

SRGe J214919.3+673634 — КАНДИДАТ В ПЕРЕМЕННЫЕ ТИПА AM Her, ОБНАРУЖЕННЫЙ ТЕЛЕСКОПОМ eРОЗИТА ОРБИТАЛЬНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ “СПЕКТР–РЕНТГЕН–ГАММА”

© 2022 г. И. Ф. Бикмаев^{1,2,3*}, А. И. Колбин^{4,1}, В. В. Шиманский⁴, И. М. Хамитов^{5,1}, Э. Н. Иртуганов^{1,2,3}, Е. А. Николаева^{1,2,3}, Н. А. Сахибуллин^{1,2}, Р. И. Гумеров^{1,2}, Р. А. Буренин⁶, М. Р. Гильфанов^{6,7}, И. А. Зазнобин⁶, Р. А. Кривонос⁶, П. С. Медведев⁶, А. В. Мещеряков⁶, С. Ю. Сазонов⁶, Р. А. Сюняев^{6,7}, Г. А. Хорунжев⁶, А. В. Моисеев^{4,6}, Е. А. Малыгин⁴, Е. С. Шабловинская⁴, С. Г. Желтоухов³

¹Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия

²Академия Наук РТ, Казань, Россия

³Государственный астрономический Институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

⁵Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция

⁶Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁷Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 05.10.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.; принята к публикации 05.10.2022 г.

Представлены результаты оптического отождествления, классификации, а также анализа фотометрических и спектральных наблюдений рентгеновского транзиента SRGe J214919.3+673634, обнаруженного телескопом eРОЗИТА орбитальной обсерватории “Спектр–Рентген–Гамма”, летом 2021 г. в ходе четвертого обзора неба. Фотометрические наблюдения оптического компаньона источника SRGe J214919.3+673634, выполненные на 6-м телескопе БТА САО РАН, 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, а также архивные данные 48-двойного телескопа ZTF показали, что источник является катаклизмической переменной с орбитальным периодом $P = 85 \pm 0.4$ мин и демонстрирует долговременную переменность блеска от 23.5^m (низкое состояние) до 20^m (высокое состояние). Показано, что кривые блеска в высоком состоянии согласуются с моделью аккрецирующего замагниченного белого карлика и позволяют сделать предположение о принадлежности SRGe J214919.3+673634 к переменным типа AM Her. Спектры оптического компаньона, полученные в низком состоянии блеска на БТА, согласуются со спектральным распределением энергии белого карлика с температурой $\sim 24\,000$ К.

Ключевые слова: звезды — новые, катаклизмические переменные; индивидуальные — SRGe J214919.3+673634; методы — фотометрия, спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0320010822090017

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская обсерватория СРГ (Сюняев и др., 2021), запущенная 13 июля 2019 г., успешно работает на орбите вокруг точки Лагранжа L_2 системы Солнце–Земля. Основная цель обсерватории — обзор всего неба в широком диапазоне энергий 0.3–30 кэВ. К середине декабря 2021 г.

были завершены четыре полных обзора неба. В состав обсерватории входят два рентгеновских телескопа с оптикой косоугольного падения: СРГ/eРОЗИТА, работающий в диапазоне 0.3–10 кэВ (Предел и др., 2020) и СРГ/АРТ-ХС им. М.Н. Павлинского, диапазон 5–30 кэВ (Павлинский и др., 2021). В результате четырех обзоров неба телескоп СРГ/eРОЗИТА зарегистрировал более двух миллионов рентгеновских источников на половине неба, за обработку данных на которой отвечают

* Электронный адрес: ibikmaev@yandex.ru

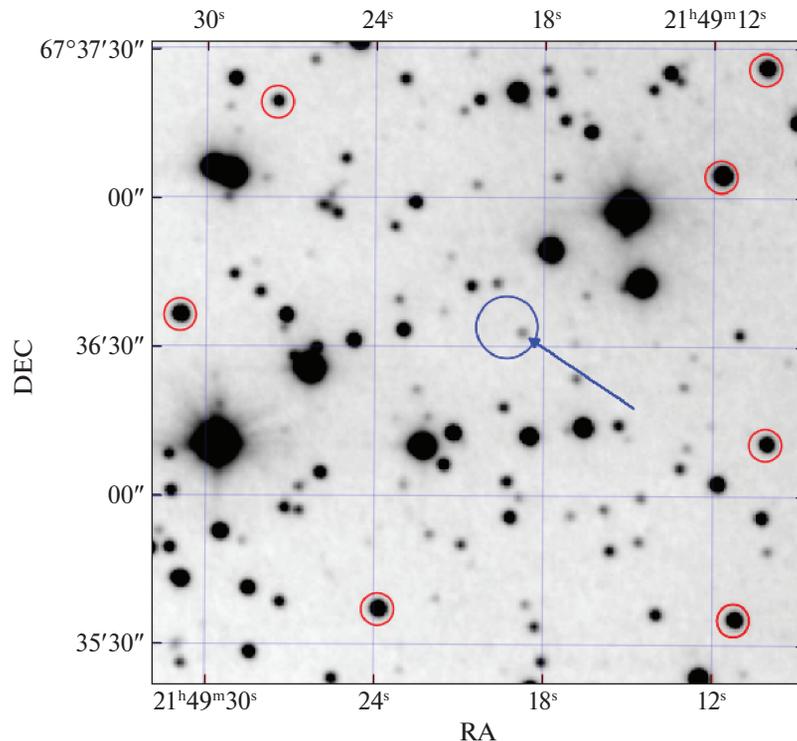


Рис. 1. Изображение окрестностей источника в фильтре i , полученное путем усреднения изображений РТТ-150. Синий кружок радиусом $5.5''$ показывает область 98% локализации рентгеновского источника. Центр кружка соответствует положению рентгеновского источника $RA = 327.33046^\circ$, $DEC = +67.60941^\circ$. Стрелкой показан вероятный оптический компаньон с координатами $RA = 327.32866^\circ$, $DEC = +67.60914^\circ$ на эпоху J2000. Красными кружками обозначены звезды сравнения, использованные при фотометрии.

российские ученые. Подавляющее большинство из зарегистрированных источников являются активными ядрами галактик (АЯГ) и квазарами. Наряду со стационарными источниками, зарегистрированными во всех четырех сканах, телескопом СРГ/еРОЗИТА в период с 2019 по 2022 г. регистрировались и переменные рентгеновские источники, поток от которых изменялся более чем в 7 раз между сканами, либо они регистрировались лишь в одном из сканов. К числу таких переменных источников относятся обнаруженные телескопом СРГ/еРОЗИТА явления приливного разрушения звезд в окрестностях активных ядер галактик (Сазонов и др., 2021).

