

ОТКРЫТИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ОТ RX J0535.0-6700 ТЕЛЕСКОПОМ СРГ/ART-XC: ЕЩЕ ОДИН РЕНТГЕНОВСКИЙ ПУЛЬСАР В БМО

© 2025 г. И. А. Мереминский^{1*}, А. С. Горбан^{1,2}, Ю. С. Кляйн^{2,1}, Е. А. Ушакова^{2,1}, А. Н. Семена¹,
А. А. Лутовинов¹, А. Ю. Ткаченко¹, С. В. Мольков¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 01.04.2025 г.

После доработки 01.04.2025 г.; принята к публикации 01.04.2025 г.

В данных телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ были обнаружены пульсации с периодом ≈ 106 с от малоизученной массивной рентгеновской двойной системы RX J0535.0-6700, расположенной в Большом Магеллановом Облаке (БМО), что доказывает, что компактным объектом в системе является замагниченная нейтронная звезда. Пульсации с близкими периодами были обнаружены также в архивных наблюдениях телескопов XMM-Newton и Chandra. По фотометрическим наблюдениям обсерватории WISE показано, что RX J0535.0-6700 демонстрирует значительную переменность в ИК-диапазоне, которая может быть связана с секулярными изменениями размера декреционного диска. Открытие рентгеновских пульсаций делает RX J0535.0-6700 еще одним членом популяции рентгеновских пульсаров с Ве-звездами в БМО.

Ключевые слова: RX J0535.0-6700, массивные рентгеновские двойные системы, нейтронные звезды.

DOI: 10.31857/S0320010825010019, **EDN:** LETZKV

ВВЕДЕНИЕ

Большое Магелланово Облако (БМО) — карликовая галактика-спутник Млечного пути. Из-за мощных вспышек звездообразования в недалеком прошлом ($\approx 10^7$ лет назад, см., например, Штыковский и Гильфанов, 2005; Антониу и Зезас, 2016) в данный момент БМО населено большой популяцией ярких массивных рентгеновских двойных систем (high-mass X-ray binaries, НМХВ). Благодаря небольшому расстоянию до БМО (49.6 кпк, Петржинский и др., 2019) и незначительному поглощению на луче зрения (Стейвели-Смит и др., 2003), эту популяцию оказывается удобно изучать современными рентгеновскими телескопами.

Однако большую долю — зачастую более 90% времени (Сидоли и Паизис, 2018; Киннеа и др., 2018) — подобные системы проводят в “низком” состоянии, с рентгеновской светимостью $L_X \lesssim 10^{34}$ эрг с⁻¹, что делает затруднительным их детальное исследование даже для самых чувствительных современных рентгеновских телескопов в наблюдениях разумной (десятки кс) продолжительности. Таким образом, для решения наблюдательных задач, таких как, например, измерение периодов вращения нейтронных звезд (НЗ) в НМХВ, необходимы множественные наблюдения, которые могут застать новые или уже известные источники во вспышке.

Рентгеновский источник RX J0535.0-6700 был обнаружен обсерваторией ROSAT (Трюмпер, 1982) во время обзора БМО, составленного из более чем

200 наблюдений, которые проводились с 1990 по 1994 г. (Хаберл и Питш, 1999). Светимость источника на момент детектирования составила $\sim 3 \times 10^{35}$ эрг/с. Хаберл и Питш (1999) предположили, что оптическим компаньоном RX J0535.0-6700 является яркая голубая звезда GRV 0535-6702, которая ранее была классифицирована как мирида (Рейд и др., 1988) на основании характерной переменности блеска с периодом в 241 день. Позднее Негуэрела и Ко (2002) получили оптический спектр этой звезды и классифицировали ее как B0Ve, таким образом показав, что RX J0535.0-6700 принадлежит к классу массивных рентгеновских двойных с Ве-компаньонами (ВеXRB, Рикельме и др. 2012). В таких системах основным источником вещества, аккрецируемого на НЗ, является декреционный диск массивной Ве-звезды (Бельчжинский и Циолковский, 2009). В зависимости от параметров двойной системы аккреция на НЗ может быть как квазипостоянной (Пфай и др., 2002), так и сильно переменной, с мощными вспышками, происходящими раз в орбитальный период или реже (Оказаки и Негуэрела, 2001).

По данным оптической спектроскопии, полученной на телескопе NTT, Рикельме и др. (2012) измерили полную эквивалентную ширину линии Na от декреционного диска $EW_{\text{Na}} = -7.9$ Å. Если орбитальный период системы действительно составляет $P_{\text{orb}} = 241$ день, то из зависимости $P_{\text{orb}} - EW(\text{Na})$ (Рейг, 2011) можно предположить, что декреционный диск на момент наблюдений в 2004 г. не достигал своего максимального возможного размера.

*Электронный адрес: i.a.mereminskiy@gmail.com

В 2024 г. RX J0535.0-6700 попал в поле зрения телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021) обсерватории СРГ (Сюняев и др., 2021) во время длительных наблюдений 1A 0538-66 – уникального рентгеновского пульсара в БМО. Полученные данные позволили нам обнаружить когерентные пульсации рентгеновского излучения от RX J0535.0-6700 с периодом в ≈ 106 с, который мы отождествили с периодом вращения замагниченной НЗ, подтвердив таким образом, что RX J0535.0-6700 – типичная BeXRB. Мы также исследовали архивные данные рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM-Newton, чтобы проследить за эволюцией периода вращения НЗ и светимости системы на больших временных масштабах.

ОТБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Источник RX J0535.0-6700 попал в поле зрения ART-XC во время мониторинговых наблюдений рентгеновского пульсара 1A0538-66 летом 2024 г. Всего было выполнено три длительных наблюдения: одно в начале июня и два в июле (см. табл. 1). Во всех трех наблюдениях источник надежно детектируется в диапазоне 4–12 кэВ, со значимостью $> 10\sigma$.

