

SRGЕ J194401.8+284452 — РЕНТГЕНОВСКАЯ КАТАКЛИЗМИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННАЯ В ПОЛЕ ГАММА-ИСТОЧНИКА 4FGL J1943.9+2841

© 2024 г. А. И. Колбин^{1,2,9*}, А. В. Карпова⁴, М. В. Сусликов^{1,2},
И. Ф. Бикмаев^{2,3}, М. Р. Гильфанов^{5,6}, И. М. Хамитов², Ю. А. Шибанов⁴, Д. А. Зюзин⁴,
Г. М. Бескин^{1,2}, В. Л. Плохотниченко¹, А. Г. Гутаев^{1,2}, С. В. Карпов⁸, Н. В. Ляпсина¹,
П. С. Медведев⁵, Р. А. Сюняев^{5,6}, А. Ю. Кириченко^{7,4}, М. А. Горбачев², Э. Н. Иртуганов²,
Р. И. Гумеров², Н. А. Сахибуллин^{2,3}, Е. С. Шабловинская¹, Е. А. Малыгин¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Академия Наук РТ, Казань, Россия

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁶Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

⁷Институт астрономии, Национальный автономный университет Мексики, Нижняя Калифорния, Мексика

⁸CEICO, Институт физики, Академия наук Чехии, Прага, Чехия

⁹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

Поступила в редакцию 6 ноября 2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.; принята к публикации 06.06.2024 г.

Проведены многоволновые спектральные и фотометрические исследования объекта SRGЕ J194401.8+284452 (2RXS J194401.4+284456, XMMSL2 J194402.0+284451, 2SXPS J194401.7+284450) — самого яркого рентгеновского источника в эллипсе неопределенности положения неидентифицированного гамма-источника 4FGL J1943.9+2841, с целью определения его природы и возможной ассоциации с гамма-источником. Показано, что объект является катаклизмической переменной с орбитальным периодом около 1.5 ч и явными признаками наличия аккреционного диска вокруг белого карлика. По своим свойствам он может быть классифицирован как промежуточный поляр, ассоциация которого с гамма-источником маловероятна. Одновременно в оптическом и рентгеновском диапазонах SRGЕ J194401.8+284452 демонстрирует резкие переходы между высокими и низкими состояниями светимости, остающимися относительно стабильными на масштабах нескольких месяцев/лет. Это может быть связано с изменением темпа аккреции на порядок величины. Получены ограничения на массу ($0.3\text{--}0.9 M_{\odot}$) и температуру ($14\,750 \pm 1250$ К) аккрецирующего белого карлика в низком состоянии, массу звезды-донора ($\leq 0.08 \pm 0.01 M_{\odot}$) и наклонение орбиты двойной системы ($40^{\circ}\text{--}75^{\circ}$). В низком состоянии обнаружена 8-мин переменность блеска в оптическом диапазоне, которая, скорее всего, связана с вращением белого карлика, а не с нерадиальными пульсациями. В высоком состоянии выявлены стохастические вариации блеска на временах 1–15 мин с амплитудами $0.2\text{--}0.6^m$. SRGЕ J194401.8+284452 пополняет малочисленную группу необычных промежуточных полярных систем с самыми короткими орбитальными периодами, лежащими ниже пробела в распределении периодов этих систем, и демонстрирующих переходы между состояниями с высоким и низким темпом аккреции. Яркость источника на уровне $17\text{--}20^m$ в диапазоне $\sim 2000\text{--}8000 \text{ \AA}$ и $(5\text{--}50) \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ в диапазоне 0.3–10 кэВ делает его интересным объектом для детального исследования физики таких систем.

Ключевые слова: звезды — катаклизмические переменные, белые карлики; рентгеновские источники; методы — фотометрия, спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0320010824060034, EDN: MXZBWK

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновский источник XMMSL2 J194402.0+284451 (далее J1944) из каталога XMM-Newton (Сэкстон и др., 2008) имеет наблюдаемый поток в диапазоне 0.2–12 кэВ $f_X = (1.25 \pm 0.45) \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ по данным от 3 мая 2013 г. Ранее он был обнаружен в ходе обзора всего неба с помо-

щью телескопа ROSAT (Боллер и др., 2016), в котором этот источник обозначен как 2RXS J194401.4+284456 (было получено 53 отсчета за 387 с в октябре 1990 г.). Природа J1944 до сих пор не определена.

В работе Торрес и др. (2019) данный источник рассматривался как кандидат в туманность пульсарного ветра. Также было обнаружено его оптическое отождествление по совпадению координат со звездой из

*Электронный адрес: kolbinalexander@mail.ru

каталога Gaia с величиной $G = 17.6^m$. По результатам рентгеновских и ультрафиолетовых (УФ) наблюдений с помощью телескопа Swift 2018 г. (время экспозиции 850 с) источник оказался слишком слабым, чтобы являться пульсарной туманностью, и вопрос о его природе остался открытым.

В последующей работе Таката и др. (2022) J1944 рассматривался как возможный кандидат в катаклизмическую переменную (КП). Авторы использовали оптические данные телескопа TESS, однако им не удалось определить параметры предполагаемой двойной звездной системы для подтверждения этой гипотезы.

В качестве альтернативы, J1944 может являться отождествлением неассоциированного гамма-источника 4FGL J1943.9+2841. Значимость детектирования последнего составляет всего $\approx 6\sigma$, переменность излучения не обнаружена, поток в диапазоне 0.1–100 ГэВ $F_\gamma = (4.3 \pm 1.1) \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, а его спектр может быть описан моделью LogParabola (Абдоллахи и др., 2022; Баллет и др., 2023). J1944 является самым ярким рентгеновским источником, который попадает в эллипс, соответствующий 95% неопределенности положения 4FGL J1943.9+2841 (рис. 1). При подтверждении отождествления J1944 с гамма-источником он мог бы быть пульсаром в двойной звездной системе.

Для выяснения природы J1944 нами были рассмотрены рентгеновские данные телескопа eROSITA (Предел и др., 2020) на борту обсерватории Спектр-РГ (СРГ; Сюняев и др., 2021), полученные в ходе сканирования неба в 2020–2021 гг. (соответствующее обозначение источника — SRGe J194401.8+284452), оптические данные различных каталогов и архивные УФ и рентгеновские данные ряда наблюдений Swift (обозначение в каталоге Swift-XRT Point Source catalogue — 2SXPS J194401.7+284450, Эванс и др., 2020). Также были проведены оптические спектроскопические и фотометрические наблюдения на 6-м телескопе БТА, 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 и 2.1-м телескопе Мексиканской национальной астрономической обсерватории (Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, OAN-SPM). Здесь мы приводим результаты анализа этих данных.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Оптические данные из каталогов

Параметры кандидата на оптическое отождествление J1944, взятые из каталога Gaia (Коллаборация Gaia и др., 2016, 2023), представлены в табл. 1. Мы обнаружили источник в обзоре Isaac Newton Telescope Photometric H-Alpha Survey (IPHAS; Барентсен и др., 2014), где на эпоху MJD 53563 его видимые звездные величины $r = 19.60(2)^m$, $i = 19.54(6)^m$ и $H\alpha = 18.41(2)^m$ в фотометрической системе AB. Также имеются наблюдения IPHAS для эпох MJD 54284 и 54674,

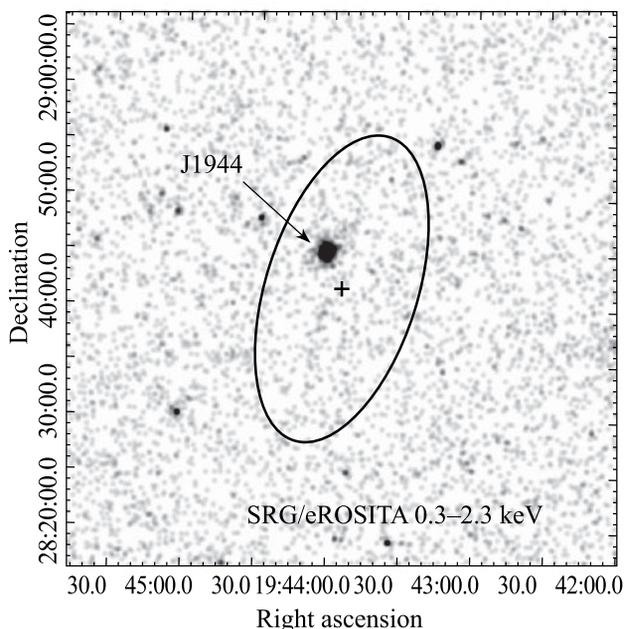


Рис. 1. Изображение поля J1944 размером $50' \times 50'$, полученное по данным телескопа eROSITA в диапазоне 0.3–2.3 кэВ. Эллипс показывает 95% неопределенность положения гамма-источника 4FGL J1943.9+2841, помеченного крестиком (Абдоллахи и др., 2022).

Таблица 1. Параметры кандидата на оптическое отождествление J1944 из каталога Gaia. Расстояние D соответствует геометрическому расстоянию по данным Gaia (Бэйлер-Джонс и др., 2021)

R.A. (J2000)	$19^h 44^m 01^s 898273(4)$
Dec. (J2000)	$+28^\circ 44' 51'' 58412(6)$
Галакт. долгота l , град.	64.226
Галакт. широта b , град.	2.396
Параллакс π , мсд	2.405(75)
Собственное движение μ , мсд год $^{-1}$	35.766
μ_{ra} , мсд год $^{-1}$	32.56(6)
μ_{dec} , мсд год $^{-1}$	14.81(7)
Расстояние D , пк	415(15)

но их результаты не вошли в обзор, возможно, из-за нефотометрических погодных условий. Однако из анализа соответствующих изображений следует, что в эти даты источник имел примерно такую же яркость, как и в наблюдениях эпохи MJD 53563. Наилучший сигнал-шум был достигнут в наблюдениях в эпоху MJD 54674, и нам удалось измерить его величины $r = 19.90(4)^m$ и $H\alpha = 18.66(4)^m$. Помимо этого,

источник присутствует в каталогах Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS; Флювеллинг и др., 2020) и Zwicky Transient Facility (ZTF; Маски и др., 2019), где он демонстрирует значимую переменность блеска.

Оптическая фотометрия

Наши фотометрические наблюдения кандидата в оптический компаньон J1944 проводились в фильтрах g, r, i, z на 1.5-м Российско-Турецком телескопе PTT-150 (Турецкая национальная обсерватория TÜBİTAK) в 2022, 2023 и 2024 гг. Телескоп оснащен инструментом TFOSC с матрицей Andor iKon-L 936 BEX2-DD-9ZQ размером 2048×2048 пикселей, термоэлектрически охлаждаемой до -80°C . Поле зрения прибора TFOSC в моде прямых снимков составляет $11' \times 11'$ с размером пикселя $0.33''$ при биннинге 1×1 .

Источник также наблюдался в полосе V на 2.1-м телескопе OAN-SPM с инструментом “Rueda Italiana”¹ 1 июня 2023 г. Поле зрения детектора равно $6' \times 6'$ с размером пикселя $0.34''$ при биннинге 2×2 .

Обработка фотометрических данных проводилась в среде IRAF². Из изображений был вычтен электронный ноль (bias), на основе кадров плоского поля проведено исправление изображений за мультипликативные ошибки. Следы космических частиц удалялись с помощью алгоритма LaCosmic (ван Доккум, 2001). Детектирование звезд на кадрах проводилось при помощи алгоритма DAOFIND. На профиль кандидата в J1944 накладываются крылья профиля ближайшей звезды, поэтому для корректного измерения потоков использовался метод PSF-фотометрии.

Также была проведена быстрая фотометрия источника на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в 2022 г. В этих наблюдениях использовался аппаратный комплекс МАНИЯ на основе многомодового панорамного фотополиметра MPPP микросекундного временного разрешения (Плохотниченко и др., 2021, 2023). Прибор был установлен в фокусе Нэсмита БТА, снабженным поворотным столом, компенсирующим вращение поля зрения с диаметром около $20''$. Излучение этой области в диапазоне $3600\text{--}7600 \text{ \AA}$, разделенное при длине волны 4500 \AA дихроичным зеркалом на два потока, синхронно регистрировалось координатно-чувствительными детекторами (КЧД) с максимумами чувствительности в длинноволновой (“красной”) и коротковолновой (“синей”) частях спектра (Де-Бур и др., 2003; Плохотниченко и др., 2009). Координаты и моменты прихода фотонов определялись и кодировались многомерным хронометрическим устройством “Квантохрон 4-48” (Плохотниченко и др., 2009) с временным разрешением 1 мкс, а их совокупность сохра-

нялась в памяти компьютера. Массивы этих данных преобразовывались в так называемые фотонные листы — текстовые файлы, содержащие последовательности моментов времени и координат зарегистрированных фотонов. С их использованием строились динамические изображения поля зрения MPPP, кривые блеска выделенных звезд (объекта, звезды сравнения и двух контрольных звезд), определялись статистические характеристики излучения. При этом были скомпенсированы эффекты атмосферной нестабильности, вариации скорости ведения телескопа, а также неравномерность движения поворотного стола. Журнал всех наблюдений приведен в табл. 2.

Оптическая спектроскопия

Набор спектров предполагаемого оптического компаньона J1944 получен на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в ночи 4/5 июля и 7/8 июля 2022 г. в квоте резерва директора. Наблюдения проводились в хороших астроклиматических условиях с размером звездного изображения $1.2\text{--}1.3''$. Регистрация спектров проводилась с помощью фокального редуктора SCORPIO-2 в режиме длиннощелевой спектроскопии (Афанасьев, Моисеев, 2011). В качестве дисперсора использовалась объемно-фазовая голографическая решетка VPHG1200@540, с которой, при выставленной ширине щели $1''$, обеспечивалось покрытие спектрального диапазона $\lambda = 3650\text{--}7250 \text{ \AA}$ с разрешением $\delta\lambda \approx 5.5 \text{ \AA}$.