В ряде случаев в результате оптических наблюдений переменные рентгеновские источники отождествлялись с катаклизмическими переменными звездами, обнаруженными в период их поярчания в рентгеновском диапазоне. К числу таких источников относится и источник SRGe J214919.3+673634, исследуемый в настоящей работе. Источник SRGe J214919.3+673634 был обнаружен в 4-м скане СРГ/еРОЗИТА в июле 2021 г. В области 98% локализации радиусом $R_{98} = 5.5''$ вокруг рентгеновских ко-

ординат СРГ/еРОЗИТА по архивным данным каталога The CatWISE2020 Catalog (Марокко и др., 2021) находится инфракрасный источник J214918.91+673633.3. На расстоянии $0.3''$ от инфракрасного источника обзором ZTF (Маски и др., 2018) 12 июля 2021 г. был зарегистрирован кандидат в оптические транзиенты ZTF21ablobhh $RA = 327.32858^\circ$, $DEC = +67.609050^\circ$. Указанный транзient имел видимую звездную величину $r = 20.1 \pm 0.2^m$.

Проведенная на БТА поисковая фотометрия в фильтре i -SDSS обнаружила в области локализации оптический компаньон, совпадающий по координатам с ZTF21ablobhh. На рис. 1 показано положение найденного источника. Блеск источника явно изменялся между соседними экспозициями. На 1.5-м телескопе РТТ-150 были получены продолжительные фотометрические ряды, показавшие признаки переменности блеска, характерные для катаклизмических переменных. Для определения параметров этого оптического кандидата SRGe J214919.3+673634 (далее в статье для краткости обозначенного как SRGe2149) была проведена серия фотометрических и спектральных наблюдений на 1.5-м телескопе РТТ-150, 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ и 6-м телескопе БТА

САО РАН. Результаты этих наблюдения анализируются в данной статье.

Катаклизмические переменные представляют собой тесные двойные системы, состоящие из аккрецирующего белого карлика (первичная компонента) и звезды главной последовательности (вторичная компонента), заполняющей свою полость Роша и теряющей вещество через окрестности точки Лагранжа L_1 (Уорнер, 1995). Орбитальные периоды этих систем лежат в диапазоне от ≈ 82 мин (Книгге и др., 2011) до нескольких часов.

Аккреция в катаклизмических переменных зависит от напряженности магнитного поля белого карлика. В системах со слабой замагниченностью белого карлика ($B \lesssim 0.1$ МГс) образуется аккреционный диск. Многие представители таких систем проявляют периодические вспышки с амплитудой $\Delta V = 2-6^m$ и называются карликовыми новыми. Вспышки происходят благодаря тепловой нестабильности аккреционного диска, возникающей при низких темпах аккреции ($\dot{M} \lesssim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$). Вспышки карликовых новых длятся от нескольких дней до нескольких месяцев и могут повторяться на масштабах времени от недель до десятков лет. Другим типом катаклизмических переменных являются новоподобные звезды, которые не проявляют вспышечной активности. Считается, что данные системы имеют высокий темп аккреции ($\dot{M} \gtrsim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$), при котором диск является стабильным. Родственными к катаклизмическим переменным являются звезды типа AM CVn с вырожденными донорами (Солхейм, 2010). Они характеризуются короткими орбитальными периодами ($P_{\text{orb}} = 5-65$ мин) и отсутствием линий водорода в оптических спектрах.

При сильной замагниченности белого карлика ($B \sim 10-200$ МГс) аккреционный диск не образуется. Ионизованный газ аккреционной струи быстро достигает альвеновского радиуса и, не успев обернуться вокруг белого карлика, перетекает вдоль линий магнитного поля в направлении магнитных полюсов. Системы такого типа называются переменными типа AM Her или полярами. Сильное магнитное поле в полярах приводит к синхронизации вращения белого карлика с орбитальным движением ($P_{\text{spin}} = P_{\text{orb}}$). Падающее на аккректор вещество формирует на поверхности белого карлика горячие ($T \sim 10-50$ кэВ) аккреционные пятна, которые являются источниками рентгеновского излучения и циклотронного излучения в оптическом диапазоне. Для более детального знакомства с системами типа AM Her мы отсылаем читателя к обзору Кроппер (1990). Системы с более слабыми магнитными полями белого карлика ($B \sim 0.1-10$ МГс) относят к типу DQ Her или промежуточным полярам (Паттерсон, 1994). В них могут образовываться

аккреционные диски, которые разрушаются изнутри магнитным полем белого карлика. В отличие от поляров, в промежуточных полярах отсутствует синхронизация вращательного и орбитального движения белого карлика (среднее отношение периода вращения к орбитальному $\langle P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} \rangle \approx 0.1$).

РЕНТГЕНОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СРГ/еРОЗИТА

Источник SRGe J214919.3+673634 был обнаружен телескопом СРГ/еРОЗИТА в четвертом обзоре неба и наблюдался в проходах в период с 2021/07/16 по 2021/07/19. Рентгеновские координаты источника $RA = 327.33046^{\circ}$ и $DEC = 67.60941^{\circ}$, ошибка локализации рентгеновского источника $R98 = 5.5''$. В четвертом обзоре было зарегистрировано 44 рентгеновских фотона от источника в диапазоне 0.3–2.2 кэВ. Средний поток источника в четвертом обзоре равен $(11.2 \pm 2) \times 10^{-14}$ эрг/с/см². Интересно, что телескоп еРОЗИТА наблюдал область источника спустя всего четыре дня с момента яркой оптической вспышки ZTF21ablobhh, и на данном месте обнаружил яркий источник уже в рентгеновском диапазоне.

Источник не детектировался в предыдущих обзорах неба СРГ/еРОЗИТЫ. Верхний предел по сумме трех предыдущих обзоров еРОЗИТЫ равен 0.6×10^{-14} эрг/с/см² (0.3–2.2 кэВ). Верхний предел на рентгеновский поток в 3 обзоре неба равен 1.4×10^{-14} эрг/с/см². Таким образом, источник стал ярче в рентгене более чем в 8 раз между третьим и четвертым обзорами. Такая значительная полугодовая переменность позволяет отнести источник к выборке рентгеновских транзиентов еРОЗИТЫ и провести более детальные многоволновые исследования источника для его классификации.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Фотометрия

В рамках исследования по оптическому отождествлению источника SRGe J214919.3+673634 первые изображения получены в фильтре *i*-SDSS на 6-м телескопе БТА САО РАН с помощью многорежимного фокального редуктора SCORPIO-2 (Афанасьев, Моисеев, 2011) 2021/10/10. Детектор E2V CCD261-84 в режиме бинирования 2×2 обеспечивал поле зрения $6.8'$ с дискретностью $0.4''$ на пиксель. Было получено шесть экспозиций длительностью 15 сек. Внутри радиуса R98 обнаружен оптический компаньон, блеск которого менялся от 23 до 21 звездной величины. Чтобы понять природу источника, решено было получить долговременные