Данные телескопа ART-XC были обработаны с использованием стандартного программного обеспечения artproducts v0.9 с версией калибровочной базы данных CALDB 20230228. Для временного анализа времена регистрации фотонов были приведены к барицентру Солнечной системы, после чего для каждого наблюдения из круговой апертуры с радиусом $1'$, центрированной на источнике, были извлечены списки событий и кривые блеска. Спектры извлекались из апертуры меньшего размера, $R = 45''$, спектр фона был набран в наблюдениях пустых полей, выполненных ранее и нормирован на темп счета на энергиях выше 60 кэВ, где эффективная площадь зеркаль-

ной системы становится пренебрежимо малой. Такой подход позволяет получать спектры фона с лучшей статистикой и уменьшает эффекты, связанные с неоднородным откликом отдельных пикселей детектора. Для спектрального и временного анализа данные всех семи модулей телескопа ART-XC объединялись.

Чтобы составить лучшее представление о переменности источника на больших временных масштабах мы проверили архивы других рентгеновских телескопов. В 2002 г. источник наблюдался обсерваторией XMM-Newton (Йенсен и др., 2001). К сожалению, из-за выбранного режима работы детекторов, источник попал в поле зрения только камер MOS1 и MOS2, временное разрешение которых ограничено временем считывания кадра и равно 2.6 с. После стандартной переобработки данных с использованием XMMSAS v20, мы извлекли списки событий и спектры в круговых апертурах $R = 22.5''$ ($R = 20''$) для MOS1 (MOS2), фоновые спектры были набраны в пустых участках поля, на тех же чипах камер.

Также в 2023–2024 гг. проводился глубокий обзор нескольких выбранных площадок в БМО с помощью телескопа Chandra (Вайскопф и др., 2000), в одну из таких площадок попал и RX J0535.0-6700. Мы выбрали соответствующие наблюдения (см. табл. 1), переобработали данные с помощью CIAO 4.17 (Фрушионе и др., 2006) и извлекли изображения поля в стандартном широком диапазоне 0.5–7 кэВ. Как оказалось, источник детектировался во всех наблюдениях, при этом наиболее ярким он был в последнем из них, выполненном в 2024 г., примерно через месяц после последнего наблюдения ART-XC. Всего в этом наблюдении было накоплено около 1600 фотонов, что достаточно для более детального спектрального и временного анализа. Из каждого наблюдения Chandra был извлечен спектр из круговой апертуры радиусом $6''$, центрированной на источнике, фоновые спектры были набраны в областях, расположенных на том же чипе матрицы и свободных от источников. Из последнего наблюдения также была извлечена кривая блеска из той же круговой апертуры. Как и для XMM-Newton, временное разрешение Chandra ограничено временем накопления кадра, которое в этом наблюдении составляло 3.1с.

Аппроксимация спектров проводилась с помощью пакета XSPEC v12.12.1 (Арно и др., 1999). Из-за небольшой фотонной статистики все спектры перебинуировались так, чтобы в канал попадали не менее пяти отсчетов и аппроксимировались с использованием W-статистики (Вахтер и др., 1979). Ошибки на параметры оценивались из длинных марковских цепочек. Качество аппроксимации оценивалось с помощью статистики Крамера – фон Мизеса: для каждого спектра разыгрывалось 1000 спектров, полученных из модели наилучшей аппроксимации, и далее оценивалось, в какой доле симулированных спектров проверочная статистика меньше (т.е. лучше), чем у наблю-

Таблица 1. Список рентгеновских наблюдений RX J0535.0-6700

ObsID	Время начала наблюдений, MJD	Экспозиция, кс
ART-XC		
124101290010	60464.86	173
124101290020	60498.12	260
124101290030	60508.20	86
XMM-Newton		
0071740501	52373.84	24
Chandra		
27078	59948.23	25
27077	60147.66	28
26555	60201.30	31
28907	60536.70	18

даемого спектра. В случае, если наблюдаемый спектр действительно производится выбранной моделью, эта доля должна быть около 50%. Для всех спектральных моделей эта доля оказалась менее 60%, что говорит о том, что модели удовлетворительно описывают данные.

ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ

Поиск пульсаций

После детектирования и отождествления источника с системой-кандидатом в BeXRB стало ясно, что данные ART-XC могут быть полезны для измерения периода вращения НЗ в системе. По отобранным спискам событий в диапазоне энергий 4–10 кэВ мы построили периодограммы в терминах Н-статистики (Харт, 1985) на гармоническом разложении вплоть до двадцати гармоник (Буччери и др., 1983). Периодограмма для первого наблюдения ART-XC, построенная на логарифмической решетке из 4×10^4 периодов от 10 до 1000 с, приведена на рис. 1, горизонтальной линией отмечена граница $H = 23$, соответствующая значимости регистрации сигнала на уровне >0.9999 . На периодограмме хорошо виден пик на периоде $P_s \approx 106$ с, который мы отождествили с периодом вращения НЗ, и вторичные пики на кратных периодах ($P = 0.5P_s, 1.5P_s, 2P_s, 2.5P_s, 3P_s$ и т.д.).

Аналогичным образом мы построили периодограммы для данных XMM-Newton и Chandra, случайным образом разыгрывая время прихода каждого фотона внутри кадра (2.6 с и 3.1 с соответственно). Из этих периодограмм (см. нижнюю панель рис. 1) хорошо видно, что пульсации с тем же периодом ≈ 106 с присутствуют и в этих данных. Пульсации также присутствуют во втором наблюдении ART-XC, которое состоялось примерно через месяц после первого, в третьем наблюдении ART-XC пульсации на этом уровне значимости не детектируются.

Несмотря на то что периодограммы позволяют надежно обнаруживать присутствие когерентных сигналов в данных, для исследования свойств этих сигналов, например, точного измерения периода или определения профиля импульса, удобнее воспользоваться другими методами.