Обработка полученного материала проводилась при помощи средств пакета IRAF. Из кадров со спектрами объекта был удален электронный ноль, с помощью программы LaCosmic проведена чистка изображений от следов космических лучей, на основе кадров плоского поля выполнена коррекция изображений за неоднородную чувствительность прибора. С помощью кадров лампы He-Ne-Ar проведена калибровка спектров по длинам волн и коррекция геометрических искажений. Выполнена оптимальная экстракция спектров с вычитанием фона неба (Хорн, 1986). Спектры были калиброваны по потокам на основе снимков звезды-стандарта BD+25°4655 (Оке, 1990). Для каждого спектра найдены гелиоцентрические поправки к лучевой скорости. Журнал спектральных наблюдений включен в табл. 2.

Архивные УФ-наблюдения

Поле J1944 наблюдалось с помощью телескопа Swift в 2018 и 2022–2024 гг. Мы проанализировали данные инструмента Ultra-violet/Optical Telescope (UVOT), полученные в полосах $uvw2$ (1928 \AA), $uvm2$ (2246 \AA), $uvw1$ (2600 \AA) и u (3465 \AA), используя обработанные изображения из архива.

Для фотометрии использовалась команда UVOTSOURCE и стандартная апертура $5''$. Список наблюдений представлен в табл. 3. Мы исключи-

¹<https://www.astrossp.unam.mx/en/users/instruments/ccd-imaging/filter-wheel-italiana>

²Пакет программ обработки и анализа астрономических данных IRAF доступен по адресу <https://iraf-community.github.io>

Таблица 2. Журнал наблюдений кандидата в оптический компаньон J1944. Перечислены телескопы и приборы, использованные в наблюдениях, наблюдательные ночи, продолжительность наблюдений, количество полученных кадров, продолжительность экспозиций, покрываемый спектральный диапазон

Телескоп/Приемник	Дата наблюдений, UT	Период HJD-2459700	N	Экспозиция, с	Диапазон
РТТ-150/TFOSC	13/14 мая 2022	13.4848–13.5940	62	120	g, r, i
РТТ-150/TFOSC	15/16 мая 2022	15.4831–15.5865	44	180	r
РТТ-150/TFOSC	01/02 июня 2022	32.4337–32.5634	63	180	i
БТА/SCORPIO-2	04/05 июля 2022	65.3705–65.4836	28	300	3650–7250 Å
БТА/SCORPIO-2	07/08 июля 2022	68.4214–68.4892	17	300	3650–7250 Å
БТА/MANIA	06/07 июля 2022	67.3822–67.4100	3230	1	3600–7600 Å
БТА/MANIA	06/07 июля 2022	67.4197–67.5000	7999	1	3600–7600 Å
2.1-м/Rueda Italiana	01/02 июня 2023	396.8990–396.9669	51	100	V
РТТ-150/TFOSC	15/16 июня 2023	411.4484–411.5523	20	120	r
РТТ-150/TFOSC	11/12 июля 2023	437.4336–437.5480	90	60	g
РТТ-150/TFOSC	12/13 июля 2023	438.4625–438.5642	76	120	r
РТТ-150/TFOSC	15/16 июля 2023	441.4186–441.5569	80	120	r
РТТ-150/TFOSC	07/08 июня 2024	769.4924–769.5603	70	60	g
РТТ-150/TFOSC	09/10 июня 2024	771.4218–771.5535	140	60	g
РТТ-150/TFOSC	15/16 июня 2024	777.4203–777.4512	12	180	g, r, i, z

ли из рассмотрения наблюдения 03111808002 и 00010695019, поскольку в них экспозиции UVOT составили 7 и 0 с соответственно.

Рентгеновские данные

Поле J1944 наблюдалось телескопом eROSITA 669 с. Для извлечения спектра источника использовался кружок радиусом 60", а спектр фона был извлечен из кольца с радиусами 120" и 300".

Также поле J1944 наблюдалось с помощью инструмента X-Ray Telescope (XRT), установленного на обсерватории Swift (номера наблюдений совпадают с наблюдениями UVOT, также использовались наблюдения 03111808002 и 00010695019). Используя эти данные, а также инструменты Swift-XRT data products generator³ (Эванс и др., 2009), мы построили кривую блеска источника и извлекли его спектры.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Оптические и УФ-изображения

Изображения поля J1944, полученные телескопами РТТ-150 в полосе r и Swift/UVOT в полосе $uvw1$, представлены на рис. 2. Они демонстрируют, что в

2022 г. источник был заметно ярче, чем в 2023 г., как в оптическом, так и в УФ-диапазоне. На рис. 3 приведено изображение окрестности J1944, зарегистрированное "красным" КЧД с экспозицией 8000 с в ночь 6/7 июля 2022 г.

Кривые блеска на больших масштабах времени

Для построения оптических, УФ и рентгеновских кривых блеска J1944 использовались данные, позволившие охватить временной промежуток с 2005 по 2024 г.

Результаты фотометрии данных Swift/UVOT представлены в табл. 3. Поток J1944 в полосе u загрязнен вкладом от ближайших звезд (рис. 2), которые значительно слабее на более коротких волнах.

Кривые блеска по данным ZTF, Pan-STARRS, IPHAS, Swift UVOT и XRT представлены на рис. 4. Они показывают, что источник испытывает сильную переменность на масштабах времени от часов до месяцев. Наблюдаются высокие и низкие состояния со средними оптическими величинами $\sim 18^m$ и $\sim 20^m$, соответственно. Переходы из низкого в высокое состояние произошли около MJD 55800 и 60300, из высокого в низкое — около MJD 60000 и 60447. При этом в высоком состоянии амплитуда переменности состав-

³https://www.swift.ac.uk/user_objects/

Таблица 3. Результаты фотометрии данных Swift/UVOT. Величины приведены в системе AB. Неопределенности величин не учитывают систематическую ошибку равную 0.03^m

ObsID	Дата	<i>www1</i>	<i>www2</i>	<i>uvm2</i>	<i>u</i>		
00010695002	31 мая 2018		18.45 ± 0.04				
03111808001	07 августа 2022	17.39 ± 0.05		18.09 ± 0.05	16.62 ± 0.04		
03111808003	31 августа 2022			17.84 ± 0.07			
03111808004	10 октября 2022			18.80 ± 0.07			
03111808005	28 ноября 2022						
03111808006	03 декабря 2022						
03111808007	04 декабря 2022		17.55 ± 0.05				
03111808008	07 декабря 2022					17.47 ± 0.05	
03111808009	08 декабря 2022			18.40 ± 0.05			
03111808010	12 декабря 2022			18.65 ± 0.06			
03111808011	14 декабря 2022		18.86 ± 0.11				
00010695003	17 мая 2023	19.83 ± 0.19	20.27 ± 0.10		18.98 ± 0.17		
00010695004	17 мая 2023		20.23 ± 0.10				
00010695005	17 мая 2023		20.28 ± 0.10				
00010695007	19 мая 2023						
00010695008	21 мая 2023		19.94 ± 0.14				
00010695009	26 мая 2023		20.05 ± 0.24	20.24 ± 0.18			
00010695010	31 мая 2023		20.11 ± 0.22	20.36 ± 0.15		18.85 ± 0.14	
00010695011	06 июня 2023		19.77 ± 0.17	20.12 ± 0.12			
00010695012	21 сентября 2023					19.12 ± 0.12	
00010695013	19 октября 2023					19.18 ± 0.13	
00010695014	16 ноября 2023					18.97 ± 0.09	
00010695015	14 декабря 2023					20.05 ± 0.18	
00010695016	11 января 2024					18.67 ± 0.08	17.33 ± 0.03
00010695017	08 февраля 2024					19.29 ± 0.13	
00010695018	07 марта 2024					18.28 ± 0.06	
00010695020	02 мая 2024						
00010695022	17 мая 2024	19.82 ± 0.26	20.02 ± 0.26		18.79 ± 0.13		
00010695023	20 мая 2024	19.83 ± 0.15	20.41 ± 0.20	19.94 ± 0.17	18.80 ± 0.09		
00010695025	27 мая 2024		20.25 ± 0.19				
00010695026	3 июня 2024				18.58 ± 0.11		
00010695027	9 июня 2024	19.87 ± 0.22	20.57 ± 0.20				

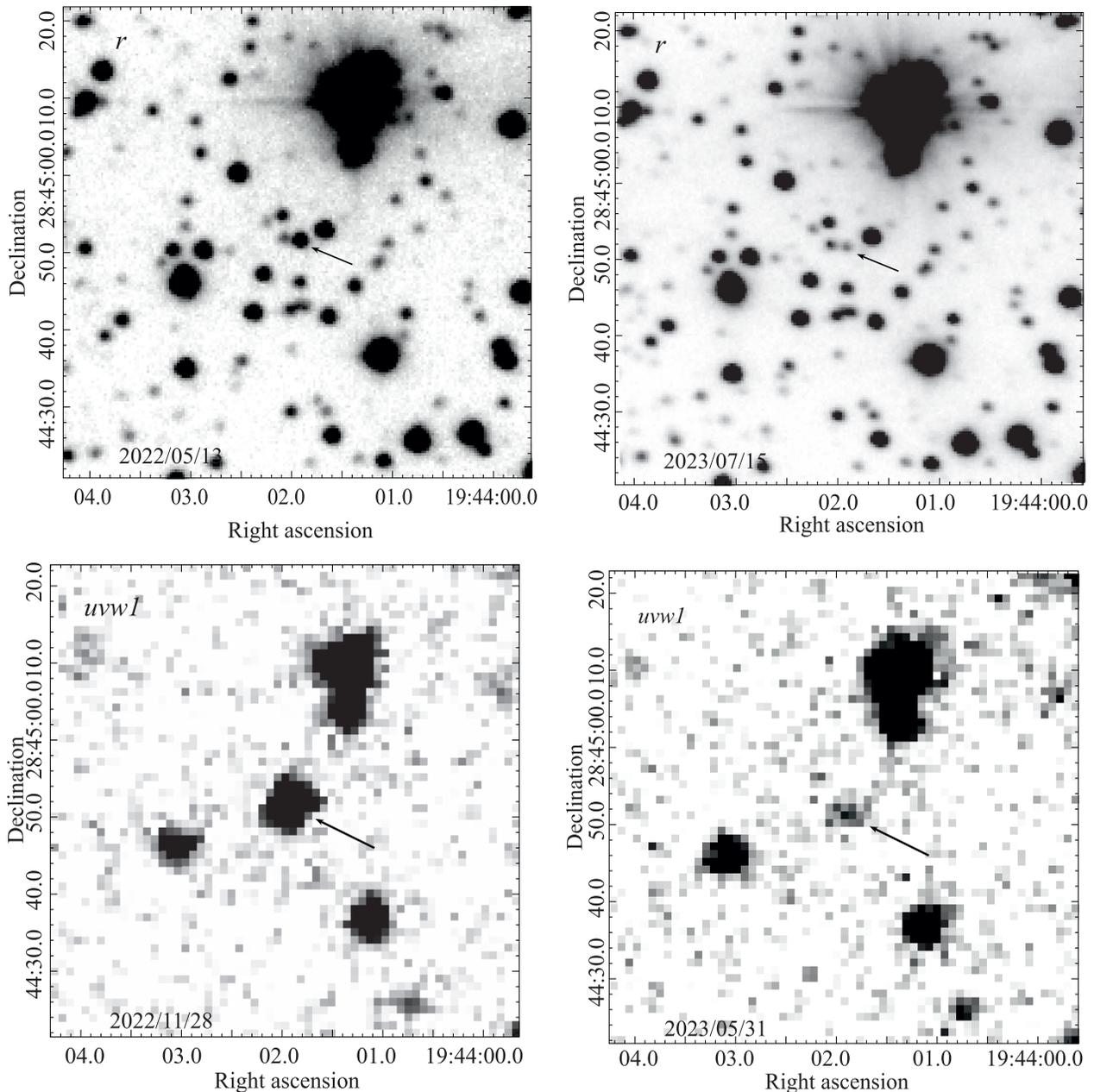


Рис. 2. Изображения поля J1944 размером $1' \times 1'$, полученные телескопами РТТ-150 в полосе r (вверху) и Swift/UVOT в полосе $uvw1$ (внизу). Положение J1944 указано стрелкой. На левых панелях представлено высокое состояние источника, на правых — низкое.

ляет примерно две звездные величины, а в низком — существенно меньше.

В рентгеновском диапазоне также наблюдаются переходы между высокими и низкими состояниями, согласующиеся по времени с переходами в оптических/УФ кривых блеска. Совместное изменение блеска подтверждает отождествление оптического источника с J1944.

Такое поведение наблюдается для тесных двойных систем с аккрецирующими компактными объектами,

например, КП (Ханикатт, Кафка, 2004; Мэйсон, Сантана, 2015; Мукай, Преториус, 2023), транзиентных миллисекундных пульсаров (МСП, Папитто, де Мартино 2022) или маломассивных рентгеновских двойных (Мишуда и др., 1989).

Оптические кривые блеска на коротких масштабах времени

Кривые блеска оптического компаньона J1944, полученные на телескопе РТТ-150, когда источник находился в высоком состоянии, представлены на

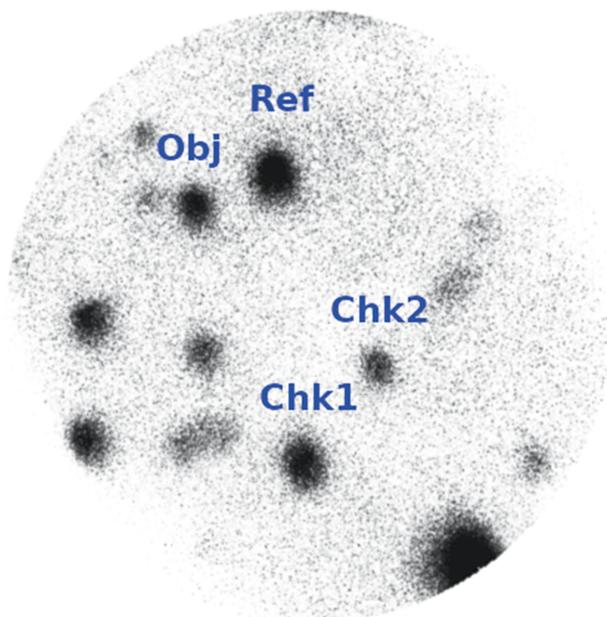


Рис. 3. Изображение поля J1944 диаметром 20", полученное на многомодовом фотополариметре MPPP. J1944 помечен как "Obj", звезда сравнения — "Ref", а две контрольные звезды — "Chk1" и "Chk2".

