

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКА Ве-ЗВЕЗДЫ В ДВОЙНОЙ МАССИВНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ СИСТЕМЕ IGR J21343+4738

© 2023 г. Е. А. Николаева^{1,2*}, И. Ф. Бикмаев^{1,2}, Э. Н. Иртуганов^{2,3},
М. А. Горбачев^{2,3}, М. В. Сусликов^{1,2}, Р. И. Гумеров^{2,3}, Н. А. Сахибуллин^{2,3}

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³Академия наук Татарстана, Казань, Россия

Поступила в редакцию 17.11.2023 г.

После доработки 21.11.2023 г.; принята к публикации 21.11.2023 г.

Представлены результаты многолетнего фотометрического и спектрального мониторинга на 1.5-м телескопе РТТ-150 оптической компоненты массивной рентгеновской двойной системы IGR J21343+4738, открытой в 2002 г. космической рентгеновской обсерваторией ИНТЕГРАЛ. Рентгеновский источник также неоднократно детектировался телескопами космической обсерватории СРГ в ходе обзоров всего неба в период 2019–2021 гг. Исследованы спектральная и фотометрическая переменности оптической компоненты — Ве-звезды, вызванные физическими процессами в экваториальном диске. Выполнен анализ эволюции параметров экваториального диска на длительной шкале времени в 16 лет.

Ключевые слова: двойные массивные рентгеновские системы, Ве-звезды, фотометрия, спектроскопия, РТТ-150, IGR J21343+4738.

DOI: 10.31857/S0320010823110074, **EDN:** RXZOQS

ВВЕДЕНИЕ

Источник жесткого рентгеновского излучения IGR J21343+4738 был обнаружен телескопом IBIS (Убертини и др., 2003) космической обсерватории ИНТЕГРАЛ (Винклер и др., 2003) в декабре 2002 г. (Кривонос и др., 2007; Бёрд и др., 2007). До февраля 2004 г. обсерваторией ИНТЕГРАЛ регистрировался рентгеновский поток от объекта на уровне 1.6 ± 0.3 мКраб $\approx (2.3 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, в марте 2004 г. поток упал ниже 0.5 мКраб, и объект стал невидим для обсерватории ИНТЕГРАЛ. С помощью рентгеновского телескопа Чандра (при точности его рентгеновских координат в 1 угл. сек) в декабре 2006 г. удалось отождествить слабый рентгеновский источник с оптической звездой яркостью $V = 14.1^m$ (Сазонов и др., 2008). По спектральным наблюдениям в 2007 г. на 1.5-м российско-турецком телескопе РТТ-150 Бикмаев и др. (2008) впервые классифицировали оптическую звезду как звезду класса В3 из-за наличия в спектре абсорбционных линий водорода H α и гелия HeI, и отсутствия

линий ионизованного гелия HeII, и показали, что оптическая компонента является Ве-звездой. Как известно, Ве-звезда — это быстровращающаяся (скорость вращения около 75% от критической и выше) звезда спектрального класса В (иногда, позднего О, раннего А класса), окруженная экваториальным диском. Диск формируется в результате выброса вещества фотосферной плазмы, закручивающегося по кеплеровской орбите. В результате на абсорбционный фотосферный спектр звезды накладываются эмиссионные линии от экваториального диска. Наиболее яркие следы присутствия диска обычно показывает профиль линии H α , приобретающий сложную структуру: абсорбционный профиль обрамляется с двух сторон эмиссионными пиками от экваториального диска. И хотя линия H α в спектрах исследуемого объекта в 2007 г. имела только абсорбционный профиль, вывод о принадлежности оптической звезды к Ве-звездам был сделан в результате сравнения ширин профилей линий H α и HeI. Профиль линии H α оказался более узким из-за вклада эмиссионной составляющей околозвездного диска (Бикмаев и др., 2008). Для корректного определения фотосферных параметров Ве-звезды

*Электронный адрес: evgeny.nikolaeva@gmail.com

необходимо получить ее спектр в периоды временного исчезновения (полного разрушения) экваториального диска. Рейг, Зезас (2014a) в период отсутствия (как полагали авторы) околосреднего экваториального диска в августе 2013 г. более точно определили спектральный класс оптической звезды как B1IVe и нашли параметры ее звездной атмосферы ($T_{\text{eff}} = 25\,000\text{ K}$, $\log g = 3.75$, $v \sin i = 365 \pm 15\text{ км с}^{-1}$). Авторы также определили расстояние до системы — 8.5 кпк.

Компактным объектом в рентгеновских двойных системах с Ве-звездами (ВеХВ) обычно является нейтронная звезда (Постнов и др., 2017). Источник IGR J21343+4738 не стал исключением. По наблюдениям в 2013 г. на рентгеновском телескопе XMM-Newton (Янсен и др., 2001) в системе IGR J21343+4738 обнаружены пульсации рентгеновского излучения с периодом $320.35 \pm 0.06\text{ с}$ (Рейг, Зезас, 2014b). Используя диаграмму Корбета (Корбет, 1984), учитывающую положительную корреляцию между периодом вращения нейтронной звезды P_{spin} и орбитальным периодом системы P_{orb} , авторы оценили значение орбитального периода в $\sim 100\text{--}300$ дней. Пайк и др. (2020), Горбан и др. (2022), используя рентгеновские наблюдения источника с помощью телескопа NuSTAR в 2020 г., получили значение периода в $322.71 \pm 0.04\text{ с}$, предположив замедление вращения нейтронной звезды.