Измерение периода, получение профиля импульса

Чтобы аккуратно измерить период пульсаций, мы использовали кривую блеска источника в диапазоне 4–10 кэВ с разрешением в 1 с. Наилучший период был определен методом сложения эпох (Лихи и др., 1983). Полученный профиль импульса во втором наблюдении ART-XC показан на рис. 2, верхняя панель. Ввиду низкой фотонной статистики (наблюдаемый темп счета ART-XC составлял примерно 400 фотонов в сутки) для определения погрешности на значение периода мы использовали методику, подобную предложенной в работе Мереминский и др. (2022). Предполагая,

что темп счета фона и средний за период темп счета источника в течение всего наблюдения были постоянными, и используя представление профиля импульса кусочно-постоянной функцией, мы разыграли 1000 кривых блеска с таким же временным разрешением и интервалами наблюдения, как и у оригинальной кривой блеска. Далее для каждой кривой блеска с помощью метода сложения эпох был определен период. Границы доверительного интервала были определены как 16% и 84% квантили выборки полученных периодов. Применяв этот метод к данным ART-XC, мы определили, что в первом наблюдении период составил $P = 106.180^{+0.003}_{-0.005}$ с (68% интервал), а во втором — $P = 106.160 \pm 0.004$ с.

Для наблюдений Chandra и XMM-Newton необходимо дополнительно учесть продолжительность накопления единичного кадра (3.1 с и 2.6 с соответственно). Для каждого списка событий мы провели 1000 случайных реализаций, приписывая каждому фотону случайное время детектирования внутри кадра. Далее для каждой реализации был определен наилучший период. Из полученной выборки периодов был взят медианный период и соответствующие квантили, измеренный таким образом период в наблюдении XMM-Newton в 2002 г. составил $P = 106.26^{+0.02}_{-0.02}$, а в последнем наблюдении Chandra в 2024 г. $P = 106.12 \pm 0.01$ с. Соответствующие профили импульса приведены на рис. 2 (средняя и нижняя панели).

Следует отметить, что доля пульсирующего излучения, измеренная во всех эпохах, достаточно велика и составляет $\approx 60\%$ для ART-XC и XMM-Newton. В узких энергетических диапазонах (0.5–2 и 2–10 кэВ) в наблюдении Chandra доля пульсирующего излучения оказалась еще выше — $\approx 70\%$.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Чтобы определить светимость, которую имел источник в наших наблюдениях, мы исследовали его рентгеновские спектры.

Учитывая небольшую фотонную статистику, для аппроксимации спектров мы выбрали простую феноменологическую модель из трех компонент, где первая компонента отвечает за межзвездное поглощение на веществе нашей Галактики, вторая — за локальное поглощение в источнике, а третья соответствует континууму, описываемому степенным законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях — $tbabs*tbfeo*cutoffpl$ в терминах XSPEC. Толща нейтрального водорода в нашей Галактике в направлении на источник была взята равной 10^{21} см $^{-2}$ (Коллаборация HI4PI, 2016). Поскольку металличность в БМО существенно отличается от солнечной, при моделировании локального поглощения, следуя работе Дуччи и др. (2019), мы приняли обилия для кислорода и железа равными 0.33 и 0.38 соответственно.

