

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЛЬСАРА IGR J21343+4738 ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИЙ NuSTAR, Swift и CPG

© 2022 г. А. С. Горбан^{1,2*}, С. В. Мольков¹, А. А. Лутовинов¹, А. Н. Семена¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²НИУ Высшая школа экономики, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Представлены результаты исследования рентгеновского пульсара IGR J21343+4738 по данным наблюдений обсерваториями NuSTAR, Swift и CPG в широком диапазоне энергий 0.3–79 кэВ. Отсутствие особенностей поглощения в энергетических спектрах источника, как усредненном, так и фазово-разрешенных, позволило оценить верхний и нижний пределы на магнитное поле нейтронной звезды в двойной системе $B < 2.5 \times 10^{11}$ Гс и $B > 3.4 \times 10^{12}$ Гс соответственно. Спектральный и временной анализ показали, что IGR J21343+4738 имеет все свойства квази-постоянного рентгеновского пульсара с периодом пульсаций 322.71 ± 0.04 с и светимостью $L_x \simeq 3.3 \times 10^{35}$ эрг с^{-1} . Анализ долговременной переменности объекта в рентгеновских лучах подтвердил возможный орбитальный период двойной системы на масштабе ~ 34.3 дня, ранее обнаруженный в оптике.

Ключевые слова: IGR J21343+4738, рентгеновские источники, двойные системы, нейтронные звезды, аккреция, магнитное поле.

DOI: 10.31857/S0320010822110080

ВВЕДЕНИЕ

Изучение рентгеновских Ве-двойных систем (ВеХРВ) как во время вспышек, так и во время низких состояний представляет большой интерес, позволяя оценить физические параметры систем (см., например, обзоры Рейга, 2011; Кречмара и др., 2019; Муштукова, Цыганкова, 2022). Такой тип двойных представляет собой систему, состоящую из массивной быстро вращающейся Ве-звезды, демонстрирующей в спектре линии излучения водорода (серии Бальмера и Пашена), и нейтронной звезды, аккреция на которую является основным источником рентгеновского излучения в системе. Некоторые ВеХРВ демонстрируют вспышки, при которых светимость источников может достигать эддингтоновского предела для нейтронной звезды $L \simeq 10^{38}$ эрг с^{-1} и более. Также существует подкласс ВеХРВ, для которых характерно постоянное слабое рентгеновское излучение и которые не проявляют ярко выраженной активности. Светимость таких систем не превышает $\sim 10^{35}$ эрг с^{-1} . Постоянные рентгеновские двойные имеют длительные периоды пульсаций (например, RX J1037.5–564, Ли и др., 2012; RX J0440.9+4431,

Цыганков и др., 2012; 3ХММ J181923.7-170616, Куи Хао и др., 2017).

Рентгеновский пульсар IGR J21343+4738 был обнаружен обсерваторией ИНТЕГРАЛ во время наблюдений Галактической плоскости в созвездии Лебедя (Кривонос и др., 2007; Бёрд и др., 2007). В декабре 2006 г. источник IGR J21343+4738 наблюдался обсерваторией Chandra (Сазонов и др., 2008), что позволило получить его точную локализацию и определить оптический компаньон. Оптический спектр этого источника демонстрировал интенсивные линии поглощения H I и He I, что указывает на звезду спектрального класса В (Сазонов и др., 2008; Бикмаев и др., 2008). Позже Рэйг и Зизас (2014) установили, что оптический компаньон IGR J21343+4738 — это Ве-звезда класса В11Ve, которая имеет звездную величину $V = 14.1$ и находится на расстоянии ~ 8.5 кпк. Этими же авторами было отмечено, что в оптическом спектре Ве-звезды также присутствует глубокое центральное поглощение между двумя пиками линии H α .

В ноябре 2013 г. источник наблюдался обсерваторией ХММ-Newton. Источник находился в спокойном состоянии с потоком $\simeq 1.4 \times 10^{-11}$ эрг см^{-2} с^{-1} в энергетическом диапазоне 0.2–12 кэВ. Временной анализ данных обсерватории позволил

*Электронный адрес: gorbana@iki.rssi.ru

обнаружить пульсации с периодом ≈ 320 с (Рэйг, Зизас, 2014).

Оценки на орбитальные параметры двойной системы были получены в работе Николаевой и др. (2021) по данным многолетних фотометрических и спектроскопических наблюдений на российско-турецком телескопе РТТ-150. В этих работах были найдены два возможных периода обращения нейтронной звезды вокруг компаньона, которые составляют примерно 34.26 и 160.8 дней, и соответствующие эксцентриситеты 0.36 и 0.38.

В декабре 2020 г. во время второго обзора неба телескоп ART-XC им. Михаила Павлинского на борту обсерватории СРГ зафиксировал значительное увеличение потока от IGR J21343+4738 (Семена и др., 2020), который составил $\sim 5 \times 10^{-11}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий 4–12 кэВ, по сравнению с потоком, полученным в предыдущем обзоре неба $\sim 1.3 \times 10^{-11}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Далее последовали наблюдения источника в широком энергетическом диапазоне обсерваториями NuSTAR и Swift.

