп был оснащен фокальным редуктором SCORPIO³, используемым в режиме длиннощелевой спектроскопии (Афанасьев и Моисеев, 2005). В ночь 24/25 апреля 2023 г. в качестве дисперсора использовалась объемная фазовая голографическая решетка VPHG550G, с помощью которой регистрировался спектральный диапазон 3900–7500 Å. Наблюдения выполнены с щелью шириной 1.2'', с которой обеспечивалось спектральное разрешение $\Delta\lambda \approx 12$ Å. В ночь 01/02 июля 2024 г. наблюдения проводились с использованием гризмы VPHG1200B с рабочим диапазоном 3600–5400 Å и разрешением 5.5 Å (при ширине щели 1.2''). Для выполнения спектрофотометрической калибровки снимались звезды-стандарты HZ44 и AGK+81°266. Обработка полученного материала выполнялась в среде IRAF⁴, следуя стандартной методике работы с данными длиннощелевой спектроскопии.

²Библиотека для поиска источников и фотометрии photutils доступна по адресу <https://photutils.readthedocs.io/en/stable/>

³Описание прибора SCORPIO можно найти по адресу <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html>

⁴Пакет программ обработки и анализа астрономических данных IRAF доступен по адресу <https://iraf-community.github.io>

3. АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИИ

Для анализа долговременной переменности Gaia 19cwm использовались архивные наблюдения обзора ZTF (Zwicky Transient Facility, Маски и др., 2018), обсерватории Gaia, обзора ATLAS⁵ (Asteroid Terrestrial impact Last Alert System, Тонри и др., 2018), обзора Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, Флювеллинг и др., 2020), обзора PTF (Palomar Transient Factory, Лой и др., 2009) и обзора ASAS-SN (All Sky Automated Survey for SuperNovae, Шаппи и др., 2014). Полученная кривая блеска, охватывающая ≈ 15 лет наблюдений, показана на рис. 1. Она демонстрирует вспышку (вероятно, сверхвспышку) амплитудой $\approx 6^m$ и продолжительностью около 12–14.5 сут. Начало вспышки лежит между эпохами HJD = 2458663.79 и HJD = 2458666.64 (т.е. между 29 июня и 02 июля 2019 г.). За вспышкой зарегистрировано два появления около HJD = 2458686 и HJD = 2458692, т.е. спустя ≈ 7 и ≈ 13 сут после окончания вспышки соответственно.

На основе данных ZTF после вспышки в полосах *g*, *r* найден орбитальный период $P_{\text{orb}} = 86.32048 \pm 0.00005$ мин (ошибка оценена методом Монте-Карло). Определение периода проводилось методом Ломба–Скаргла (использовалось шесть гармоник для описания затмения). Получены эфемериды середины затмения

$$\text{HJD}_{\text{min}} = 2460000.0568(1) + 0.05994478(4) \times E. \quad (1)$$

⁵Фотометрия ATLAS доступна по адресу <https://fallingstar-data.com/forcedphot>. Наблюдения ATLAS выполняются в полосах *o* (560–820 nm) и *c* (420–650 nm).

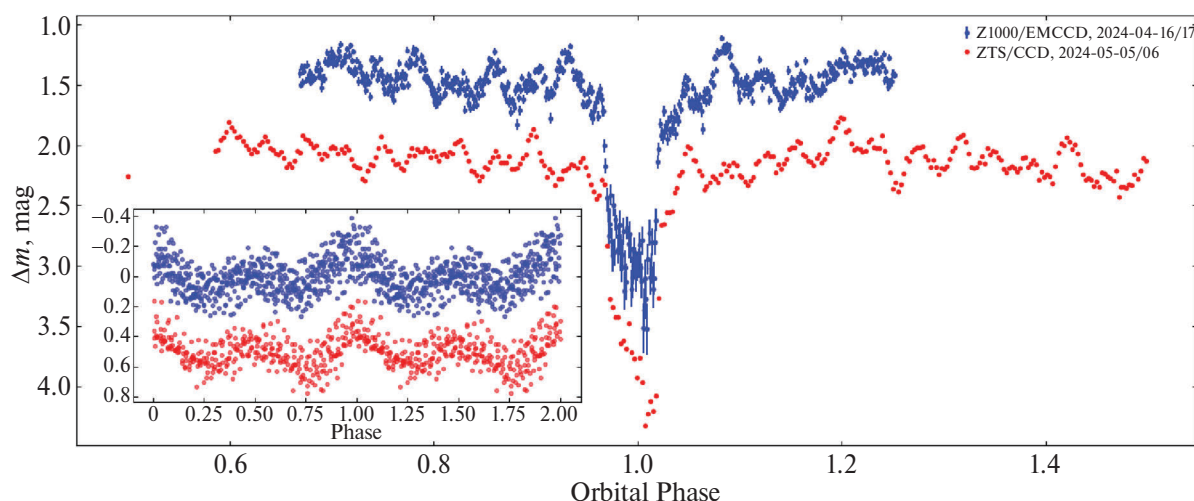


Рис. 2. Примеры кривых блеска Gaia 19swm, полученные на телескопах Цейсс-1000 и ЗТШ. Также показаны внезатменные кривые блеска, свернутые с периодом $P_s = 6.45$ мин. Кривая блеска ЗТШ смещена вниз на $\approx 0^m.5$.

В наблюдениях Цейсс-1000 и ЗТШ проявляется внезатменная переменность с периодом $P_s \approx \approx 6.45$ мин. Примеры кривых блеска с этой переменностью показаны на рис. 2. Свернутые с найденным периодом кривые блеска имеют двухгорбую структуру с разделением горбов на $\approx P_s/2$. Эта же периодичность обнаружена в результате анализа данных ZTF, полученных после вспышки. Методом Ломба—Скаргла определен период $P_s = 6.4477728 \pm 0.0000006$ мин (частота $f = 223.33293 \pm 0.00002$ сут $^{-1}$). На рис. 3 показаны периодограммы Gaia 19swm, построенные по наблюдениям ZTF в 2018–2019 гг. (до вспышки), 2020, 2021, 2022, 2023 гг. На периодограммах 2021, 2022, 2023 гг. выделяется значимый пик мощности при периоде, в пределах ошибок равным P_s . Таким образом, период является стабильным на протяжении по крайней мере четырех лет, что указывает на его связь с вращением белого карлика, а не с нерадиальными пульсациями. В последнем случае следовало бы ожидать изменения периода по мере остывания белого карлика (см., например, Шкоди и др., 2021).

На рис. 4а и 4б представлены кривые блеска Gaia 19swm, построенные по данным наблюдений Цейсс-1000/EMCCD. Из кривых блеска была исключена вращательная переменность путем аппроксимации внезатменной части кривых блеска тригонометрическим полиномом. Первая кривая блеска отличается сложной структурой, где помимо затмения белого карлика выделяется слабое затмение горячего пятна. Кривая блеска хорошо аппроксимируется набором из двух трапециод. Затмение горячего пятна центрировано на фазу $\varphi_b = 1.0359 \pm 0.0015$ и имеет ширину (FWHM) $\Delta\varphi_b = 0.098 \pm 0.008$. Ширина (FWHM) затмения белого карлика $\Delta\varphi_w = 0.0510 \pm 0.0007$ и продолжительность входа в затмение (или выхода из затмения) $\Delta\varphi_{\text{egr}} = 0.0079 \pm 0.0007$ найдены по второй кривой блеска, полученной с большим времен-

ным разрешением. В ней уже не проявляется затмение горячего пятна.