Таблица 1. Журнал фотометрических наблюдений SRGe J214919.3+673634

Телескоп	Дата	Период наблюдений, HJD-2459000	N	Фильтр	Δt_{exp} , с	ΔT , ч	$\langle m \rangle$, m
РТТ-150	14/15 Окт. 2021	502.32845–502.43391	19	i	300	2.5	21.6
РТТ-150	18/19 Окт. 2021	506.36633–506.47173	28	i	300	2.4	21.8
РТТ-150	19/20 Окт. 2021	507.21642–507.53612	60	i	300	8	21.9
РТТ-150	20/21 Окт. 2021	508.21643–508.63550	111	i	300	10.6	22.1
РТТ-150	28/29 Окт. 2021	516.23887–516.29336	14	i	180, 300	1.7	22.8
РТТ-150	05/06 Нояб. 2021	524.20206–524.22764	4	i	600	0.7	23.7
РТТ-150	05/06 Нояб. 2021	524.23487–524.36515	19	C	600	3.1	23.7
2.5-м КГО	05/06 Нояб. 2021	524.23724–524.34754	22	r	300	3	23.5
РТТ-150	16/17 Нояб. 2021	535.22147–535.26842	7	C	600	1.1	23.2
РТТ-150	02/03 Окт. 2022	855.31460–855.35774	12	i	300	1.0	21.8
РТТ-150	03/04 Окт. 2022	856.20068–856.33360	36	i	300	3.1	22.0
РТТ-150	04/05 Окт. 2022	857.32003–857.37078	11	i	300	1.2	21.9

Примечание. Перечислены телескопы, задействованные в наблюдениях, наблюдательные ночи, период наблюдений в гелиоцентрических юлианских датах, количество полученных изображений (N), использованные фильтры (C — наблюдения без фильтра), продолжительность единичных экспозиций (Δt_{exp}), общая продолжительность наблюдений в часах (ΔT) и средняя звездная величина $\langle m \rangle$.

фотометрические наблюдения и провести спектроскопию источника.

Фотометрические наблюдения SRGe2149 проводились на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 (Турецкая национальная обсерватория TUBITAK) с 14-го октября по 16 ноября 2021 г. и 2–4 октября 2022 г. Использовались прибор TFOSS и фильтр i системы SDSS. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС-камера Andor iKon-L 936 VEX2-DD-9ZQ размером 2048×2048 пикселей. Качество изображений составляло $1.5\text{--}2''$ в разные периоды наблюдения, поэтому использовался вариант наблюдений с бинированием 2×2 и элементом изображения $0.65''/\text{пиксель}$. Дополнительные фотометрические наблюдения были выполнены 5 ноября 2021 г. на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ в полосе r системы SDSS параллельно со спектральными наблюдениями на 6-м телескопе БТА. Измерения проводились на охлаждаемом жидким азотом ПЗС-фотометре NBI¹ (с размером чипа 4096×4096 пикселей и масштабом изображения $0.155''/\text{пиксель}$), установленном в

фокусе Кассегрена телескопа. Был проведен мониторинг объекта длительностью около 3 ч, при длительности одной экспозиции 300 с. Во время мониторинга качество изображения составляло $0.8\text{--}1''$ и не наблюдалось вариаций прозрачности атмосферы. Журнал фотометрических наблюдений e2149 представлен в табл. 1.

Обработка полученного материала проводилась с использованием стандартных средств пакета IRAF². Из изображений вычитались кадры электронного нуля (байеса), на основе кадров плоского поля выполнено исправление изображений за мультипликативные ошибки, проведена чистка изображений от следов космических частиц с применением алгоритма LaCosmic (ван Доккум, 2001). Поиск звездообразных источников на изображениях проводился с помощью алгоритма DAOFIND. Апертурная фотометрия SRGe2149 выполнялась с использованием нескольких звезд сравнения, показанных на рис. 1. Анализ их блеска относительно контрольной звезды не выявил их переменности в течение всего периода наблюдений. Выбор оптимальной апертуры проводился путем

¹Более подробная информация о детекторе доступна по адресу: <https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/wfi/>.

²Пакет обработки и анализа астрономических данных разработан Национальной оптической обсерваторией США и доступен по адресу: <https://iraf-community.github.io/>.

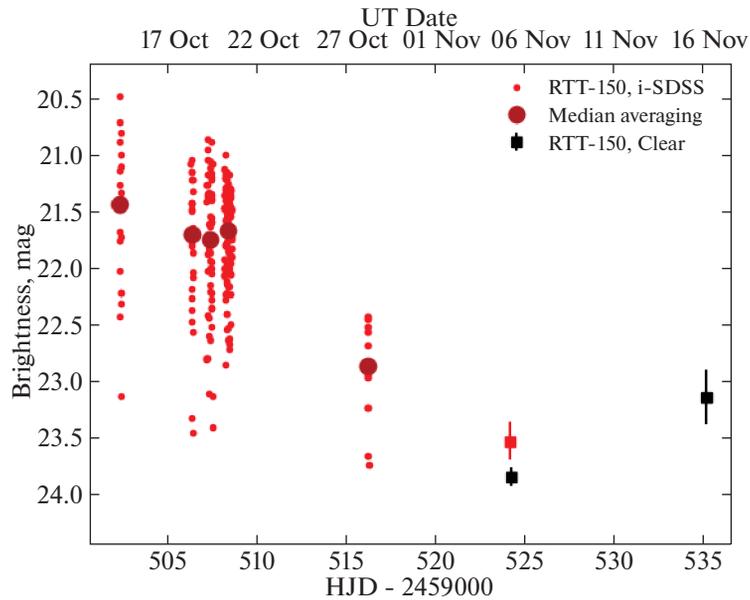


Рис. 2. Долговременная кривая блеска SRGe2149, построенная на основе наблюдений на телескопе РТТ-150. Показаны кривые блеска, полученные в фильтре i в период с 14 по 28 октября 2011 г. (красные точки), а также их средние медианные яркости (коричневые кружки). Также представлены оценки среднего блеска звезды, полученные без использования фотометрических фильтров 5 и 16 ноября (черные квадраты). Кроме того, дана оценка среднего блеска SRGe2149 в полосе r , найденная по наблюдениям 5 ноября.

минимизации стандартного отклонения блеска контрольных звезд, сравнимых по яркости с SRGe2149.

Спектроскопия

Спектроскопические наблюдения e2149 были выполнены на 6-м телескопе БТА САО РАН с использованием многорежимного фокального редуктора SCORPIO-2 в режиме длиннощелевой спектроскопии (Афанасьев, Моисеев, 2011). Наблюдения проводились в ночь с 5 по 6 ноября 2021 г. в хороших астроклиматических условиях (размер звездного изображения $\approx 1''$). При получении спектров использовались гризма VPHG1200@540 и щель шириной $1.5''$, обеспечивающие регистрацию спектров в диапазоне $\lambda = 3650\text{--}7250 \text{ \AA}$ с эффективным спектральным разрешением $\Delta\lambda \approx 6.5 \text{ \AA}$. Длина щели — $6.8'$ при масштабе $0.4''/\text{пиксель}$. К сожалению, к моменту наблюдений источника SRGe2149 на 6-м телескопе его видимый блеск ослаб до $i \approx 23.5^m$. Всего было получено пять экспозиций суммарной длительностью 6000 с.