рис. 5. В ночь 13/14 мая 2022 г. были проведены многополосные фотометрические наблюдения в фильтрах g , r , i системы SDSS. Во всех фильтрах проявляются взаимосвязанные (квазиодновременные) изменения блеска с амплитудой $\Delta g \approx \Delta r \approx \Delta i \approx 0.5^m$ на масштабе времени ~ 1 часа. Также заметны изменения блеска между отдельными экспозициями, значительно превышающие ошибки фотометрии $\delta m = 0.02 - 0.05^m$.

В ночь 15/16 мая 2022 г. наблюдались квазипериодические изменения блеска амплитудой $\Delta r \approx 0.4^m$ с характерным временем переменности в 86 мин (рис. 5). В наблюдениях 01/02 июня 2022 г. периодичность не проявляется. Блеск системы плавно уменьшался на $\Delta i \approx 0.4^m$ в течение ≈ 0.12 сут, после чего резко увеличился до исходного значения за ≈ 0.01 сут.

Кривые блеска, полученные на телескопах OAN-SPM и PTT-150 в 2023 г., когда J1944 находился в низком состоянии, представлены на рис. 6 слева. Они не демонстрируют таких резких изменений, которые характерны для высокого состояния. Проведя анализ кривых блеска методом Ломба–Скаргла, мы обнаружили период P_s , равный 7.96 ± 0.07 мин (см. центральные панели на рис. 6). Свернутые с этим периодом кривые блеска имеют один пик за период, при этом блеск меняется не больше, чем на 0.4^m (рис. 6 справа). Для проверки стабильности периода в 7.96 мин были выполнены дополнительные фотометрические наблюдения на PTT-150 в фильтре g в ночи 07/08

и 09/10 июня 2024 г. Анализ кривых блеска методом Ломба–Скаргла показывает период 7.948 ± 0.011 мин с амплитудой 0.4^m , что подтверждает высокую стабильность как периода, так и амплитуды изменения блеска в низком состоянии на шкале один год.

По результатам обработки данных комплекса МАНИЯ (рис. 3), полученных в ночь 6/7 июля 2022 г. на 6-м телескопе БТА, были построены кривые блеска J1944 и звезд поля с временным разрешением 1, 5 и 10 с. На рис. 7 приведены кривые блеска с окном 10 сек в форме разности инструментальных звездных величин объекта и звезды сравнения (Ref) (синяя кривая), а также контрольной звезды (Chk2) и Ref (оранжевая кривая). Одинаковые долговременные (часовые) вариации блеска обусловлены комбинацией виньетирования поля и неполной компенсации его вращения. В результате их редукции получены кривые блеска с разрешением 1 мин для пар источников Obj – Ref и Chk1 – Ref, которые показаны на рис. 8. Анализ совокупности этих результатов позволяет сделать следующие выводы:

- не обнаружена значимая переменность на временных масштабах $\sim 1-10$ с. С учетом статистических и систематических ошибок измерений характерное ограничение на амплитуду такой переменности составляет $\sim 0.25^m$
- зарегистрированы вариации стохастического характера на временах 1–15 мин, наблюдающиеся на кривых блеска с амплитудами $0.2-0.6^m$.

По-видимому, эти проявления обусловлены крупномасштабной турбулентностью аккреционной структуры вокруг компактного объекта.

Оптические спектры

Усредненный оптический спектр J1944 в высоком состоянии показан на рис. 9. Он имеет голубой континуум, содержит двухпиковые эмиссионные линии бальмеровской серии водорода ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, $H\epsilon$, $H\zeta$), нейтрального гелия ($HeI \lambda 4023$, $\lambda 4387$, $\lambda 4471$, $\lambda 4713$, $\lambda 4921$, $\lambda 5015$, $\lambda 5876$, $\lambda 6678$, $\lambda 7065$), линию ионизованного гелия $HeII \lambda 4686$ и линию ионизованного железа $FeII \lambda 5169$. Он типичен для излучения аккреционного диска в тесной двойной звездной системе.

Динамический спектр линии $HeI \lambda 5876$, полученный по наблюдениям 04/05 июля 2022 г., показан на левой панели рис. 10. В нем проявляется слабая S-волна, которая часто присутствует в спектрах КП с аккреционными дисками. Следы этой волны проявляются и в профилях других линий, однако она наиболее выражена в линии $HeI \lambda 5876$. По-видимому, она формируется в горячем пятне, возникающим при взаимодействии аккреционной струи с внешним краем аккреционного диска. Для ее выделения мы вычли из профилей линии усредненный профиль. Полученный на основе остаточных профилей динамический

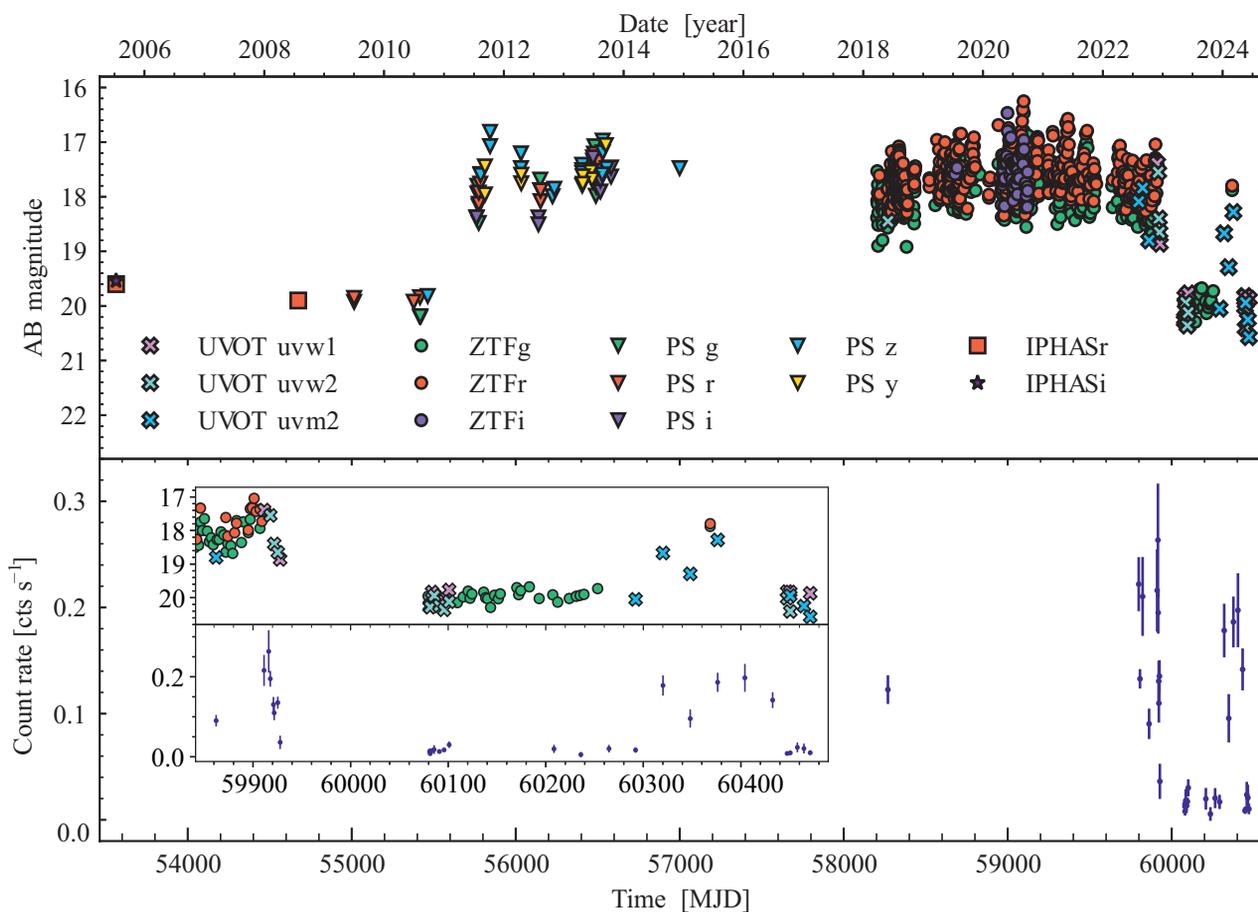


Рис. 4. Вверху: кривые блеска J1944, полученные по данным различных каталогов и инструментов в разных оптических и УФ-фильтрах, как указано в легенде (PS \equiv Pan-STARRS). Внизу: кривая блеска J1944, полученная по данным телескопа Swift/XRT в диапазоне 0.3–10 кэВ. Во вставке показаны те же кривые блеска, но для меньшего интервала времени.

спектр HeI $\lambda 5876$ показан на правой панели рис. 10. Аппроксимация S-волны синусоидой дала полуамплитуду лучевой скорости горячего пятна $K_s = 650 \pm 23$ км/с и период $P = 89 \pm 1$ мин. Поскольку лучевые скорости горячего пятна модулированы орбитальным движением, то найденный период должен быть орбитальным.

Для оценки параметров системы важно определить полуамплитуду лучевых скоростей аккректора K_1 . Хотя в спектрах J1944 не проявляются линии аккректора, его орбитальное движение отражают эмиссионные линии, формирующиеся в аккреционном диске. Корректное определение K_1 требует измерения лучевых скоростей по крыльям спектральных линий, которые образуются ближе к аккректору и менее искажены излучением горячего пятна и приливными деформациями края аккреционного диска. Для решения этой задачи мы воспользовались методом, предложенным Шафтер (1983). Его суть сводится к вычислению свертки

$$C(v_0) = \int k(v - v_0)r(v)dv, \quad (1)$$

где $r(v)$ — профиль спектральной линии в шкале скоростей, а ядро k представляет собой разность двух гауссиан, разделенных расстоянием a , т.е.

$$k(v) = \exp\left[-\frac{(v + a/2)^2}{2\sigma^2}\right] - \exp\left[-\frac{(v - a/2)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (2)$$

Разделение a выбирается так, чтобы гауссианы располагались на крыльях линии. Среднеквадратическое отклонение σ должно быть достаточно малым, чтобы гауссианы не захватывали центральные части линии. С другой стороны, ширина гауссиан должна быть достаточно большой, для накопления необходимого сигнала. Лучевая скорость крыльев линии v_0 определяется из требования $C(v_0) = 0$. Полученные таким образом кривые лучевых скоростей аппроксимировались синусоидами $v_0(t) = \gamma - K_1 \sin[2\pi(t/P_{\text{orb}} - \varphi_0)]$, где γ — средняя лучевая скорость, K_1 — искомая полуамплитуда лучевой скорости ($K_1 > 0$), φ_0 — начальная фаза. Для подбора разделения гауссиан a мы воспользовались диагностическими диаграммами, представ-

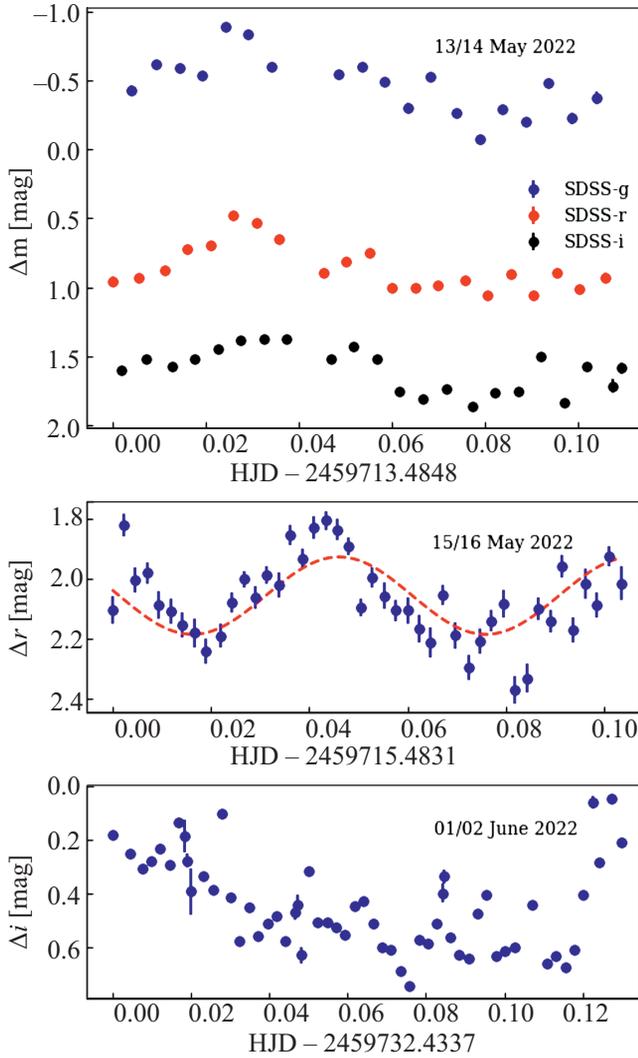


Рис. 5. Кривые блеска кандидата в оптический компаньон J1944, полученные на РТТ-150 13/14 мая, 15/16 мая, 01/02 июня 2022 г. Кривая блеска 15/16 мая описана синусоидой с периодом 86 мин.