Помимо отмеченной вращательной переменности кривые блеска Gaia 19swm также показывают внезатменную переменность, модулированную с орбитальным периодом. В течение орбитального цикла она имеет двухгорбую структуру, которая хорошо проявляется в наблюдениях ЗТШ (см. рис. 5). Амплитуда внезатменной переменности $\Delta I_C \approx 0^m.15$. Возможные варианты интерпретации этого явления приведены в разделе “Дискуссия и заключение”.

4. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Усредненные спектры Gaia 19swm показаны на рис. 6. Они содержат типичный для катаклизмических переменных набор спектральных линий: балмеровские линии водорода ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, $H\epsilon$, $H\zeta$), линии нейтрального гелия ($\text{HeI } \lambda 4020, \lambda 4387, \lambda 4471, \lambda 4921, \lambda 5015, \lambda 5876, \lambda 6678, \lambda 7065$), слабую линию ионизованного гелия $\text{HeII } \lambda 4686$ и линию ионизованного железа $\text{FeII } \lambda 5169$. Водородные линии и линии нейтрального гелия имеют двухпиковую структуру, естественную для карликовых новых с высоким наклонением орбитальной плоскости ($i \sim 90^\circ$). Вокруг эмиссионных линий $H\gamma$ и $H\delta$ в спектре 01/02 июля 2024 г. наблюдаются признаки широких абсорбций, формирующихся в атмосфере белого карлика. Для наглядности этот спектр приведен в сравнении с теоретическим спектром белого карлика с температурой $T_{\text{eff}} = 13\,000$ К и логарифмом ускорения силы тяжести $\log g = 8.0$ (Кестер, 2010).

Допплеровские томограммы Gaia 19swm в линиях $H\beta$ и $H\gamma$ построены по данным наблюдений 01/02 июля 2024 г. и представлены на рис. 7 (о методе доплеровской томографии и интерпретации доплеровских томограмм см., например, Марш, Швопе, 2016).

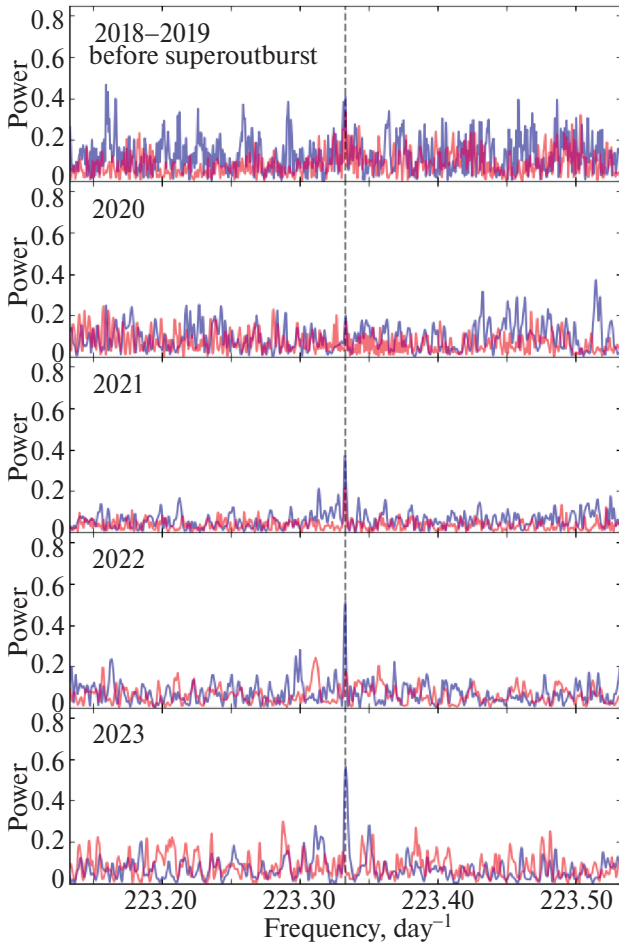


Рис. 3. Периодограммы Ломба–Скаргла, полученные по данным обзора ZTF за 2018–2019 г. перед вспышкой, 2020 г., 2021 г., 2022 г., 2023 г. Синей линией показаны периодограммы, построенные по данным в полосе g , а красными — в полосе r . Пунктирной линией указана частота $f_s = 223.323 \pm 0.001 \text{ сут}^{-1}$, найденная по данным наблюдений ЗТШ в 2024 г.

Восстановление томограмм проводилось с помощью программного кода `doptomog` (Котзе, Поттер и др., 2015, 2016), реализующего метод максимума энтропии. На томограммах видна кольцеобразная структура, соответствующая излучению аккреционного диска. Также проявляется горячее пятно во второй четверти томограмм ($v_x \leq 0$, $v_y \geq 0$). Обе томограммы также содержат второе, более слабое пятно в четвертой четверти ($v_x \geq 0$, $v_y \leq 0$). Эта структура не является общим свойством карликовых новых, однако встречалась у некоторых представителей звезд типа WZ Sge (Авилес и др., 2010; Жариков и др., 2013). На томограммы наложена модель Gaia 19cwm с отношением масс $q = 0.11$, массой белого карлика $M_1 = 0.66 M_\odot$ и наклоном орбиты $i = 84^\circ$ (см. следующий раздел). Видно, что аккреционный диск в линиях водорода не превышает радиус резонанса 3 : 1, а баллистическая траектория частиц, вырывающихся из точки Лагранжа L_1 , пересекает горячее пятно.

В исследовании катаклизмических переменных часто используется метод определения лучевых скоростей, предложенный Шафтером (1983). В этом методе измерение лучевых скоростей проводится по крыльям эмиссионных линий, которые формируются во внутренних частях аккреционного диска. Можно ожидать, что получаемые таким образом лучевые скорости отражают движение белого карлика. Определение лучевых скоростей v_r проводится решением уравнения $\int k(v - v_r)r(v)dv = 0$, где $r(v)$ — наблюдаемый профиль спектральной линии в шкале скоростей $k(v)$ — разность двух гауссиан, центрированных на противоположные крылья линий. Таким образом, лучевая скорость подбирается так, чтобы гауссианы “захватывали” одинаковое количество потока в крыльях линий. Разделение гауссиан выбиралось нами больше $2K_{\text{spot}}$, где $K_{\text{spot}} \approx 900 \text{ км/с}$ — полуамплитуда лучевой скорости горячего пятна (см. доплеровские томограммы на рис. 7), и ограничивалось сверху FWZI линии. Ширины гауссиан варьировались от FWHM/4 до FWHM/2, где FWHM $\approx 700 \text{ км/с}$ — ширина пика спектральной линии. К сожалению, варьирование разделения и ширин гауссиан не дало ожидаемой для белого карлика кривой лучевых скоростей. По-видимому, имеющегося отношения сигнал–шум недостаточно для восстановления лучевых скоростей частей аккреционного диска, повторяющих движение белого карлика. Либо такие части вовсе отсутствуют из-за ограничения внутреннего радиуса аккреционного диска магнитным полем белого карлика. На рис. 8 показаны кривые лучевых скоростей Gaia 19cwm в линиях H β и H γ , полученные при параметрах $a = 2500 \text{ км/с}$ и $\sigma = 300 \text{ км/с}$ (σ — стандартное отклонение гауссианы). Хорошо проявляет себя эффект затмения аккреционного диска, выражающийся в резком скачке лучевой скорости перед центром затмения ($\varphi = 1$) и аналогичным скачком в отрицательную область после центра затмения. Вне затмения лучевые скорости распределены случайным образом. Средняя ошибка измерения лучевой скорости вне затмения $\approx 25 \text{ км/с}$.

5. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ

Оценки отношения масс $q = M_2/M_1$, наклона орбиты i и радиуса аккреционного диска R_D/A (в единицах большой полуоси A) могут быть найдены из кривых блеска затмения белого карлика и горячего пятна (Вуд и др., 1989). Ширина затмения белого карлика $\Delta\varphi_w$ зависит от наклона орбиты i и отношения масс q . Если предположить, что горячее пятно образуется в области пересечения баллистической траектории частиц, испускаемых из точки Лагранжа L_1 , с внешним краем аккреционного диска, то из положения центра φ_b и ширины $\Delta\varphi_b$ затмения горячего пятна мы имеем еще два уравнения на параметры q , i , R_D/A . Для вычисления сеток $\Delta\varphi_w$, φ_b и $\Delta\varphi_b$ мы воспользовались простой моделью катаклизмической переменной

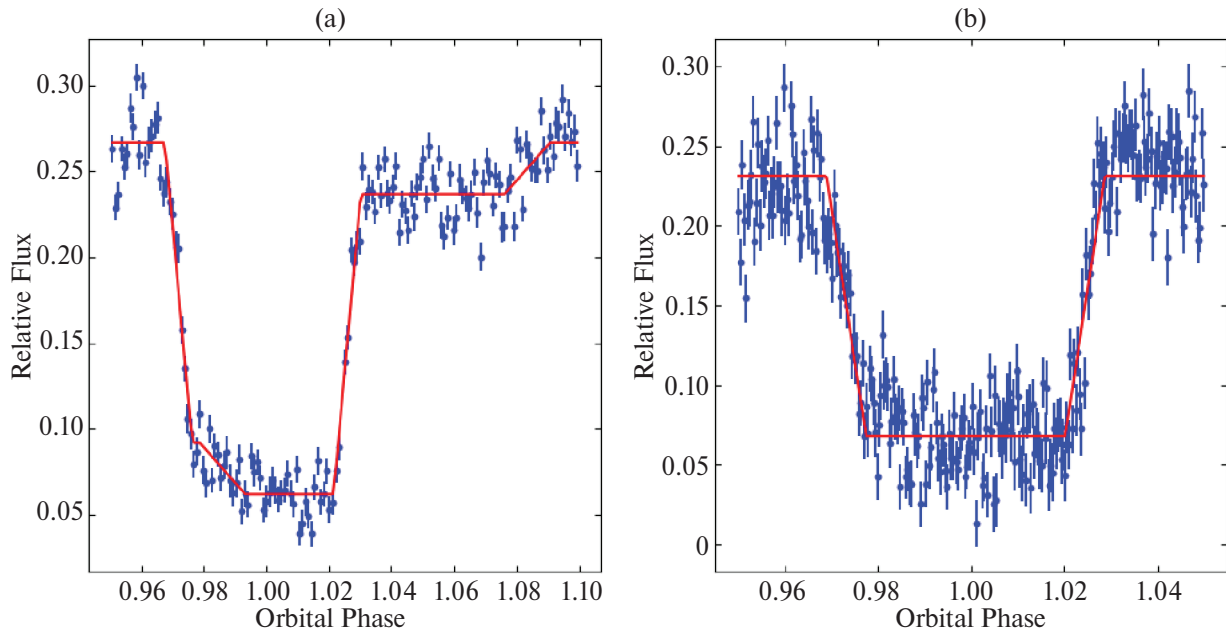


Рис. 4. Кривые блеска затмения Gaia 19swm, полученные на телескопе Цейсс-1000 с EMCCD-фотометром 15/16 апреля 2024 г. (a) и 03/04 июля 2024 г. (b). Красными линиями показаны аппроксимирующие трапециоды.

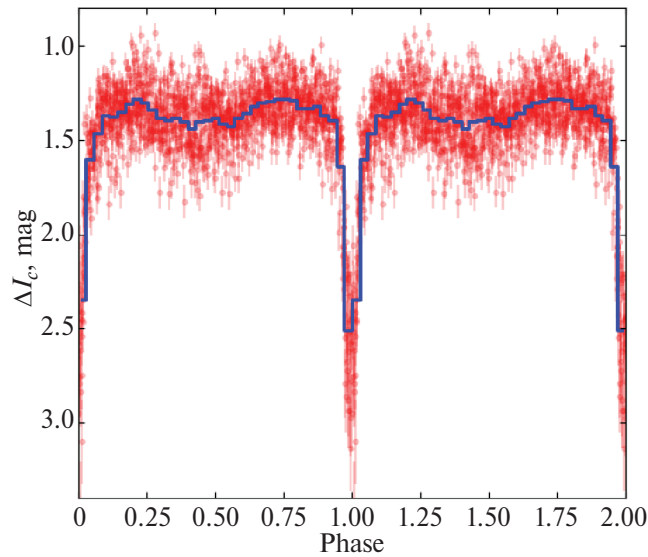


Рис. 5. Кривая блеска Gaia 19swm, свернутая с орбитальным периодом (красные точки). Измерения блеска получены в полосе I_C на телескопе ЗТШ в течение четырех ночей. Синей линией показано усреднение кривой блеска в пределах 35 фазовых отрезков.

с заполняющим свою полость Роша донором. Горячее пятно считалось точечным и лежащим на пересечении аккреционной струи с внешним краем аккреционного диска. Траектория аккреционной струи вычислялась путем решения ограниченной задачи трех тел для частиц, вырывающихся из точки Лагранжа L_1 с малой начальной скоростью (Фланнери, 1975).

На рис. 9 показано решение, полученное из ширины затмения белого карлика $\Delta\phi_w$. Видно, что оно накладывает ограничение на отношение масс $q \geq 0.06$.

На том же рисунке показано решение, обеспечивающее наблюдаемые центр ϕ_b и ширину $\Delta\phi_b$ затмения горячего пятна. Видно, что два решения пересекаются при отношении масс $q = 0.11 \pm 0.02$ и наклонении орбиты $i = 83.8^\circ \pm 1.1^\circ$. Этому решению соответствует радиус аккреционного диска $R_D/A \approx 0.59$. Продолжительность входа в затмение $\Delta\phi_{\text{egr}} = 0.0079 \pm 0.0007$ (см. раздел “Анализ фотометрии”) соответствует радиусу белого карлика $R_1 = 0.0109\text{--}0.0124R_\odot$ или, согласно соотношению Нойнберг (1972), массе $M_1 = 0.66 \pm 0.06M_\odot$. Заметим, что распределение яркости по диску белого карлика должно быть сложным из-за наличия аккреционных пятен. По этой причине мы не использовали модель двойной системы для моделирования профиля затмения и ограничились более простой методикой, предполагающей трапецевидную форму затмения.