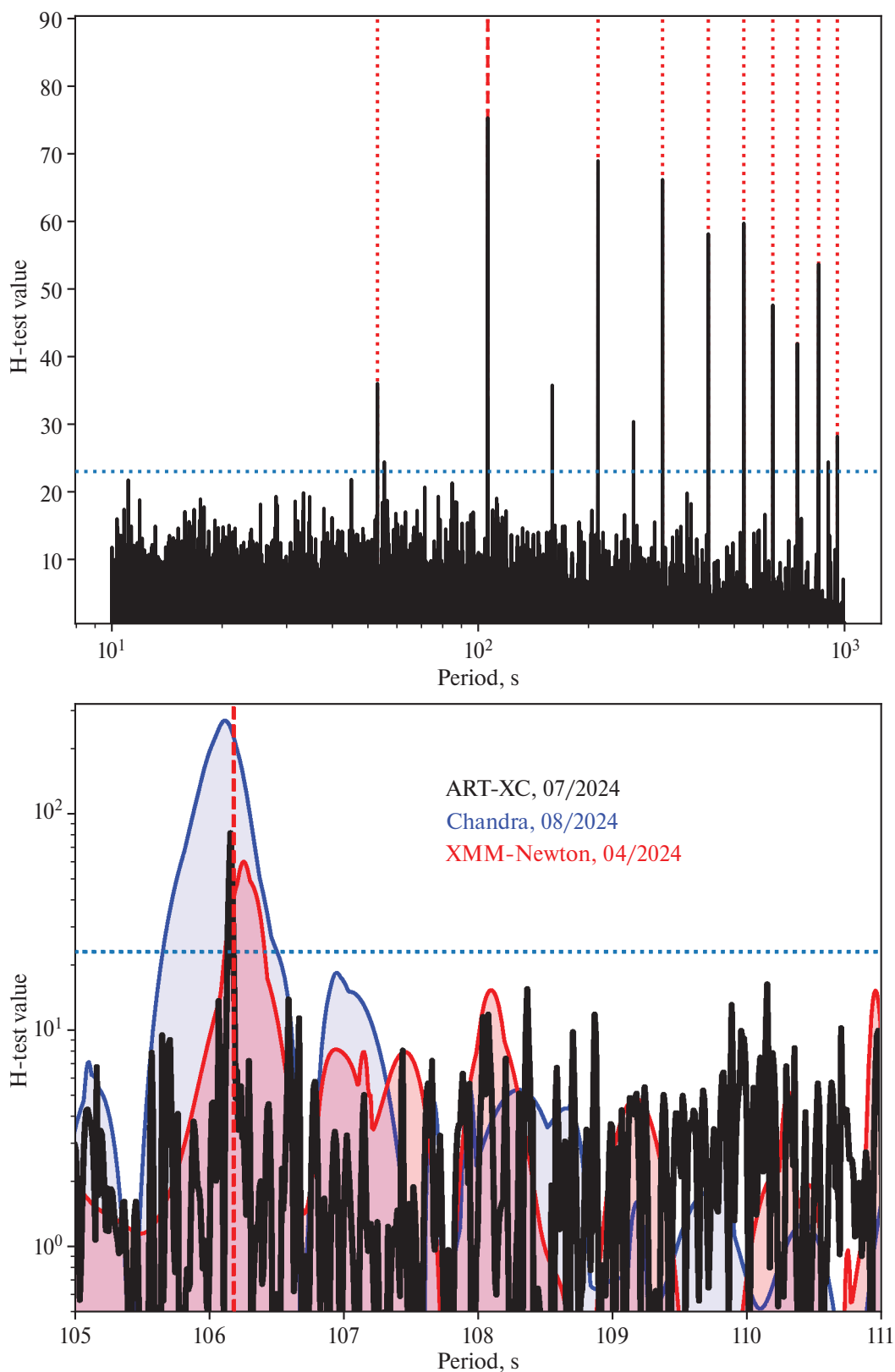


Рис. 1. *Сверху:* периодограмма первого наблюдения ART-XC в 2024 г. (4–10 кэВ). Красной штриховой линией указан период вращения НЗ, пунктирными линиями — субгармоника и гармоники. *Снизу:* участок периодограммы вблизи периода пульсаций, построенный для второго наблюдения ART-XC (4–10 кэВ, черным), наблюдения XMM-Newton (0.2–10 кэВ, красным) и наблюдения Chandra (0.5–10 кэВ, синим).

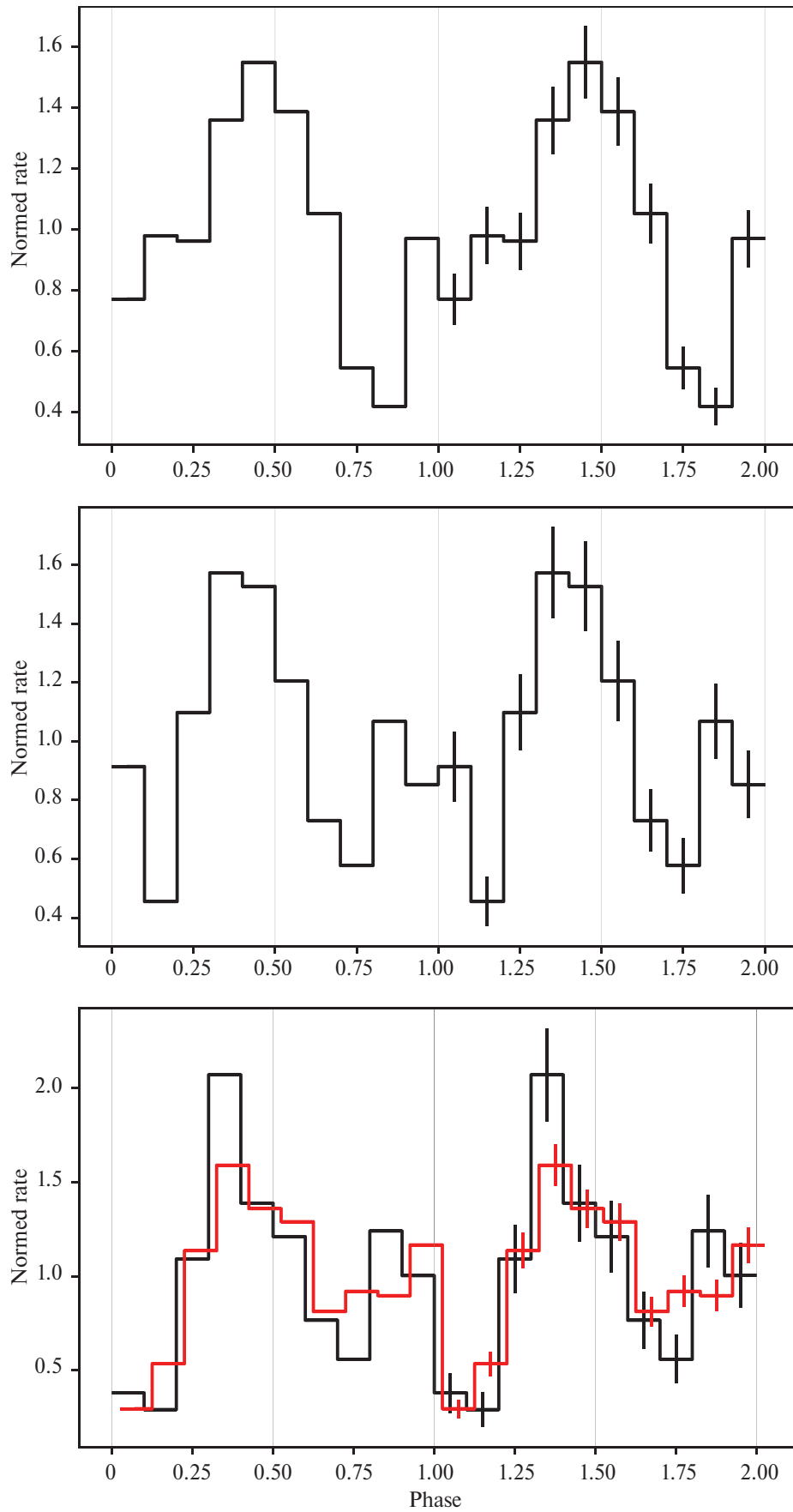


Рис. 2. Профиль импульса RX J0535.0-6700 из наблюдений разных телескопов. *Сверху:* ART-XC. 4–10 кэВ, *посередине:* XMM-Newton, 0.5–10 кэВ, *снизу:* Chandra 0.5–2 кэВ (показана черным) и 2–10 кэВ (красным).

