

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЛЬСАРА ХТЕ J1946+274 ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ NuSTAR

© 2021 г. А. С. Горбан^{1,2*}, С. В. Мольков¹, С. С. Цыганков^{3,1}, А. А. Лутовинов^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

³Обсерватория Туорла, Университет Турку, Финляндия

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.; принята к публикации 15.06.2021 г.

Представлены результаты спектрального и временного анализа излучения транзиентного рентгеновского пульсара ХТЕ J1946+274 по данным одновременных наблюдений обсерваториями NuSTAR и Swift/XRT в широком диапазоне энергий 0.3–79 кэВ, проведенными в июне 2018 г. во время яркой вспышки излучения. Спектральный анализ подтвердил наличие циклотронной линии поглощения на энергии ~ 38 кэВ как в среднем, так и в фазово-разрешенных спектрах источника. Фазированная спектроскопия позволила также исследовать изменение спектральных параметров в зависимости от фазы вращения нейтронной звезды, период которого составил $\simeq 15.755$ с. Показано, что энергия циклотронной линии значительно меняется (от $\simeq 34$ до $\simeq 39$ кэВ) на масштабе импульса, при этом ширина и оптическая толща линии также демонстрируют переменность. Наблюдаемое поведение параметров циклотронной линии может быть интерпретировано в рамках модели отражения излучения небольшой аккреционной колонки (светимость источника в момент наблюдений составила $\sim 3 \times 10^{37}$ эрг с^{-1}) от поверхности нейтронной звезды. Обнаружено, что эквивалентная ширина линии железа также значительно изменяется с фазой импульса. Временная задержка между профилями импульса и эквивалентной ширины может быть объяснена отражением излучения нейтронной звезды от внешних областей аккреционного диска.

Ключевые слова: ХТЕ J1946+274, рентгеновские источники, рентгеновские двойные, аккреция, магнитное поле.

DOI: 10.31857/S0320010821060048

ВВЕДЕНИЕ

Транзиентный рентгеновский пульсар ХТЕ J1946+274 впервые был обнаружен во время вспышки в сентябре 1998 г. с помощью монитора всего неба All-Sky Monitor (ASM), входящего в состав орбитальной обсерватории Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE, Смит, Такешима, 1998а,б). Позднее по данным прибора BATSE на борту обсерватории Compton-GRO от источника были зарегистрированы когерентные пульсации с периодом 15.83 с (Уилсон и др., 1998). Через три года после открытия пульсар перешел в спокойное состояние и не проявлял вспышечной активности в рентгеновском диапазоне до июня 2010 г., когда Burst Alert Telescope (BAT) на борту обсерватории Swift им. Н. Джерельса и Gamma-ray Burst Monitor (GBM) обсерватории Fermi зафиксировали новую вспышку излучения

(Кримм и др., 2010; Фингер, 2010). Во время этой вспышки источник также наблюдался орбитальными обсерваториями INTEGRAL, RXTE и Suzaku (Кабаллеро и др., 2010; Мюллер и др., 2012; Майтра, Пол, 2013; Марку-Четам и др., 2015). Как и в случае вспышки 1998 г., за основной вспышкой II рода (яркие вспышки в Be-системах, не зависящие от орбитальной фазы двойной системы с пиковой светимостью, достигающей эддингтоновского предела для нейтронной звезды) наблюдался ряд более слабых событий, вспышек I рода, связанных с прохождением нейтронной звездой периастра двойной системы (Мюллер и др., 2012), после чего излучение от источника опять не регистрировалось вплоть до 2018 г., когда Fermi/GBM зарегистрировал очередную вспышку от ХТЕ J1946+274 (Дженке и др., 2018).

Оптический компаньон в системе был установлен благодаря хорошей локализации в рентгеновских лучах, полученной по данным обсерватории

*Электронный адрес: gorbani@iki.rssi.ru

ВерроSAX, что позволило провести его спектроскопическое исследование в оптическом диапазоне (Верречиа и др., 2002). В спектрах оптического компаньона пульсара были обнаружены сильные линии излучения $H\alpha$ и $H\beta$. Спектроскопические и фотометрические данные позволили не только определить класс звезды-компаньона (B0-1V-Ive), но и оценить расстояние до двойной системы $d \sim 8-10$ кпк (Верречиа и др., 2002). Таким образом, совокупность рентгеновских и оптических данных позволяет отнести источник к классу рентгеновских пульсаров в двойных системах с Ве-звездами (ВеХРВ). Позднее, анализируя зависимость ускорения вращения нейтронной звезды от наблюдаемого потока, Уилсон и др. (2003) оценили расстояние до пульсара как $d = 9.5 \pm 2.9$ кпк (далее будет использоваться это значение). Большое расстояние до системы ~ 10 кпк было также подтверждено данными телескопа Gaia (Арнасон и др., 2021).

Как было сказано выше, первая вспышка ХТЕ J1946+274 в 1998 г. длилась около трех месяцев. После основной вспышки источник оставался активным еще около трех лет, демонстрируя серию более слабых всплесков, разделенных интервалами около 80 дней (Кампана и др., 1999). Позднее было показано, что эта периодичность связана с движением нейтронной звезды по орбите двойной системы с периодом 169.2 дня (см. Уилсон и др., 2003). Орбитальные параметры двойной системы были впервые определены в той же работе и позднее уточнены Марку-Четам и др. (2015).