ляющими собой зависимости полуамплитуды K и ее ошибки ΔK от разделения a . На основе этих диаграмм мы выбрали разделение $a = 2500$ км/с, как максимальное разделение, начиная с которого ошибка ΔK испытывает резкое возрастание. Среднеквадратическое отклонение было принято равным $\sigma = 150$ км/с. Полученные кривые лучевых скоростей линий $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$, $\text{H}\gamma$, $\text{HeI } \lambda 5876$ (с вычитенной средней скоростью γ) показаны на рис. 11. Определение лучевых скоростей проводилось со средними ошибками ≈ 5 км/с для линии $\text{H}\alpha$, ≈ 9 км/с для линии $\text{H}\beta$, ≈ 16 км/с для линий $\text{H}\gamma$ и $\text{HeI } \lambda 5876$. Они соответствуют определенному выше орбитальному периоду. Оценка полуамплитуды лучевой скорости составила $K_1 = 30 \pm 5$ км/с, которая дает функцию масс $f_2(M) = 0.00017(9)M_\odot$.

На основе профилей линий $\text{H}\alpha$ и $\text{HeI } \lambda 5876$ восстановлены доплеровские томограммы, показанные

на рис. 12. Доплеровские томограммы представляют собой распределение скоростей источников эмиссионных линий, проецированных на орбитальную плоскость. Точки этого пространства характеризуются парой координат: модулем скорости v , отсчитываемым от центра масс, и углом ϑ между вектором скорости и линией, соединяющей центры масс звезд системы. Для более детального знакомства с методом доплеровской томографии мы отсылаем читателя к Марш, Швопе (2016); Котзе и др. (2015); Котзе, Поттер и др. (2016). Восстановление доплеровских карт проводилось при помощи кода `doptomog-2.0` (Котзе и др., 2015), реализующего метод максимума энтропии. Орбитальные фазы середин спектральных экспозиций рассчитывались на основе кривых лучевых скоростей аккректора. Из-за ошибки определения нулевой фазы φ_0 доплеровские томограммы имеют неопределенность в угле поворота $\Delta\theta = 6^\circ$ и $\Delta\theta = 9^\circ$ для наблюдений 04/05 июля и 07/08 июля 2022 г. соответственно. На всех томограммах, представленных на рис. 12, видна кольцеобразная структура, которая соответствует излучению аккреционного диска. Также на томограммах проявляется горячее пятно, образованное в результате взаимодействия аккреционной струи с краем аккреционного диска. Положение горячего пятна на томограммах в линии $\text{HeI } \lambda 5876$, полученных по данным разных ночей, отличается на $\theta \sim 15^\circ$ и может быть объяснено ошибками определения начальных эпох в орбитальных эфемеридах. Положение горячего пятна на томограммах в линии $\text{H}\alpha$ испытывает большие изменения $\Delta\theta \approx 45^\circ$ и, вероятно, отражает изменение положения источника эмиссии. Из сравнения томограмм в двух линиях очевидно, что эмиссии в линии $\text{HeI } \lambda 5876$ образуются в более скоростных и, следовательно, более близких к аккректору областях диска.

Рентгеновские спектры

Наблюдения СРГ/eROSITA пришлись на высокое состояние J1944. Было получено 872 отсчета от источника (исключая фон) в диапазоне 0.3–9 кэВ, которые были сгруппированы так, чтобы приходилось не менее 20 отсчетов на спектральный канал.

В случае данных Swift/XRT мы извлекли два спектра: первый включает данные 2018, 2022 и 2024 (до 17 мая) гг. (высокое состояние), а второй — 2023 и 2024 (от 17 мая) гг. (низкое состояние). В результате для первого спектра эффективное время экспозиции составило около 8.7 кс, и было получено 965 отсчетов от источника в диапазоне 0.3–10 кэВ. Спектр был перегруппирован так, чтобы приходилось не менее 20 отсчетов на спектральный канал. Для второго спектра эффективное время экспозиции составило 14.1 кс но отсчетов получено всего 130, поэтому перегруппировка была сделана так, чтобы приходилось не менее пяти отсчетов на канал.

Спектры, извлеченные из данных телескопов Swift

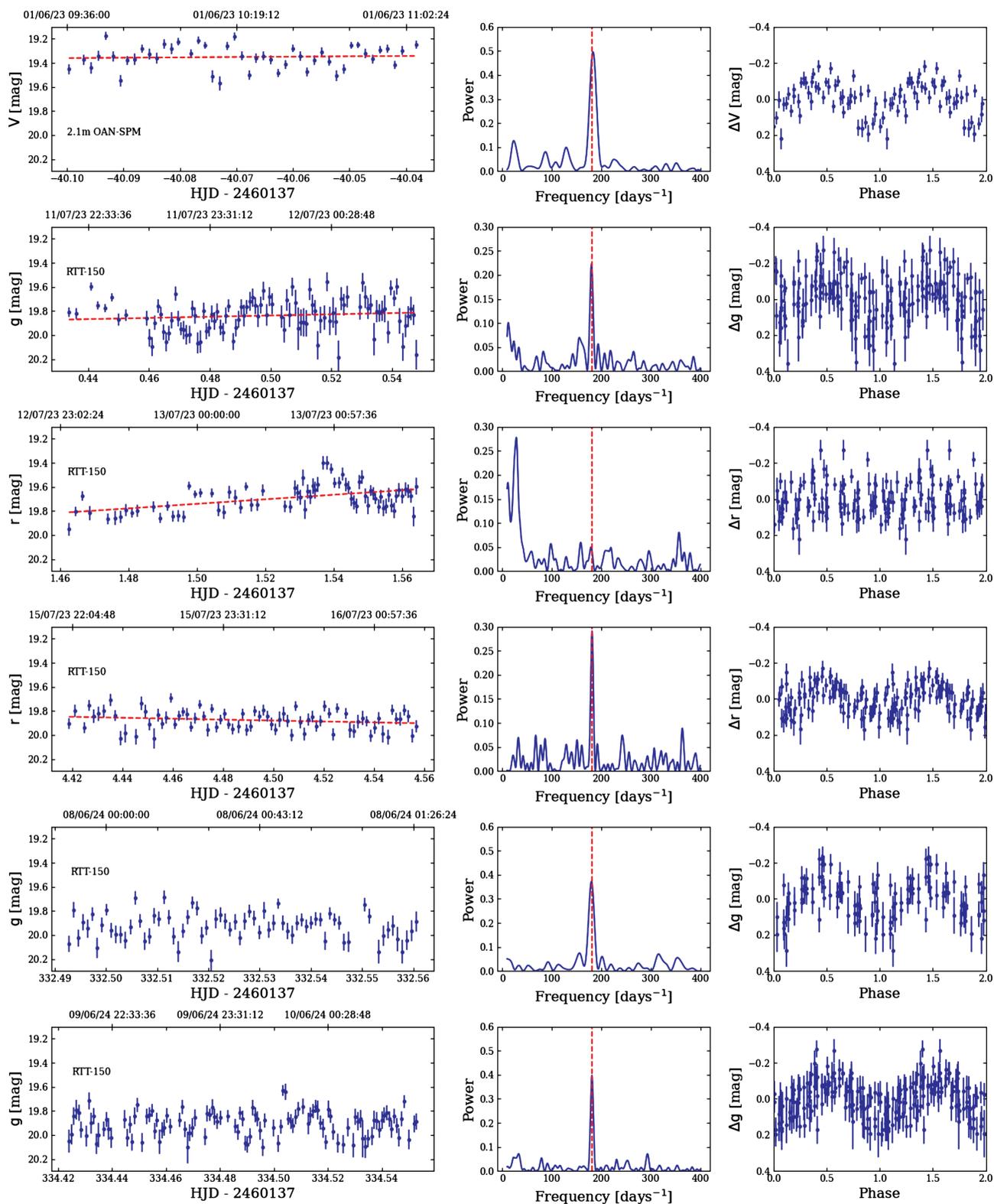


Рис. 6. Кривые блеска J1944 в низком состоянии (слева), соответствующие им периодограммы Ломба–Скаргла (посередине) и фазовые кривые блеска (справа), полученные для периода $P_s = 7.96 \pm 0.07$ мин ($f_s = 181.00 \pm 1.66$ сут $^{-1}$). На графиках слева пунктирной линией показан тренд, вычтенный перед расчетом периодограмм. Измерения для телескопа OAN-SPM приведены в системе Vega.

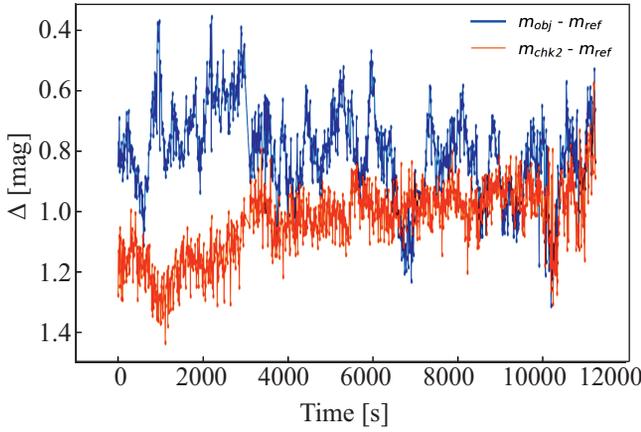


Рис. 7. Кривые блеска с 10-секундным временным разрешением, полученные на MPPP для J1944 (синяя линия) и контрольной звезды (оранжевая линия).

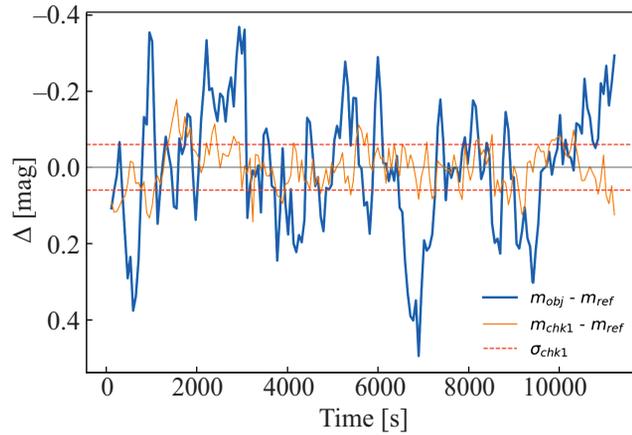


Рис. 8. Кривые блеска J1944 и контрольной звезды с 60-секундным временным разрешением, полученные по результатам наблюдений на многомодовом фотополариметре MPPP. Красными штриховыми линиями показана 1σ неопределенность вариации блеска, рассчитанная по контрольной звезде

и eROSITA, были аппроксимированы в диапазоне 0.3–10 кэВ с помощью пакета программ XSPEC (Арно, 1996). Мы использовали статистику χ^2 для данных, полученных в высоком состоянии тогда как для данных в низком состоянии из-за малого числа отсчетов — C -статистику (Кэш, 1979).

Мы аппроксимировали спектры моделью тепловой плазмы mekal (Меве и др., 1985, 1986; Лидал и др., 1995). Подобные модели используются для описания рентгеновских спектров КП (см., например, Баскилл и др., 2005; Рейс и др., 2013; Нусита и др., 2014). Сначала мы оставили температуру и нормировку модели свободными параметрами для каждого спектра, чтобы

Таблица 4. Параметры наилучшей аппроксимации рентгеновских спектров моделью $\text{tbabs} \times (\text{mekal} + \text{mekal})$. Неопределенности соответствуют 1σ доверительным интервалам. Верхние индексы h и l соответствуют высокому и низкому состоянию источника. VEM — объемная мера эмиссии. $D_{415} \equiv D/(415 \text{ пк})$

$N_{\text{H}}, \text{см}^{-2}$	$5.8^{+1.3}_{-1.4} \times 10^{20}$
$T_1, \text{кэВ}$	$0.61^{+0.07}_{-0.09}$
$\text{VEM}_1^h, \text{см}^{-3}$	$(4.1 \pm 0.9) \times 10^{53} D_{415}^2$
$\text{VEM}_1^l, \text{см}^{-3}$	$1.5^{+0.4}_{-0.3} \times 10^{53} D_{415}^2$
$T_2, \text{кэВ}$	$5.94^{+1.26}_{-0.74}$
$\text{VEM}_2^h, \text{см}^{-3}$	$6.1^{+0.3}_{-0.2} \times 10^{54} D_{415}^2$
$\text{VEM}_2^l, \text{см}^{-3}$	$3.7^{+0.6}_{-0.7} \times 10^{53} D_{415}^2$
$F_X^h, \text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2}$	$5.72^{+0.28}_{-0.24} \times 10^{-12}$
$F_X^l, \text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2}$	$4.53^{+0.50}_{-0.46} \times 10^{-13}$
$L_X^h, \text{эрг с}^{-1}$	$1.18^{+0.06}_{-0.05} \times 10^{32} D_{415}^2$
$L_X^l, \text{эрг с}^{-1}$	$9.33^{+1.04}_{-0.94} \times 10^{30} D_{415}^2$
χ^2/ν	88.9/79
C/ν	26.8/20

оценить возможные изменения параметров источника со временем. Для учета межзвездного поглощения была взята модель tbabs с химическим составом wilm (Вилмс и др., 2000). Эквивалентная колонковая плотность водорода N_{H} полагалась одинаковой для всех спектров.

Оказалось, что такая однокомпонентная модель плохо описывает данные: χ^2 , отнесенный к числу степеней свободы ν , составляет $\chi^2_{\nu} = 1.4$ ($\nu = 37$) и 1.2 ($\nu = 41$) для спектров в высоком состоянии по данным eROSITA и Swift, для спектра в низком состоянии по данным Swift $C'_{\nu} = 2.1$ ($\nu = 22$). Также наблюдается некоторый избыток потока по сравнению с модельным на энергиях $\lesssim 1$ кэВ.