Обработка полученных данных выполнялась с помощью пакета программ в среде IDL, разработанного в САО РАН для редукции длиннощелевых спектров, получаемых с прибором SCORPIO-2. Основные этапы обработки описаны в ряде статей, например в Егоров, Моисеев (2019). Но, в отличие от стандартной методики, чистка следов космических частиц проводилась на индивидуальных

кадрах уже после приведения спектров в шкалу длин волн и вычитания спектра свечения ночного неба. Такая методика обусловлена относительно большими размерами следов космических частиц при наблюдениях с детектором E2V CCD261-84 (Афанасьева и др., 2022).

Спектрофотометрическая калибровка выполнялась по спектру звезды-стандарта BD+28°4655, наблюдавшейся в ту же ночь перед наблюдениями SRGe2149 на близком зенитном расстоянии. Экстракция спектра SRGe2149 выполнялась в прямоугольной апертуре шириной $5''$.

АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИИ

В течение фотометрических наблюдений средний блеск SRGe2149 испытывал большие изменения. Кривая блеска, построенная по всем наблюдениям, полученным на РТТ-150 в 2021 г., представлена на рис. 2. Видно, что в период 14–20 октября 2021 г. средний блеск объекта находился на уровне $\langle i \rangle = 21.4\text{--}21.8^m$, а затем упал до величины $\langle i \rangle \approx 23.5^m$, зарегистрированной 5 ноября 2021 г. 28 октября SRGe2149 наблюдался в промежуточном состоянии со средним блеском $\langle i \rangle \approx 22.8^m$. Из табл. 1 видно, что в период 2–4 октября 2022 г. источник вновь находился в высоком состоянии со средним блеском $\langle i \rangle \approx 21.9^m$. Помимо долговременной переменности объект демонстрирует короткопериодические изменения блеска на масштабах времени ~ 1 ч.

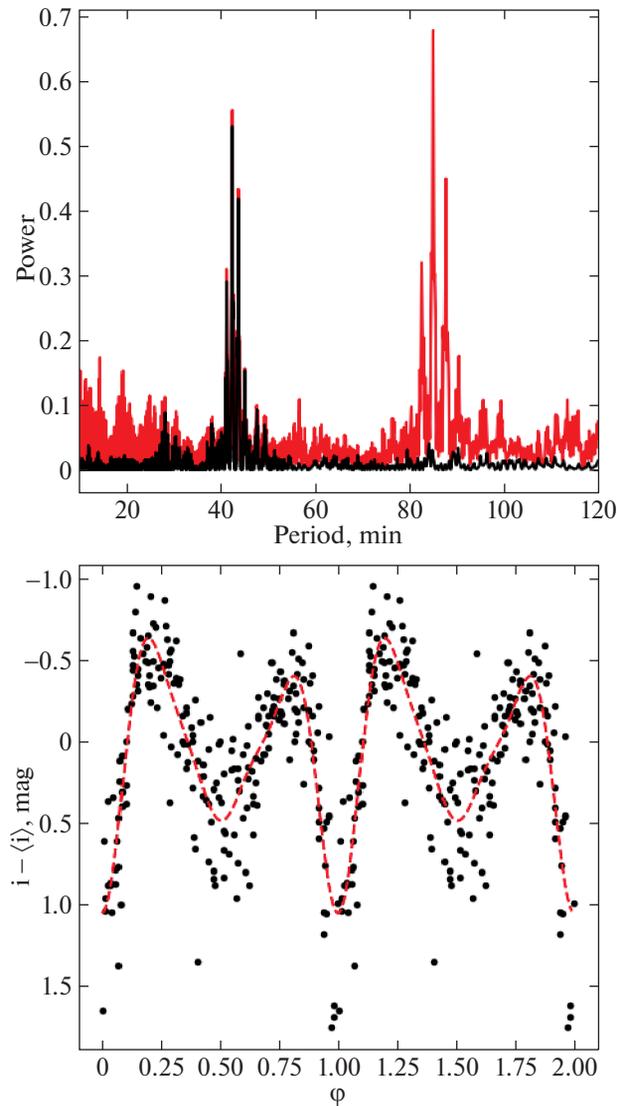


Рис. 3. На верхней панели показаны периодограммы Ломба–Скаргла SRGe J214919.3+673634 в высоком и промежуточном состоянии блеска (14–28 октября 2021 г.). Черная кривая — спектр мощности, полученный с использованием одной гармоники, красная кривая — спектр мощности, полученный с применением четырех гармоник. На нижней панели представлена кривая блеска высокого состояния SRGe J214919.3+673634, построенная в фазах фотометрического периода согласно эфемеридам (1). Пунктирная линия — аппроксимация тригонометрическим полиномом с четырьмя гармониками.

Анализ короткопериодических изменений блеска SRGe2149 проводился методом Ломба–Скаргла (ВандерПлас, 2018). При построении периодограмм использовались наблюдения, полученные в период нахождения объекта в высоком и промежуточном состоянии блеска (14–28 октября 2021 г.). Из кривых блеска отдельных ночей был вычтен средний уровень блеска, а наблюдения с плохим детектированием были исключены из рассмотрения. Анализ переменности на основе одной гармоники ($\cos(\omega t)$) дал значимый пик мощности, соответствующий периоду $P \approx 42.5$ мин (рис. 3). Однако более надежный период выделяется при использовании двух и более гармоник. На рис. 3

представлена периодограмма Ломба–Скаргла, полученная на основе четырех гармоник ($\cos(i\omega t)$, $i = 1, \dots, 4$), обеспечивающих удовлетворительное (в пределах ошибок) описание фазовой кривой блеска. Максимум мощности соответствует периоду $P = 85.0 \pm 0.4$ мин.