В настоящей работе проведен детальный анализ данных всех трех обсерваторий с целью измерения временных и спектральных характеристик источника IGR J21343+4738 и получения оценок на его физические параметры.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Наблюдение источника IGR J21343+4738 было проведено обсерваторией NuSTAR 17 декабря 2020 г. (MJD 59200) с экспозицией около 27 ксек (ObsID 90601339002). Для исследования пульсара в широком энергетическом диапазоне наблюдение выполнялось одновременно обсерваториями NuSTAR (Харрисон и др., 2013) и Swift имени Нейла Джерельса (Джерельс и др., 2004; Барроуз и др., 2005). Данные этих обсерваторий были получены из архива данных HEASARC (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>).

NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) — обсерватория, чувствительная к жесткому рентгеновскому излучению в диапазоне энергий от 3 до 79 кэВ. Обсерватория состоит из двух идентичных соосных рентгеновских телескопов (FPMa и FPMb), спектральное разрешение которых составляет 0.4 на 10 кэВ и около 0.9 на 60 кэВ (Харрисон и др., 2013). Полученные данные обрабатывались с помощью стандартного программного обеспечения NuSTARDAS v1.9.7, предоставляемого в рамках пакета HEASOFT v6.30.1 с версией калибровок CALDB v20220426. Для того чтобы получить энергетические спектры источника и его кривые блеска, была проведена обработка данных с помощью процедур NUPIPELINE и затем NUPRODUCTS. Данные

по каждому из двух модулей для источника были выбраны из круговых областей радиусом $50''$, центрированных на источник. Фоновые спектры и кривые блеска извлекались из области радиусом $70''$, расположенной на том же чипе в стороне от источника. Для расширения исследуемого диапазона энергий в работе также использовались спектральные наблюдения IGR J21343+4738, полученные телескопом Swift/XRT в диапазоне энергий 0.3–10 кэВ. Наблюдения проводились одновременно с обсерваторией NuSTAR с экспозицией 1.6 ксек. Энергетические спектры были получены онлайн-сервисами (см. Эванс и др., 2009), предоставленными UK Swift Science Data Centre при Университете Лестера¹. Наблюдения проводились в режиме счета фотонов (Photon Counting, PC). Данные для источника были извлечены из круговой области радиусом $47''$, центрированной на источник. Все энергетические спектры источника сгруппировывались по энергии по 25 отсчетов на канал, чтобы использовать χ^2 статистику для спектрального анализа. Аппроксимация спектров проводилась с помощью пакета XSPEC v12.12.1 (Арно и др., 1999).

Источник IGR J21343+4738 несколько раз наблюдался во время обзора всего неба обсерваторией Спектр–Рентген–Гамма (СРГ, см. Сюняев и др., 2021). В настоящей работе были использованы данные телескопа ART-XC им. Михаила Павлинского (Павлинский и др., 2021) — рентгеновского телескопа с оптикой косоугольного падения, который работает в жестком рентгеновском диапазоне энергий 4–30 кэВ, позволяет определять положение источников на небе с точностью $\approx 15''$, а также проводить их временной и спектральный анализ. С декабря 2019 г. по март 2022 г. телескоп выполнял программу обзора всего неба, в процессе которой каждое положение на небе наблюдалось раз в полгода. Для четырех наблюдений IGR J21343+4738, выполненных в ходе обзора всего неба, были проведены измерения потока в диапазоне энергий 4–12 кэВ с помощью стандартных процедур обработки из пакета ARTPRODUCTS v0.9 с версией калибровочных данных CALDB 20200401. Потоки извлекались из апертуры в $2'$. Ввиду краткости эффективной экспозиции и ограниченного количества зарегистрированных фотонов провести более детальный временной и спектральный анализ затруднительно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Временной анализ излучения IGR J21343+4738

Для корректного определения временных характеристик источника времени прихода фотонов