Для оценки параметров атмосферы белого карлика мы использовали данные о потоках излучения Gaia 19swm в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах. Нами были заимствованы архивные наблюдения обсерватории GALEX (Боселли и др., 2011) в полосах FUV ($\lambda_{\text{eff}} \approx 1550 \text{ \AA}$) и NUV ($\lambda_{\text{eff}} \approx 2300 \text{ \AA}$), данные обзора Pan-STARRS (Чамберс и др., 2016), а также минимальные внезатменные потоки из обзора ZTF в полосах g , r , зарегистрированные перед вспышкой. Также нами были измерены потоки в полосе $UVW1$ ($\lambda_{\text{eff}} \approx 2680 \text{ \AA}$) на основе наблюдений телескопа UVOT орбитальной обсерватории Swift (id = 00014862002). Из данных Swift/UVOT были исключены измерения, захватывающие затмение белого карлика. Предполагалось, что в указанных полосах доминирует излучение белого карлика. Так, из кривой блеска затмения

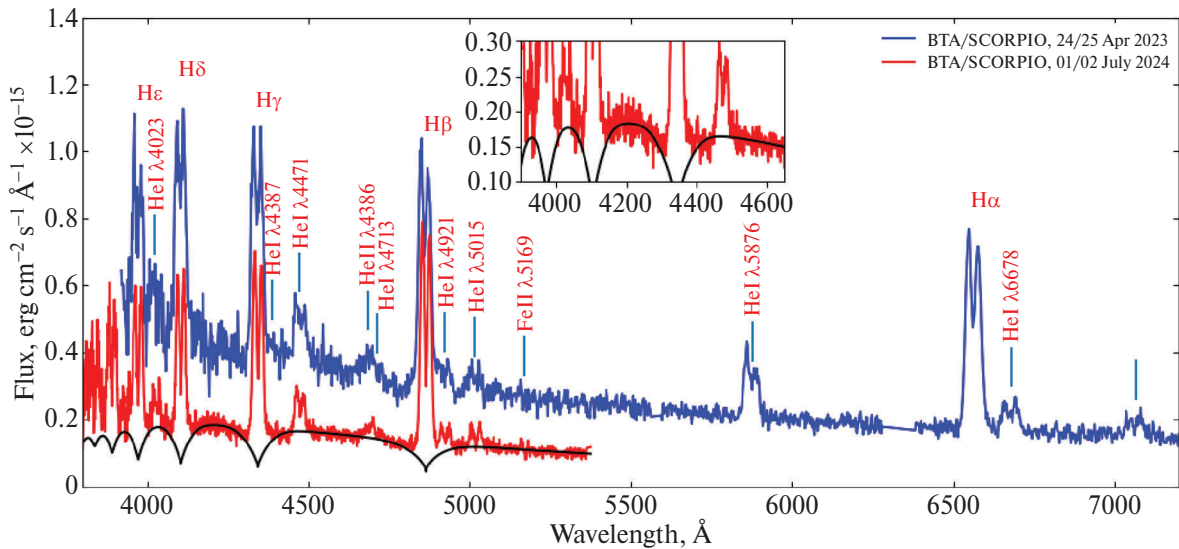


Рис. 6. Усредненные спектры Gaia 19cwm, полученные по наблюдениям 24/25 апреля 2023 г. и 01/02 июля 2024 г. (для наглядности спектр 2023 г. смещен относительно спектра 2024 г.). Черной линией показан теоретический спектр белого карлика с эффективной температурой $T = 13\,000$ К и логарифмом ускорения силы тяжести $\log g = 8.0$. На рисунке-вставке показана область около линий $H\gamma$ и $H\delta$ для более наглядного представления широких бальмеровских абсорбций.

на рис. 4а видно, что вклад горячего пятна в интегральное излучение системы $\sim 10\%$. Затмение аккреционного диска не проявляется в имеющихся кривых блеска и его вклад должен быть меньше. Дальний ультрафиолетовый диапазон часто используется для анализа излучения белого карлика, где вкладом других составляющих системы можно пренебречь. Измерения в полосах NUV и $UVW1$ не отклоняются значимо на диаграмме $O-C$ (см. рис. 10а) и, вероятно, вклад аккреционного диска и горячего пятна в этих полосах не превышает или сравним с соответствующим вкладом в оптическом диапазоне. Мы не использовали фотометрические данные в красной части оптического спектра и перед бальмеровским скачком из-за возможного высокого вклада аккреционного диска и горячего пятна (см., например, Пала и др., 2019; Неустроев и Мантинен, 2023). Согласно трехмерным картам межзвездного поглощения *STILISM*⁶, избыток цвета для Gaia 19cwm $E(B-V) = 0^m.051^{+0.037}_{-0.039}$ с соответствующим поглощением $A_V \approx 3.1E(B-V) = 0^m.16 \pm \pm 0^m.11$. Наблюдаемые потоки Gaia 19cwm были исправлены за межзвездную экстинкцию согласно кривой поглощения Фитцпатрик (1999).

Моделирование потоков в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах проводилось с помощью ЛТР-спектров моделей водородных (DA) атмосфер белых карликов, рассчитанных Кестер (2010). Потоки в фотометрических полосах вычислялись как свертка теоретического спектра с функцией пропускания фильтра⁷. Форма теоретического спектра зависит от эф-

фективной температуры атмосферы T_{eff} и ускорения силы тяжести $\log g$. При описании наблюдений для каждой пары $(T_{\text{eff}}, \log g)$ находился масштабирующий множитель к теоретическим спектрам, минимизирующий χ^2 . Поскольку теоретические потоки рассчитаны у поверхности звезды, множитель для исправленных за межзвездное поглощение наблюдаемых потоков равен $\theta^2/4$, где θ — угловой диаметр белого карлика. Карта распределения χ^2 в плоскости $T_{\text{eff}} - \log g$ представлена на рис. 10b. На ней нарисована изолиния для уровня доверия 90%, показывающая высокую неопределенность в $\log g$. Минимум χ^2 достигается около $T_{\text{eff}} = 13\,080$ К и $\log g = 8.4$ при $\chi^2_{\nu} = 0.93$ ($\nu = 3$).

Для Gaia 19cwm в каталоге Gaia DR3 приводится параллакс $p'' = (4.21 \pm 0.24) \times 10^{-3}$, соответствующий расстоянию $D = 237 \pm 13$ Пк (Коллаборация Гайа, 2020). Это дает нам возможность наложения дополнительного ограничения на $\log g$ белого карлика (см. подробнее об используемом методе Колбин и др., 2024). Действительно, при описании фотометрических потоков в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах находились угловые диаметры θ . С другой стороны, угловой диаметр при известном расстоянии однозначно зависит от радиуса белого карлика, а тот, в свою очередь, однозначно связан с $\log g$ соотношением Нойнберг (1972). Требование равенства фотометрических угловых диаметров к $2R_1(\log g)/D$ дает решение в плоскости $T_{\text{eff}} - \log g$, показанное на рис. 10. Это решение дает ограничение на ускорение силы тяжести $\log g \in 8.0-8.4$, соответствующее массе $M_1 \in 0.58-0.84M_{\odot}$. Полученное ограничение на массу хорошо согласуется с оценкой массы белого карлика $M_1 = 0.66 \pm 0.06M_{\odot}$, найденной из анализа затмения.