Оптическая переменность Ве-звезд проявляется как по фотометрическим, так и по спектральным наблюдениям на шкалах времени от нескольких часов до нескольких десятилетий. Самые быстрые вариации яркости продолжительностью 0.1–2 дня показывают нерадиальные пульсации (Ривиниус и др., 2013). Тогда как самые долговременные (годы, десятилетия) и значительные изменения связаны с “жизнью” диска: он может увеличиваться в размерах или рассеиваться изнутри наружу при прекращении поступления вещества от звезды. Так, накопление вещества и рост диска спектроскопически проявляются в усилении интенсивностей эмиссионных компонент линии $H\alpha$, а фотометрически — в случае, если мы видим систему “плашмя” (лежит в картинной плоскости), общая яркость системы увеличивается, а если “с ребра”, диск заслоняет саму звезду, и блеск системы падает. Спектральная переменность промежуточной длительности (~ 10 лет) проявляется в изменении отношения интенсивностей синего и красного эмиссионных пиков V/R из-за распространения волн плотности по экваториальному диску. Когда материал с высокой плотностью приближается к наблюдателю, усиливается синий (V) пик, а когда часть с высокой плотностью удаляется от наблюдателя, усиливается красный (R) пик.

Настоящая работа посвящена определению параметров экваториального диска Ве-звезды массивной рентгеновской двойной системы IGR J21343+4738 и исследованию их изменений со временем.

НАБЛЮДЕНИЯ

В работе представлен обширный материал, накопленный за 16-летнюю историю наблюдений источника IGR J21343+4738 на Российско-Турецком телескопе РТТ-150 (Национальная Обсерватория ТЮБИТАК, Анталья, Турция). Фотометрические изображения области, содержащей источник рентгеновского излучения, начали получать еще в 2005 г. Была использована ПЗС-матрица ANDOR (2048 × 2048 пикселей, модель DW436 с термоэлектрическим охлаждением — -60°C). Фотометрические снимки получались в основном без фильтра с экспозицией 5–30 с. А с 2007 г. после отождествления оптической звезды на РТТ-150 начались спектроскопические исследования оптической компоненты рентгеновского источника. Спектроскопия проводилась с использованием эшелле-моды среднего разрешения (2.5 \AA) прибора TFOSC¹, оснащенного различными детекторами. В период с 2007 по 2017 г. в качестве детектора использовалась азотно охлаждаемая матрица Fairchild 447 формата 2048 × 2048 пикселей размером 15 микрон. С 2017 по 2019 г. использовалась термоэлектрически охлаждаемая до -60°C матрица ANDOR, модель DW436-BV, а с 2019 г. по настоящее время используется термоэлектрически охлаждаемая до -80°C матрица ANDOR iKON-L 936 BEX2-DD, 2048 × 2048 пикселей размером 13.5 микрон. Для уменьшения влияния космических частиц время единичной экспозиции в разные периоды наблюдений составляло от 20 до 60 мин. Для увеличения отношения сигнал/шум несколько спектров, полученных в течение ночи, складывались. Спектральный диапазон приходится на диапазон длин волн 4000–9000 Å. Редукция спектров (экстрагирование одномерных векторов из двумерных изображений, удаление следов космических частиц и дефектов, проведение континуума, калибровка длин волн) была выполнена в комплексе программ DECH (Галазутдинов, 2022).

ФОТОМЕТРИЯ И ПРОФИЛЬ ЛИНИИ $H\alpha$

Для изучения долговременной фотометрической переменности оптической звезды IGR J21343+4738

¹ <https://tug.tubitak.gov.tr/tr/icerik/xfosc-tug-faint-object-spectrograph-and-camera>

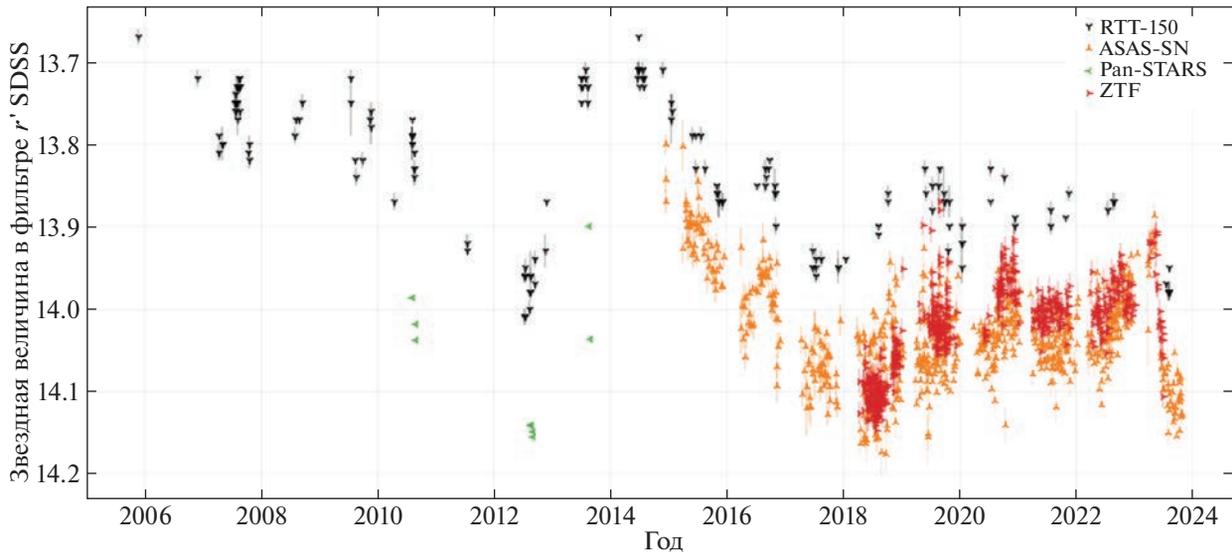


Рис. 1. Многолетняя кривая блеска IGR J21343+4738, полученная по данным RTT-150 (черные точки) в сравнении с данными ZTF, ASAS-SN и PanSTARRS (цветные точки).