¹http://www.swift.ac.uk/user_objects/

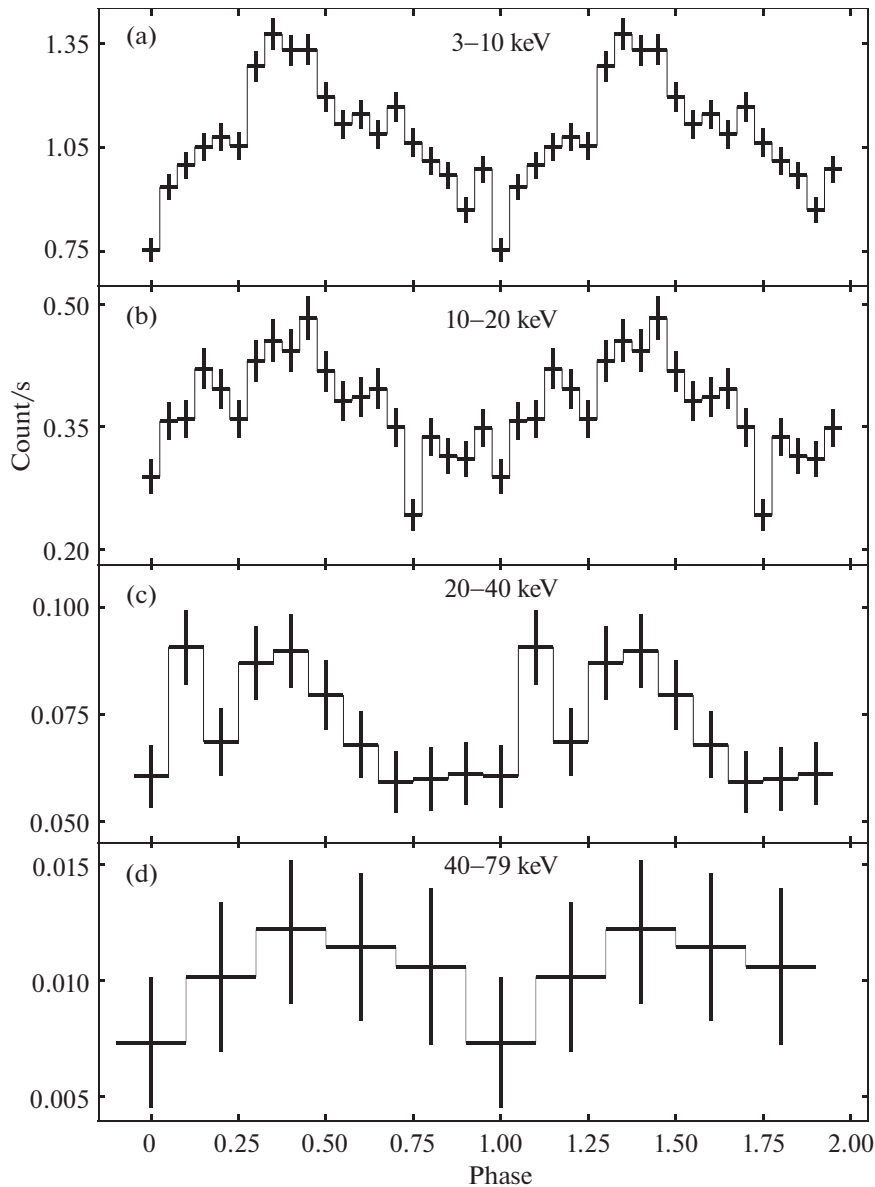


Рис. 1. Профили импульса IGR J21343+4738 в четырех энергетических диапазонах, полученные по данным обсерватории NuSTAR в декабре 2020 г. (ObsID 90601339002).

от него были сначала приведены к барицентру Солнечной системы с помощью стандартного инструмента `barcorr` из пакета `HEASOFT`. В связи с отсутствием известных орбитальных параметров, коррекция на орбитальное движение не проводилась. Из полученных кривых блеска по данным NuSTAR с разрешением 0.1 с вычитался фон, а затем кривые блеска двух модулей обсерватории складывались с помощью инструмента `lsmath` (XRONOS v6.0). Определение периода пульсаций проводилось с помощью метода наложения эпох, реализованного в инструменте `efsearch` из пакета `HEASOFT`. Период пульсаций, определенный по данным обсерватории NuSTAR, составил $322.71 \pm$

± 0.04 с. Ошибка на период была оценена с помощью моделирования кривой блеска методом Монте-Карло (см. подробнее Болдин и др., 2013).

Мы провели исследование профиля импульса в различных энергетических диапазонах 3–10, 10–20, 20–40, 40–79 кэВ. Кривые блеска были получены по данным обсерватории NuSTAR и сворачивались с определенным ранее периодом 322.71 с. На рис. 1 приведены полученные профили импульса источника. Хорошо видно, что профиль практически не изменяется с энергией. На фазах 0.3–0.5 регистрируется главный пик, который сохраняется до 40 кэВ. Также второй небольшой пик наблюдается до 40 кэВ вблизи фазы 0.15–0.2.