⁶<https://stilism.obspm.fr>, см. подробнее Лаллемент и др. (2014, 2018); Капитанио и др. (2017).

⁷Функции пропускания использованных фильтров доступны на сайте <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/>

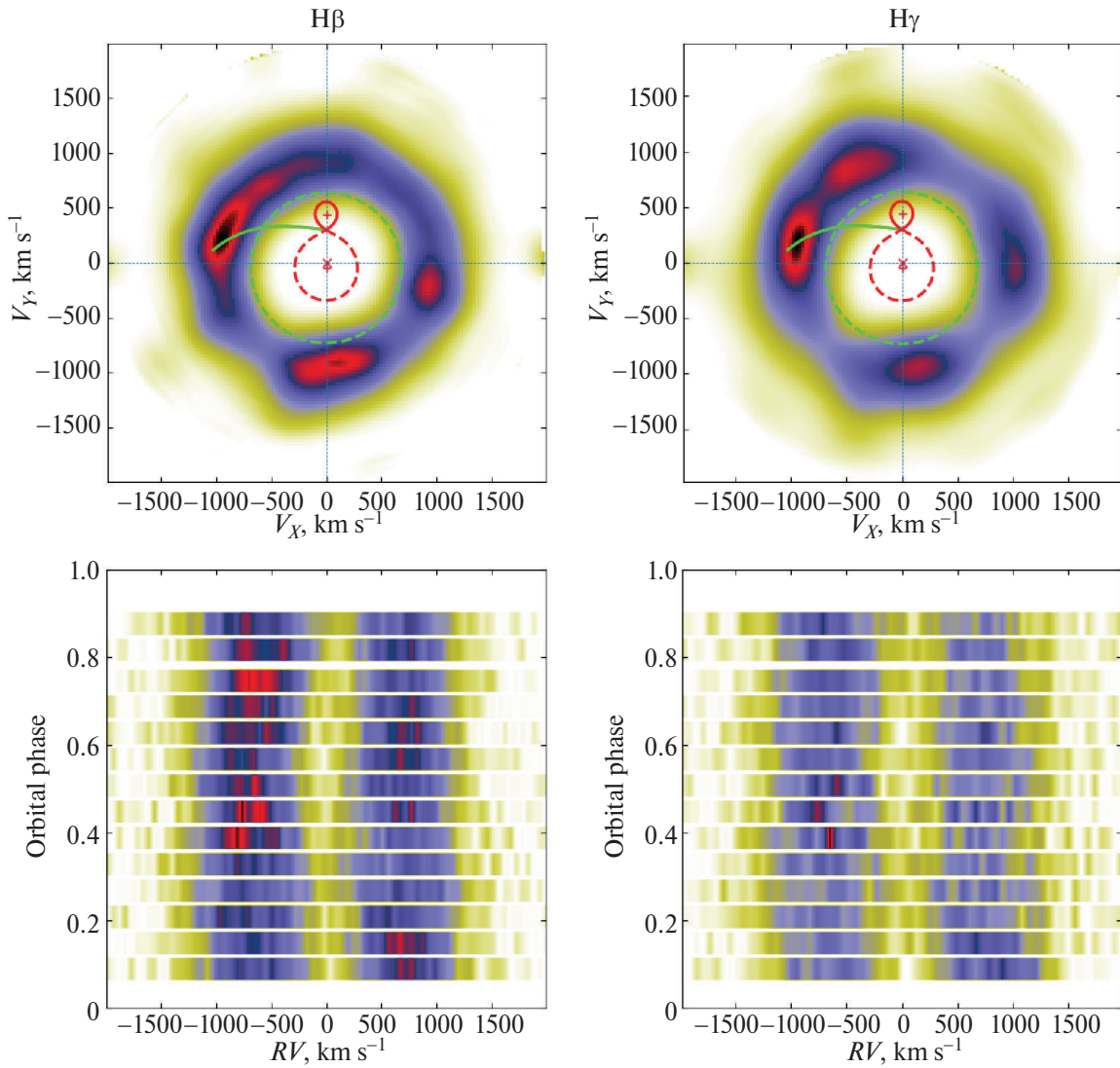


Рис. 7. Верхняя панель: доплеровские томограммы Gaia 19cwm в линиях H β (слева) и H γ (справа). Указаны скорости полюстей Роша первичной (замкнутая красная пунктирная линия) и вторичной (замкнутая непрерывная линия) компоненты. Зеленой непрерывной линией указана баллистическая траектория частиц, вырывающихся из точки Лагранжа L $_1$. Зеленая пунктирная окружность — скорости частиц на орбите вокруг белого карлика, в которой реализуется резонанс 3 : 1. Нижняя панель: динамические спектры линий H β (слева) и H γ (справа), по которым проводилось восстановление доплеровских томограмм.

6. РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТР

Переменная Gaia 19cwm попала в поле зрения рентгеновского телескопа XRT орбитальной обсерватории Swift. Спектр Gaia 19cwm получен в диапазоне энергий $E = 0.2\text{--}10$ кэВ с экспозицией 3.6 кс (ObsID 00014862002). Экстракция спектральных наблюдений осуществлялась с помощью онлайн-сервиса⁸ извлечения данных Swift/XRT (Эванс и др., 2009). Анализ спектральных данных проводился с использованием программы Xspec пакета HEASoft⁹.

⁸Сервис по извлечению наблюдательных данных Swift/XRT доступен по адресу https://www.swift.ac.uk/user_objects/

⁹Пакет программ HEASoft доступен по адресу <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft/>

Спектр был сгруппирован таким образом, чтобы в каждом спектральном канале было не менее одного отсчета. Для оценки рентгеновской светимости спектр был описан моделью тормозного излучения с поглощением (tbabs(bremss) в Xspec). В модели поглощения tbabs использовался химический состав, предложенный в работе Вилмс и др. (2000). Применяв эмпирическое соотношение Фойт и др. (2016) к оценке межзвездного поглощения, полученной в предыдущем разделе, мы получили лучевую концентрацию водорода $N_H = (0.450 \pm 0.018) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, которую зафиксировали при моделировании рентгеновских наблюдений. Поскольку спектр имел малое накопление (лишь 18 отсчетов), аппроксимация была выполнена

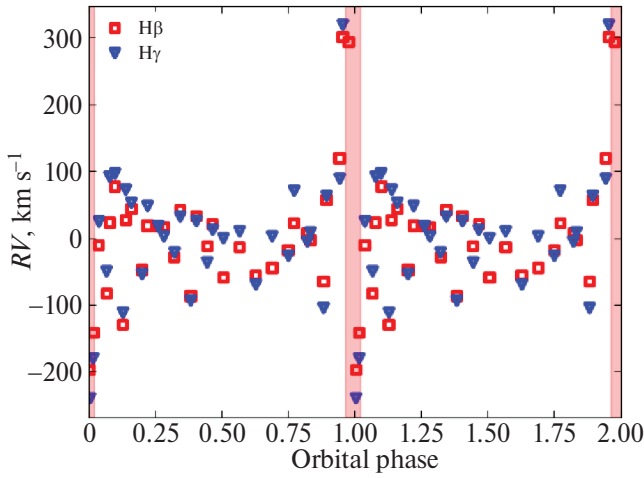


Рис. 8. Кривая лучевых скоростей Gaia 19cwm в линиях H β и H γ . Вертикальными полосами указаны фазы затмения белого карлика.