Существуют и физические ограничения, указывающие на истинность последнего периода. Первый период ($P \approx 42.5$ мин) существенно меньше предельного периода катаклизмических переменных $P_{\min} \approx 82$ мин (Книгге и др., 2011), и, если бы он соответствовал орбитальной переменности, то указывал бы на принадлежность SRGe2149 к системам типа AM CVn. Однако это входит в

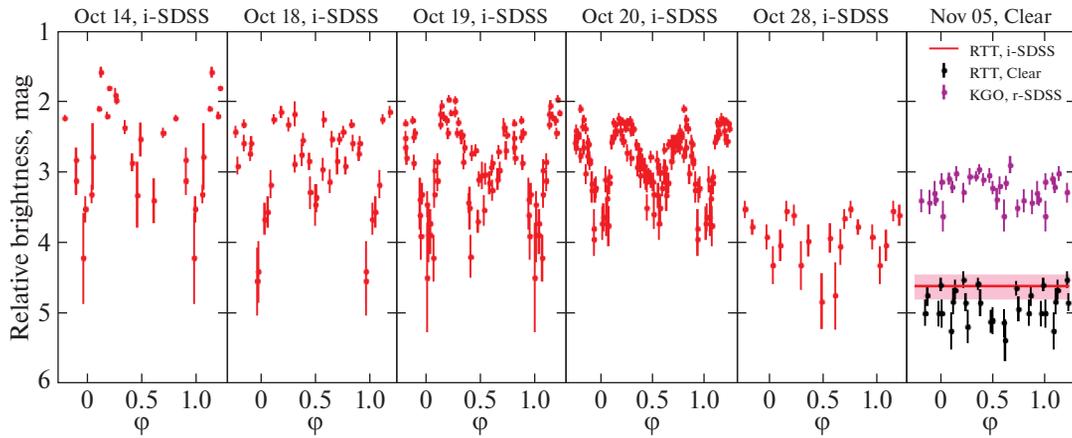


Рис. 4. Кривые блеска SRGe J214919.3+673634. Представлены наблюдения, выполненные в период 14–28 октября в фильтре i (красные точки). На последней панели дана кривая блеска, полученная 5 ноября без использования фотометрических фильтров (черные точки). Около нее красной горизонтальной линией представлен средний блеск объекта в полосе i . Там же показана кривая блеска SRGe J214919.3+673634, полученная на 2.5-м телескопе КГО в фильтре r системы SDSS. Эта кривая блеска не калибровалась по абсолютным потокам и произвольно смещена по оси ординат.

противоречие с проявлением линии $\text{H}\alpha$ в спектрах SRGe2149 (см. ниже), которая, как и другие водородные линии, не наблюдается у представителей типа AM CVn. Можно было бы также предположить, что наблюдаемая периодичность связана с вращением аккректора, а орбитальный период $P \gtrsim P_{\min}$, т.е. исследуемая система является промежуточным полярком. Однако тогда возникают сложности в интерпретации высокой амплитуды блеска $\Delta i \approx 1.5^m$, нетипичной для такого рода систем.

Найденный период близок к пределу P_{\min} и, с другой стороны, близок к наиболее вероятному орбитальному периоду катаклизмической переменной (т.е. соответствует максимуму наблюдаемого распределения катаклизмических переменных (Гэнзике и др., 2009)). Свернутая с ним кривая блеска e2149 представлена на рис. 3. Она имеет сложную форму с двумя различающимися по форме и глубине минимумами. Эфемериды главного минимума блеска SRGe2149+6736 имеют вид

$$BJD_{\min} = 2459502.3339(6) + 0.0590(2)E. \quad (1)$$

Рассмотрим подробнее кривую блеска на рис. 3. Центр главного минимума, расположенного на фазе $\varphi = 0$, является более узким ($\Delta\varphi \approx 0.2$), имеет резкий вход и выход. Вторичный минимум, расположенный на фазе $\varphi \approx 0.5$, менее глубокий, отличается плавным входом и выходом. Изменение кривой блеска SRGe2149 в течение проведенных наблюдений представлено на рис. 4. Очевидно уменьшение амплитуды блеска с уменьшением среднего блеска объекта. Наибольшую амплитуду демонстрируют наблюдения 14–20 октября ($\Delta i \approx 1.5 - 2^m$) при среднем блеске $i \approx 21.7^m$ (рис. 2).

Затем 28 октября блеск звезды уменьшился на $\approx 1^m$, амплитуда упала до $\Delta i \approx 1^m$. В низком состоянии блеска 5 ноября наблюдения переменности SRGe2149 на PTT-150 были возможны лишь без использования фотометрических фильтров. На полученной кривой блеска изменения яркости не выделяются и можно наложить ограничения на амплитуду $\Delta m \lesssim 0.5^m$. В ту же ночь SRGe2149 наблюдался на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории МГУ в фильтре r системы SDSS. В отличие от поведения блеска в высоком состоянии в полосе i , полученная кривая блеска является одnogорбой с амплитудой $\Delta r \approx 0.5^m$. Отметим, что ввиду ошибки в найденном периоде, кривые блеска от 5 ноября могут быть смещены по фазе на $\Delta\varphi \approx 0.5$.

Кривая блеска SRGe2149 в высоком состоянии напоминает поведение блеска некоторых полярков. Примерами могут служить полярки BS Tri (Колбин и др., 2022), EP Dra (Швопе, Менгель, 1997), V379 Vir (Дебес и др., 2006). Минимум блеска в них обусловлен заходом аккреционного пятна за диск звезды, а во время прохождения пятна по звездному диску образуется двухгорбый максимум. Двухгорбость кривой блеска обусловлена особенностями циклотронного излучения. При некоторых физических условиях излучающей среды его интенсивность максимальна при углах между линией магнитного поля и лучом зрения $\theta \sim 90^\circ$ и падает с уменьшением θ . Вероятно, похожий сценарий реализуется в SRGe2149, однако, он отличается от представленных примеров более узким минимумом. Последнее можно связать с меньшим углом наклона оси вращения белого карлика к лучу зрения и, как следствие, меньшей продолжительностью пребывания аккреционного пятна за диском

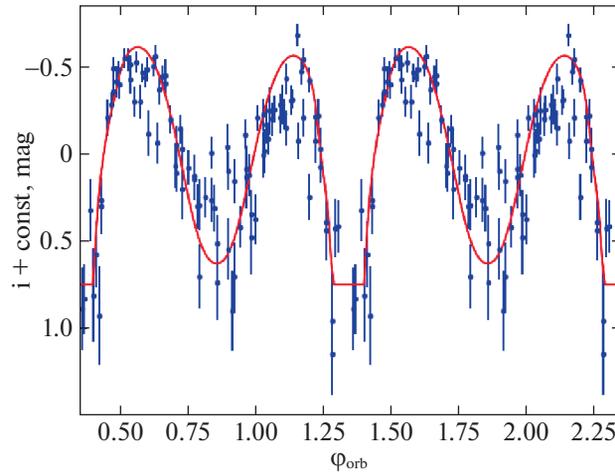


Рис. 5. Сравнение наблюдаемой (точки с барами фотометрических ошибок) и теоретической (непрерывная линия) кривой блеска SRGe J214919.3+673634. Кривые блеска приведены в шкале фаз орбитального периода модели SRGe J214919.3+673634 (фаза $\varphi_{\text{orb}} = 0$ соответствует наибольшему удалению белого карлика от наблюдателя).