В спокойном состоянии источник наблюдался в марте 2013 г., через несколько лет после вспышки 2010 г., с помощью обсерватории Chandra и был обнаружен в состоянии со светимостью около 10^{34} эрг с^{-1} (Озбей Арабаси и др., 2015; Цыганков и др., 2017а). Интересно, что несмотря на столь низкую светимость, от ХТЕ J1946+274 было зарегистрировано пульсирующее излучение и измерен жесткий энергетический спектр (Цыганков и др., 2017а), указывающие на продолжающийся процесс аккреции даже при столь низких светимостях, что скорее это связано с присутствием вокруг нейтронной звезды слабоионизованного (холодного) аккреционного диска (Цыганков и др., 2017б).

В ярком состоянии энергетический спектр ХТЕ J1946+274 имеет типичную для рентгеновских пульсаров форму и может быть описан степенным законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях. Кроме того, используя данные обсерватории RXTE, Хейндл и др. (2001) удалось обнаружить линию циклотронного поглощения на энергии около 35 кэВ, что позволило измерить напряженность магнитного поля нейтронной звезды в системе. Позднее присутствие циклотронной линии на энергии ~ 38 кэВ в спектре источника во время вспышки 1998 г. было независимо подтверждено

по данным обсерватории ВерроSAX (Дорошенко и др., 2017). Однако, анализируя данные обсерватории RXTE, полученные во время вспышки 2010 г., Мюллер и др. (2012) исключили присутствие циклотронной линии на энергии 35 кэВ. Вместо этого авторы нашли свидетельства наличия особенности в поглощении на энергии около 25 кэВ. Это дало авторам основание предположить, что циклотронная энергия может варьироваться от вспышки к вспышке. В то же время, основываясь на данных обсерватории Suzaku, полученных во время этой же вспышки, Майтра и Пол (2013) и Марку-Четам и др. (2015) подтвердили присутствие линии поглощения на энергиях 35–38 кэВ и не обнаружили никаких признаков подобной особенности в области энергии 25 кэВ.

Таким образом, вопрос о присутствии и точных параметрах циклотронной особенности в спектре пульсара ХТЕ J1946+274 до сих пор остается открытым и обсуждается в настоящей работе. Для ответа на поставленный вопрос используются данные обсерватории NuSTAR, полученные при наблюдении пульсара в ярком состоянии, во время вспышки 2018 г.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В 2018 г. после семи лет пребывания в “спокойном” состоянии источник ХТЕ J1946+274 перешел в очередную фазу активности. Начало вспышки II типа было зарегистрировано инструментом Fermi/GBM (Дженке и др., 2018). Вспышка продолжалась более двух месяцев. Чтобы показать ее морфологию, на рис. 1 представлена кривая блеска, полученная в диапазоне энергий 15–50 кэВ по данным телескопа Swift/BAT (Кримм и др., 2013). Источник за время вспышки наблюдался несколькими обсерваториями и инструментами, однако для исследования спектрально-временных (NICER, NuSTAR, Swift), однако для исследования спектрально-временных характеристик в широком энергетическом диапазоне мы использовали только данные телескопов обсерватории NuSTAR и данные телескопа Swift/XRT для спектрального анализа в мягком рентгеновском диапазоне (0.3–10 кэВ).

Обсерватория NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope ARray) состоит из двух идентичных рентгеновских телескопов (FPMA и FPMB), работающих в диапазоне энергий 3–79 кэВ и имеющих энергетическое разрешение около 400 эВ на энергии 10 кэВ (Харрисон и др., 2013). Наблюдения источника ХТЕ J1946+274 были проведены 24 июня 2018 г. (ObsID: 90401328002) с экспозицией около 50 кс (момент наблюдения отмечен на рис. 1 пунктирной линией).