использовались кадры наведения на объект в белом свете, предшествующие спектроскопическим наблюдениям. Дифференциальная апертурная фотометрия относительно более ярких звезд поля выполнена стандартным образом. Среднее значение звездной величины и ошибка ее измерения получены по нескольким кадрам внутри одной наблюдательной ночи. Точность фотометрических измерений контролировалась по звездам сравнения. Вид многолетней кривой блеска, полученной по данным РТТ-150, хорошо согласуется с фотометрическими данными обзоров ZTF (Маски и др., 2019), ASAS-SN (Шепа и др., 2014; Джаясингхе и др., 2019) и PanSTARRS (Чамберс и др., 2016), звездные величины для сравнения данных между собой были приведены в единую шкалу — звездную величину r' фильтра SDSS (рис. 1). Формулы перехода между разными фотометрическими системами звездных величин взяты из статей Костов, Бонев (2017), Тонри и др. (2012). Небольшое систематическое смещение в 0.1 звездной величины объясняется различием показателей цвета звезды сравнения и Ве-звезды и использованием при наблюдениях на РТТ-150 белого фильтра.

Первые фотометрические кадры на РТТ-150 были получены еще до оптического отождествления системы в 2005 г., и в этот момент ($HJD \approx 2453700$) система имела максимальный блеск за всю историю наблюдений (рис. 2, верхняя панель). Затем, до $HJD \approx 2456100$, наблюдался тренд падения яркости системы с одновременным ростом эмиссионных компонент профиля линии $H\alpha$: от практически полного отсутствия ($HJD \approx 2454315$) до ярко выраженных эмиссий с превалирующим

синим пиком ($HJD \approx 2456119$, нижняя левая панель рис. 2). Увеличение интенсивности эмиссионных компонент говорит о развитии экваториального диска, а падение яркости — о том, что растущий диск все больше заслоняет звезду, а значит, система наблюдается “с ребра”.

В момент времени $HJD \approx 2456255$ эмиссионные крылья выравниваются ($V=R$), а в $HJD \approx 2456502$ и вовсе пропадают: диск рассеялся, но не исчез полностью, профиль линии $H\alpha$ еще довольно узкий. Максимальной ширины за весь период наблюдений на РТТ-150 профиль линии $H\alpha$ достигал 26 июня 2014 г. ($HJD \approx 2456835$), тогда же и блеск системы сравнялся с максимальным значением 13.67^m , как и на старте мониторинга системы в 2005 г. ($HJD \sim 2453700$). При этом профиль линии выглядит усеченным, как будто обрезанным, по сравнению с другими спектральными наблюдениями, т.е., скорее всего, продолжает содержать следы излучения экваториального диска.

С $HJD \approx 2456835$ вновь начинается формирование диска, блеск системы падает, а эмиссионные компоненты растут, с той лишь разницей, что теперь, с $HJD \approx 2457634$ начинает доминировать красный пик. Достигнув наибольшего значения $HJD \approx 2458865$, эмиссия красного пика начинает уменьшаться, профиль линии $H\alpha$ приобретает форму P-Cygni профиля.

Особый интерес представляет профиль линии $H\alpha$, наблюдаемый в момент времени $HJD \approx 2458725$: абсорбция отсутствует, линия полностью эмиссионная, при этом блеск системы близок к среднему значению и составляет 13.8^m . Здесь корреляция между фотометрической яркостью и размером экваториального диска нарушается.