звезды (при условии, что пятно находится около полюса вращения, обращенного к наблюдателю). В низком состоянии блеска, вероятно, темп аккреции в системе ослаблен. Это ведет к пониженной яркости аккреционного пятна с соответствующим уменьшением амплитуды блеска.

К сожалению, низкая яркость SRGe2149 в период его спектральных наблюдений ($i \approx 23.5^m$) не позволила получить материал, пригодный для оценки параметров системы (массы компонент, наклонение орбиты) и напряженности магнитного поля белого карлика. Знание этих параметров позволило бы промоделировать кривые блеска с определением ориентации магнитного диполя и положения аккреционного пятна. В данной работе мы ограничимся лишь интерпретацией кривой блеска SRGe2149 в высоком состоянии в рамках модели аккрецирующего замагниченного белого карлика с доминированием излучения аккреционного пятна в оптическом диапазоне. Для выполнения этой работы нами использован код расчета и аппроксимации кривых блеска полярных, описанный в статье Колбин, Борисов (2020). Данный код использует простую модель белого карлика с дипольным магнитным полем. Предполагается, что аккреционное пятно является геометрически-тонким и вычерчивается на поверхности звезды линиями магнитного поля, пересекающими баллистическую траекторию аккреционной струи. Аккреционное пятно считается однородным по температуре и плотности. Расчет интенсивности его излучения проводится в предположении высокого фарадеевского вращения, сводящим вычисление параметров Стокса к двум независимым уравнениям для обыкновенной и необыкновенной волны. Основной вклад в излучение аккреционного пятна в оптическом диапазоне

принадлежит циклотронному излучению. Для вычисления его интенсивности использовались коэффициенты поглощения, рассчитываемые по методу Чэнмьюгэм, Далк (1981). Аккреционное пятно полагалось точечным плоскопараллельным источником, т.е. глубина пятна вдоль луча зрения ℓ ведет себя как $\ell \sim 1/\cos \gamma$, где γ — угол между нормалью к поверхности звезды и лучом зрения.

С помощью описанного подхода была промоделирована кривая блеска SRGe2149, полученная 20 октября 2021 г. Для расчета баллистической траектории код Колбин, Борисов (2020) требует массы компонент системы. Масса белого карлика предполагалась равной $0.83M_{\odot}$, т.е. средней массе аккретора в катаклизмических системах (Зоротович и др., 2011). Масса вторичной компоненты была принята равной $0.07M_{\odot}$ (Книгге и др., 2011). Наклонение орбитальной плоскости было зафиксировано на значении $i = 60^{\circ}$. Интенсивность циклотронного излучения быстро падает после частоты $\approx 10\omega_c$, где $\omega_c = eB/m_e c$ — циклотронная частота (Вада и др., 1980). Это дает возможность наложить ограничение на напряженность магнитного поля $B \gtrsim 10$ МГс, поскольку переменность, обусловленная источником циклотронного излучения, наблюдается в полосе i . При моделировании мы использовали напряженность магнитного поля $B = 20$ МГс. Температура аккреционного пятна была принята равной 20 кэВ. Для вычисления интенсивности излучения пятна также требуется плазменный параметр $\Lambda = \omega_p^2 H / \omega_c c$, где ω_p — плазменная частота, а H — глубина пятна. Данный параметр был зафиксирован на значении $\Lambda = 10^3$, типичным для полярных. Ориентация магнитного диполя и положение области стагнации

(т.е. области перехода с баллистической на магнитную траекторию), определяющей координаты пятна, находились путем аппроксимации кривой блеска методом наименьших квадратов. Для минимизации χ^2 использовался генетический алгоритм (см., например, Шарбонно, 1980). В итоге получены параметры ориентации магнитного диполя $\beta = 22^\circ$, $\psi = 70^\circ$, где β — наклонение оси диполя к оси вращения, а ψ — долгота магнитного полюса, отсчитываемая от направления на вторичную компоненту по направлению орбитального движения. Область стагнации расположилась на азимутальном угле $\alpha = 30^\circ$, отсчитываемым от направления на вторичную компоненту. Сравнение теоретической кривой блеска с наблюдаемой дано на рис. 5. Наблюдения описываются с $\chi^2_\nu \approx 11$, а отклонение χ^2_ν от единицы обусловлено переменностью формы кривой блеска в течение наблюдений, а также возможными быстрыми изменениями блеска — фликкерингом. Трехмерная модель системы, видимая в двух фазах периода, представлена на рис. 6. Хотя и представленная модель может быть далека от реальной картины ввиду большого количества использованных предположений, настоящий пример показывает, что форма кривой блеска может быть интерпретирована моделью замагниченного белого карлика с циклотронным источником излучения и подкрепляет наше предположение о принадлежности объекта к системам типа AM Her.

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Усредненный спектр SRGe2149 показан на рис. 7. Для уменьшения влияния шума он был сглажен гауссианой шириной 10 \AA . Кроме того, потоки были исправлены на величину межзвездного поглощения $E(B - V) = 0.57^m$ в направлении источника SRGe2149+6736. Полученное распределение энергии имеет монотонный наклон в красную область ($dF/d\lambda \approx -2.6 \times 10^{-5} \text{ эрг/см}^2/\text{\AA}^2/\text{с}$). Наблюдается эмиссия в линии H α , а высокий уровень шумов не позволяет выделить в спектре какие-либо абсорбционные детали. На длине волны $\lambda = 6561.1 \text{ \AA}$ выделяется эмиссионный пик, интенсивность которого в 3.7 раза превышает уровень шумов в его окрестности, а полуширина $\Delta\lambda \approx 10 \text{ \AA}$ соответствует спектральному разрешению. Данная эмиссия, вероятно, является линией H α $\lambda 6562.8 \text{ \AA}$ с доплеровским смещением для лучевой скорости $V_r \approx -80 \text{ км/с}$.

Наблюдаемое распределение потоков качественно соответствует тепловому при температуре излучающего объекта выше $T_{\text{eff}} = 20\,000 \text{ К}$. Поэтому мы выполнили его описание теоретическими спектрами белых карликов с разными значениями

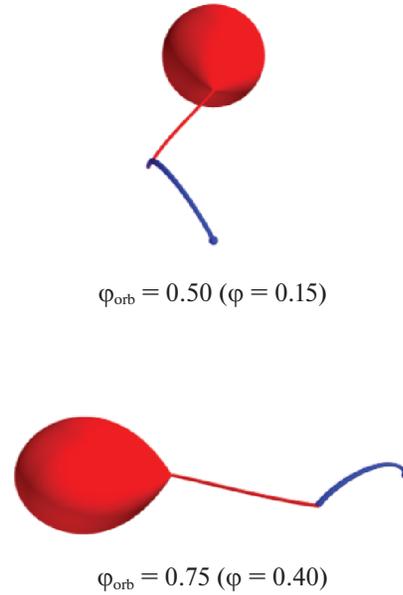


Рис. 6. Модель системы SRGe J214919.3+673634, видимая со стороны наблюдателя в двух фазах орбитального периода. Красной линией показана баллистическая траектория аккреционной струи, текущей с заполняющего свою полость Роша донора. Она переходит в магнитную траекторию (синяя линия), которая оканчивается на поверхности белого карлика. Указаны фазы орбитального периода φ_{orb} , а также фотометрические фазы φ , при которых $\varphi = 0$ соответствует середине главного минимума в кривой блеска.