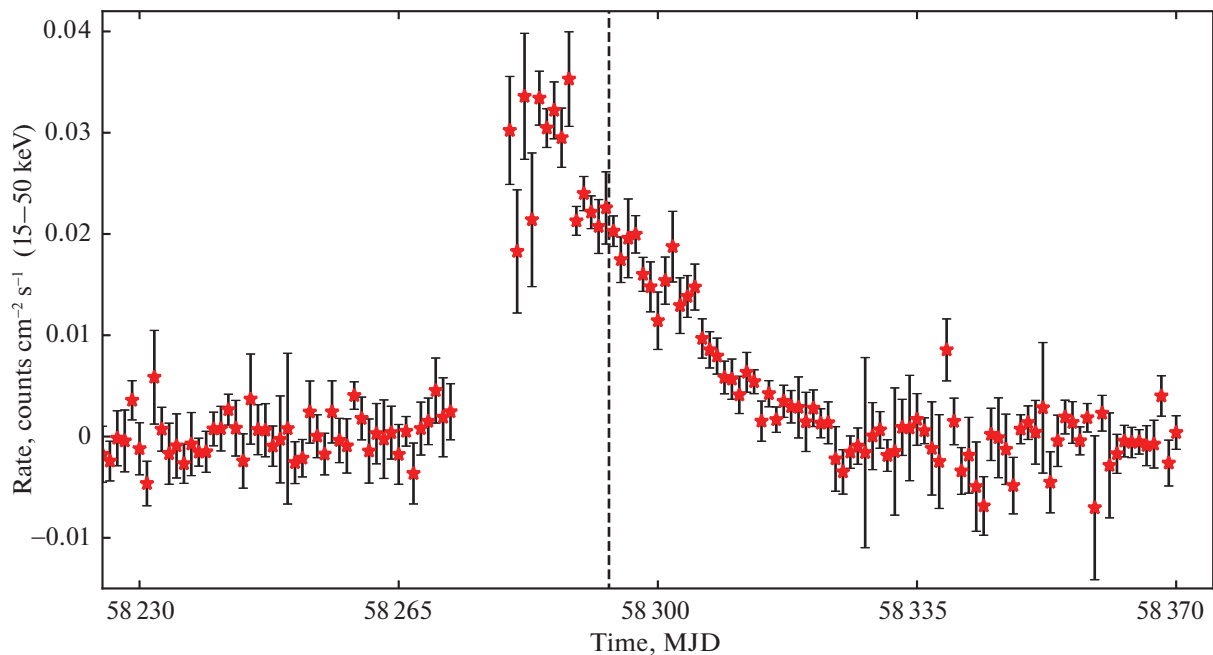


Рис. 1. Кривая блеска пульсара XTE J1946+274 в диапазоне энергий 15–50 кэВ по данным телескопа BAT обсерватории Swift. Пунктирной линией обозначен момент наблюдения обсерваторией NuSTAR.

Анализ данных обсерватории NuSTAR был проведен с помощью программ пакета HEASOFT v6.27.2, а также с использованием программного обеспечения NuSTAR Data Analysis (NuSTARDAS v0.4.7) и калибровок CALDB v20180925. После обработки данных с помощью NUPipeline мы использовали NUPRODUCTS для извлечения энергетических спектров источника и его кривых блеска. Данные для источника извлекались из круговой области радиусом $100''$, расположенной симметрично относительно центра изображения источника на детекторах. В связи с тем, что источник очень яркий, область для извлечения спектра и кривой блеска фона, размер которой составляет $150''$, выбиралась на соседнем чипе. Для спектрального анализа все полученные энергетические спектры были сгруппированы по 25 отсчетов на канал.

Наблюдение XTE J1946+274 было проведено телескопом Swift/XRT параллельно с наблюдениями NuSTAR 24 июня 2018 г. (ObsID: 00088783002) с экспозицией 1.2 кс. Спектры источника были получены с помощью онлайн-инструментов (Эванс и др., 2009), предоставленных UK Swift Science Data Centre при университете Лестера.¹ В работе использовались данные, полученные в режиме WT, в связи с тем, что данные РС-режима были подвержены накоплению фотонов (pile-up), которые не позволяют адекватно

оценивать результаты. Энергетические спектры сгруппировывались также по 25 отсчетов на канал.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Временной анализ излучения XTE J1946+274 во время вспышки 2018 г.

На первом этапе мы провели детальный временной анализ данных NuSTAR. Чтобы учесть эффекты, связанные с движением телескопа вокруг Земли и Земли вокруг Солнца, прежде всего, все времена прихода фотонов были приведены к барицентру Солнечной системы. Барицентрирование осуществлялось с помощью стандартных инструментов программного обеспечения пакета HEASOFT. Коррекция времени прихода фотонов на орбитальное движение в двойной системе не проводилась, так как орбитальный период много больше времени наблюдений, и поэтому данной поправкой для целей настоящей статьи можно было пренебречь. Таким образом, мы определили период пульсаций, который составил 15.75519 ± 0.00001 с. Для поиска периодического сигнала использовался стандартный метод наложения эпох. Погрешность на значение периода оценивалась с использованием моделирования кривой блеска методом Монте-Карло (Болдин и др., 2013). Следующим шагом было извлечение кривых блеска по данным каждого модуля в энергетических диапазонах 3–6, 6–8, 8–10, 10–15, 15–20, 20–30, 30–40 и 40–79 кэВ. Кривые блеска строились с временным разрешением 0.1 с.