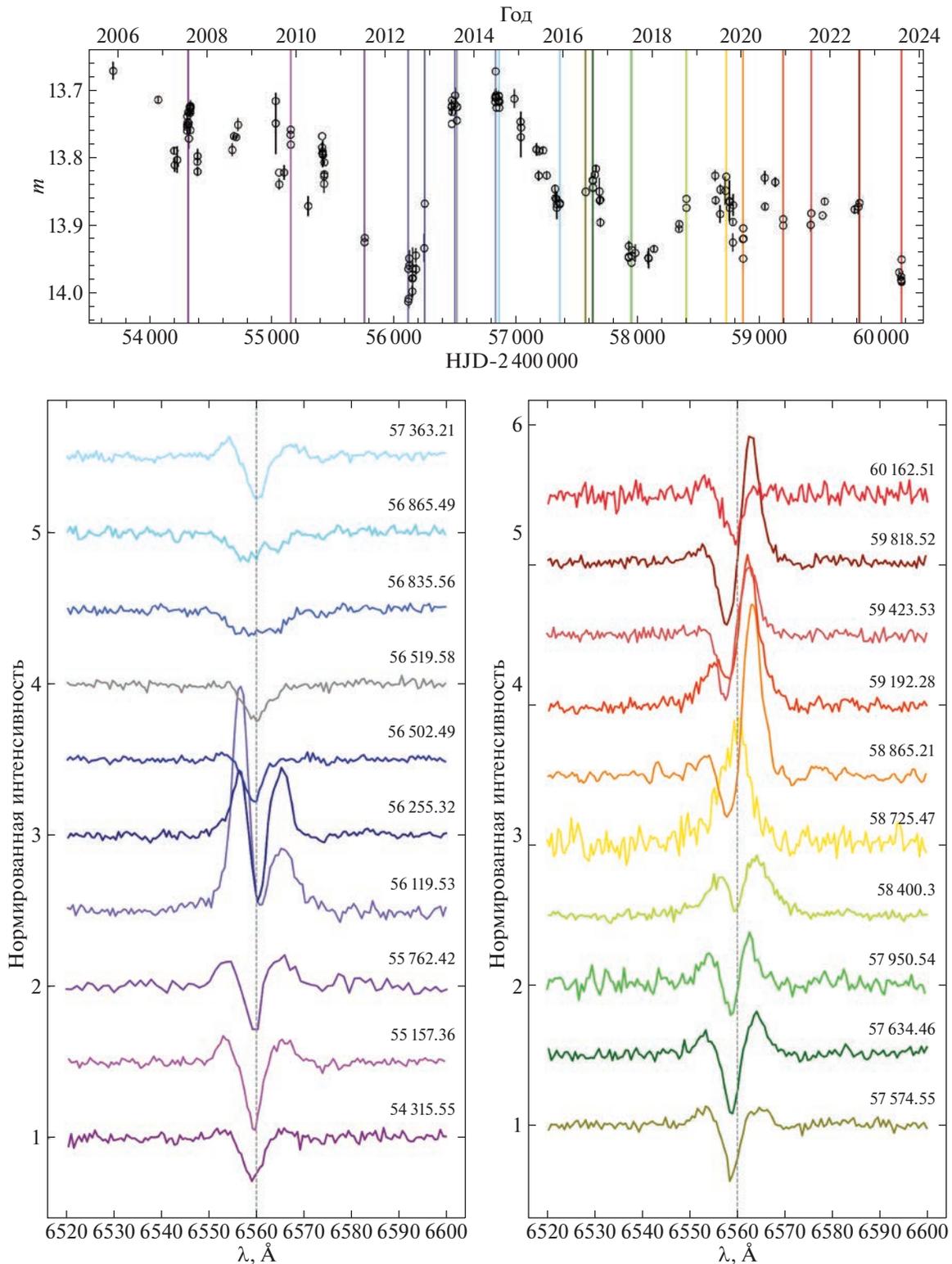


Рис. 2. Кривая блеска IGR J21343+4738 (верхняя панель). Изменение профиля линии $H\alpha$ (нижняя панель) в разные моменты времени показаны в соответствии с цветными вертикальными линиями, нанесенными на график кривой блеска.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ $H\alpha$

Вид профиля линии $H\alpha$ очень разнообразен в разные моменты времени. Эмиссионные компоненты линии $H\alpha$ формируются в экваториальном диске

Ве-звезды, и для того чтобы рассмотреть, какие количественные изменения происходили с диском, были измерены и проанализированы следующие параметры профиля линии $H\alpha$:

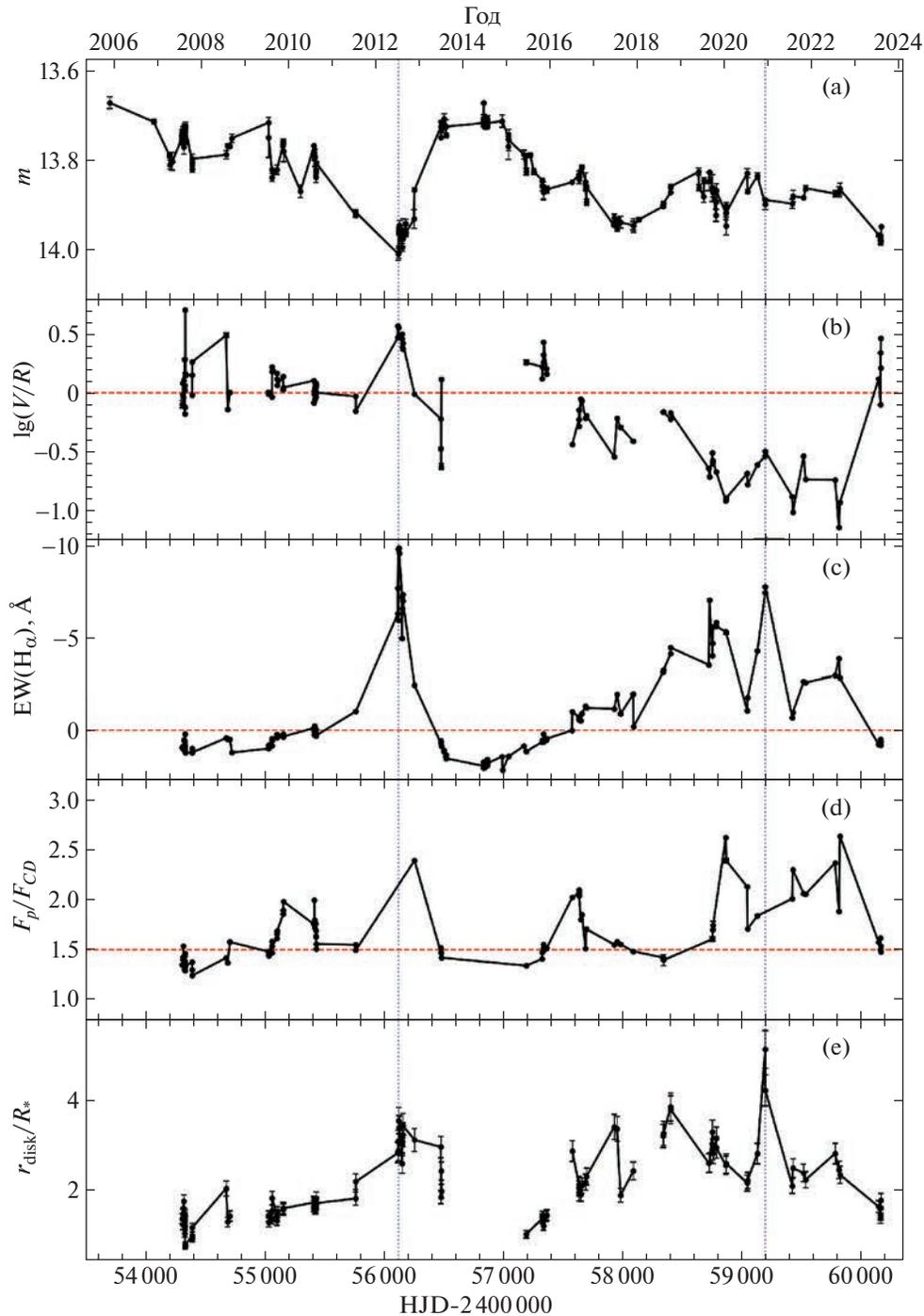


Рис. 3. (a) — Кривая блеска; (b) — логарифм отношения интенсивностей синего и красного пиков профиля линии $H\alpha$; (c) — эквивалентная ширина профиля линии $H\alpha$; (d) — полусумма интенсивностей синего и красного пиков, отнесенная к глубине абсорбционной составляющей линии; (e) — радиус экваториального диска Ве-звезды в радиусах звезды.