T_{eff} . Для расчета модельных спектров использовались программа STAR и плоско-параллельные модели атмосфер белых карликов с лучистым и конвективным переносом, полученные в Митрофанова и др. (2014). Содержания всех элементов, кроме водорода, принимались равными нулю, а профили линий бальмеровской серии H β моделировались с применением теории VCS Вайдэл и др. (1973). Спектры вычислялись для набора атмосфер белых карликов с $T_{\text{eff}} = 20\,000\text{--}40\,000 \text{ К}$ при фиксированном значении силы тяжести $\log g = 8.3$, примерно соответствующем массе $M = 0.8M_\odot$. Полученные спектры сворачивались с аппаратной функцией спектрографа и сравнивались с наблюдаемым путем вычисления среднеквадратического отклонения отношений потоков:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{F_\lambda^{\text{obs}}}{F_\lambda^{\text{mod}}} - 1 \right)^2 d\lambda}, \quad (2)$$

где F_λ^{obs} и F_λ^{mod} — потоки в наблюдаемом и теоретическом спектрах. При сравнении использовался диапазон $\lambda = 4400\text{--}6700 \text{ \AA}$ с более низким уровнем шумов с исключением областей расположения линий H α и H β шириной по $\Delta\lambda = 50 \text{ \AA}$ в обе

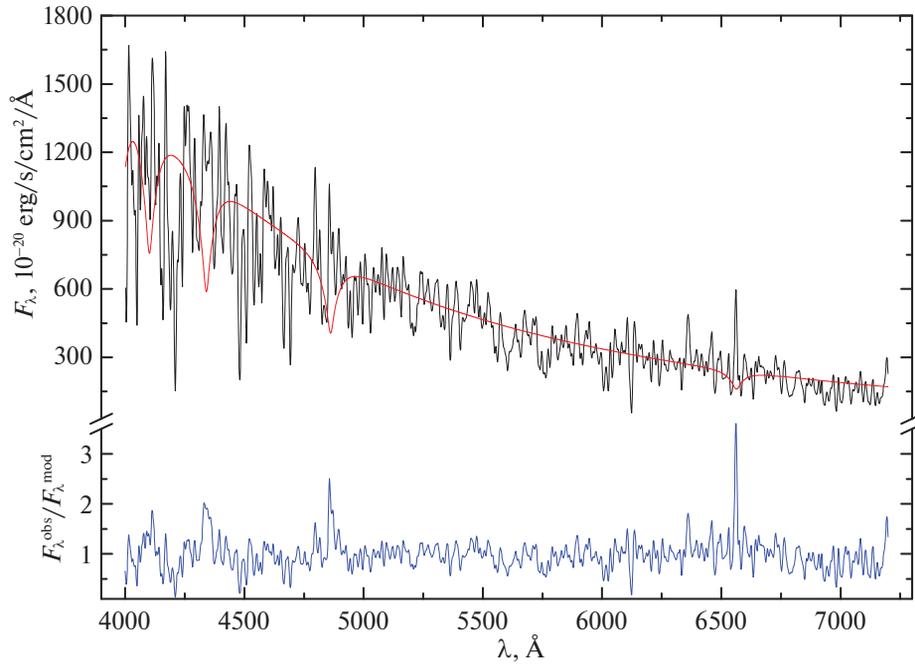


Рис. 7. Наблюдаемый спектр SRGe J214919.3+673634 (черная линия), модельный спектр белого карлика при $T_{\text{eff}} = 24\,000$ К (красная линия) и их отношение (синяя линия).

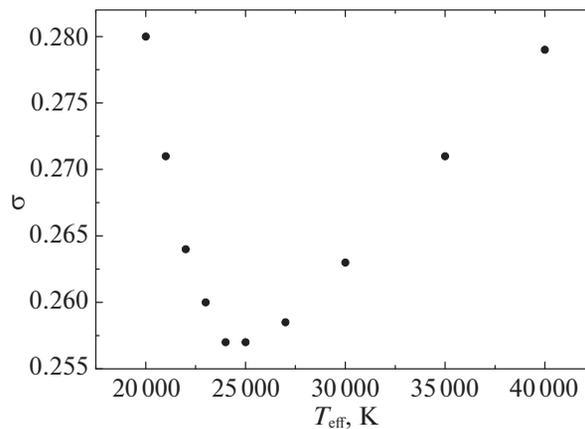


Рис. 8. Зависимость среднеквадратичных отклонений σ от эффективной температуры белого карлика.

стороны от их лабораторных длин волн. Названные исключения делались для нивелирования возможного влияния эмиссий, неопределенности выбора величины $\log g$, а также возможного зеемановского расщепления. Зависимость значений σ от эффективной температуры представлена на рис. 8, а сравнение модельного и наблюдаемого спектров при $T_{\text{eff}} = 24\,000$ К на рис. 7.

Среднее отношение сигнал/шум в сглаженном спектре составляет $S/N \approx 4.1$ и обуславливает значение $\sigma_{\text{lim}} = 0.244$ при абсолютно точном моделировании наблюдаемого распределения F_λ . Сравнение минимального значения $\sigma = 0.257$ при $T_{\text{eff}} = 24\,000$ К с величиной σ_{lim} показывает, что в этом

случае ошибка модельного описания распределения F_λ равна 8%. Диапазон возможных вариаций температуры белого карлика $T_{\text{eff}} = 21\,000\text{--}35\,000$ К определен условием удвоения разницы уклонений σ и σ_{lim} по сравнению с минимумом. В нижней части рис. 7 представлено распределение отношения наблюдаемого и модельного потоков по λ , качественно иллюстрирующее возможные эмиссионные детали в спектре SRGe2149. Кроме отмеченной выше эмиссии в линии $H\alpha$ появились аналогичные детали в остальных линиях Бальмеровской серии. Их наблюдаемые интенсивности понижаются от $H\alpha$ к $H\delta$, что характерно для аккрецирующих структур в катаклизмических переменных. Однако высокий