¹http://www.swift.ac.uk/user_objects/

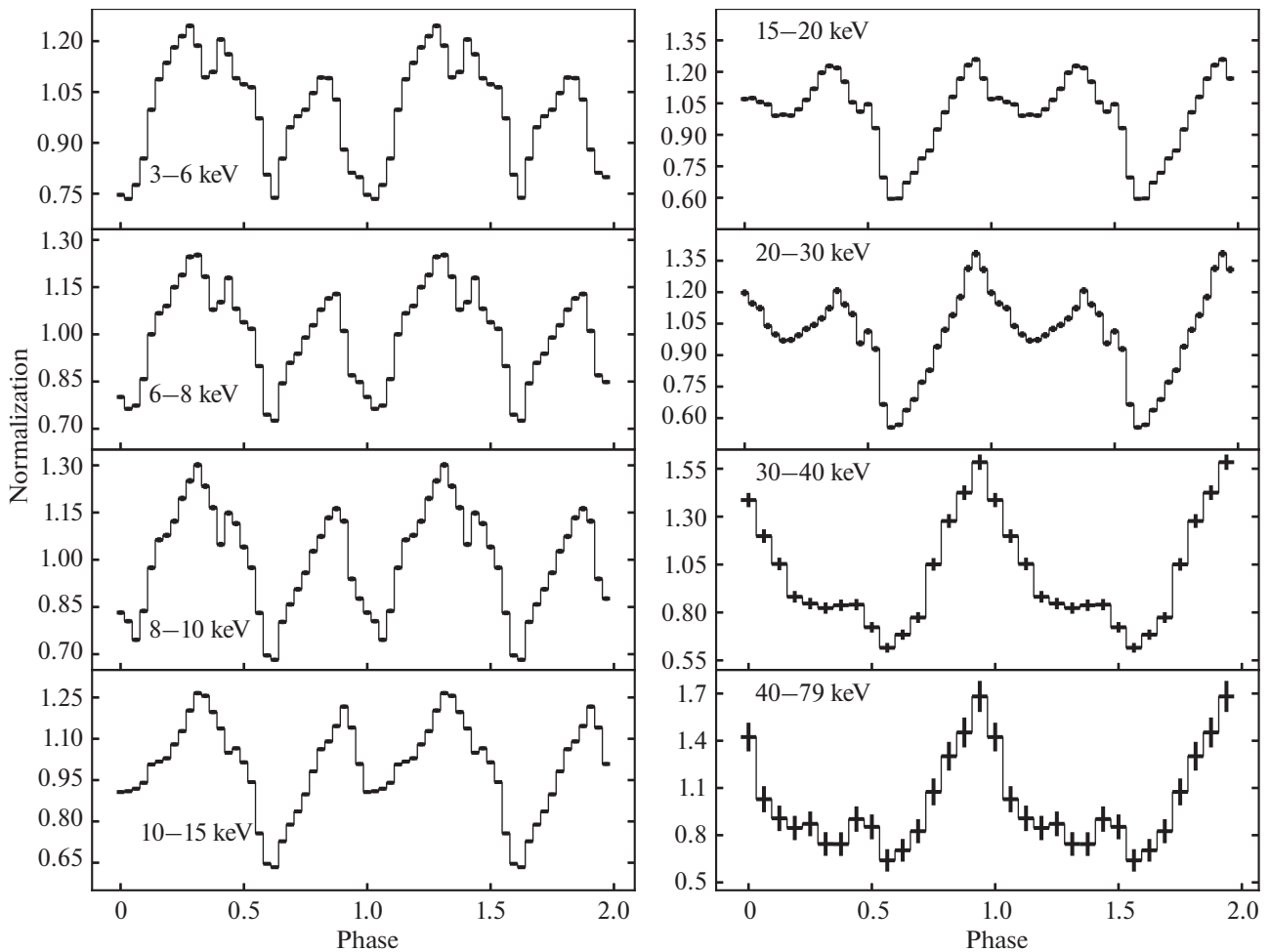


Рис. 2. Профили импульса ХТЕ J1946+274 в восьми энергетических диапазонах, полученные по данным обсерватории NuSTAR в июне 2018 г. Скорость счета нормирована на среднее значение в данном диапазоне.

Затем из кривых блеска источников вычитался фон и кривые блеска двух модулей объединялись с помощью инструмента *lsmath* (FTOOLS V6.27). Профиль импульса восстанавливался путем свертки кривой блеска с определенным выше периодом пульсаций. На рис. 2 приведены полученные фазовые кривые блеска источника. Хорошо видно, что профиль импульса существенно изменяется с энергией. Примерно до 20 кэВ профили импульсов в общей структуре схожи и характеризуются двумя фазовыми областями — они имеют двойной пик с довольно узким минимумом между ними на фазе 0.6. При этом основной пик на низких энергиях (до ~10 кэВ) показывает наличие сложной структуры. На более высоких энергиях основной пик практически исчезает и остается один пик на фазах от 0.8 до 1.0.

Чтобы более подробно исследовать эволюцию излучения в зависимости от энергии, было построено двумерное распределение интенсивностей

профилей импульсов (рис. 3). Как и на рис. 2, здесь прослеживается изменение профиля с энергией от двухпикового к однопиковому, при этом такой переход наблюдается в районе энергии циклотронной линии. Такие переходы от двухпиковой структуры к однопиковой были обнаружены ранее и описаны в работе Уилсон и др. (2003) во время двух вспышек, наблюдавшихся с помощью RXTE/PCA в 1998 и 2001 гг., а также в работе Дорошенко и др. (2017) по данным обсерватории ВерроSAX, полученным в 1998 г. Интересно отметить, что подобное поведение наблюдалось ранее и в других BeXRB системах (Цыганков и др., 2006, 2007; Айер и др., 2015; Цыганков и др., 2015) и объясняется как следствие эффектов углового перераспределения рентгеновского излучения за счет циклотронного резонансного рассеяния в сильном магнитном поле в сочетании с релятивистскими эффектами, а также геометрией излучающей области (см., например, Ферриньо и др., 2011; Шонхерр и др., 2014).