— V, R — интенсивности (измеренные от уровня континуума) синей и красной эмиссионной компоненты соответственно;

— CD — глубина центральной абсорбции (депрессии) от уровня континуума;

— ΔV — расстояние между синим и красным эмиссионными пиками;

— EW — эквивалентная ширина всей линии $H\alpha$.

Интенсивности эмиссионных и абсорбционных составляющих линии $H\alpha$, а также ее эквивалентная ширина очень сильно зависят от выбранного уровня континуума. Поэтому, чтобы минимизировать ошибки и оценить погрешность измерений вышеперечисленных параметров, континуум был проведен 10 раз по различным областям спек-

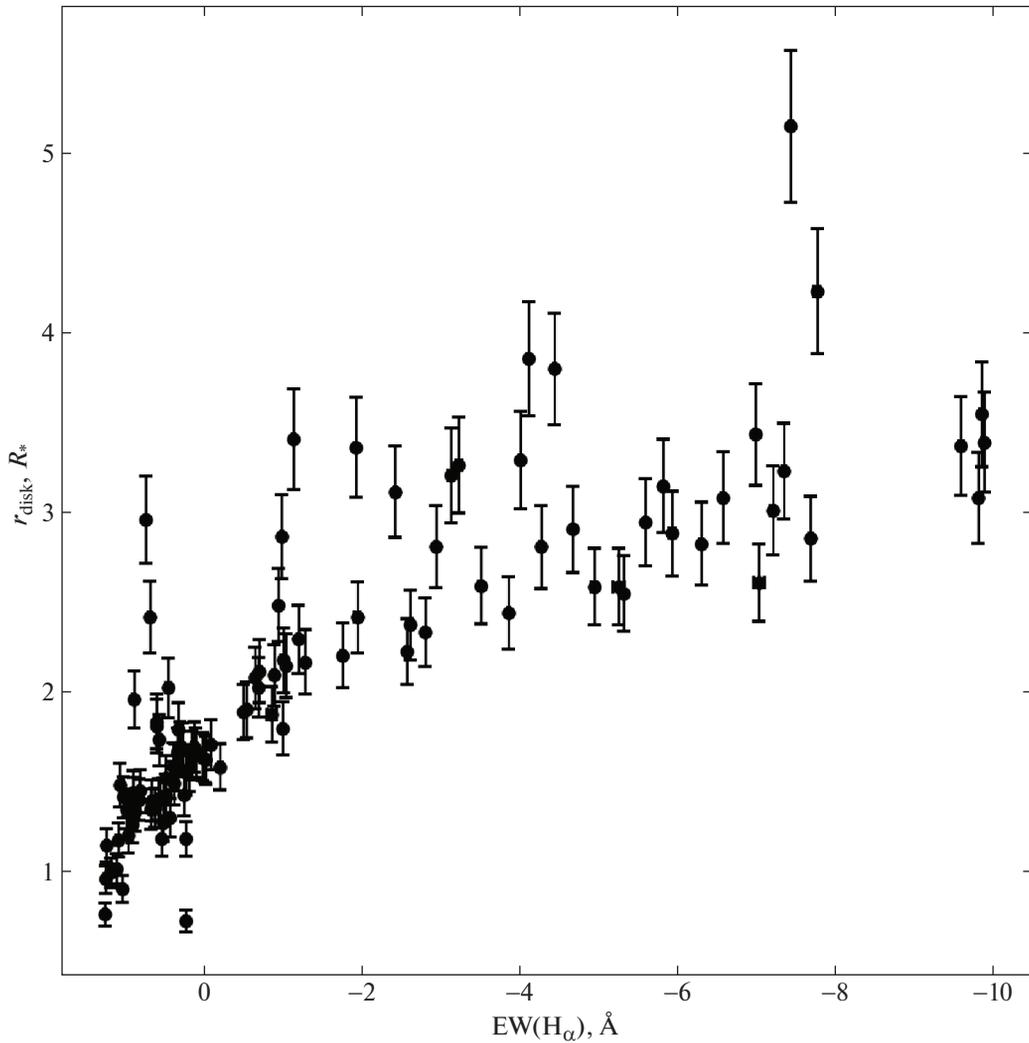


Рис. 4. Зависимость радиуса диска от эквивалентной ширины профиля линии $H\alpha$.

тра, не содержащим линии. Каждый компонент линии (2 эмиссии и центральная абсорбция, при наличии) описывался гауссианой для нахождения интенсивности и положения центрального максимума (минимума), а эквивалентная ширина рассчитывалась непосредственно путем суммирования площади фигуры под кривой. Отношение интенсивностей синего и красного эмиссионных пиков сильно изменяется со временем, тем не менее, прослеживается нисходящий тренд логарифма этой величины (рис. 3b). Так, если в первую половину периода мониторинга на РТТ-150 чаще доминировал синий пик $\log(V/R) > 0$ или интенсивности пиков были практически равны $\log(V/R) = 0$ (до момента разрушения диска в 2013 г. и немного позже), то затем наблюдался уверенный рост красного эмиссионного пика $\log(V/R) < 0$, что говорит о наличии глобального возмущения плотности в диске, приводящего к асимметричному вращению диска относительно оси вращения.