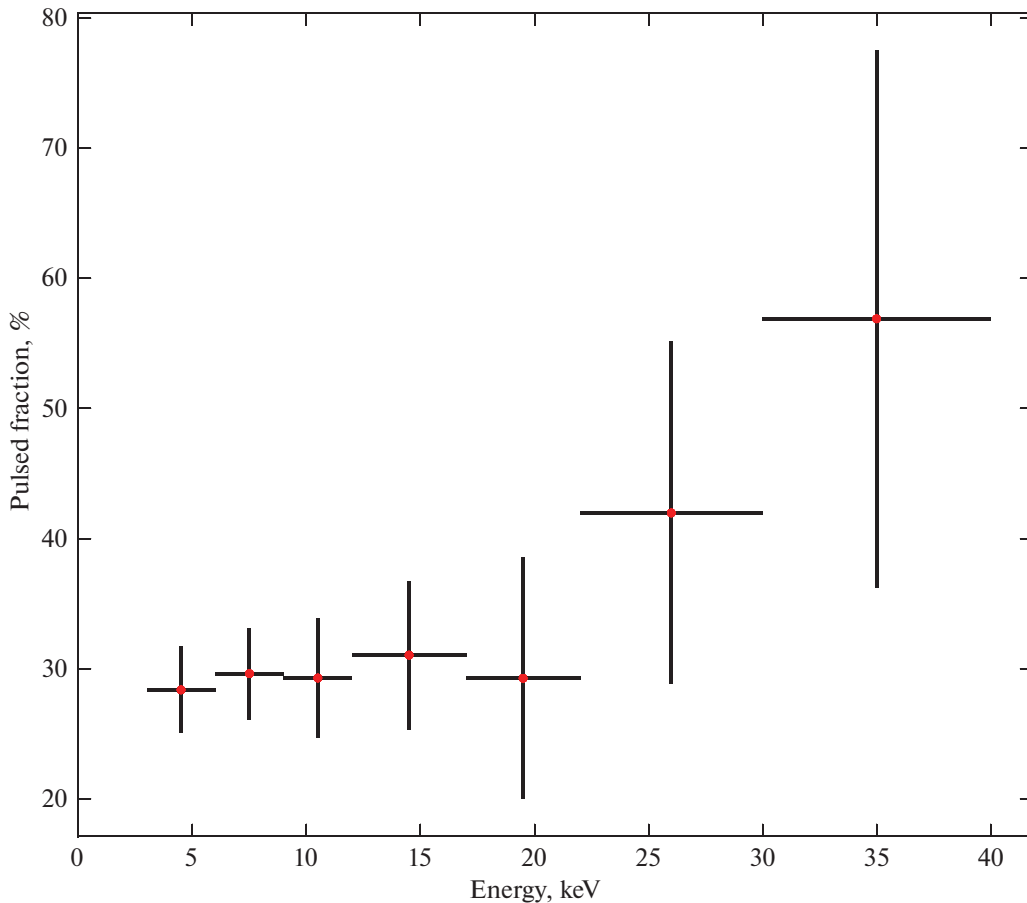


Рис. 2. Зависимость доли пульсирующего излучения IGR J21343+4738 от энергии по данным обсерватории NuSTAR (ObsID 90601339002).

Видно, что выше 40 кэВ значимый пульсирующий сигнал отсутствует, что, скорее всего, связано с низким потоком от источника и, как следствие, с недостатком статистики в жестких энергетических каналах. Схожая форма импульса наблюдалась и на более мягких энергиях по результатам наблюдений обсерватории XMM-Newton (Рэйг, Зизас, 2014).

Доля пульсирующего излучения от энергии рассчитывалась как отношение $(F_{\max} - F_{\min}) / (F_{\max} + F_{\min})$, где F_{\max} и F_{\min} — максимальное и минимальное значение потока в поправленном на фон профиле импульса в выбранном энергетическом диапазоне, состоящем из 16 бинов. Полученная зависимость (рис. 2) демонстрирует рост доли пульсирующего излучения с энергией, что является типичным для рентгеновских пульсаров (Лутовинов, Цыганков, 2009).

Спектральный анализ источника IGR J21343+4738

Средний энергетический спектр IGR J21343+4738, полученный по данным телеско-

пов NuSTAR и Swift/XRT, показан на рис. 3а. Для описания континуума источника были применены несколько моделей, используемые для описания спектров рентгеновских пульсаров в пакете XSPEC v12.12.1 (Арно и др., 1999). Для сравнения наших результатов с предыдущей работой (Рейг, Зизас, 2014) была выбрана модель континуума в форме степенного закона с экспоненциальным завалом на высоких энергиях (POWERLAW*HIGHCUT), которая также продемонстрировала наилучшее качество аппроксимации. Для учета межзвездного поглощения в модель была добавлена компонента TBABS. Полученное поглощение $N_{\text{H}} \simeq 2.9 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ превышает значение Галактического поглощения в направлении источника $\sim 3.24 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (N14PI сотрудничество, Бехти, Флоер и др., 2016), что указывает на наличие дополнительного поглощения в самой системе. В работе Рейг и Зизас (2014) использовалась модель с добавлением компоненты в виде чернотельного излучения, но так как его температура равна 0.11 кэВ, то включать эту компоненту в нашу модель нет необходимости из-за недостаточной статистики в мягких диапазонах