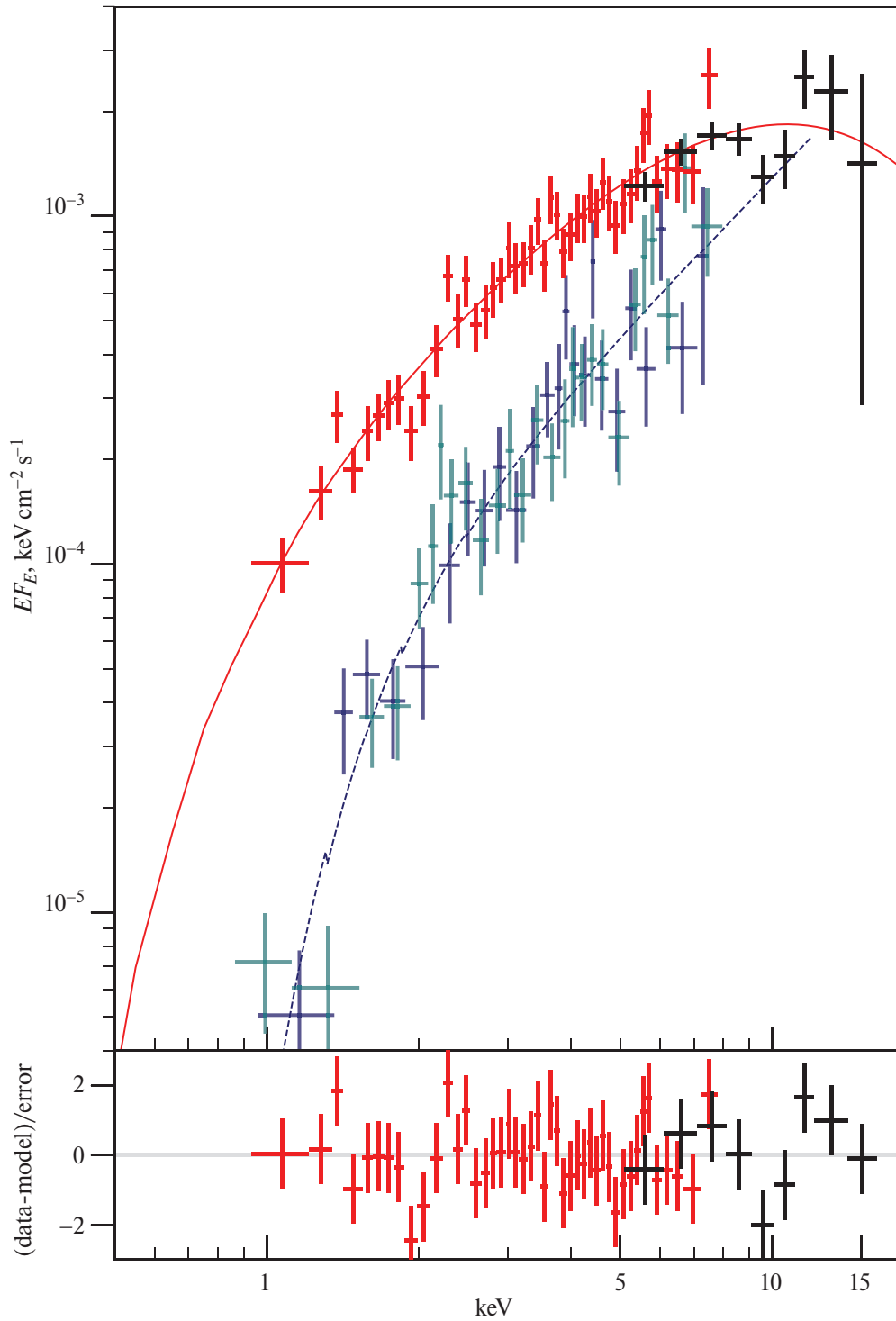


Рис. 3. Рентгеновские спектры, набранные в 2024 г. телескопами Chandra (красным) и ART-XC (черным, значения потока домножены на коэффициент ≈ 5 , полученный из фитирования) и их невязки. Темно-синими и бирюзовыми точками показан спектр XMM-Newton от 2002 г.

Несмотря на простоту принятой спектральной модели, надежно определить ее параметры по узкополосным спектрам достаточно сложно из-за сильного вырождения параметров. Поэтому мы решили одновременно использовать данные Chandra и первых двух наблюдений ART-XC, набранные в 2024 г. Спектры этих двух наблюдений ART-XC похожи по форме, а темп счета в диапазоне 4–12 кэВ отличается менее, чем на 10%. Поток в наблюдении Chandra был примерно в 5 раз выше, для учета этой разности при фитировании вводилась мультипликативная постоянная. Полученный широкополосный спектр (0.8–16 кэВ) приведен на рис. 3 черными (ART-XC) и красными (Chandra) крестами. Расширенный энергетический диапазон позволил нам измерить величину локального поглощения $N_{H,loc} = 2.8^{+7.5}_{-2.1} \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (здесь и далее ошибки на спектральные параметры приведены на уровне 90% доверительного интервала), наклон степенного закона $\Gamma = 0.23^{+0.52}_{-0.17}$ и энергию завала $E_{cut} = 6.0^{+7.2}_{-1.2} \text{ кэВ}$.

По полученным параметрам были оценены болометрические светимости в диапазоне 0.1–30 кэВ для всех наблюдений ART-XC и Chandra за 2023–2024 гг. Как показано на рис. 4, за два года светимость RX J0535.0-6700 возросла от $4 \times 10^{34} \text{ эрг с}^{-1}$ до $2 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$, однако этот рост не был строго монотонным и сопровождался переменностью на масштабах недель.