Сгущение то приближается $\log(V/R) > 0$, то удаляется $\log(V/R) < 0$ от наблюдателя. Кроме того, если сравнивать среднюю интенсивность эмиссионных пиков $F_p = (F_V + F_R)/2$ с интенсивностью абсорбционной компоненты F_{CD} (рис. 3d), видно, что большую часть времени выполняется условие $F_p/F_{CD} \geq 1.5$ (Ханушик, 1996), позволяющее классифицировать оптический компонент в качестве Ве-звезды с оболочкой (shell star). Известно, что для таких звезд угол наклона системы i должен превышать 70° .

Расстояние между эмиссионными пиками характеризует внешний размер (радиус) области, где формируется излучение. Таким образом, радиус диска r_d связан с расстоянием между эмиссионными пиками следующим соотношением (Хуанг, 1972):

$$\frac{r_d}{R_*} = \left(\frac{2V_* \sin i}{\Delta V} \right)^{1/j}, \quad (1)$$

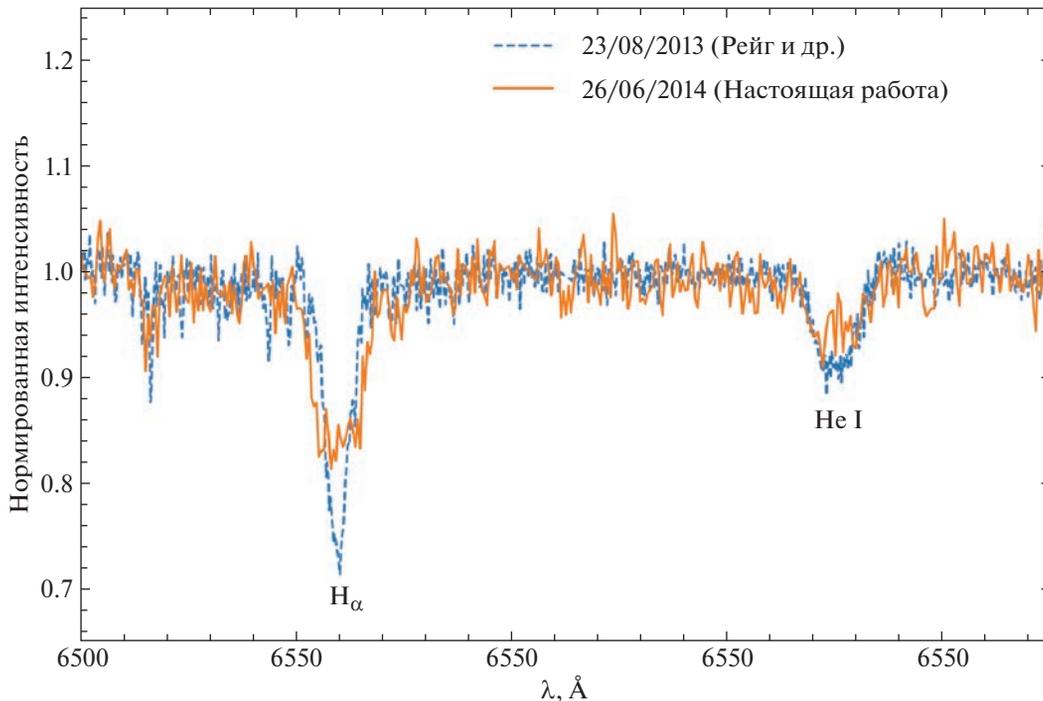


Рис. 5. Участок спектра, содержащий линию $H\alpha$ и линию He I. Сравнение спектра, полученного Рейгом и Зезасом 23.08.2013 в момент отсутствия диска, как полагали авторы, и спектра, описанного в настоящей статье, полученного 26.06.2014 в момент наибольшей яркости системы, когда абсорбционный профиль линии $H\alpha$ имел наибольшую ширину.

где $2V_* \sin i$ — скорость вращения звезды, а $\Delta V = 2V_{\text{rot}} \sin i$ — скорость движения вещества в диске, i — наклонение орбиты. Закон, по которому осуществляется вращение газа в экваториальном диске, определяется величиной j в показателе степени:

$j = 1$ — выполняется сохранение углового момента на единицу массы;

$j = -1$ — твердотельное вращение;

$j = 0.5$ — кеплеровский диск.

Проверка закона вращения диска, проведенная для Ве-звезд, как для одиночных, так и в составе двойных рентгеновских систем, привела к единому результату — декреционный диск является кеплеровским (Рейг и др., 2016). Воспользовавшись значением скорости вращения, полученным в момент отсутствия диска, $v \sin i = 365 \pm 15 \text{ км с}^{-1}$ (Рейг, Зезас, 2014а), был рассчитан радиус диска системы в разные моменты времени (рис. 3е). Вертикальными линиями отмечены моменты, когда диск имел наибольший радиус до и после разрушения. В эти же моменты эквивалентная ширина линии $H\alpha$ имела минимальное значение. Более наглядно корреляция между эквивалентной шириной и радиусом диска продемонстрирована на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на протяжении всей истории наблюдений Ве-звезда в массивной двойной рентгеновской системе IGR J21343+4738 всегда имела

экваториальный диск, излучение которого вносит искажения во все спектральные линии В-звезды. Если сравнить наш спектр 2014 г. в момент максимальной яркости системы (а значит, в момент, когда затмевающий звезду декреционный диск минимален) и спектр Рейга и Зезаса в момент “потери” экваториального диска в 2013 г. (Рейг, Зезас, 2014а) видно, что линия $H\alpha$ является более широкой в 2014 г. (рис. 5), т.е. и в 2013 г. линия содержала эмиссионные компоненты диска. В то же время на спектре 2014 г. линия $H\alpha$ выглядит усеченной и плоской, в соседней линии гелия He I 6678 и вовсе видны следы эмиссионной составляющей, а центральная часть линий также искажена из-за вклада излучения диска, и спектр не годится для моделирования звездной атмосферы звезды.