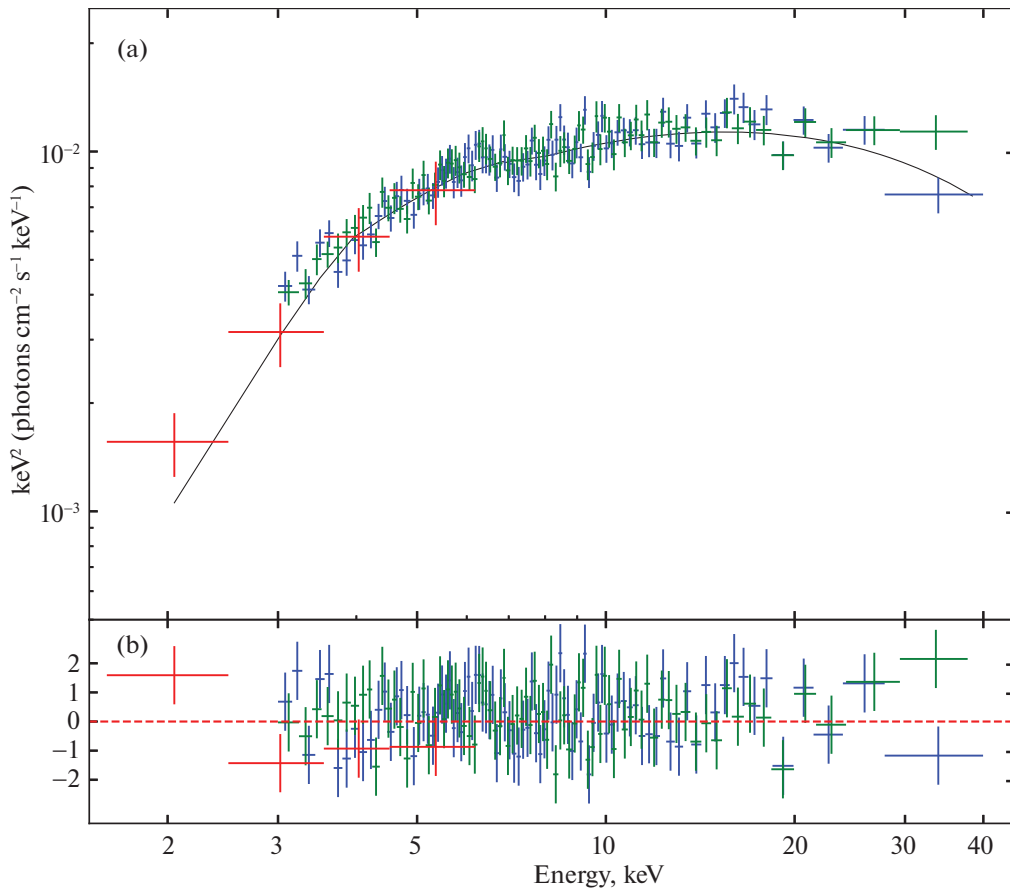


Рис. 3. (a) — Энергетический спектр IGR J21343+4738, полученный по данным NuSTAR в декабре 2020 г. (ObsID 90601339002) (зеленые и синие точки для модулей FPMA и FPMB соответственно) и Swift/XRT (красные точки). Сплошной линией показана модель, наилучшим образом описывающая спектр. (b) — Отклонение наблюдательных данных от модели POWERLAW*HIGHCUT.

энергий. Чтобы учесть возможные различия в калибровках эффективной площади для инструментов NuSTAR (FPMA, FPMB) и Swift/XRT, а также неполную одновременность наблюдений источника разными обсерваториями, были введены кросс-нормировочные коэффициенты (см. табл. 1). Остальные модельные параметры для разных инструментов были зафиксированы между собой. Как и для временного анализа, средний спектр статистически значим до 40 кэВ, поэтому приведенные далее параметры были получены в диапазоне энергий 3–40 кэВ.

Наблюдаемый поглощенный рентгеновский поток источника IGR J21343+4738 в энергетическом диапазоне 3–40 кэВ составил $F_x = 3.77^{+0.09}_{-0.53} \times 10^{-11}$ эрг см⁻² с⁻¹, что соответствует светимости $L_x \simeq 3.3 \times 10^{35}$ эрг с⁻¹ для расстояния 8.5 кпк.

Как уже было сказано выше, наилучший результат аппроксимации дала модель TBABS*POWERLAW*HIGHCUT, показавшая качество аппроксимации, равное 553.50 на 538 сте-

пеней свободы. Параметры модели представлены в табл. 1.

Чтобы проверить гипотезу о наличии в спектре источника циклотронной особенности, мы приме-

Таблица 1. Параметры спектра IGR J21343+4738 для модели Powerlaw*Highecut

Параметры модели	Powerlaw*Highecut
$N_H, 10^{22}$ см ⁻²	$2.92^{+1.13}_{-1.03}$
Γ	1.34 ± 0.13
E_{cutoff} , кэВ	5.9 ± 0.8
E_{Fold} , кэВ	$22.4^{+6.3}_{-3.9}$
Флюкс (3–40 кэВ), 10^{-11} эрг см ⁻² с ⁻¹	$3.77^{+0.09}_{-0.53}$
$C_{\text{NuSTAR, FPMB}}$	1.01 ± 0.02
$C_{\text{Swift, XRT}}$	$0.86^{+0.15}_{-0.14}$
χ^2 (d.o.f.)	553.50 (538)

нили подход, предложенный в работе Цыганкова, Лутовинова (2005). В диапазоне энергий 3–40 кэВ в аппроксимирующую модель была добавлена компонента gabs из пакета XSPEC — линия поглощения с гауссовым профилем. При этом энергия циклотронной линии изменялась в заданном диапазоне энергий с шагом 5 кэВ, а ее ширина фиксировалась на значении 1 кэВ для энергий линии ниже 10 кэВ и на значении 2 кэВ для энергий линии выше 10 кэВ. Значимость улучшения статистики проверялась с помощью критерия χ -квадрат. Таким образом, в указанном диапазоне энергий не было обнаружено циклотронных линий, включение которых улучшило бы качество аппроксимации спектра более чем на 2σ , при этом верхний предел на глубину линии составил $\tau = 0.18$. Оптическая толщина τ линии вычислялась как $A/\sigma/\sqrt{2\pi}$, где A — амплитуда линии в ее центре, а σ — ширина линии. Данный результат может указывать на то, что энергия циклотронной линии лежит за пределами исследуемого диапазона энергий (3–40 кэВ), так как на более высоких энергиях не хватает статистики для обнаружения циклотронной линии в спектре источника. Таким образом, на основе соотношения для энергии циклотронной линии $B = \frac{E_{\text{cycl}}(1+z)}{11.6} \times 10^{12}$ Гс

(Штауберт и др., 2019) можно предположить, что магнитное поле на поверхности нейтронной звезды вблизи полюсов должно быть либо меньше 2.5×10^{11} Гс, либо больше 3.4×10^{12} Гс.