Тогда мы добавили еще одну тепловую компоненту, т.е. использовали двухтемпературную модель 2-T mekal. Качество аппроксимации оказалось приемлемым, причем полученные температуры T_1 и T_2 согласуются друг с другом в пределах 2σ неопределенностей для всех спектров. Также для данных eROSITA и Swift по высокому состоянию источника согласуются нормировки тепловых компонент, тогда как для данных по низкому состоянию нормировки ниже, как и следовало ожидать, исходя из кривой блеска (рис. 4, внизу). Из-за малого числа отсчетов параметры для последнего спектра определяются плохо. Тогда мы провели совместную аппроксимацию всех трех спектров, полагая при этом все параметры, кроме нормировок

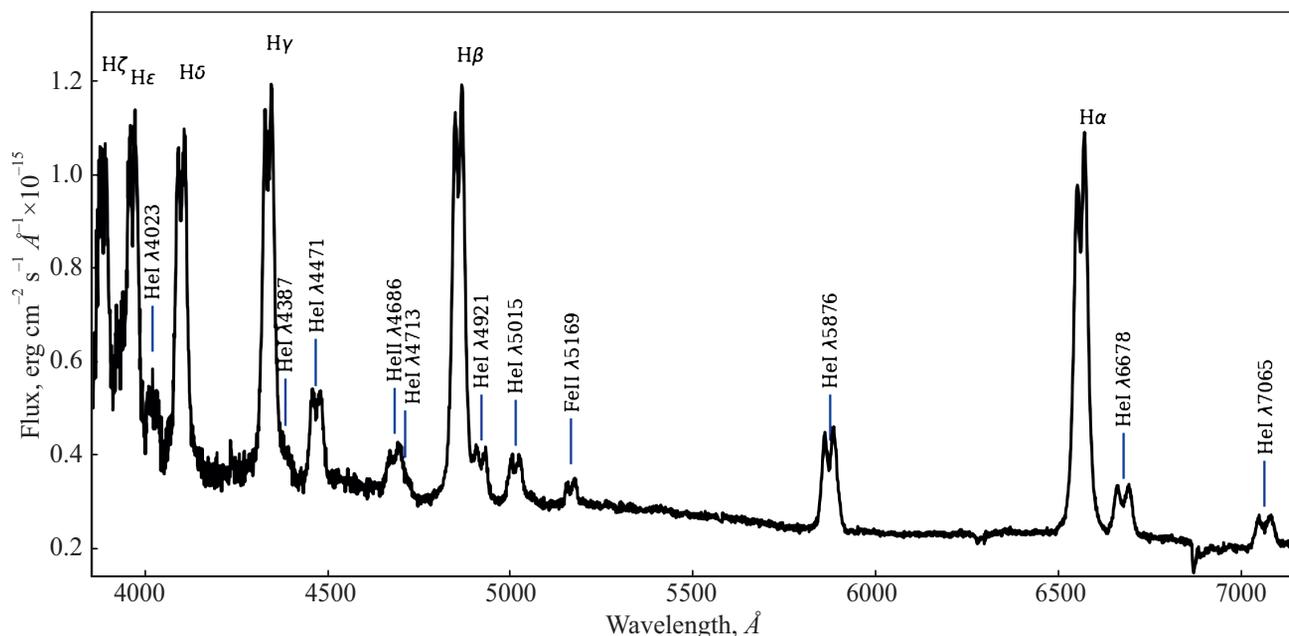


Рис. 9. Усредненный оптический спектр кандидата на отождествление J1944.

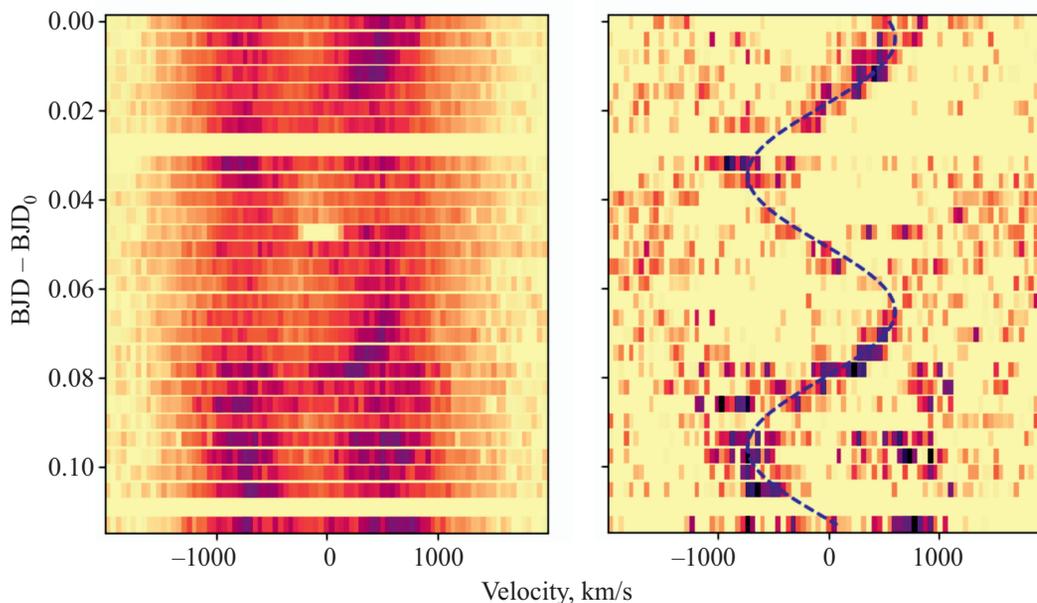


Рис. 10. Динамический спектр линии He I $\lambda 5876$ (слева) и остаточный спектр, полученный после вычитания усредненного профиля линии (справа). Начальная эпоха BJD_0 соответствует середине экспозиции первого спектра.

компонент модели, общими. Результаты аппроксимации представлены в табл. 4, где также приведены исправленные за межзвездное поглощение потоки в диапазоне 0.3–10 кэВ F_X^h и F_X^l в высоком и низком состояниях, а также соответствующие светимости L_X^h и L_X^l . Спектры и модель наилучшей аппроксимации показаны на рис. 13.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренные архивные и оригинальные оптические, УФ и рентгеновские данные указывают, что J1944 является тесной двойной аккрецирующей системой с орбитальным периодом ≈ 1.5 ч. Последний однозначно определяется из анализа временных вариаций обнаруженных эмиссионных спектральных линий Бальмеровской серии водорода и ионизованного

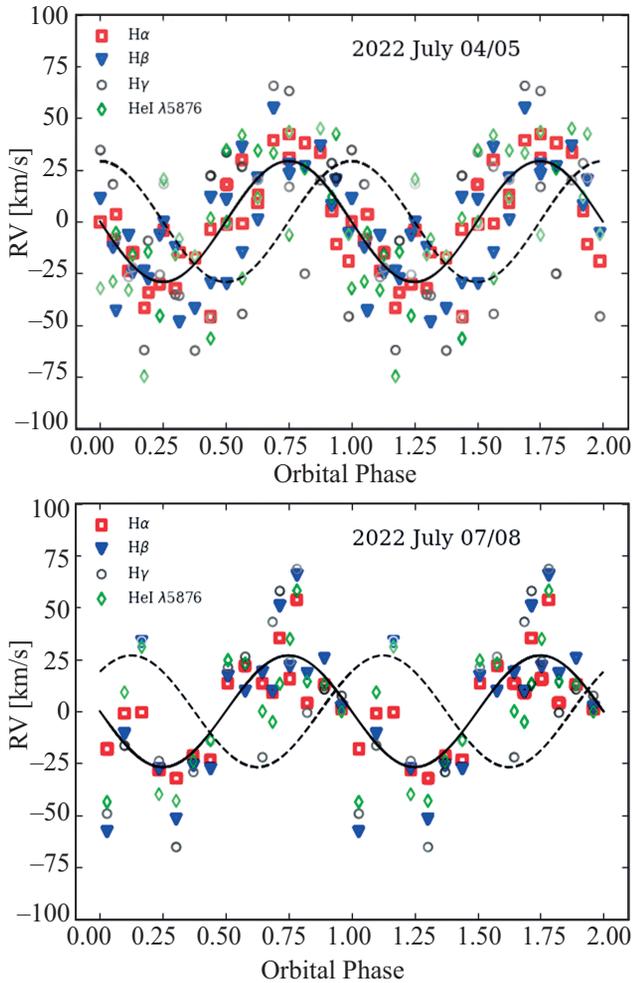


Рис. 11. Кривые лучевых скоростей крыльев линий $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ и $HeI \lambda 5876$, полученные по данным наблюдений 04/05 июля 2022 г. (верхняя панель) и 07/08 июля 2022 г. (нижняя панель). Черной линией показана аппроксимирующая синусоида. Пунктирной линией показана кривая лучевых скоростей горячего пятна, деленная на K_s/K_1 .

и нейтрального гелия. Двойственная структура линий и проведенная доплеровская томография также свидетельствуют о наличии аккреционного диска и горячих пятен, связанных со столкновением вещества диска со струей газа вытекающей из звезды донора, переполняющей полость Роша. Эпизодически орбитальный период также проявляется в оптических кривых блеска, полученных с помощью широкополосной фотометрии и имеющих один максимум за период. Однако в большинстве наших наблюдений вариации оптического блеска на временных масштабах от нескольких минут до нескольких часов имеют случайный характер, демонстрируя спорадические вспышки на уровне нескольких десятых звездной величины, видимые одновременно в нескольких фильтрах. Это свидетельствует о неустойчивости процесса ак-

креции. Мы не обнаружили никаких признаков затмений в этой двойной системе. Однако нами найдено, что эпизодически на масштабах нескольких месяцев/лет J1944 резко переходит в достаточно продолжительные, от полугода и более, состояния высокой и низкой светимости, различающиеся по оптическому блеску на уровне более одной звездной величины. Переход происходит одновременно в рентгеновском, оптическом и УФ-диапазонах, указывая на существенное изменение темпа аккреции. В низком состоянии полученные нами оптические кривые блеска не проявляют вспышечной активности, однако демонстрируют регулярные колебания интенсивности излучения с периодом ≈ 8 мин. В высоком состоянии оптический спектр системы практически полностью определяется излучением диска. В то же время, в низком состоянии полученное распределение энергии излучения по спектру в оптическом и УФ-диапазонах соответствует звездному (см. ниже).

Перечисленные свойства излучения объекта характерны для КП, состоящих из аккрецирующего белого карлика и невырожденной звезды позднего спектрального класса, являющейся донором аккрецирующего вещества. Как уже было отмечено выше, наличие периода 8 мин исключает интерпретацию объекта как двойной системы с нейтронной звездой. В предположении, что J1944 является КП, детально оценим параметры двойной системы и обсудим их совместимость с ожидаемыми для таких объектов и возможный тип КП.

Массы компонент и орбитальные параметры КП, температура белого карлика

Оценку массы вторичного компонента (донора) можно сделать исходя из требования заполнения им своей полости Роша. Согласно Сироткин, Ким (2010) эффективный радиус полости Роша R_L (т.е. радиус сферы, объем которой равен объему полости Роша) донора связан с отношением масс $q = M_2/M_1$ соотношением

$$R_L = A \frac{0.5126q^{0.7388}}{0.6710q^{0.7349} + \ln(1 + q^{0.3983})}, \quad (3)$$

где A — большая полуось системы, связанная с массами компонент и орбитальным периодом третьим законом Кеплера $A = (M_2(1 + 1/q)P_{\text{orb}}^2)^{1/3}$, M_1 — масса аккретора (белого карлика). Соотношение (3) является уточнением соотношения Игглтон (1983) для политропных моделей звезд (показатель политропы $n = 3/2$), которые лучше описывают полностью конвективные доноры КП ниже пробела в распределении их орбитальных периодов. С другой стороны, радиус звезды должен быть эволюционно связан с ее массой. Мы воспользовались эмпирической зависимостью $R_2(M_2)$, представленной в работе Книгге, Бараффе и др. (2011) и воспроизведенной на рис. 14. Она