Такие значительные изменения, связанные с переменным диском Ве-звезды, вносят сильные искажения в профили композитных (фотосферная абсорбция плюс эмиссия от диска) спектральных линий и не позволяют произвести корректные измерения лучевых скоростей. Наши попытки построить кривую лучевых скоростей по линии гелия He I 4471 в синей части спектра (Николаева и др., 2021), менее подверженной влиянию излучения диска, не увенчались успехом: орбитальный период, найденный по измеренным лучевым скоростям, не согласовался с массой компактного объекта. По двум найденным нами возможным периодам

Таблица 1. Наблюдения IGR J21343+4738 в рентгеновском диапазоне длин волн

Дата	Поток, $\times 10^{-11}$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Диапазон, кэВ	Обсерватория	Ссылка
декабрь 2002 г.— февраль 2004 г.	2.3 ± 0.4	17–60	ИНТЕГРАЛ	Кривонос и др. (2007)
март 2004 г.	< 0.72	17–60	ИНТЕГРАЛ	Кривонос и др. (2007)
ноябрь 2013 г.	1.4	0.2–12	ХММ-Newton	Рейг, Зезас (2014b)
2 июня 2020 г.	1.3	4–12	ART-XC/СРГ	Семена и др. (2020)
6 декабря 2020 г.	7	4–12	ART-XC/СРГ	Семена и др. (2020)
17 декабря 2020 г.	1.49(2)	4–12	NuSTAR	Пайк и др. (2020)

(порядка 34 и 160 сут) получалось наличие в системе черной дыры или очень массивной нейтронной звезды, что является маловероятным.

Объект показывает сильную фотометрическую и спектральную переменности в оптическом диапазоне длин волн. Это связано с эволюцией экваториального диска: диск менялся в размерах, рассеивался и вновь формировался. Наличие более плотных областей в диске привело к асимметричному вращению диска относительно оси вращения звезды и прецессии волн плотности по диску. В рентгеновском диапазоне выполнено не так много наблюдений (табл. 1) (Горбан и др., 2022), а орбитальный период системы к настоящему времени неизвестен. Поэтому для подтверждения корреляции между рентгеновским и оптическим излучениями на временных масштабах, сравнимых с орбитальным периодом, необходимы дальнейшие рентгеновские и оптические наблюдения этой системы. Во время поярчания системы в 5 раз в рентгеновском диапазоне 6 декабря 2020 г. (Семена и др., 2020), авторы предположили возможное начало новой вспышки. Но уже через 11 дней рентгеновский поток вернулся к своему обычному уровню (Пайк и др., 2020). Спустя 2 суток после рентгеновской вспышки 6 декабря 2020 г. были проведены и оптические наблюдения на РТТ-150. Спектры по-прежнему содержали сильные эмиссионные компоненты диска (оранжевый спектр, полученный в момент времени HJD-2400000 = 59192.28 на рис. 2).

Корреляция рентгеновского и оптического излучений могла бы проявиться не на шкале времени, соизмеримого с орбитальным периодом системы, а в эпизодах, связанных с разрушением диска. Так, можно было бы предположить, что частичное разрушение диска может спровоцировать возникновение рентгеновской вспышки из-за аккреции вещества диска на компактный объект, но этого не наблюдается. Поэтому выводы о жесткой корреляции оптического и рентгеновского излучений

являются, по-видимому, преждевременными. Вероятно, в данной системе работает другой механизм (сферической) аккреции вещества — медленное магнитное оседание, описанный в статьях Шакуры и др. (2014), Постнова и др. (2017).

Источник IGR J21343+4738 несколько раз детектировался в 2019–2021 гг. (Семена и др., 2020, Горбан и др., 2022) в спокойном состоянии с потоком на уровне $\approx 1.3 \times 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в обзоре всего неба обсерватории “Спектр–Рентген–Гамма” (Сюняев и др., 2021) телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021) в жестком рентгеновском диапазоне 4–30 КэВ. Используя оценку расстояния до источника в 8.5 кпк, Горбан и др. (2022) оценили рентгеновскую светимость источника порядка 3×10^{35} эрг с^{-1} . Интересно, что в ходе обзора всего неба Обсерваторией “Спектр–Рентген–Гамма” телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского был обнаружен новый рентгеновский пульсар (Лутовинов и др., 2022), SRGAJ204318.2+443815/SRGe J204319.0+443820, входящий в тесную массивную двойную систему. Период вращения пульсара составляет 742 с. Рентгеновская светимость источника порядка 4×10^{35} эрг с^{-1} . Спектральные наблюдения, в том числе и с помощью 1.5-м телескопа РТТ-150, показали, что оптическим компаньоном в этой системе является Ве-звезда. В продолжающемся обзоре всего неба телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ среди источников различной природы будут обнаруживаться и новые массивные рентгеновские системы с Ве-звездами, для оптического отождествления которых (а также анализа физических параметров компонент этих систем) будут необходимы оптические наблюдения с помощью наземных телескопов.

Анализ физических параметров экваториального диска Ве-звезды в системе IGR J21343+4738

выполнен при поддержке гранта РФФ 21-12-00210.