Принимая во внимание, что для ряда рентгеновских пульсаров циклотронные особенности отсутствуют в усредненном спектре источника, но при этом регистрируются на отдельных фазах вращения нейтронной звезды (Мольков и др., 2019, 2021), была также проведена фазово-разрешенная спектроскопия. Для поиска возможных особенностей в спектрах в зависимости от фазы вращения мы разделили данные на четыре фазовых интервала, соответствующих нарастающему импульсу с небольшим пиком (0–0.25), главному пику (0.25–0.5), спадающему импульсу (0.5–0.75) и минимальному импульсу (0.75–1.0) кривой блеска. Спектры четырех фазовых интервалов были аппроксимированы той же самой моделью $\text{TBABS}^*\text{POWERLAW}^*\text{HIGHCUT}$, что использовалась при анализе усредненного спектра. Полученные модельные параметры фазовых спектров практически не изменяются с фазой и имеют значения, приблизительно равные значениям параметров усредненного спектра. Какие-либо особенности, связанные с возможным наличием циклотронной линии поглощения, отсутствуют.

Орбитальный период двойной системы

В работе Николаевой и др. (2021) были определены два возможных периода обращения ней-

тронной звезды вокруг компаньона, равные 34.26 и 160.8 дням. Чтобы проверить эти предположения, мы собрали все доступные данные измерений потока источника инструментами обсерваторий Спектр–Рентген–Гамма (телескоп ART-XC), Swift (телескоп XRT), NuSTAR, XMM-Newton и построили долговременные кривые блеска в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Затем они были свернуты с указанными выше периодами и аппроксимированы соответствующими синусоидами (рис. 4). На рисунке видно, что все полученные измерения потоков приемлемо описываются синусоидой с периодом 34.26 дня за исключением точки на фазе 0.65. Соответствующее измерение было проведено в декабре 2020 г. во время предполагаемой вспышки источника, поэтому эта точка была исключена из ряда данных при дальнейшей аппроксимации. Модель описывает кривую блеска с приемлемым значением статистики $\chi^2/\text{d.o.f.} = 1.6/3$ для периода 34.26 дня. Вторая модель, с периодом 160.8 дней, описывает данные значительно хуже, со значением статистики $\chi^2/\text{d.o.f.} = 48.7/3$. Таким образом, имеющиеся рентгеновские данные согласуются с предположением о существовании в системе орбитального периода ≈ 34.3 , однако для окончательных выводов необходимы более длительные наблюдения рентгеновскими инструментами с целью определения изменений периода пульсаций источника, связанных с орбитальным движением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проанализированы данные наблюдения рентгеновского пульсара IGR J21343+4738, полученные обсерваторией NuSTAR, а также телескопами Swift/XRT и SPG/ART-XC. Показано, что широкополосный спектр источника, измеренный в декабре 2020 г. в состоянии со светимостью $L_x \approx 3.3 \times 10^{35}$ эрг с^{-1} , наилучшим образом может быть описан моделью континуума в форме степенного закона с экспоненциальным завалом на высоких энергиях $\text{POWERLAW}^*\text{HIGHCUT}$. В модель была включена компонента для учета межзвездного поглощения, которая превышает значение Галактического поглощения в направлении источника, что свидетельствует о том, что часть излучения поглощается внутри двойной системы. В работе также была проведена фазово-разрешенная спектроскопия, которая показала, что значения модельных параметров практически не меняются с фазой.

Временной анализ позволил зарегистрировать пульсации рентгеновского излучения с периодом ≈ 322.71 с. Это значение почти на 2.5 с больше измеренного в 2013 г. по данным обсерватории XMM-Newton, что свидетельствует о слабом замедлении вращения нейтронной звезды со средним