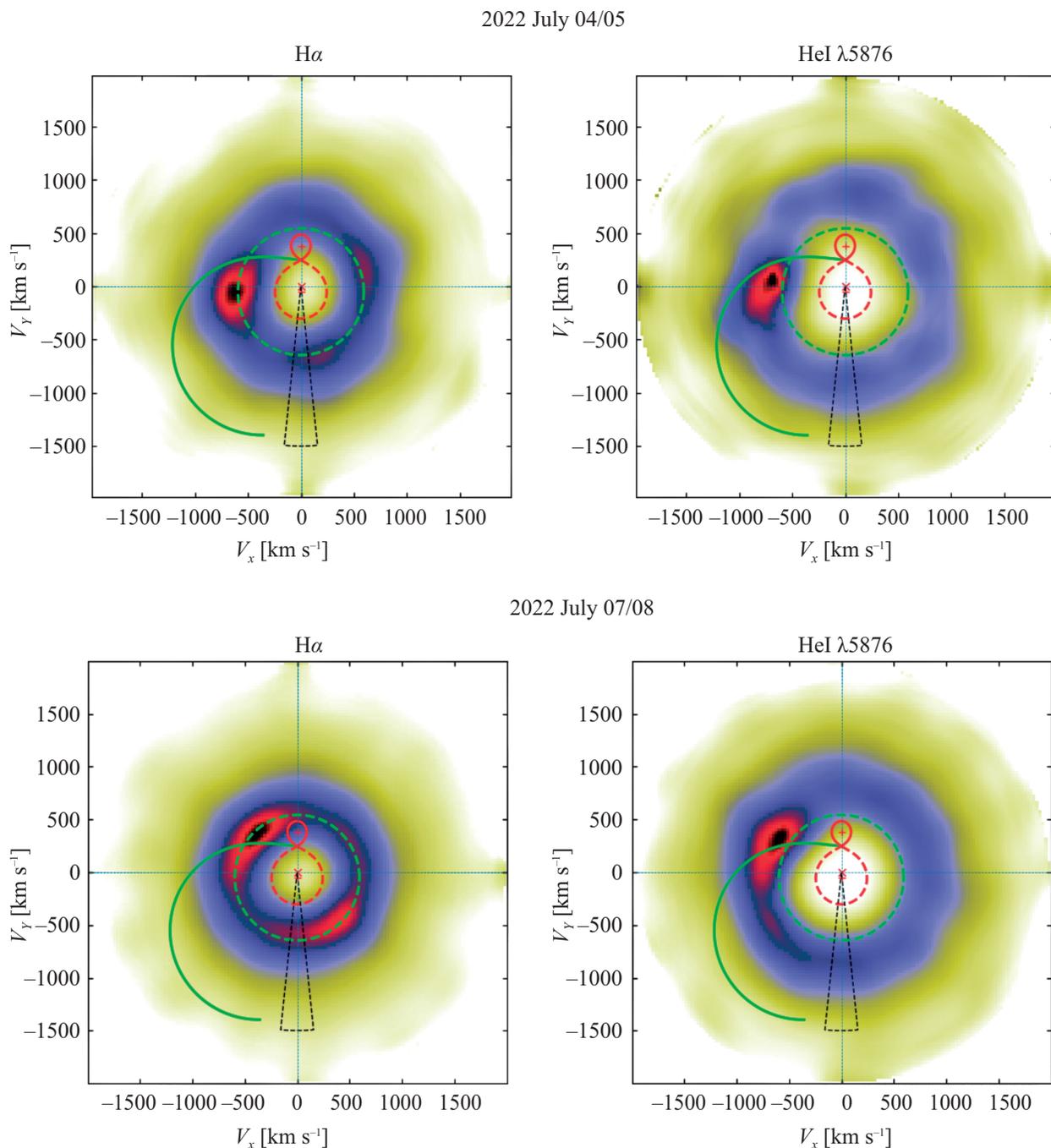


Рис. 12. Доплеровские томограммы J1944 в линиях H α (слева) и HeI λ 5876 (справа). Сверху показаны томограммы, полученные по данным наблюдений 04/05 июля 2022 г., а снизу — по наблюдениям 07/08 июля 2022 г. На томограммах указаны скорости полостей Роша первичной (замкнутая пунктирная красная линия) и вторичной компоненты (замкнутая непрерывная красная линия). Также нанесены скорости частиц на баллистической траектории (непрерывная зеленая линия), берущей начало из точки Лагранжа L₁, и скорости частиц на внешнем крае аккреционного диска (замкнутая пунктирная зеленая линия), соответствующим резонансу 3 : 1. Угол пунктирного сектора соответствует неопределенности поворота томограммы, связанной с ошибкой определения нулевой эпохи орбитальных эфемерид. Модель двойной системы рассчитана для массы аккретора 0.6 M_⊙, отношения масс $q = 0.13$ и наклона орбиты $i = 65^\circ$ (данные параметры удовлетворяют оценкам из раздела “Обсуждение”).

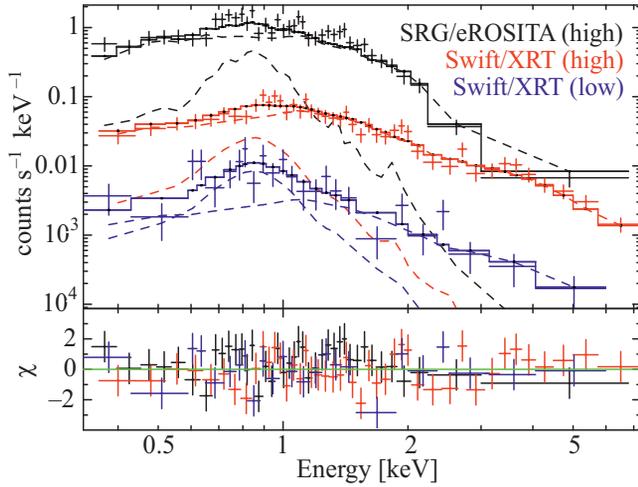


Рис. 13. Рентгеновские спектры J1944 по данным Swift/XRT и СРГ/eROSITA в высоком и низком состояниях. Модель наилучшей аппроксимации 2-T mekal показана сплошными толстыми линиями, а ее компоненты — штриховыми. Также приведена невязка.

аппроксимирована двумя красными прямыми линиями. Первая соответствует донорам с массой $M_2 < 0.069 M_\odot$, при которых двойная система эволюционирует с увеличением периода (т.н. баунсер). Вторая кривая является аппроксимацией для масс $M_2 \in 0.069 - 0.20 M_\odot$. На этот же график наложена зависимость радиуса полости Роша (синяя линия), вычисленная по формуле (3) для масс белых карликов $M_1 \in 0.2 - 1.44 M_\odot$ (R_L слабо зависит от M_1). Из рис. 14 видно, что радиус донора согласуется с радиусом полости Роша при $M_2 \leq 0.08 \pm 0.01 M_\odot$, что определяет верхнюю границу его массы.

На верхней панели рис. 15 показано решение в плоскости $i - M_1$, соответствующее найденной оценке полуамплитуды лучевой скорости K_1 для предельной массы донора $0.08 M_\odot$. Здесь i — это наклонение орбиты. Уменьшение массы донора приводит к смещению этой кривой влево, т.е. уменьшению массы аккретора (нижняя панель рис. 15). Полученное решение при $i = 90^\circ$ дает ограничение массы аккретора $M_1 \lesssim 1.55 M_\odot$, превышающее предел Чандрасекара для белых карликов.

Для сужения области допустимых значений параметров системы мы сделали оценку проекции скорости вращения внешнего края аккреционного диска $v_{\text{out}} \sin i$. Также, как Якин и др. (2013); Неустроев и др. (2016), мы полагали, что межпиковое расстояние в эмиссионных линиях, выраженное в единицах скорости, равно проекции скорости вращения $v \sin i$ кольца диска, на котором формируется эмиссия. Интенсивность спектральной линии чувствительна к локальным параметрам аккреционного диска (температура, давление), из-за чего межпиковое расстояние

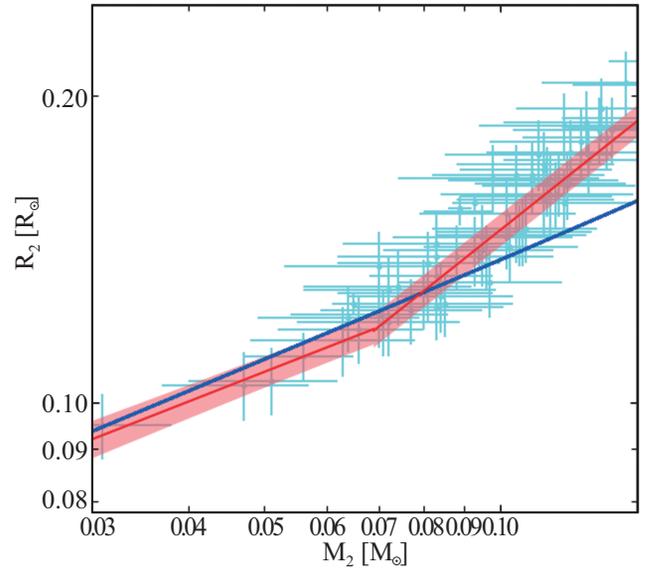


Рис. 14. Зависимость радиуса донора в КП от его массы. Точки с барами ошибок соответствуют измерениям радиусов и масс доноров, заимствованным из работы Книгге (2006). Красные линии — степенные аппроксимации с их 1- σ неопределенностями (розовые полигоны) для доноров с массами $M_2 < 0.069 M_\odot$ (так называемых баунсеров) и $0.069 M_\odot < M_2 < 0.20 M_\odot$, полученные Книгге (2006); Книгге, Барaffe и др. (2011). Синие линии — эффективные радиусы полости Роша донора, рассчитанные для масс белого карлика $M_1 \in 0.20 - 1.44 M_\odot$.

разных линий соответствует разным кольцам диска. Наименьшее значение $v \sin i$ было получено для линии H α , для которой оно равно $v \sin i \approx 465$ км/с. Мы приняли это значение за оценку $v_{\text{out}} \sin i$.

Полагая, что движение частиц у внешнего края диска близко к кеплеровскому, проекция скорости вращения края диска равна

$$v_{\text{out}} \sin i = \left(\frac{GM_1}{R_{\text{out}}} \right)^{1/2} \sin i, \quad (4)$$

где R_{out} — радиус аккреционного диска. Согласно Пачински (1977); Уорнер (1995) размер аккреционного диска R_{out} ограничивается приливными силами вторичного компонента и оценивается по формуле

$$R_{\text{max}} = A \frac{0.6}{1+q}. \quad (5)$$

Соответствующее этой проекции скорости вращения решение при $M_2 = 0.08 M_\odot$ наложено на плоскость $i - M_1$, показанную на верхней панели рис. 15. Видно, что для указанной массы донора мы имеем массу аккретора $M_1 \approx 0.88 M_\odot$, совместимую с пределом Чандрасекара, и наклонение орбиты $i \approx 43^\circ$. На рис. 15 также наложены ограничения на наклонение орбиты, полученные из факта отсутствия затме-

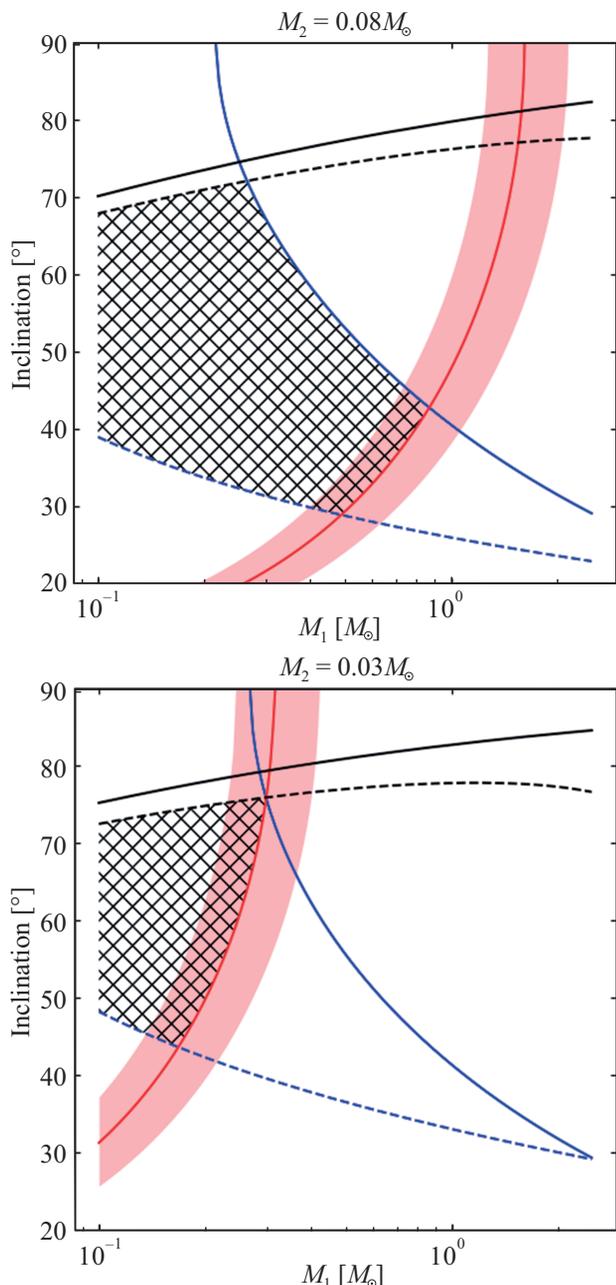


Рис. 15. Набор решений в плоскости $i - M_1$. Сверху показаны решения для массы донора $M_2 = 0.08M_\odot$, а снизу — для $M_2 = 0.03M_\odot$. Красные непрерывные линии являются решениями, которые получены на основе полуамплитуды лучевой скорости белого карлика K_1 . Синие непрерывные линии — решения, полученные в предположении образования пиков линии $H\alpha$ на краю аккреционного диска максимального радиуса R_{\max} . Аналогичные решения представляют синие пунктирные линии, однако они получены для аккреционного диска с минимально возможным радиусом R_{\min} . Черная непрерывная линия показывает наклонение орбиты i , начиная с которых происходит затмение акретора, а черная пунктирная линия соответствует наклонениям, до которых отсутствует затмение аккреционного диска радиуса R_{\min} .

ний в системе. Первое ограничение предполагает отсутствие затмения акретора, а второе — аккреционного диска. При выводе последнего ограничения использовалось выражение для минимально возможного радиуса аккреционного диска

$$R_{\min} = 0.0859Aq^{-0.426}, \quad (6)$$

данное Хессман, Хопп (1990).

На нижней панели рис. 15 показан набор решений для донора массой $M_2 = 0.03M_\odot$. Видно, что пересечение решений, соответствующих наблюдаемым оценкам K_1 и $v_{\text{out}} \sin i$, дает предельное наклонение орбиты i . При меньших значениях M_2 параметры системы не согласуются с отсутствием затмений в J1944. Таким образом, $M_2 = 0.03M_\odot$ можно рассматривать как нижнюю границу массы донора. Из рис. 15 также следует, что масса акретора принадлежит диапазону $M_1 \in 0.30 - 0.88M_\odot$, а наклонение орбиты лежит в диапазоне $i \in 40^\circ - 75^\circ$. Следует отметить, что приведенные ограничения на массу акретора и орбитальное наклонение получены из предположения формирования пиков линии $H\alpha$ на краю аккреционного диска. Если же считать, что они образуются в кольце радиуса $R \in R_{\min} - R_{\max}$, то диапазон допустимых параметров системы существенно расширится. Соответствующие области допустимых решений для двух рассмотренных масс донора показаны на рис. 15 заштрихованными зонами. Они остаются вполне совместимыми с ожидаемыми для КП.