Интересно отметить, что спектр, полученный XMM-Newton в 2002 г., можно описать подобной моделью с зафиксированным локальным поглощением ($N_{H,loc} = 2.8 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$), но в таком случае получаются нефизичные параметры континуума — очень жесткий степенной наклон $\Gamma \lesssim -1.5$ и низкая энергия завала — около 3 кэВ. Можно описать спектр и моделью чернотельного излучения с температурой $kT \approx 2 \text{ кэВ}$ и характерным размером излучающей области $R \approx 500 \text{ м}$, при этом светимость источника оказывается около $3 \times 10^{35} \text{ эрг с}^{-1}$. Подобные горячие области наблюдаются в спектрах аккрецирующих рентгеновских пульсаров с массивными компаньонами, но при существенно больших светимостях, обычно выше $10^{37} \text{ эрг с}^{-1}$ (Муштуков и Цыганков, 2022). Однако, позволив локальному поглощению варьироваться, спектр удастся описать исходной моделью со степенным законом, при этом фотонный индекс оказывается достаточно типичным $\Gamma = 0.49^{+0.47}_{-0.25}$, а толщина локального вещества большой $N_{H,loc} = 23.5^{+17.0}_{-7.1} \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, энергию завала в спектре значимо измерить не удастся. Аппроксимация спектров MOS1/MOS2 этой моделью показана на рис. 3 темно-синей пунктирной линией. Для такого жесткого спектра невозможно получить надежную оценку болометрической светимости. Однако, зная светимость в мягком рентгеновском диапазоне $L_{0.1-10 \text{ кэВ}} \approx 4 \times 10^{35} \text{ эрг с}^{-1}$ и предполагая, что типичная болометрическая поправка невелика (так,

для широкополосного спектра ART-XC/Chandra эта поправка была равна $L_{0.1-30 \text{ кэВ}}/L_{0.1-10 \text{ кэВ}} \approx 1.7$), можно предположить, что болометрическая светимость RX J0535.0-6700 в 2002 г. была на уровне $\approx 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$.

RX J0535.0-6700 также попадал в поле зрения телескопа XMM-Newton несколько раз в течение мая-июня 2018 г., однако не был детектирован. Мы получили 2σ верхние пределы на его поток с помощью специализированного сервиса (XMM-Newton Science Archive upper limit server, Руиз и др., 2022), характерное значение верхнего предела составило $\approx 3 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне 0.2–12 кэВ, что соответствует светимости в $\approx 10^{34} \text{ эрг с}^{-1}$ в предположении, что форма спектра была такой же, как в 2024 г.

ОБСУЖДЕНИЕ

Долговременная переменность рентгеновской светимости в Ве-системах, подобная наблюдающейся в RX J0535.0-6700, может быть связана с секулярной эволюцией декреционного диска (Вишневский и др., 2010). Мы использовали публично доступные данные космического ИК-телескопа WISE (Райт и др., 2010; Майнцер и др., 2014), чтобы проверить наличие характерной переменности “ярче-краснее”, связанной с изменением размера декреционного диска. Кривая блеска в фильтрах W1 и W2 приведена на рис. 4. К сожалению, количество данных в фильтре W2 недостаточно для каких-то конкретных заключений о состоянии декреционного диска в 2023–2024 гг., однако видно, что с 2010 г. блеск в W2 вырос от 14.5 до 13 зв. величины, при этом блеск в W1 вырос на 1 величину. Кроме того, после 2019 г. наблюдается изменение характера переменности на масштабах месяцев. Все это может указывать на процессы, происходящие в декреционном диске, дальнейшие спектроскопические наблюдения необходимы, чтобы подтвердить эти подозрения.

Следует отметить, что на диаграмме Корбета (Корбет, 1986) $P_{orb} - P_s$ RX J0535.0-6700 попадает в основное сгущение Ве-систем (см. обновленные версии диаграммы Гребенев, 2010; Кречмар и др., 2019), если предположить, что наблюдавшийся период в 241 день (Рейд и др., 1988) действительно является орбитальным.

Стабильность наблюдаемого периода вращения НЗ за последние более чем двадцать лет позволяет предположить, что он близок к равновесному значению. Предполагая, что средний темп аккреции в RX J0535.0-6700 составляет $\langle \dot{M} \rangle \approx 2 \times 10^{-11} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, что соответствует средней светимости $\langle L_X \rangle \approx 10^{35} \text{ эрг с}^{-1}$, можно получить грубую оценку на напряженность магнитного поля НЗ по формуле (9) из работы Бильдстен и др. (1997): $B \approx 5 \times 10^{12} \text{ Гс}$. Такой напряженности магнитного поля недостаточно для того, чтобы в системе наблюдался эффект “пропеллера” (Илларионов и Сюняев, 1975),