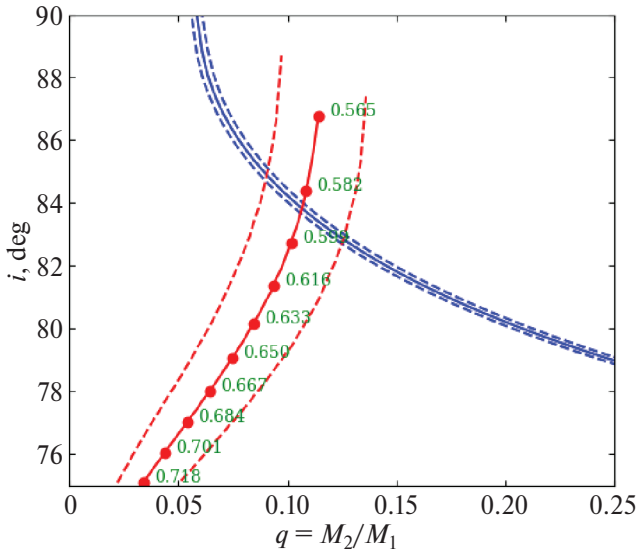


Рис. 9. Плоскость $i - q$ с решениями, обеспечивающими наблюдаемую ширину затмения белого карлика (синяя линия) и параметры (положение и ширину) затмения горячего пятна (красная линия). Зелеными надписями указаны радиусы диска в единицах большой полуоси R_D/A , соответствующие положению и ширине затмения горячего пятна.

с использованием С-статистики (Кэш, 1979). Малое накопление не позволяет определить температуру аккреционных пятен, поэтому она была зафиксирована на характерном значении 25 кэВ. Получен рентгеновский поток в диапазоне 0.1–10 кэВ $F_X = (2.4 \pm 0.3) \times 10^{-13}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$, исправленный за межзвездное поглощение. С учетом параллакса $p'' = (4.21 \pm 0.24) \times 10^{-3}$ (Коллаборация Гайа, 2020) имеем рентгеновскую светимость $L_X = (1.6 \pm 0.3) \times 10^{31}$ эрг/с. Это соответствует темпу аккреции на белый карлик $\dot{M} \sim L_X R_1 / GM_1 \approx 10^{-12} M_\odot/\text{год}$.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В долговременной кривой блеска Gaia 19cwm прослеживаются два типа вспышек. Одна из них — типичная сверхвспышка с амплитудой $\approx 6^m$. Это пограничная амплитуда между сверхвспышками катаклизмических переменных типов SU UMa и WZ Sge. Судя по наиболее плотному ряду наблюдений ZTF, сверхвспышек в интервале ~ 5 лет, вероятнее всего, не было. Это говорит в пользу того, что Gaia 19cwm является системой типа WZ Sge. Две небольшие вспышки, следующие за сверхвспышкой, не похожи ни на нормальные вспышки систем типа SU UMa (нормальные вспышки обычно происходят регулярно), ни на ребрайтинги у “классических” звезд типа WZ Sge (ребрайтинги обычно наблюдаются на спаде сверхвспышки, здесь же через ≈ 10 сут после ее окончания). Интересной особенностью Gaia 19cwm является на $\approx 0^m.5$ большая яркость после вспышки в сравнении с довспышечным уровнем блеска. По-видимому, это явление является распространенным среди звезд типа WZ Sge и наблюдались, например, у V455 And (Товмассян и др., 2022), LS And (Kato, 2023), KSN:BS-C11a (Ридден-Харпер и др., 2019), BW Sqi (Неустров и Мантинен, 2023) (см. также похожие явления у звезд типа SU UMa в Павленко и др., 2014, 2024). Орбитальный период Gaia 19cwm $P_{\text{orb}} = 0.05994478(4)$ сут (≈ 86.32 мин) хорошо согласуется с распределением периодов звезд типа WZ Sge, где большая часть систем имеет периоды менее 0.06 сут (Като, 2015).

Кривые блеска Gaia 19cwm демонстрируют переменность с периодом $P_s \approx 6.45$ мин, который является стабильным на протяжении, по крайней мере, четырех последних лет. Стабильность периода указывает на его связь с вращением белого карлика, а не с нерадиальными пульсациями, что позволяет классифицировать Gaia 19cwm как промежуточный поляр. Двухгорбая форма фазовой кривой блеска указывает на двухполюсной режим аккреции на белый карлик. Отношение периода вращения белого карлика к орбитальному $P_s/P_{\text{orb}} \approx 0.075$ принадлежит диапазону 0.01–0.1, где располагается большинство известных промежуточных поляров. Наличие вспышечной активности также делает Gaia 19cwm представителем редкого подкласса вспыхивающих промежуточных поляров (см. рис. 8 в Павленко и др., 2019).

Gaia 19cwm демонстрирует также внезатменную переменность, модулированную с орбитальным периодом. Кривые блеска, свернутые с орбитальным периодом, имеют двухгорбую форму (вне затмения). Такое поведение блеска, при сделанных оценках параметров белого карлика, может быть интерпретировано эффектами эллипсоидальности донора с температурой $T \sim 2500$ К. Однако, ввиду имеющихся неопределенностей в параметрах системы, не стоит отвергать переменность иной природы. Так, похожая двухгорбая модуляция блеска наблюдалась среди звезд ти-