В 2023 г. J1944 ушел в низкое состояние блеска с $\langle g \rangle \approx 20^m$. В оптических и УФ-наблюдениях орбитальная переменность объекта не проявлялась. Можно предположить, что в низком состоянии основным источником излучения является белый карлик. Мы попытались воспроизвести спектральное распределение энергии J1944 (рис. 16) на основе спектров водородных моделей атмосфер белых карликов, рассчитанных Кестер (2010). Моделирование проводилось путем минимизации квадратов невязок между теоретическими и наблюдаемыми потоками в полосах $uvw1$, $uvw2$, $uvw3$, g и r . Ошибки потоков в полосах g , r приняты равными 0^m1 , т.е. примерной переменности блеска J1944 в низком состоянии. Потоки в более длинноволновых полосах были исключены из рассмотрения из-за возможного вклада аккреционного диска и донора. Поток в полосе u был исключен из-за вклада от ближайших звезд. Потоки излучения J1944 были исправлены за межзвездное поглощение на основе кривой поглощения Фитцпатрик (1999). Мы использовали избыток цвета $E(B-V) = 0.06^m \pm 0.04^m$ для расстояния 415 пк в направлении на источник согласно картам межзвездного поглощения⁴ (Лальмен и др., 2014, 2018; Капитанио и др., 2017). Соответствующее поглощение в полосе V системы Джонсона

⁴<https://stilism.obspm.fr/>

$A_V = 3.1E(B-V) = 0.18^m$. Форма спектрального распределения энергии наилучшим образом описывается при температуре белого карлика $T = 14750 \pm 1250$ К. Эта температура типична для КП ниже пробела периодов (Таунсли и Гэнзике, 2009). Согласие наблюдаемых потоков с расстоянием до звезды $D = 415 \pm 15$ Пк достигается при радиусе белого карлика $R_1 = 0.0094-0.0124R_\odot$, которому соответствует масса $M_1 = 0.61-0.86M_\odot$ (Нойнберг, 1972). За подробностями по используемому методу моделирования спектрального распределения энергии мы отсылаем читателя к Колбин и др. (2024). Оценка M_1 согласуется с ее динамическим ограничением, представленным выше.

Маломассивный донор является более холодным, и его вклад в излучение не проявляется в наших данных, но может проявляться в красной и инфракрасной областях спектра. Для его обнаружения и звездной классификации необходимы наблюдения в этих диапазонах.

Таким образом, полученные данные и оценки показывают, что аккретором является белый карлик, а донором — маломассивная звезда позднего спектрального класса, подтверждая тем самым катаклизмическую природу J1944.

Переменность излучения и периодичности

Как уже отмечалось, J1944 может находиться в высоком и низком состояниях и продолжительность нахождения в этих состояниях может составлять несколько лет. Согласно рис. 4 в высоком состоянии объект был как минимум с июля 2011 г. по декабрь 2014 г. (3.4 года), а также с марта 2018 г. по декабрь 2022 г. (4.7 года) и находился в нем с января по начало мая 2024 г. (0.5 года). Состояние источника с 2015 по 2017 г. могли бы прояснить данные Gaia, однако на текущий момент в каталоге имеется только усредненная звездная величина источника за все время наблюдений. В низком состоянии J1944 находился на протяжении 2023 г., возможно с июля 2005 г. по сентябрь 2010 г. (т.е. примерно 5.2 года), хотя наблюдения в этом промежутке времени достаточно редки. На текущий момент объект находится в низком состоянии, в которое он перешел в мае 2024 г. Фотометрические наблюдения, выполненные на РТТ-150 15 июня 2024 года (см. табл. 2), показывают следующие звездные величины: $g = 19.82^m \pm 0.03^m$, $r = 19.82^m \pm 0.09^m$, $i = 19.76^m \pm 0.09^m$, $z = 19.64^m \pm 0.07^m$. Эти данные хорошо согласуются с измерениями в обзорах Pan-STARRS и ZTF, и по данным Swift/UVOT, полученными в низком состоянии источника (см. рис. 4 и табл. 3).

Высокие и низкие состояния наблюдаются у КП типа полярнов (Мэйсон, Сантана, 2015), промежуточных полярнов (Ковингтон и др., 2022; Мукай, Преториус, 2023) и новоподобных звезд типа VY Scl (Ханикатт, Кафка, 2004). Наличие аккреционного диска позволяет исключить принадлежность источника к классу

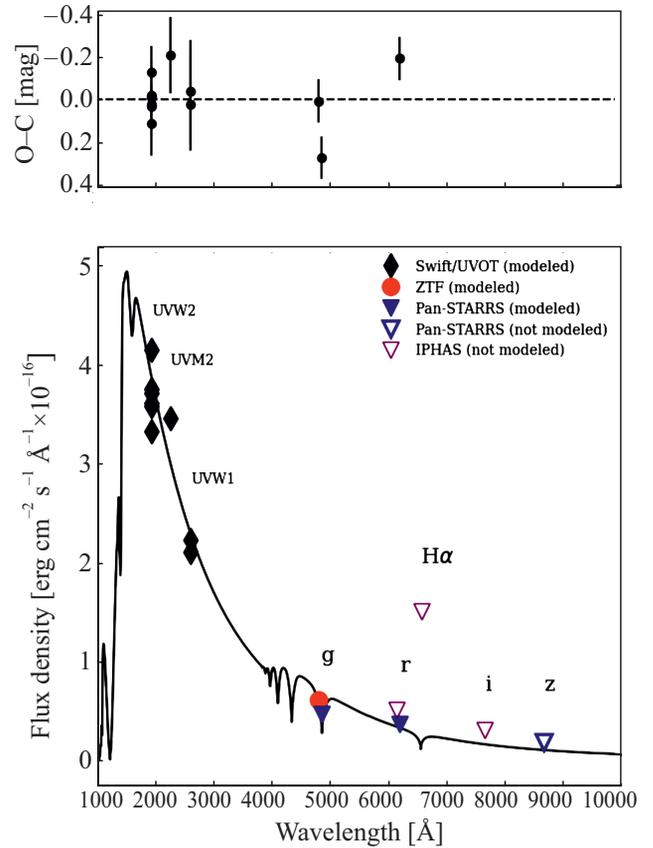


Рис. 16. Диаграмма $O-C$ между наблюдаемыми и модельными потоками белого карлика при оптимальных параметрах его атмосферы (верхняя панель), а также сравнение плотностей потоков J1944 в низком состоянии с модельным спектром белого карлика (нижняя панель). Заполненными символами указаны использованные для оценки параметров белого карлика потоки, а полыми — потоки в низком состоянии, не учитываемые в моделировании.

полярнов.

Найденный нами орбитальный период системы $P = 89 \pm 1$ мин близок к минимальному предельному значению ~ 80 мин для КП систем с водородными донорами (Книгге, 2006). Подобные периоды встречаются у промежуточных полярнов (Бернардини и др., 2017), тогда как системы типа VY Scl имеют более длинные периоды, обычно 3–6 ч (Медина Родригес и др., 2023).

Зарегистрированные нами (по фотометрическим наблюдениям в 2023 году) более короткие вариации оптического блеска с периодом $P_s = 7.96$ мин могут быть связаны с вращением белого карлика. Данный период не проявляется в высоком состоянии J1944, что, по-видимому, связано с доминированием излучения аккреционного диска. Если P_s действительно является периодом вращения белого карлика, то отношение P_s/P составляет 0.09, что близко к типичному

соотношению 0.01–0.1 между периодом вращения и орбитальным периодом для промежуточных поляр (Бернардини и др., 2017).

С другой стороны, P_s может быть периодом пульсаций белого карлика (см., например, Шкоди 2021). Оценки массы и температуры объекта указывают на то, что он может находиться в полосе неустойчивости. Однако подтверждение 8-мин периодичности с точностью порядка одной секунды по фотометрическим данным, полученным на РТТ-150 в 2024 г., является весомым аргументом в пользу ее связи с периодом вращения белого карлика. К тому же, наблюдаемая амплитуда 8-мин переменности блеска J1944 в 0.4^m существенно больше наблюдаемых амплитуд пульсаций у белых карликов, не превышающих 0.2^m (см., например, Фонтен, Брассард, 2008).

В высоком состоянии также зарегистрированы вариации стохастического характера на временах 1–15 мин, с амплитудами $0.2–0.6^m$, тогда как на меньших масштабах они не обнаружены.

Рентгеновские спектры

Рентгеновский спектр J1944 может быть описан моделью двухтемпературной оптически тонкой плазмы, указывая на неоднородность температуры в излучающей области. Полученные температуры типичны для КП (напр., Баскилл и др., 2005; Уорпел и др., 2020).

Используя избыток цвета $E(B-V)$ для J1944, определенный выше, и эмпирическое соотношение из работы Фойт и др. (2016), мы получили лучевую концентрацию поглощающего водорода $N_H = (5.2 \pm 3.8) \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$. Это согласуется с величиной N_H , полученной при аппроксимации рентгеновских спектров (см. табл. 4).

Рассчитанные рентгеновские светимости в высоком и низком состояниях составляют $\approx 10^{32}$ и $\approx 10^{31}$ эрг с^{-1} , соответственно. Скан источника с помощью XMM-Newton проводился 3 мая 2013 г., т.е. при нахождении J1944 в высоком состоянии (см. рис. 4). Светимость при этом была в ~ 2 раза больше, чем получена по данным Swift/XRT при усреднении по ряду наблюдений в течение нескольких лет. С учетом довольно сильной переменности блеска источника в высоком состоянии (рис. 4), в этом нет ничего удивительного. Полученные значения светимостей согласуются с наблюдаемыми для других КП с похожими периодами (Мукай, Преториус, 2023).

Оптические потоки (рассчитанные в полосе g) примерно в 10 раз ниже рентгеновских, как в высоком, так и в низком состоянии. Такое соотношение типично для КП (Ла Паломбара и др., 2006).

Темп аккреции

В высоком состоянии в оптическом спектре J1944 наблюдаются двухпиковые эмиссионные линии, причем в течение всего орбитального периода. Такие

линии указывает на наличие аккреционного диска, что подтверждается доплеровскими томограммами. В этом состоянии ни белый карлик, ни звезда-донор в спектре не проявляются.

В низком состоянии спектральное распределение энергии соответствует звездному (рис. 16). Однако по данным IPHAS, когда объект находился в низком состоянии, плотность потока в линии H α была в три раза больше континуума (это соотношение также наблюдается и для высокого состояния). Наличие эмиссионной линии может быть связано с аккрецией, которая может продолжаться и в низком состоянии, пусть и с существенно меньшим темпом. Преобладание потока в H α над континуумом в низком состоянии часто наблюдается для магнитных КП (см., например, Кеннеди и др., 2020; Колбин и др., 2023), при этом в континууме доминирует белый карлик. Также сильные эмиссионные линии, формируемые в диске, присутствуют и в спектрах карликовых новых типа WZ Sge в спокойном состоянии (см., например, Амантаева и др., 2021).

Оценить темп аккреции \dot{M} в высоком и низком состояниях можно в предположении, что вся энергия аккрецирующего вещества, образующаяся при его взаимодействии с поверхностью белого карлика, высвечивается в рентгеновском диапазоне, используя формулу

$$L_{X,\text{bol}} \sim \frac{GM_1 \dot{M}}{2R_1}, \quad (7)$$

где $L_{X,\text{bol}}$ — болометрическая светимость. Болометрические потоки были оценены с использованием результатов аппроксимации рентгеновских спектров J1944, $F_{X,\text{bol}}^h \sim 7 \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ и $F_{X,\text{bol}}^l \sim 6 \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. При этом темп аккреции в низком состоянии составляет

$$\dot{M}^l \approx 3 \times 10^{-12} \frac{R_1}{10^4 \text{ км}} \frac{M_\odot}{M_1} M_\odot \text{ год}^{-1}, \quad (8)$$

тогда как в высоком он на порядок больше при любых разумных значениях массы M_1 и радиуса R_1 белого карлика из возможных диапазонов, определенных ранее.

Тип катаклизмической переменной

Как уже было сказано выше, наличие аккреционного диска у J1944 исключает его принадлежность к (асинхронным) полярам. Его характеристики близки к типу VY Scl, у которых также наблюдаются низкие и высокие состояния с типичными разностями потоков в 3–5 величин. Главные различия состоят в том, что у VY Scl типичные орбитальные периоды равны 3–6 ч (Медина Родригес и др., 2023), температуры белых карликов превосходят 20000 К, а также темп аккреции на два порядка выше в высоком состоянии, чем у нашего объекта. По своим характеристикам J1944 является, скорее всего, промежуточным полярком.

Отношение интенсивностей линий HeII $\lambda 4686$ к H β в спектре J1944 меньше типичного значения >0.4 для магнитных КП (Силбер, 1992). Однако есть промежуточные полярны с похожей ситуацией, например, DW Snc⁵. Он так же, как и J1944, является короткопериодической системой ($P_{orb} = 86$ мин) и демонстрирует наличие высоких и низких состояний (Даффи и др., 2022).

Ассоциация с гамма-источником 4FGL J1943.9+2841

J1944 попадает в эллипс неопределенности положения неидентифицированного гамма-источника 4FGL J1943.9+2841, что ставит вопрос об их возможной ассоциации. У КП крайне редко регистрируется гамма-излучение. В гамма диапазоне были детектированы лишь вспышки некоторых новых (Синицина, Синицина, 2016; Соколовский и др., 2022, 2023). Лишь для двух магнитных быстро вращающихся белых карликов в двойных системах, AE Aqr и AR Sco (периоды вращения 33 и 117 с соответственно), возможно были обнаружены пульсации в гамма-диапазоне с периодом вращения белого карлика (Мейнтъес и др., 2023). AE Aqr является промежуточным полярным с магнитным полем $B \sim 10^6$ Гс, а AR Sco показывает ряд свойств, которые отличают его от всех известных классов КП. Темп аккреции в обеих системах очень низок, аккреционный диск не образуется: у AE Aqr — за счет эффекта пропеллера, у AR Sco — за счет сильного магнитного поля белого карлика ($B \sim 10^8$ Гс).