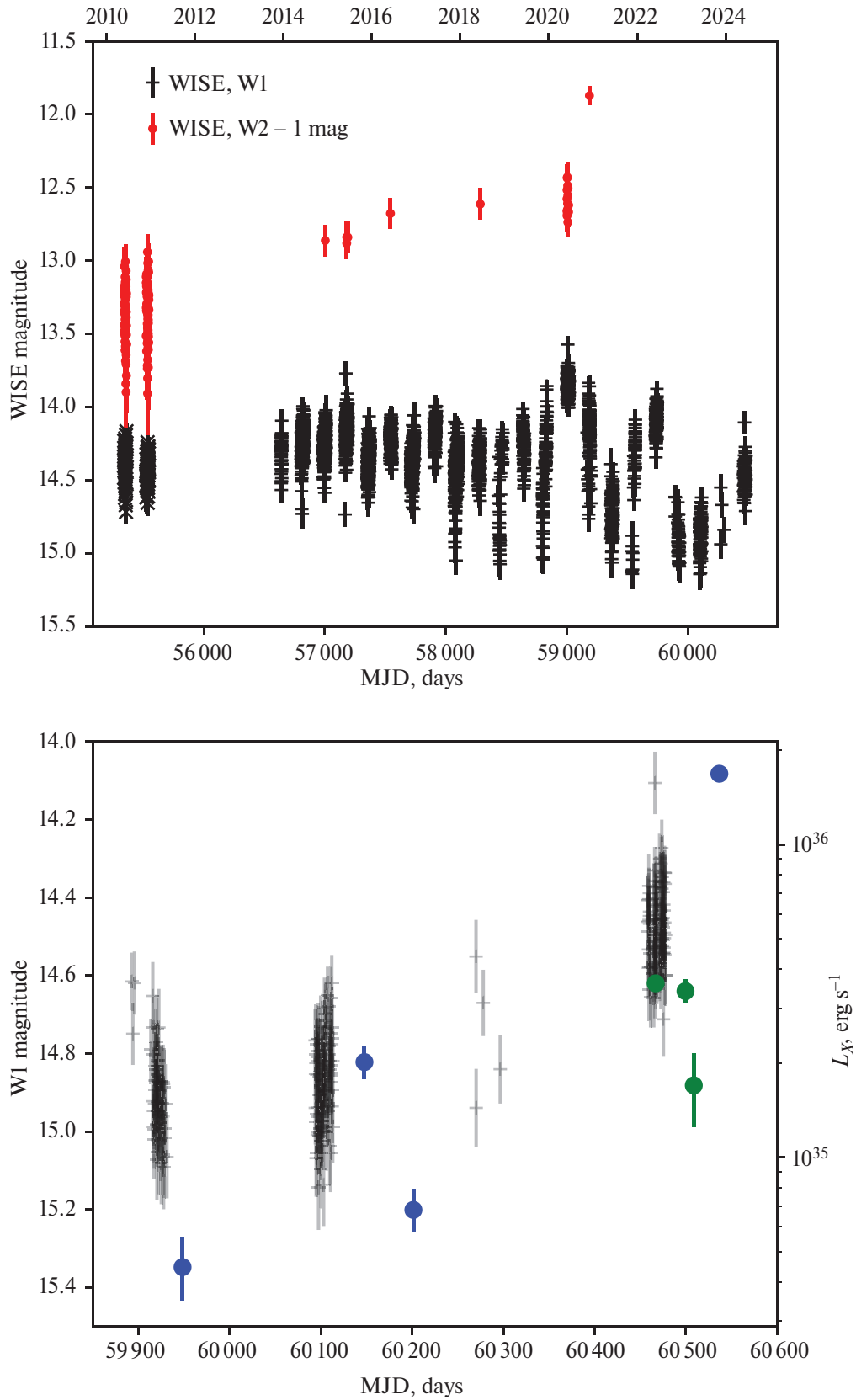


Рис. 4. *Вверху:* кривая блеска RX J0535.0-6700 в ИК-диапазоне за 2010–2024 гг. в фильтрах WISE W1 (показаны черным) и WISE W2 (красным, для наглядности значения уменьшены на 1 зв. величину), *внизу:* часть ИК-кривой блеска и изменение болометрической светимости RX J0535.0-6700 по наблюдениям ART-XC и Chandra (зеленые и синие точки соответственно).

даже на низких светимостях может продолжаться аккреция из холодного диска (Цыганков и др., 2017). Таким образом можно объяснить и длительное состояние с низкой светимостью ($L_X \approx 3 \times 10^{35}$ эрг с⁻¹), наблюдавшееся ART-XC и не характерное для типичной переменности BeXRB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами были обнаружены когерентные пульсации рентгеновского потока с периодом в 106.2 с от RX J0535.0-6700 — BeXRB, расположенной в БМО, что позволило измерить частоту вращения нейтронной звезды в этой системе. Пульсации были обнаружены в данных ART-XC, а также в архивных наблюдениях обсерваторий XMM-Newton и Chandra, выполненных в различные эпохи, при этом период за время наблюдений (>20 лет) сильно не изменился. Доля пульсирующего излучения оказалась большей (выше 50%) во всех наблюдениях.

Рентгеновский спектр источника характерен для аккрецирующих пульсаров в массивных рентгеновских двойных системах и может быть описан моделью степенного закона с экспоненциальным завалом и поглощением. Величина локального поглощения сильно изменилась между 2002 и 2024 гг., однако необходимо отметить, что точное измерение $N_{H,loc}$ по отдельным спектрам, набранным только в мягком рентгеновском диапазоне (0.5–10 кэВ), затруднено; для надежного измерения параметров спектра необходимы широкополосные наблюдения.

У B0Ve звезды — оптического компаньона RX J0535.0-6700 — была обнаружена сильная переменность в ИК-диапазоне, которая может указывать на эволюцию декреционного диска.

Таким образом, все полученные нами данные подтверждают, что RX J0535.0-6700 — 28-й известный аккрецирующий рентгеновский пульсар в Большом Магеллановом Облаке (Хаберл и др., 2023)

В работе использованы данные телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории Спектр—Рентген—Гамма (СРГ). Обсерватория СРГ разработана в АО “НПО Лавочкина” (входит в госкорпорацию “Роскосмос”) при участии Германского центра авиации и космонавтики (DLR) в рамках Федеральной космической программы России по заказу Российской академии наук. Команда ART-XC благодарит госкорпорацию “Роскосмос”, Российскую академию наук и госкорпорацию “Росатом” за поддержку проекта СРГ, а также АО “НПО Лавочкина” и партнеров за создание и работу с космическим аппаратом и платформой “Навигатор”.