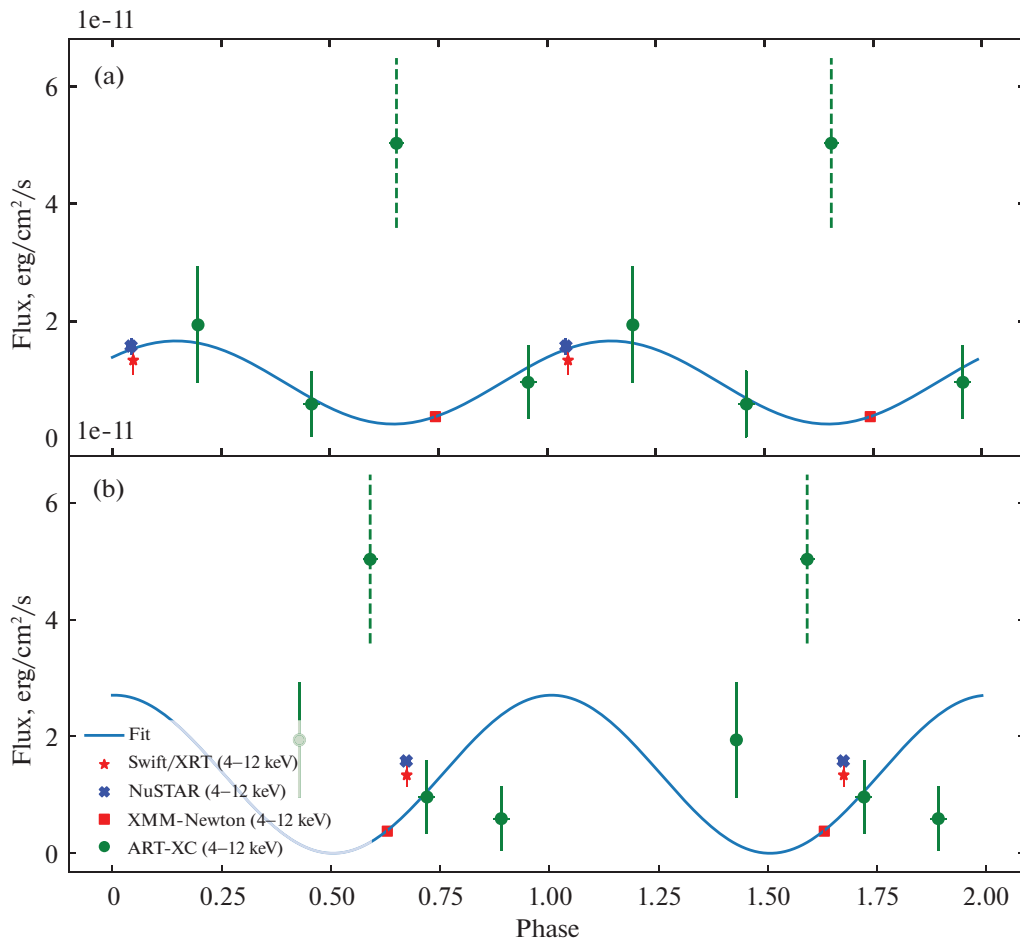


Рис. 4. Кривые блеска рентгеновского пульсара IGR J21343+4738 по данным нескольких телескопов, свернутые с периодом 34.26 дней (a) и с периодом 160.8 дней (b). Поток от источника на фазе 0.65 (a) и 0.59 (b) (отмечены пунктирной линией) были получены в декабре 2020 г. во время предполагаемой вспышки, поэтому эта точка была исключена из ряда данных при аппроксимации.

темпом $\dot{P}/P \simeq 1 \times 10^{-3}$ год $^{-1}$, что может быть характерно для рентгеновских пульсаров на стадии квазисферической аккреции (Шакура и др., 2018).

Профиль импульса оказывается типичным для постоянных рентгеновских двойных с низкими потоками (см., например, Рэйг, Роше, 1999). В диапазоне энергий 3–40 кэВ он практически не изменяется с энергией и хорошо согласуется с измеренным ранее в более мягких каналах. Доля пульсирующего излучения имеет типичный для рентгеновских пульсаров вид возрастающей зависимости от энергии.

В спектре источника на энергиях 3–40 кэВ не было обнаружено особенностей, которые можно было бы интерпретировать как циклотронные линии. Таким образом, мы можем предположить, что магнитное поле источника $B < 2.5 \times 10^{11}$ Гс или $B > 3.4 \times 10^{12}$ Гс.

Имеющиеся измерения рентгеновского потока от источника в диапазоне энергий 4–12 кэВ согласуются с предположением о существовании в

системе орбитального периода $\simeq 34.3$ дня, однако для окончательных выводов необходимы более длительные наблюдения. Предполагая, что пульсар находится вблизи равновесного состояния, а аккреция идет в режиме квазисферической дозвуковой аккреции Бонди (Шакура и др., 2012), магнитное поле может быть независимо оценено по орбитальному и вращательному периодам и среднему темпу аккреции. Такая оценка дает величину $B \sim 2 \times 10^{11}$ Гс для характерной скорости ветра у массивных систем ~ 1 тыс. км/с, что согласуется с верхним пределом, полученным по спектральному анализу.