Авторы благодарны ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталии). Авторы благодарны Р.Я. Жучкову и С.С. Мельникову за помощь в наблюдениях на РТТ-150. Работа Э.Р. Иртутанова, М.А. Горбачева, Р.И. Гумерова, Н.А. Сахибуллина частично выполнена за счет субсидии Минобрнауки РФ № FZSM-2023-0015, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахумада и др. (R. Ahumada, C.A. Prieto, A. Almeida, F. Anders, S.F. Anderson, B.H. Andrews, B. Anguiano, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **249**, 3 (2020).
- Бёрд и др. (A.J. Bird, A. Malizia, A. Bazzano, E.J. Barlow, L. Bassani, A.B. Hill, G. B'elanged, F. Capitanio, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170**, 175 (2007).
- Бикмаев И.Ф., Буренин Р.А., Ревнивцев М.Г. и др., Письма в Астрон. журн. **34**, (2008) [I.F. Bikmaev, R.A. Burenin, M.G. Revnivitsev, S.Yu. Sazonov, R.A. Sunyaev, M.N. Pavlinsky, and N.A. Sakhibullin, *Astron. Lett.* **34**, 653 (2008)].
- Винклер и др. (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Gim'enez, S. Grebenev, W. Hermsen, and J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
- Галазутдинов (Г.А. Галазутдинов), *Астрофиз. Бюлл.* **77**, 579 (2022).
- Горбан А.С., Мольков С.В., Лутовинов А.А., Семена А.Н., Письма в Астрон. журн. **48**, 861 (2022) [A.S. Gorban, S.V. Molkov, A.A. Lutovinov, and A.N. Semena, *Astron. Lett.* **48**, 798 (2022)].
- Джаясингхе и др. (T. Jayasinghe, K.Z. Stanek, C.S. Kochanek, B.J. Shappee, T.W.-S. Holoiien, T.A. Thompson, J.L. Prieto, S. Dong, et al.), *MNRAS* **485**, 961 (2019).
- Костов, Бонев (A. Kostov and T. Bonev), arXiv e-prints, arXiv:1706.06147 (2017).
- Корбет (R.H.D. Corbet), *Astron. Astrophys.* **141**, 91 (1984).
- Кривонос и др. (R. Krivonos, M. Revnivitsev, A. Lutovinov, S. Sazonov, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **475**, 775 (2007).
- Лутовинов и др. (A. Lutovinov, S. Tsygankov, I. Mereminsky, S. Molkov, A. Semena, V. Arefiev, I. Bikmaev, and A. Djupvik), *Astron. Astrophys.* **661**, A28 (2022).
- Маски и др. (F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, Jackson, S. Monkewitz, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131**, 018003 (2019).
- Николаева и др. (E.A. Nikolaeva, I.F. Bikmaev, E.S. Islentieva, and V.V. Shimansky), MOBSTER-1 virtual conference: Stellar variability as a probe of magnetic fields in massive stars, 25 (2021); doi:10.5281/zenodo.5525551.
- Оказаки и др. (A.T. Okazaki, M.R. Bate, G.I. Ogilvie, and J.E. Pringle), *MNRAS* **337**, 967 (2002).
- Пайк, Харрисон (S.N. Pike and F.A. Harrison), *Astronom. Telegram #14291*, (2020).
- Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, M. Levin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
- Портер (J.M. Porter), *MNRAS* **280**, L31 (1996).
- Постнов и др. (K. Postnov, L. Oskinova, and J. Torrejon), *MNRAS* **465**, L119 (2017).
- Рейг, Зезас (P. Reig and A. Zezas), *Astron. Astrophys.* **561**, A137 (2014a).
- Рейг, Зезас (P. Reig and A. Zezas), *MNRAS* **442**, 472 (2014b).
- Рейг и др. (P. Reig, A. Nersesian, A. Zezas, L. Gkouvelis, and M.J. Coe), *Astron. Astrophys.* **590**, A122 (2016).
- Ривиниус и др. (T. Rivinius, A.C. Carciofix, and C. Martayan), *Astron. Astrophys. Rev.* **21**, 69 (2013).
- Сазонов и др. (S. Sazonov, M. Revnivitsev, R. Burenin, E. Churazov, R. Sunyaev, W.R. Forman, and S.S. Murray), *Astron. Astrophys.* **487**, 509 (2008).
- Семена и др. (A. Semena, A. Lutovinov, I. Mereminskiy, S. Molkov, I. Lapshov, and A. Tkachenko), *Astronom. Telegram #14247*, (2020).
- Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
- Тонри и др. (J.L. Tonry, C.W. Stubbs, K.R. Lykke, P. Doherty, I.S. Shivvers, W.S. Burgett, K.C. Chambers, K.W. Hodapp, et al.), *Astrophys. J.* **750**, 99 (2012).
- Убертини и др. (P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, A. Bazzano, A.J. Bird, K. Broenstad, A. Goldwurm, and G. LaRosa), *Astron. Astrophys.* **411**, 131 (2003).
- Ханушик (R.W. Hanuschik), *Astron. Astrophys.* **308**, 170 (1996).
- Хуанг (S.-S. Huang), *Astrophys. J.* **171**, 549 (1972).
- Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewellng, M.E. Huber, C.Z. Waters, L. Denneau, P.W. Draper, и др.), arXiv e-prints, arXiv:1612.05560 (2016).
- Шакура и др. (N. Shakura, K. Postnov, L. Sidoli, and A. Paizis), *MNRAS* **442**, 2325 (2014).
- Шеппи и др. (B.J. Shappee, J.L. Prieto, D. Grupe, C.S. Kochanek, K.Z. Stanek, G. De Rosa, S. Mathur, Y. Zu, et al.), *Astrophys. J.* **788**, 48 (2014).
- Янсен и др. (F. Jansen, D. Lumb, B. Altieri, J. Clavel, M. Ehle, C. Erd, C. Gabriel, and M. Guainazzi, et al.), *Astron. Astrophys.* **365**, L1 (2001).