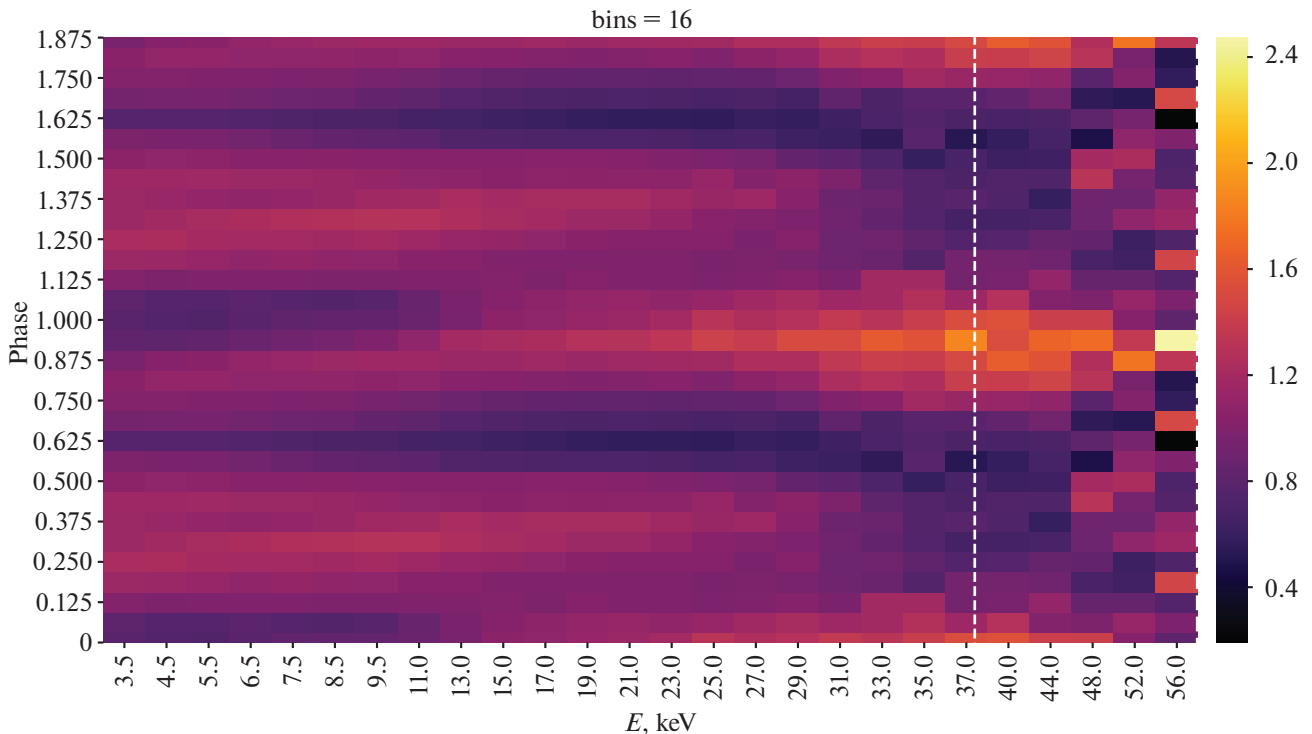


Рис. 3. Двумерное распределение нормализованной интенсивности профиля импульса в зависимости от энергии. Уровни одинакового цвета показывают равные значения нормализованной интенсивности, которые представлены на панели справа. Пунктирная линия показывает положение центра линии циклотронного поглощения в спектре пульсара (см. подраздел “Спектральный анализ”).

На рис. 4 показана зависимость доли пульсирующего излучения от энергии. Доля пульсирующего излучения определялась как отношение $(F_{\max} - F_{\min}) / (F_{\max} + F_{\min})$, где F_{\max} и F_{\min} — максимальный и минимальный поток в профиле импульса (используя 10 фазовых бинов во всех энергетических каналах). Из полученного графика видно, что доля пульсирующего излучения увеличивается с ростом энергии, что является типичным для большинства рентгеновских пульсаров, в особенности для ярких (Лутовинов, Цыганков, 2009). Отметим, что в работе Дорошенко и др. (2017) было показано, что в области энергий ~ 40 кэВ наблюдается особенность, связанная с локальным увеличением доли пульсирующего излучения вблизи циклотронной линии поглощения, ранее обнаруженная для нескольких других рентгеновских пульсаров (Цыганков и др., 2007; Лутовинов, Цыганков, 2009; Лутовинов и др. 2016). Результаты обсерватории NuSTAR (рис. 4) в целом хорошо согласуются с результатами обсерватории ВерроSAX, однако явного увеличения доли пульсирующего излучения вблизи циклотронной линии не регистрируется.

Спектральный анализ источника XTE J1946+274 во время вспышки 2018 г.