уровень шумов в синем диапазоне не позволяет провести эффективный анализ этих эмиссий. В целом мы пришли к выводу, что наблюдаемый в низком состоянии спектр SRGe2149 может быть корректно представлен спектром белого карлика с температурой около $T_{\text{eff}} = 24\,000$ К с дополнительным излучением в эмиссиях H β , вероятно, формирующихся в аккреционной структуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнены оптические исследования рентгеновского источника SRGe J214919.3+673634, обнаруженного телескопом ePOZITA в четвертом скане в ходе рентгеновского обзора неба орбитальной обсерваторией Спектр-РГ. В ходе фотометрических наблюдений SRGe J214919.3+673634 было зарегистрировано два состояния блеска, различающиеся на $\Delta i \approx 2^m$. В высоком состоянии объект имел двухпиковые кривые блеска с амплитудой $\Delta i = 1.5\text{--}2^m$. В низком состоянии кривые блеска имеют меньшую амплитуду ($\Delta r \approx 0.5^m$), а спектры показывают голубой континуум и проявляют эмиссионную линию H α ($EW = 18 \pm 5$ Å). Фотометрический период оказался равным $P = 85.0 \pm 0.4$ мин, т.е. близким к предельному орбитальному периоду $P_{\text{min}} \approx 82$ мин для катаклизмических переменных (Книгге и др., 2011). С другой стороны, периоды, близкие к P_{min} , не являются редкими среди катаклизмических переменных и, более того, соответствуют максимуму их распределения (Гэнзике и др., 2009).

Исходя из перечисленных наблюдательных особенностей можно предположить, что SRGe J214919.3+673634 является представителем магнитных катаклизмических переменных типа AM Нег (или поляр). Быстрые переключения состояния блеска в несколько звездных величин в долговременных кривых блеска в таких системах связывают с изменением темпа переноса вещества через точку Лагранжа L $_1$, вероятно, обусловленным магнитной активностью донора (Кинг, Каннizzo, 1998). Нами было показано, что двухгорбая форма кривых блеска в высоком состоянии может быть описана моделью белого карлика с циклотронным источником излучения (аккреционным пятном). Высокая амплитуда блеска $1.5\text{--}2^m$ также свойственна полярам с доминирующим вкладом аккреционного пятна в оптическое излучение. В низком состоянии спектр SRGe J214919.3+673634 согласуется со спектром белого карлика с температурой $T_{\text{eff}} = 24\,000$ К, что следовало бы ожидать при пониженном темпе аккреции. Однозначная классификация SRGe J214919.3+673634 как поляра может быть

проведена на основе его поляриметрических наблюдений, либо его спектральных наблюдений с обнаружением гармоник циклотронной линии.

Авторы благодарны ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталии). 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”.

Часть исследования выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-60048. Фотометрические наблюдения на 1.5-м телескопе РТТ-150 и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ и их первичная обработка выполнены при поддержке гранта РНФ 21-12-00210 (ИФБ, ЭНИ, ЕАН, СГЖ). Работа НАС, РИГ, ИМХ финансировалась за счет субсидии Минобрнауки РФ № 671-2020-0052, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Это исследование основано на наблюдениях телескопа ePOZITA на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/ePOZITA изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка (MPE) при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Используемые в настоящей работе данные телескопа ePOZITA обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом ePOZITA и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа СРГ/ePOZITA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Baltic. Astron.* **20**, 363 (2011).
2. Афанасьева и др. (I. Afanasieva, V. Ardiljanov, V. Murzin, N. Ivaschenko, M. Pritychenko, A. Moiseev, E. Shablovinskaya, and E. Malygin), *ExpA*, submitted (2023).

3. Вада и др. (T. Wada, A. Shimizu, M. Suzuki, M. Kato, and R. Hoshi), *Progress Theoretic. Phys.* **64**, 1986 (1980).
4. Вайдэл и др. (C.R. Vidal, J. Cooper, and E.W. Smith), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **25**, 37 (1973).
5. ВандерПлас (J.T. VanderPlas), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **236**, 16 (2018).
6. Гэнзике и др. (B.T. Gänsicke, M. Dillon, J. Southworth, J.R. Thorstensen, P. Rodríguez-Gil, A. Aungwerojwit, T.R. Marsh, P. Szkody, et al.), *MNRAS* **397**, 2170 (2009).
7. Дебес и др. (J.H. Debes, M. López-Morales, A.Z. Bonanos, and A.J. Weinberger), *Astrophys. J.* **647**, 147 (2006).
8. ван Доккум (P.G. van Dokkum), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113**, 1420 (2001).
9. Зоротович и др. (M. Zorotovic, M.R. Schreiber, and B.T. Gänsicke), *Astron. Astrophys.* **536**, 42 (2011).
10. Егоров, Моисеев (O.V. Egorov and A.V. Moiseev), *MNRAS* **20**, 363 (2011).
11. Кинг, Каннизо (A.R. King and J.K. Cannizzo), *Astrophys. J.* **499**, 348 (1998).
12. Книгге и др. (C. Knigge, I. Baraffe, and J. Patterson), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **194**, 28 (2011).
13. Колбин, Борисов (A.I. Kolbin and N.V. Borisov), *Astron. Lett.* **46**, 812 (2020).
14. Колбин и др. (A.I. Kolbin, N.V. Borisov, N.A. Serebriakova, V.V. Shimansky, N.A. Katysheva, M.M. Gabdeev, and S.Yu. Shugarov), *MNRAS* **511**, 20 (2022).
15. Кроппер (M. Cropper), *Space Sci. Rev.* **54**, 195 (1990).
16. Марокко и др. (F. Marocco, P. Eisenhardt, J. Fowler, J. Kirkpatrick, A. Meisner, E. Schlafly, S. Stanford, N. Garcia, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 8 (2021).
17. Маски и др. (F. Masci, R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, E. Jackson, S. Monkewitz, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131**, 995 (2018).
18. Менжевицкий и др. (V.S. Menzhevitski, N.N. Shimanskaya, V.V. Shimansky, and D.O. Kudryavtsev), *Astrophys. Bull.* **69**, 169 (2014).
19. Митрофанова и др. (A.A. Mitrofanova, N.V. Borisov, and V.V. Shimansky), *Astrophys. Bull.* **69**, 82 (2014).
20. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babushkin, O. Batanov, Yu. Bodnar, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
21. Паттерсон (J. Patterson), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 209 (1994).
22. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babushkin, O. Batanov, W. Becker, H. Becker, H. Boehringer, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
23. Сазонов и др. (S. Sazonov, M. Gilfanov, P. Medvedev, Y. Yao, G. Khorunzhev, A. Semena, R. Sunyaev, R. Burenin, et al.), *MNRAS* **508**, 3820 (2021).
24. Солхейм (J.-E. Solheim), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 1133 (2010).
25. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babushkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
26. Уорнер (B. Warner), *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995).
27. Чэнмьюгэм, Далк (G. Chanmugam and G.A. Dulk), *Astrophys. J.* **244**, 569 (1981).
28. Шарбонно (P. Charbonneau), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **101**, 309 (1995).
29. Швопе, Менгель (A.D. Schwöpe, and S. Mengel), *Astron. Nach.* **318**, 25 (1997).