В работе использованы данные, полученные с помощью обсерватории NuSTAR, проекта Caltech, финансируемого NASA и управляемого NASA/JPL, и данные, предоставленные UK Swift Science Data Centre (анализ данных телескопа XRT). Также использовалось программное обеспечение, предоставленное Исследовательским цен-

тром архива астрофизики высоких энергий (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center, HEASARC). В работе использовались данные телескопа ART-XC им. Михаила Павлинского на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена ГК Роскосмос в интересах Российской академии наук в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Телескоп ART-XC им. Михаила Павлинского изготовлен Институтом космических исследований Российской академии наук совместно с Российским федеральным ядерным центром (г. Саров, Россия). Также в проекте участвует Центр космических полетов им. Маршалла, НАСА (США). Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется АО “НПО Лавочкина”. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Усурийске, Евпатории и Байконуре и финансируется ГК Роскосмос. Работа поддержана грантом РНФ 19-12-00423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арно, Дорман и Гордон (K. Arnaud, B. Dorman, and C. Gordon), *Astrophysics Source Code Library*, 10005 (1999).
2. Барроуз и др. (D.N. Burrows, J.E. Hill, J.A. Nousek, J.A. Kennea, A. Wells, J.P. Osborne, A.F. Abbey, A. Beardmore, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 165 (2005).
3. Бехти и др. (HI4PI Collaboration: N. Ben Bekhti, L. Floer, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A116 (2016).
4. Бёрд и др. (A.J. Bird, A. Malizia, A. Bazzano, E.J. Barlow, L. Bassani, A.B. Hill, G. Belanger, F. Capitanio, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170**, 175 (2007).
5. Бикмаев и др. (I.F. Bikmaev, R.A. Burenin, M.G. Revnivtsev, S.Yu. Sazonov, R.A. Sunyaev, M.N. Pavlinsky, and N.A. Sakhibullin), *Astron. Lett.* **34**, 10 (2008).
6. Болдин П.А., Цыганков С.С., Лутовинов А.А., *Письма в Астрон. журн.* **39**, 423 (2013) [P.A. Boldin, S.S. Tsygankov, and A.A. Lutovinov, *Astron. Lett.* **39**, 375 (2013)].
7. Джерельс и др. (N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi, K.O. Mason, J.A. Nousek, A.A. Wells, N.E. White, S.D. Barthelmy, et al.), *Astrophys. J.* **611**, 1005 (2004).
8. Киу и др. (H. Qiu, P. Zhou, W. Yu, X. Li, and X. Xu), *Astrophys. J.* **847**, 1 (2017).
9. Кречмар и др. (P. Kretschmar, F. Fürst, L. Sidoli, et al.), *New Astron. Rev.* **86**, id. 101546 (2019).
10. Кривонос и др. (R. Krivonos, M. Revnivtsev, A. Lutovinov, S. Sazonov, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **475**, 2 (2007).
11. Ли и др. (J. Li, D.F. Torres, S. Zhang, A. Papitto, Yu. Chen, and J.-M. Wang), *Astrophys. J.* **761**, 1 (2012).
12. Лутовинов А.А., Цыганков С.С., *Письма в Астрон. журн.* **35**, 483 (2009) [A.A. Lutovinov and S.S. Tsygankov, *Astron. Lett.* **35**, 433 (2009)].
13. Мольков и др. (S. Molkov, A. Lutovinov, S. Tsygankov, I. Mereminskiy, and A. Mushtukov), *Astrophys. J.* **883**, L11 (2019).
14. Мольков и др. (S. Molkov, V. Doroshenko, A. Lutovinov, S. Tsygankov, A. Santangelo, I. Mereminskiy, and A. Semena), *Astrophys. J. Lett.* **915**, 2 (2021).
15. Муштуков и Цыганков (A. Mushtukov and Tsygankov), *arXiv e-prints*, arXiv:2204.14185 (2022).
16. Николаева и др. (E.A. Nikolaeva, et al.), MOBSTER-1 virtual conference: Stellar variability as a probe of magnetic fields in massive stars, *Proceedings of the MOBSTER-1 virtual conference held 12–17 July 2020*, id.25 (2021), <http://heaconf.cosmos.ru/heaconf/hea/2021/hea/talk/801/>
17. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
18. Рэйг (P. Reig), *Astrophys. Space Sci.* **332**, 1 (2011).
19. Рэйг, Зизас (P. Reig and A. Zezas), *Astron. Astrophys.* **561**, A13 (2014).
20. Сазонов и др. (S. Sazonov, M. Revnivtsev, R. Burenin, E. Churazov, R. Sunyaev, W.R. Forman, and S.S. Murray), *Astron. Astrophys.* **487**, 2 (2008).
21. Семена и др. (A. Semena, A. Lutovinov, I. Mereminskiy, S. Molkov, I. Lapshov, and A. Tkachenko), *Astron. Telegram* 14247 (2020).
22. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
23. Харрисон и др. (F.A. Harrison, W.W. Craig, F.E. Christensen, et al.), *Astrophys. J.* **770**, 103 (2013).
24. Цыганков С.С., Лутовинов А.А., *Письма в Астрон. журн.* **31**, 427 (2005) [S.S. Tsygankov and A.A. Lutovinov, *Astron. Lett.* **31**, 380 (2005)].
25. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, R.A. Krivonos, and A.A. Lutovinov), *MNRAS* **421**, 3 (2012).
26. Шакура и др. (N. Shakura, K. Postnov, A. Kochetkova, L. Hjalmarsson), *MNRAS* **420**, 216 (2012).
27. Штауберт и др. (R. Staubert, J. Trumper, E. Kendziorra, et al.), *Astron. Astrophys.* **622**, A61 (2019).
28. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).