Средний спектр XTE J1946+274, полученный по данным NuSTAR и Swift/XRT, показан на рис. 5а. Для описания континуума в пакете XSPEC v12.11.0 (Арно и др., 1999) были применены две модели, обычно используемые для описания спектров рентгеновских пульсаров: степенной закон с экспоненциальным завалом на высоких энергиях (POWERLAW*HIGHCUT) и модель комптонизированного излучения (COMPTT, Титарчук, 1994). Для учета межзвездного поглощения была добавлена компонента TBABS. Кроме того, в общую аппроксимирующую модель была добавлена эмиссионная линия железа на энергии ~ 6.4 кэВ. Значение эквивалентной ширины линии железа W_{Fe} для среднего спектра составило $\simeq 0.1$ кэВ. Спектры для двух модулей NuSTAR и Swift/XRT аппроксимировались одновременно. Для того чтобы учесть различные калибровки этих модулей, а также неодновременность наблюдений обсерваторий NuSTAR и Swift, были введены нормировочные коэффициенты (см. табл. 1), а остальные параметры модели фиксировались между собой. В результате анализа было обнаружено, что модели COMPTT и POWERLAW*HIGHCUT описывают

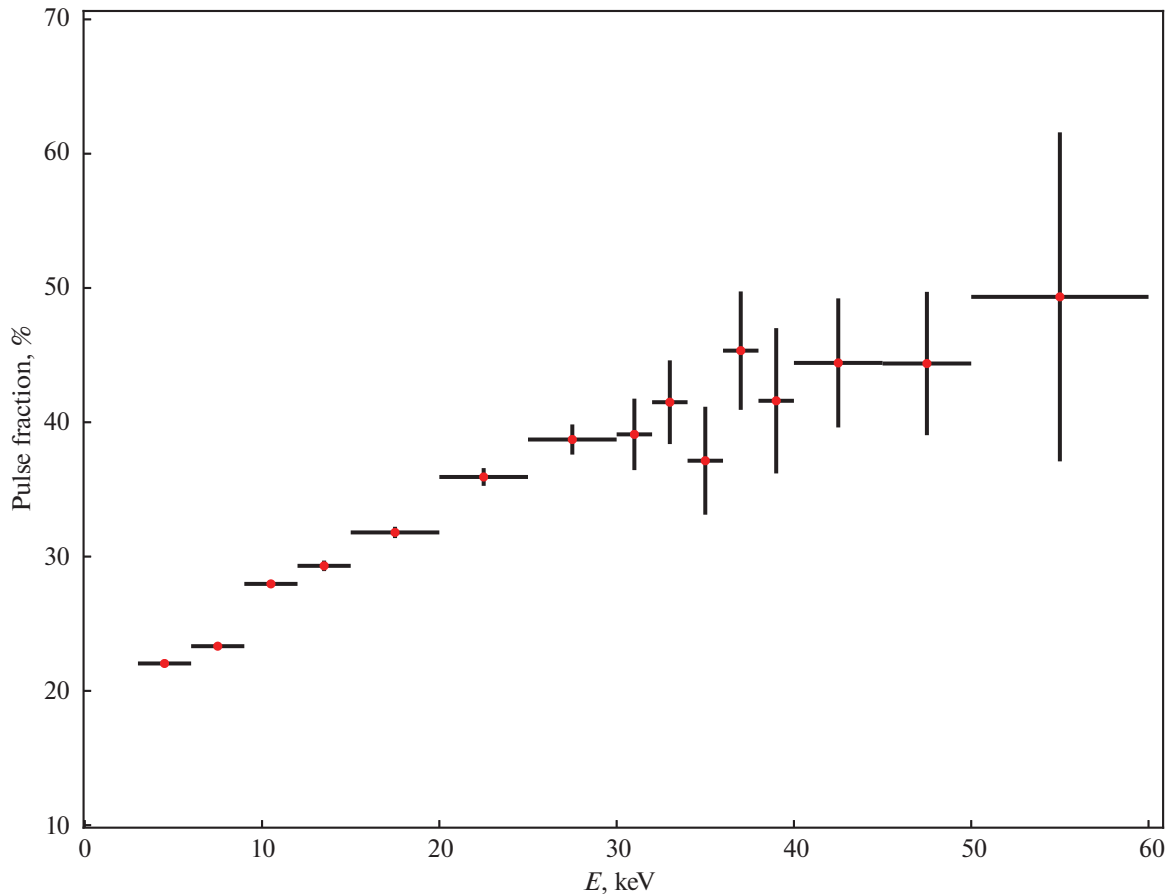


Рис. 4. Зависимость доли пульсирующего излучения ХТЕ J1946+274 от энергии по данным обсерватории NuSTAR.

данные приблизительно одинаково, с небольшими различиями.

В частности, модель TBABS*(BB+COMPTT+GAUS) показывает неудовлетворительное качество аппроксимации с $\chi^2 = 2716.94$ с 1904 степенями свободы и заметными отклонениями, означающими дефицит фотонов, вблизи энергии ~ 38 кэВ (рис. 5b). Для описания этой особенности в модель была добавлена линия поглощения с гауссовым оптическим профилем глубины GABS, которая может быть интерпретирована как линия циклотронного резонансного рассеяния. Это привело к значительному улучшению качества аппроксимации модели $\chi^2 = 2083.95$ (1901) и адекватному описанию спектра источника (рис. 5с). Ширина циклотронной линии и ее оптическая глубина имеют значения $\sigma_{\text{Cycl}} \simeq 8.6$ кэВ и $\tau_{\text{Cycl}} \simeq 0.57$ соответственно. Наблюдаемый рентгеновский поток источника ХТЕ J1946+274 в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ составил $F_x = 2.603(+0.005, -0.065) \times 10^{-9}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, что соответствует светимости $L_x \simeq 2.8 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} для расстояния 9.5 кпк. В табл. 1 также приведены полученные параметры

континуума для среднего спектра, описанного моделью COMPTT.