В работе использованы данные полученные из Архива данных Chandra, который поддерживается Chandra X-ray Center (CXC). Работа частично основана на данных, полученных XMM-Newton, научной

миссией ESA, созданной при прямом финансировании государств-членов ESA и NASA.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ № 075-15-2024-647.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антониу и Зезас (V. Antoniou and A. Zezas), *MNRAS* **459**(1), 528 (2016).
2. Арно и др. (K. Arnaud, B. Dorman and C. Gordon), *XSPEC: An X-ray spectral fitting package*, Astrophysics Source Code Library, record ascl:9910.005 (1999).
3. Бельжжинский и Циолковский (K. Belczynski and J. Ziolkowski), *Astrophys. J.* **707**(2), 870 (2009).
4. Буччери и др. (R. Bucchini, K. Bennett, G.F. Bignami, J.B.G.M. Bloemen, V. Boriakoff, P.A. Caraveo, et al.), *Astron. Astrophys.* **128**, 245 (1983).
5. Байскопф и др. (M.C. Weisskopf, H.D. Tananbaum, L.P. Van Speybroeck, and S.L. O'Dell), *Chandra X-ray Observatory (CXO): overview*, volume 4012 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2–16 (2000).
6. Бахтер и др. (K. Wachter, R. Leach, and E. Kellogg), *Astrophys. J.* **230**, 274 (1979).
7. Вишневецкий и др. (J.P. Wisniewski, Z.H. Draper, K.S. Bjorkman, M.R. Meade, J.E. Bjorkman, and A.F. Kowalski), *Astrophys. J.* **709**(2), 1306 (2010).
8. Гребенев (S. A. Grebnev), *arXiv e-prints*, arXiv:1004.0293 (2010).
9. Дуччи и др. (L. Ducci, S. Mereghetti and A. Santangelo), *Astrophys. J. Lett.* **881**(1), L17 (2019).
10. Илларионов и Сюняев (A.F. Illarionov and R.A. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **39**, 185 (1975).
11. Йенсен и др. (F. Jansen, D. Lumb, B. Altieri, J. Clavel, M. Ehle, C. Erd, et al.), *Astron. Astrophys.* **365**, L1 (2001).
12. Киннеа и др. (J.A. Kennea, M.J. Coe, P.A. Evans, J. Waters, and R.E. Jasko), *Astrophys. J.* **868**(1), 47 (2018).
13. Коллаборация HI4PI (HI4PI Collaboration, N. Ben Bekhti, L. Floer, R. Keller, J. Kerp, D. Lenz, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A116 (2016).
14. Корбет (R.H.D. Corbet), *MNRAS* **220**, 1047 (1986).
15. Кречмар и др. (P. Kretschmar, F. Furst, L. Sidoli, E. Bozzo, J. Alfonso-Garzón, A. Bodaghee, et al.), *New Astron. Rev.* **86**, 101546 (2019).
16. Лихи и др. (D.A. Leahy, W. Darbro, R.F. Elsner, M.C. Weisskopf, P.G. Sutherland, S. Kahn, and J.E. Grindlay), *Astrophys. J.* **266**, 160 (1983).
17. Майнцер и др. (A. Mainzer, J. Bauer, R.M. Cutri, T. Grav, J. Masiero, R. Beck, et al.), *Astrophys. J.* **792**(1), 30 (2014).
18. Мереминский и др. (I.A. Mereminskiy, A.A. Mushtukov, A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, A.N. Semena, S.V. Molokov, and A.E. Shtykovsky), *Astron. Astrophys.* **661**, A33 (2022).
19. Муштуков и Цыганков (A. Mushtukov and S. Tsygankov), *arXiv e-prints*, arXiv:2204.14185 (2022).
20. Негуэрела и Ко (I. Negueruela and M.J. Coe), *Astron. Astrophys.* **385**, 517 (2002).
21. Оказаки и Негуэрела (A.T. Okazaki and I. Negueruela), *Astron. Astrophys.* **377**, 161 (2001).

22. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
23. Петржинский и др. (G. Pietrzynski, D. Graczyk, A. Gallenne, W. Gieren, I.B. Thompson, B. Pilecki, et al.), *Nature* **567(7747)**, 200 (2019).
24. Пфай и др. (E. Pfahl, S. Rappaport, P. Podsiadlowski, and H. Spruit), *Astrophys. J.* **574(1)**, 364 (2002).
25. Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, et al.), *Astron. J.* **140(6)**, 1868 (2010).
26. Рейг (P. Reig), *Astrophys. and Space Sci.* **332(1)**, 1 (2011).
27. Рейд и др. (N. Reid, I.S. Glass and R.M. Catchpole), *MNRAS* **232**, 53 (1988).
28. Рикельме и др. (M.S. Riquelme, J.M. Torrejón, and I. Negueruela), *Astron. Astrophys.* **539**, A114 (2012).
29. Руиз и др. (A. Ruiz, A. Georgakakis, S. Gerakakis, R. Saxton, P. Kretschmar, A. Akylas, and I. Georgantopoulos), *MNRAS* **511(3)**, 4265 (2022).
30. Сидоли и Паизис (L. Sidoli and A. Paizis), *MNRAS* **481(2)**, 2779 (2018).
31. Стейвели-Смит и др. (L. Staveley-Smith, S. Kim, M.R. Calabretta, R.F. Haynes, and M.J. Kesteven), *MNRAS* **339(1)**, 87 (2003).
32. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
33. Трюмпер (J. Truemper), *Adv. Space Res.* **2(4)**, 241 (1982).
34. Фрушионе и др. (A. Fruscione, J.C. McDowell, G.E. Allen, N.S. Brickhouse, D.J. Burke, J.E. Davis, et al.), in D.R. Silva and R.E. Doxsey, editors, *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems*, volume 6270 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 62701V (2006).
35. Хаберл и Питш (F. Haberl and W. Pietsch), *Astron. Astrophys.* **344**, 521 (1999).
36. Хаберл и др. (F. Haberl, C. Maitra, D. Kaltenbrunner, D. Buckley, I. Monageng, A. Udalski, et al.), *Astron. Astrophys.* **671**, A90 (2023).
37. Харт (J.D. Hart), *Journal of Statistical Computation and Simulation* **21(2)**, 95 (1985).
38. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, A.A. Mushtukov, V.F. Suleimanov, V. Doroshenko, P.K. Abolmasov, A.A. Lutovinov, and J. Poutanen), *Astron. Astrophys.* **608**, A17 (2017).
39. Штыковский и Гильфанов (P. Shtykovskiy and M. Gilfanov), *Astron. Astrophys.* **431**, 597 (2005).