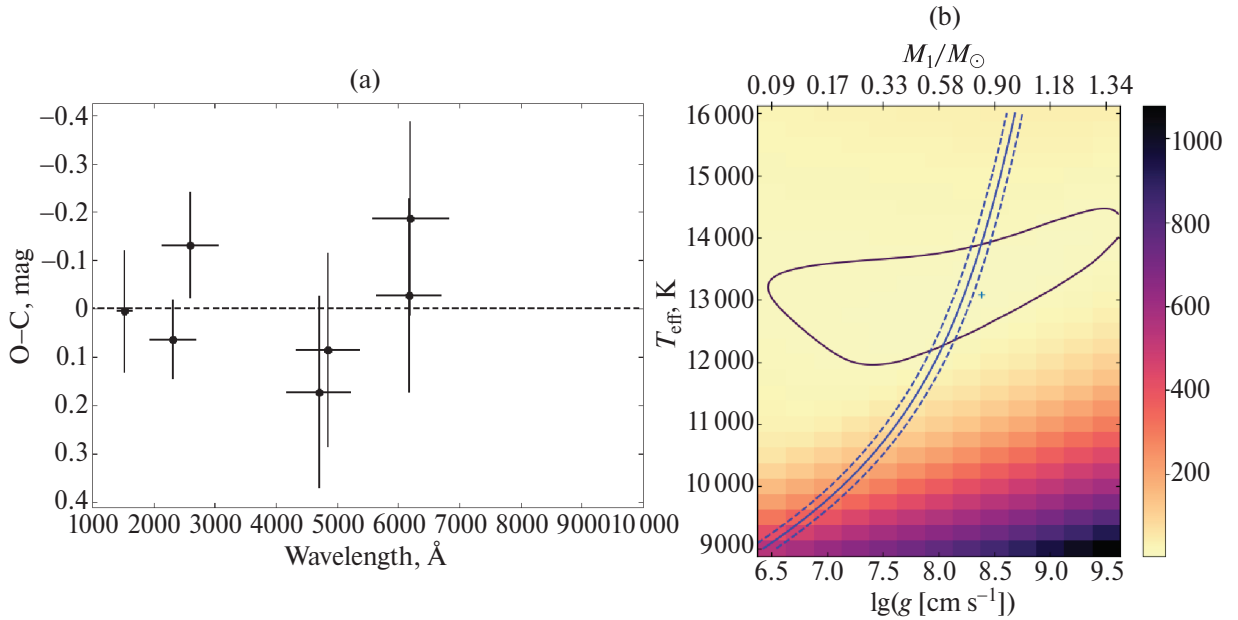


Рис. 10. (a) — Диаграмма $O-C$ между наблюдаемыми и теоретическими звездными величинами белого карлика (горизонтальными барами указаны ширины фотометрических полос). (b) — Карта распределения χ^2 в плоскости $T_{\text{eff}} - \log g$.

па WZ Sge с маломассивными донорами, где яркости донора не достаточно для воспроизведения наблюдаемой амплитуды блеска. Можно выделить три интерпретации этого явления. Первая заключается в изменении условий видимости горячего пятна (горячей линии), образуемого при взаимодействии аккреционной струи с прозрачным аккреционным диском. Во втором случае двухгорбая переменность ассоциируется со спиральной структурой в аккреционном диске, рождающейся при резонансе 2 : 1 (Авилес и др., 2010; Жариков и др., 2013). Резонанс 2 : 1 может возникать только во внешних частях аккреционного диска при отношении масс $q \leq 0.1$, в пределах ошибок согласующимся с оценкой этого параметра для Gaia 19cwm. Другая интерпретация этого явления предложена Кононов и др. (2015) и заключается во взаимодействии прецессирующей волны плотности с ударными областями в диске.

Из анализа профиля затмения сделаны оценки отношения масс $q = 0.11 \pm 0.02$ и наклона орбиты $i = 83.8^\circ \pm 1.1^\circ$. Продолжительность входа в затмение соответствует массе белого карлика $M_1 = 0.66 \pm 0.06 M_\odot$. Масса донора $M_2 = 0.073 \pm 0.015 M_\odot$ близка к массе $M_{\text{bounce}} = 0.063^{+0.005}_{-0.002} M_\odot$, при которой происходит изменение эволюции катаклизмической переменной с уменьшающегося периода на возрастающий (МакАллистер и др., 2019, см. также Книгге и др., 2011). Однако стоит отметить, что оценка массы белого карлика модельно зависима и на нее может сказываться вклад излучения аккреционного диска, смещение центра яркости горячего пятна от баллистической траектории и наличие аккреционных пятен на поверхности белого карлика. Так как оценка

вклада диска по кривой блеска невелика (не более 10 %), определение массы белого карлика в нашей работе проводилось в пренебрежении возможным вкладом диска. Найденная нами оценка температуры белого карлика $T \approx 13000$ К является естественной для катаклизмических переменных с орбитальными периодами $P \sim 80-90$ мин (Таунсли и Гэнзике, 2009; Пала и др., 2022; Книгге и др., 2011). Допплеровские томограммы Gaia 19cwm демонстрируют наличие горячего пятна, образуемого при взаимодействии аккреционной струи и аккреционного диска. Также томограммы показывают излучение аккреционного диска, формирующееся внутри радиуса резонанса 3 : 1. В кривых лучевых скоростей не проявляется орбитальное движение внутренних частей аккреционного диска ($K \lesssim 50$ км/с), что согласуется с малым отношением масс системы.

Низкая рентгеновская светимость $L_X = (1.6 \pm 0.3) \times 10^{31}$ эрг/с позволяет отнести Gaia 19cwm к группе промежуточных полярных LLIP¹⁰ (Low Luminosity Intermediate Polars, Преториус и Мукай, 2014), удовлетворяющих ограничению $L_X < 10^{33}$ эрг/с. К этому же типу, вероятно, относится недавно открытый промежуточный поляр SRGe J194401.8+28445 (Колбин и др., 2024). Полученное нами ограничение на рентгеновскую светимость согласуется со светимостью звезд типа WZ Sge в спокойном состоянии (Амантаева и др., 2021; Неустров и Мантинен, 2023; Швопе и др., 2024). Низкий темп аккреции на белый карлик $\dot{M} \lesssim 10^{-12} M_\odot/\text{год}$ ожидаем для звезд типа WZ Sge в спокойном состоянии

¹⁰См. также <https://asd.gsfc.nasa.gov/Koji.Mukai/iphone/catalog/llip.html>

(Неустроев и Мантинен, 2023). Однако следует отметить, что рентгеновская светимость в спокойном состоянии плохо отражает темп массопереноса в системе, поскольку темп аккреции в аккреционном диске уменьшается при приближении к белому карлику (Канниzzo, 1993).