Для сравнения наших результатов с предыдущими работами (Марку-Четам и др., 2015; Дорошенко и др., 2017) спектр был также аппроксимирован моделью TBABS*(GAUS+BB+POWERLAW*HIGHCUT) и показал качество аппроксимации, равное 2222.91 на 1903 степеней свободы.² Также как и в модели TBABS*(BB+COMPTT+GAUS) вблизи энергии ~ 38 кэВ наблюдается особенность, которая была описана путем добавления к основной модели компоненты GABS. Качество аппроксимации значительно улучшилось до 2065.27 (1900) (рис. 5d,e). Ширина циклотронной линии составила $\sigma_{\text{Cycl}} \simeq 4.53$ кэВ, а оптическая глубина $\tau_{\text{Cycl}} \simeq 0.25$. Параметры модели POWERLAW*HIGHCUT+BB для среднего спектра также приведены в табл. 1.

²Важно отметить, что в такой модели на энергии E_{cut} может возникать искусственный недостаток фотонов, который компенсируется включением дополнительной линии поглощения с энергией, равной энергии E_{cut} и шириной $0.1E_{\text{cut}}$.

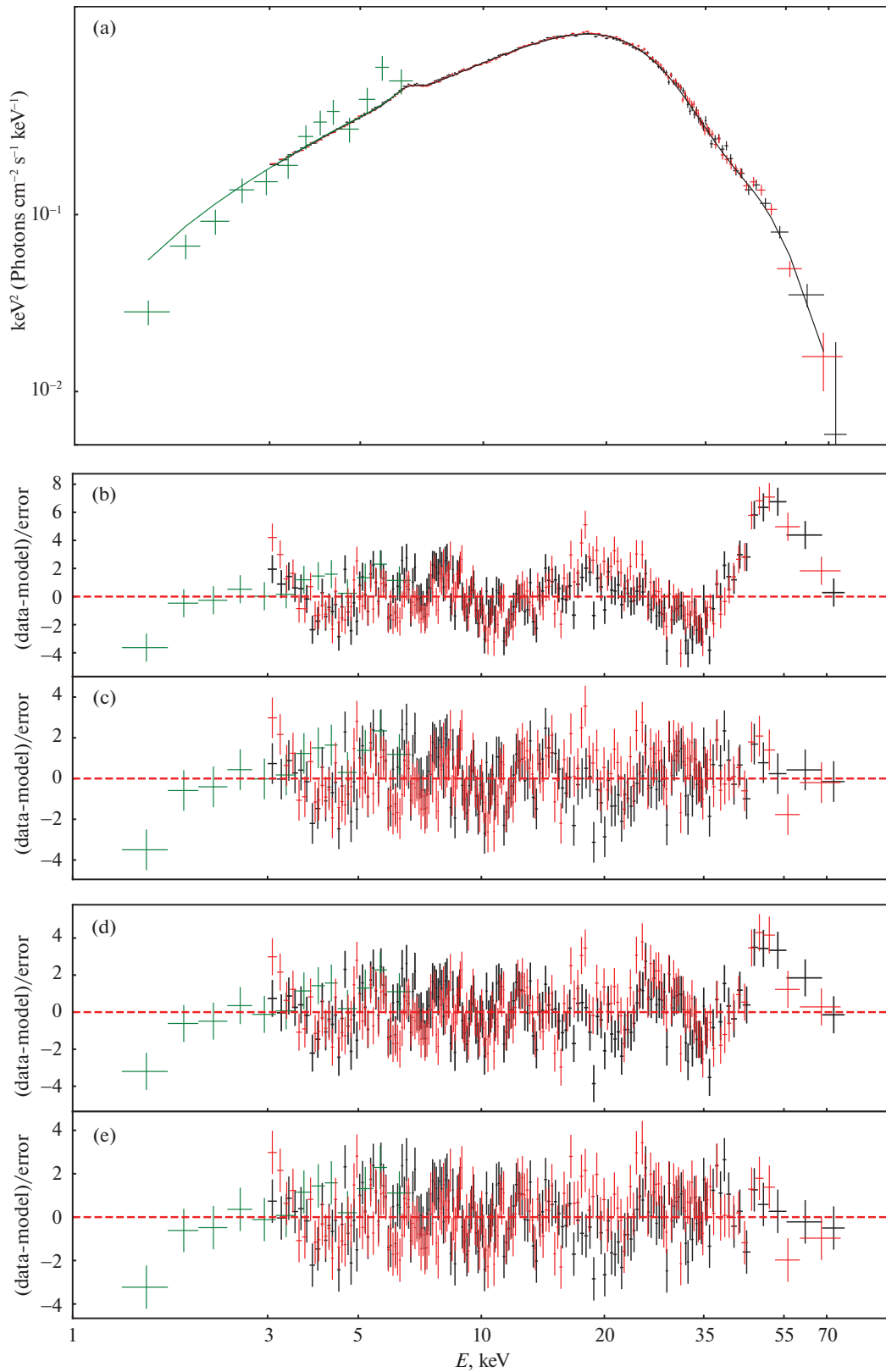


Рис. 5. (a) — Энергетический спектр ХТЕ J1946+274, измеренный по данным NuSTAR (красные и синие точки) и Swift/XRT (зеленые точки), сплошной линией показана модель, наилучшим образом описывающая спектр. Панель (b) показывает отклонение наблюдательных данных от модели HIGHCUT+BB без включения в модель циклотронной линии, (c) — с включением циклотронной линии, панель (d) показывает отклонение наблюдательных данных от модели COMP TT+BB без включения циклотронной линии, (e) — с включением всех дополнительных компонентов модели.

Таблица 1. Параметры спектра ХТЕ J1946+274 с описанием континуума моделью CompTT+BB и HIGHCUT+BB

Параметры модели	CompTT+BB	HIGHCUT+BB
$N_H, 10^{22} \text{ см}^{-2}$	$0.14^{+0.25}_{-0.13}$	$0.86^{+0.29}_{-0.31}$
Γ	—	$0.92^{+0.03}_{-0.03}$
$kT_{bb}, \text{кэВ}$	$1.59^{+0.02}_{-0.02}$	$2.14^{+0.12}_{-0.09}$
$E_{cut}, \text{кэВ}$	—	$18.02^{+0.17}_{-0.17}$
$E_{fold}, \text{кэВ}$	—	$8.92^{+0.18}_{-0.17}$
$E_{Fe}, \text{кэВ}$	$6.44^{+0.03}_{-0.03}$	$6.44^{+0.03}_{-0.03}$
$\sigma_{Fe}, \text{кэВ}$	$0.42^{+0.04}_{-0.03}$	$0.40^{+0.04}_{-0.03}$
$W_{Fe}, \text{кэВ}$	$0.116^{+0.006}_{-0.002}$	$0.107^{+0.005}_{-0.004}$
$E_{Cycl}, \text{кэВ}$	$37.49^{+0.70}_{-0.64}$	$37.81^{+0.75}_{-0.73}$
$\sigma_{Cycl}, \text{кэВ}$	$8.59^{+0.69}_{-0.61}$	$4.53^{+0.59}_{-0.55}$