Классификация J1944 как КП делает его ассоциацию с 4FGL J1943.9+2841 крайне маловероятной, так как в его случае отсутствуют признаки новой, имеется аккреционный диск и он не обладает такими пекулярными свойствами как AE Aqr.

Заметим, что 4FGL J1943.9+2841 может являться пульсаром. Для подтверждения этого необходимы дальнейшие многоволновые исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что J1944 демонстрирует целый ряд характерных особенностей, позволяющих отнести его к классу промежуточных полярных. Примечательным и необычным является то, что он входит в немногочисленную группу промежуточных полярных с самыми короткими орбитальными периодами, лежащими ниже “пробела периодов” (Мукай, Преториус, 2023), и демонстрирующих переходы между высокими и низкими состояниями как в оптическом, так и рентгеновском диапазонах. На данный момент низкое состояние наблюдалось всего у одиннадцати промежуточных полярных (см., например, Ковингтон и др., 2022; Мукай, Преториус, 2023),

и лишь два объекта, FO Aqr и Swift J0746.3–1608 (Бернардини и др., 2019), наблюдались в рентгеновском диапазоне как в низком, так и в высоком состояниях. Таким образом, J1944 является, особенно с учетом его относительной яркости, уникальным объектом для исследования эволюции подобных систем одновременно в оптическом и рентгеновском диапазонах.

Дополнительные наблюдения в рентгеновском диапазоне могут позволить расширить представления о механизмах 8-мин переменности. Оптическая спектроскопия в низком состоянии поможет существенно уточнить параметры белого карлика и, возможно, звезды-донора, а также параметры двойной системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Это исследование основано на наблюдениях телескопа ePOZITA на борту обсерватории SRG. Обсерватория SRG 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 SRG/ePOZITA изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка (MPE) при поддержке DLR. Космический аппарат SRG 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. Исползованные в настоящей работе данные телескопа ePOZITA обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом ePOZITA и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа SRG/ePOZITA.

В работе использовались данные миссии Европейского космического агентства Gaia (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные и проанализированные Gaia консорциумом DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Также использовались данные обзора Pan-STARRS1, публичный доступ к которым был обеспечен институтом Астрономии Гавайского университете и офисом Pan-STARRS1 проекта, а также обществом Макса Планка, включая его институты и др. Использовались данные, полученные с помощью Zwicky Transient Facility проекта, поддержанного рядом грантов, а также данные фотометрического обзора северной части Галактической плоскости (IPHAS, www.iphas.org) полученного с помощью телескопа Исаака Ньютона и обработанные в Кембриджском институте астрономии.

Авторы благодарны ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании РТТ-

⁵Спектр источника доступен в обзоре LAMOST <https://www.lamost.org/dr8/v2.0/spectrum/view?obsid=392716175>

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”. Работа выполнена на основе наблюдений, проведенных в Мексиканской национальной астрономической обсерватории (OAN-SPM) в Нижней Калифорнии в Мексике. Благодарим сотрудников дневной и ночной поддержки OAN-SPM за содействие и помощь в получении наших наблюдений. Работа частично выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, а также за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

Работа ИФБ, ИМХ, МАГ, ЭНИ, МВС, РИГ, НАС выполнена за счет субсидии Минобрнауки РФ FZSM-2023-0015, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Работа ЮАШ, АВК и ДАЗ (анализ архивных оптических, ультрафиолетовых и рентгеновских данных, а также анализ данных 2.1-м телескопа OAN-SPM и телескопа eROSITA) выполнена в рамках темы Государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе номер FFUG-2024-0002. ДАЗ благодарит Пиринемскую школу Теоретической физики за гостеприимство.

Работа АЮК (планирование оптических наблюдений на 2.1-м телескопе OAN-SPM и получение данных) выполнена при поддержке гранта DGAPA-PAPIIT IA105024.

Работа АИК (анализ оптических спектров, оценка параметров компонент двойной системы) выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10064, <https://rscf.ru/project/22-72-10064/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдоллахи и др. (S. Abdollahi, F. Acero, L. Baldini, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **260**, 53 (2022).
- Амантаева и др. (A. Amantayeva, S. Zharikov, K.L. Page, et al.), *Astrophys. J.* **918**, 58 (2021).
- Арно (K.A. Arnaud), *Astron. Data Analysis Software and Systems V, A.S.P. Conf. Ser.* **101**, 17 (1996).
- Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *BaltA* **20**, 363 (2011).
- Баллет и др. (J. Ballet, P. Bruel, T.H. Burnett, et al.), Preprint arXiv:2307.12546.
- Барентсен и др. (G. Barentsen, H.J. Farnhill, J.E. Drew, et al.), *MNRAS* **444**, 3230 (2014).
- Баскилл и др. (D.S. Baskill, P.J. Wheatley, and P. Julian), *MNRAS* **357**, 626 (2005).
- Бернардини и др. (F. Bernardini, D. de Martino, K. Mukai, et al.), *MNRAS* **470**, 4815 (2017).
- Бернардини и др. (F. Bernardini, D. de Martino, K. Mukai, and M. Falanga), *MNRAS* **484**, 101 (2019).
- Боллер и др. (Th. Boller, M.J. Freyberg, J. Trümper, et al.), *Astron. Astrophys.* **588**, A103 (2016).
- Бэйлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, and R. Andrae), *Astrophys. J.* **161**, 147 (2021).
- ван Доккум (P.G. van Dokkum), *PASP* **113**, 1420 (2001).
- ВандерПлас (J.T. VanderPlas), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **236**, 16 (2018).
- Вилмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
- Даффи и др. (C. Duffy, G. Ramsay, D. Steeghs, et al.), *MNRAS* **510**, 1002 (2022).
- Де-Бур и др. (V. Debur, T. Arkhipova, and G. Beskin), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **513(1-2)**, 127 (2003).
- Игглтон (P.P. Eggleton), *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983).
- Капитанио и др. (L. Capitanio, R. Lallement, J.L. Vergely, M. Elyajouri, and A. Monreal-Ibero), *Astron. Astrophys.* **606**, A65 (2017).
- Кеннеди и др. (M.R. Kennedy, P.M. Garnavich, C. Littlefield, et al.), *MNRAS* **495**, 4445 (2020).
- Кестер (D. Koester), *Memorie della Societa Astronomica Italiana* **81**, 921 (2010).
- Книгге (C. Knigge), *MNRAS* **373**, 484 (2006).
- Книгге и др. (C. Knigge, I. Baraffe, and J. Patterson), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **194**, 28 (2011).
- Ковингтон и др. (A.E. Covington, A.W. Shaw, K. Mukai, et al.), *Astrophys. J.* **928**, 164 (2022).
- Колбин А.И., Борисов Н.В., Буренков А.Н. и др., Письма в Астрон. журн. **49**, 208 (2023) [A.I. Kolbin, N.V. Borisov, A.N. Burenkov, et al., *Astron. Lett.* **49**, 129 (2023)].
- Колбин и др. (A.I. Kolbin, E.P. Pavlenko, V.Yu. Kochkina, et al.), *Astron. Lett.* **50**, 335 (2024).
- Коллаборация Gaia и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, A1 (2016).
- Коллаборация Gaia и др. (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, et al.), *Astron. Astrophys.* **674**, A1 (2023).
- Котзе 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).
- Кэш (W. Cash), *Astrophys. J.* **228**, 939 (1979).
- Ла Паломбара и др. (N. La Palombara, R.P. Mignani, E. Hatziminaoglou, et al.), *Astron. Astrophys.* **458**, 245 (2006).
- Лальемен и др. (R. Lallement, J.-L. Vergely, B. Valette, et al.), *Astron. Astrophys.* **561**, A91 (2014).
- Лальемен и др. (R. Lallement, L. Capitanio, L. Ruiz-Dern, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A132 (2018).
- Лидал и др. (D.A. Liedahl, A.L. Osterheld, and W.H. Goldstein), *Astrophys. J. (Lett.)* **438**, L115 (1995).

35. Марш, Швопе (T.R. Marsh and A.D. Schwope), *ASSL* **439**, 195 (2016).
36. Маски и др. (F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, et al.), *PASP* **131**, 018003 (2019).
37. Меве и др. (R. Mewe, E.H.B.M. Gronenschild, and G.H.J. van den Oord), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **62**, 197 (1985).
38. Меве и др. (R. Mewe, J.R. Lemen, and G.H.J. van den Oord), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **65**, 511 (1986).
39. Медина Родригес и др. (A.L. Medina Rodriguez, S. Zharikov, J. Kára, et al.), *MNRAS* **521**, 5846 (2023).
40. Мейнтъес и др. (P.J. Meintjes, S.T. Madzime, Q. Kaplan, and H.J. van Heerden), *Galaxies* **11**, 14 (2023).
41. Мицуда и др. (K. Mitsuda, H. Inoue, N. Nakamura, and Y. Tanaka), *Publ. Astron. Soc. Japan* **41**, 97 (1989).
42. Мукай, Преториус (K. Mukai and M.L. Pretorius), *MNRAS* **523**, 3192 (2023).
43. Мэйсон, Сантана (P.A. Mason and J.B. Santana), *Proc. The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects III* (Proc. of Science, v. 255), 16 (2015).
44. Неустроев и др. (V.V. Neustroev, S.V. Zharikov, and N.V. Borisov), *Astron. Astrophys.* **586**, A10 (2016).
45. Нойнберг (M. Nauenberg), *Astrophys. J.* **175**, 417 (1972).
46. Нусита и др. (A.A. Nucita, E. Kuulkers, F. De Paolis, et al.), *Astron. Astrophys.* **566**, A121 (2014).
47. Оке (J.B. Oke), *Astron. J.* **99**, 1621 (1990).
48. Папитто, де Мартино (A. Papitto and D. de Martino), In: S. Bhattacharyya, A. Papitto, D. Bhattacharya, D. (eds) *Millisecond Pulsars*, *Astrophys. Space Sci. Lib. V.* 465. P. 157–200. Springer, Cham. (2022).
49. Пачински (B. Paczynski), *Astrophys. J.* **216**, 822 (1977).
50. Плохотниченко и др. (V.L. Plokhotnichenko, G.M. Beskin, V.G. de Boer, et al.), *Astrophysical Bulletin* **76(4)**, 472 (2021).
51. Плохотниченко и др. (V.L. Plokhotnichenko, G.M. Beskin, V.G. de Boer, et al.), *Изв. КРАО РАН* **119(3)**, 11 (2023).
52. Плохотниченко и др. (V.L. Plokhotnichenko, A.V. Solin, and A.G. Tikhonov), *Astrophys. Bull.* **64(2)**, 198 (2009).
53. 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).
54. Рейс и др. (R.C. Reis, P.J. Wheatley, B.T. Gänsicke, and J.P. Osborne), *MNRAS* **430**, 1994 (2013).
55. Силбер (A.D. Silber), *Studies of an X-Ray Selected Sample of Cataclysmic Variables*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1992).
56. Синицина, Синицина (V.G. Sinitsyna and V.Y. Sinitsyna), *J. Phys.: Conf. Ser.* **718**, 052046 (2016).
57. Сироткин, Ким (F.V. Sirotkin and W.-T. Kim), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **721**, 1356 (2010).
58. Соколовский и др. (K.V. Sokolovsky, K.-L. Li, R.L. de Oliveira, et al.), *MNRAS* **514**, 2239 (2022).
59. Соколовский и др. (K.V. Sokolovsky, T.J. Johnson, S. Buson, et al.), *MNRAS* **521**, 5453 (2023).
60. Сэкстон и др. (R.D. Saxton, A.M. Read, P. Esquej, et al.), *Astron. Astrophys.* **480**, 611 (2008).
61. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
62. Таката и др. (J. Takata, X.F. Wang, A. K. H. Kong, et al.), *Astrophys. J.* **936**, 134 (2022).
63. Таунсли и Гэнзике (D.M. Townsley, B.T. Gänsicke), *Astrophys. J.* **693**, 1007 (2009).
64. Торрес и др. (D.F. Torres, T. Lin, and F. Coti Zelati), *MNRAS* **486**, 1019 (2019).
65. Уорнер (B. Warner), *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge Univ. Press, Cambridge).
66. Уорпел и др. (H. Worpel, A.D. Schwope, I. Traulsen, et al.), *Astron. Astrophys.* **639**, A17 (2020).
67. Фонтен, Брассард (G. Fontaine and P. Brassard), *PASP* **120**, 1043 (2008).
68. Фитцпатрик (E.L. Fitzpatrick), *PASP* **111**, 63 (1999).
69. Флювеллинг и др. (H.A. Flewelling, E.A. Magnier, K.C. Chambers, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **251**, 7 (2020).
70. Фойт и др. (D.R. Foight, T. Güver, F. Özel, and P.O. Slane), *Astrophys. J.* **826**, 66 (2016).
71. Ханикатт, Кафка (R.K. Honeycutt, S. Kafka), *Astrophys. J.* **128**, 1279 (2004).
72. Хессман, Хопп (F.V. Hessman and U. Hopp), *Astron. Astrophys.* **228**, 387 (1990).
73. Хорн (K. Horne), *PASP* **98**, 609 (1986).
74. Шафтер (A.W. Shafter), *Astrophys. J.* **267**, 222 (1983).
75. Шкоди (P. Szkody), *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **8**, 184 (2021).
76. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).
77. Эванс и др. (P.A. Evans, K.L. Page, J.P. Osborne, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **247**, 54 (2020).
78. Якин Д.Г., Сулейманов В.Ф., Власюк В.В., Спиридонова О.И., Письма в астрон. журн. **39**, 41 (2013) [D.G. Yakin, V.F. Suleimanov, V.V. Vlasyuk, et al., *Astron. Lett.* **39**, 38 (2013)].