По результатам выполненной работы мы можем заключить, что Gaia 19cwm является интересным представителем карликовых новых, имеющим в своем составе замагниченный белый карлик. Gaia 19cwm дополняет немногочисленный ряд затменных звезд типа WZ Sge, что делает эту систему важным объектом для понимания эволюционного статуса звезд типа WZ Sge.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10064, <https://rscf.ru/project/22-72-10064/>. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука и университеты”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авилес и др. (A. Aviles, S. Zharikov, G. Tovmassian, R. Michel, M. Tapia, M. Roth, V. Neustroev, C. Zurita, et al.), *Astrophys. J.* **711**, 389 (2010).
- Амантаева и др. (A. Amantayeva, S. Zharikov, K.L. Page, E. Pavlenko, A. Sosnovskij, S. Khokhlov, and M. Ibraimov), *Astrophys. J.* **918**, 58 (2021).
- Афанасьев и Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005).
- Бисикало и др. (D.V. Bisikalo, A.A. Boyarchuk, P.V. Kaigorodov, and O.A. Kuznetsov), *Astronomy Reports* **47**, 809 (2003).
- Боселли, Бойссиер и др. (A. Boselli, S. Boissier, S. Heinis, L. Cortese, O. Ilbert, T. Hughes, O. Cucciati, J. Davies, et al.), *Astron. Astrophys.* **528**, 107 (2011).
- Вилмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
- Вуд и др. (J.H. Wood, K. Horne, G. Berriman, and R.A. Wade), *Astrophys. J.* **341**, 974 (1989).
- Жариков и др. (S. Zharikov, G. Tovmassian, A. Aviles, R. Michel, D. Gonzalez-Buitrago, and M.T. Garcia-Diaz), *Astron. Astrophys.* **549**, A77 (2013).
- Канниzzo (J.K. Cannizzo), in J.C. Wheeler ed, *Accretion discs in compact stellar systems*, World Sci. Publ., Singapore, 6 (1993).
- Капитанио и др. (L. Capitanio, R. Lallement, J.L. Vergely, M. Elyajouri, and A. Monreal-Ibero), *Astron. Astrophys.* **606**, A65 (2017).
- Каро (T. Kato), *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, 108 (2015).
- Каро (T. Kato), *arXiv arXiv:2301.03743*, (2023).
- Кестер (D. Koester), *Memorie della Societa Astronomica Italiana* **81**, 921 (2010).
- Книгге и др. (C. Knigge, I. Baraffe, and J. Patterson), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **194**, 28 (2011).
- Колбин и др. (A.I. Kolbin, A.V. Karpova, M.V. Suslikov, I.F. Bikmaev, M.R. Gilfanov, I.M. Khamitov, Yu.A. Shibano, D.A. Zyuzin, et al.), *Astron. Lett.* **50**, 351 (2024).
- Колбин и др. (A.I. Kolbin, E.P. Pavlenko, V.Yu. Kochkina, A.S. Vinokurov, S.Yu. Shugarov, A.A. Sosnovskij, K.A. Antonyuk, O.I. Antonyuk, N.V. Pit', et al.), *Astron. Lett.* **50**, 335 (2024).
- Коллаборация Гайа (Gaia Collaboration), *VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3* (2020).
- Кононов и др. (D.A. Kononov, D.V. Bisikalo, V.B. Puzin, A.G. Zhilkin, and A.Yu. Sytov), *Astronomy Reports* **59**, 191 (2015).
- Котзе, Поттер и др. (E.J. Kotze, S.B. Potter, and V.A. McBride), *Astron. Astrophys.* **579**, 77 (2015).
- Котзе, Поттер и др. (E.J. Kotze, S.B. Potter, and V.A. McBride), *Astron. Astrophys.* **595**, 47 (2016).
- Кроппер (M. Cropper), *Space Sci. Rev.* **54**, 195 (1990).
- Кэш (W. Cash), *Astrophys. J.* **228**, 939 (1979).
- Лаллемент и др. (R. Lallement, J.-L. Vergely, B. Valette, L. Puspitarini, L. Eyer, and L. Casagrande), *Astron. Astrophys.* **561**, A91 (2014).
- Лаллемент и др. (R. Lallement, L. Capitanio, L. Ruiz-Dern, C. Danielski, C. Babusiaux, L. Vergely, M. Elyajouri, F. Arenou, and N. Leclerc), *Astron. Astrophys.* **616**, A132 (2018).
- Лоу и др. (N.M. Law, S.R. Kulkarni, R.G. Dekany, E.O. Ofek, R.M. Quimby, P.E. Nugent, J. Surace, C.C. Grillmair, et al.), *PASP* **121**, 1395 (2009).
- МакАллистер и др. (M. McAllister, S.P. Littlefair, S.G. Parsons, V.S. Dhillon, T.R. Marsh, B.T. Gansicke, E. Breedt, C. Copperwheat, et al.), *MNRAS* **486**, 5535 (2019).
- Марш, Швопе (T.R. Marsh and A.D. Schwöpe), *ASSL* **439**, 195 (2016).
- Маски и др. (F. Masci, R. Laher, B. Rusholme, et al.), *PASP* **131**, 995 (2018).
- Мэттьюз и др. (O.M. Matthews, R. Speith, G.A. Wynn, et al.), *MNRAS* **375**, 105 (2007).
- Неустроев и Мантинен (V.V. Neustroev and I. Mäntynen), *MNRAS* **523**, 6114 (2023).
- Нойнберг (M. Nauenberg), *Astrophys. J.* **175**, 417 (1972).
- Осаки (Y. Osaki), *Publ. Astron. Soc. Japan* **47**, 47 (1995).
- Павленко и др. (E.P. Pavlenko, T. Kato, O.I. Antonyuk, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, 111 (2014).
- Павленко и др. (E. Pavlenko, K. Nijima, P. Mason, et al.), *CoSka* **49**, 204 (2019).
- Павленко и др. (E. Pavlenko, S. Shugarov, T. Kato, et al.), *CoSka* **54**, 117 (2024).
- Пала и др. (A.F. Pala, B.T. Gansicke, T.R. Marsh, et al.), *MNRAS* **483**, 1080 (2019).
- Пала и др. (A.F. Pala, B.T. Gansicke, D. Belloni, S.G. Parsons, T.R. Marsh, et al.), *MNRAS* **510**, 6110 (2022).
- Паттерсон (J. Patterson), *PASP* **106**, 209 (1994).
- Преториус и Мукаи (M.L. Pretorius and K. Mukai), *MNRAS* **442**, 2580 (2014).
- Ридден-Харпер и др. (R. Ridden-Harper, B.E. Tucker, and P. Garnavich, et al.), *MNRAS* **490**, 5551 (2019).

41. Таунсли и Гэнзике (D.M. Townsley and B.T. Gansicke), *Astrophys. J.* **693**, 1007 (2009).
42. Товмассян и др. (G. Tovmassian, B.T. Gansicke, J. Echevarria, et al.), *Astrophys. J.* **939**, 14 (2022).
43. Тонри и др. (J.L. Tonry, L. Denneau, A.N. Heinze, B. Stalder, K.W. Smith, et al.), *PASP* **130**, 064505 (2018).
44. Уорнер (B. Warner), *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge Univ. Press, Cambridge).
45. Фитцпатрик (E.L. Fitzpatrick), *PASP* **111**, 63 (1999).
46. Фланнери (B.P. Flannery), *MNRAS* **170**, 325 (1975).
47. Флювеллинг и др. (H.A. Flewelling, E.A. Magnier, K.C. Chambers, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **251**, 7 (2020).
48. Фойт и др. (D. Foight, T. Guver, and F. Ozel), *Astrophys. J.* **826**, 66 (2016).
49. Хамери и др. (J.M. Hameury, J.P. Lasota, and J.M. Hure), *MNRAS* **287**, 937 (1997).
50. Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, et al.), arXiv:1612.05560 (2016).
51. Шакура и Сюняев. (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **24**, 337 (1973).
52. Шаппи и др. (B.J. Shappee, J.L. Prieto, D. Grupe, C.S. Kochanek, K.Z. Stanek, et al.), *Astrophys. J.* **788**, 48 (2014).
53. Шафтер (A.W. Shafter), *Astrophys. J.* **267**, 222 (1983).
54. Швопе и др. (A. Schwope, J. Kurpas, P. Baecke, et al.), *Astron. Astrophys.* **686**, A110 (2024).
55. Шкоди и др. (P. Szkody, C. Olde Loohuis, B. Koplitz, J. van Roestel, et al.), *Astron. J.* **162**, 94 (2021).
56. Шкоди и др. (P. Szkody, P. Godon, B.T. Gansicke, S. Kafka, O.F.T. Castillo, K.J. Bell, P.B. Cho, et al.), *Astrophys. J.* **914**, 40 (2021).
57. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).