τ_{Cycl}	$0.567^{+0.011}_{-0.011}$	$0.248^{+0.003}_{-0.003}$
$T_{0CompTT}, \text{кэВ}$	$0.46^{+0.13}_{-0.46}$	—
$kT_{CompTT}, \text{кэВ}$	$7.07^{+0.07}_{-0.06}$	—
τ_{CompTT}	$6.39^{+0.07}_{-0.06}$	—
Flux (3–79 кэВ), $10^{-9} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$2.603^{+0.005}_{-0.065}$	$2.606^{+0.001}_{-0.011}$
C_{NuSTAR}	$1.005^{+0.002}_{-0.002}$	$1.005^{+0.002}_{-0.002}$
C_{XRT}	$0.719^{+0.081}_{-0.079}$	$0.710^{+0.076}_{-0.075}$
$\chi^2 \text{ (d.o.f.)}$	2083.95 (1901)	2065.27 (1900)

Таким образом, независимо от модели, описывающей континуум, в спектре источника значимо регистрируется особенность вблизи энергии 38 кэВ, скорее всего связанная с циклотронным поглощением. Энергия линии практически не зависит от выбора модели континуума, а вот ее ширина и оптическая глубина оказываются существенно меньше для степенной модели с экспоненциальным завалом.

С целью изучения эволюции спектральных параметров в зависимости от фазы импульса (или, другими словами, от угла обзора излучающих областей нейтронной звезды), была проведена фазово-разрешенная спектроскопия. Принимая во внимание наблюдаемую морфологию профиля импульса, мы разделили данные на десять фазовых интервалов. Для аппроксимации полученных спектров мы использовали модель POWERLAW*HIGHCUT+BB, как и для усредненного спектра. Температура чернотельного излучения плохо определяется в фазовых спектрах,

поэтому она была зафиксирована на значении, полученном для среднего спектра. В результате проведенного анализа было обнаружено, что эмиссионная линия железа присутствует во всех фазах, в то время как циклотронная линия поглощения значимо регистрируется только в пяти фазовых бинах, приходящихся на максимумы излучения. При этом оказалось, что энергия циклотронной линии значительно, от 34 до 39 кэВ, изменяется на масштабе импульса (рис. 6а), достигая максимальных значений вблизи пиков импульса. Такая зависимость энергии от фазы, вероятно, связана с изменениями угла обзора областей, где образуется циклотронная линия (см., например, Лутовинов и др., 2015). Более того, ширина и глубина линии также меняются в течение импульса излучения примерно таким же образом, что и ее энергия. Зависимость параметров континуума от фазы также показана на рис. 7.

Помимо изменений параметров циклотронной линии, на масштабе импульса также наблюдаются

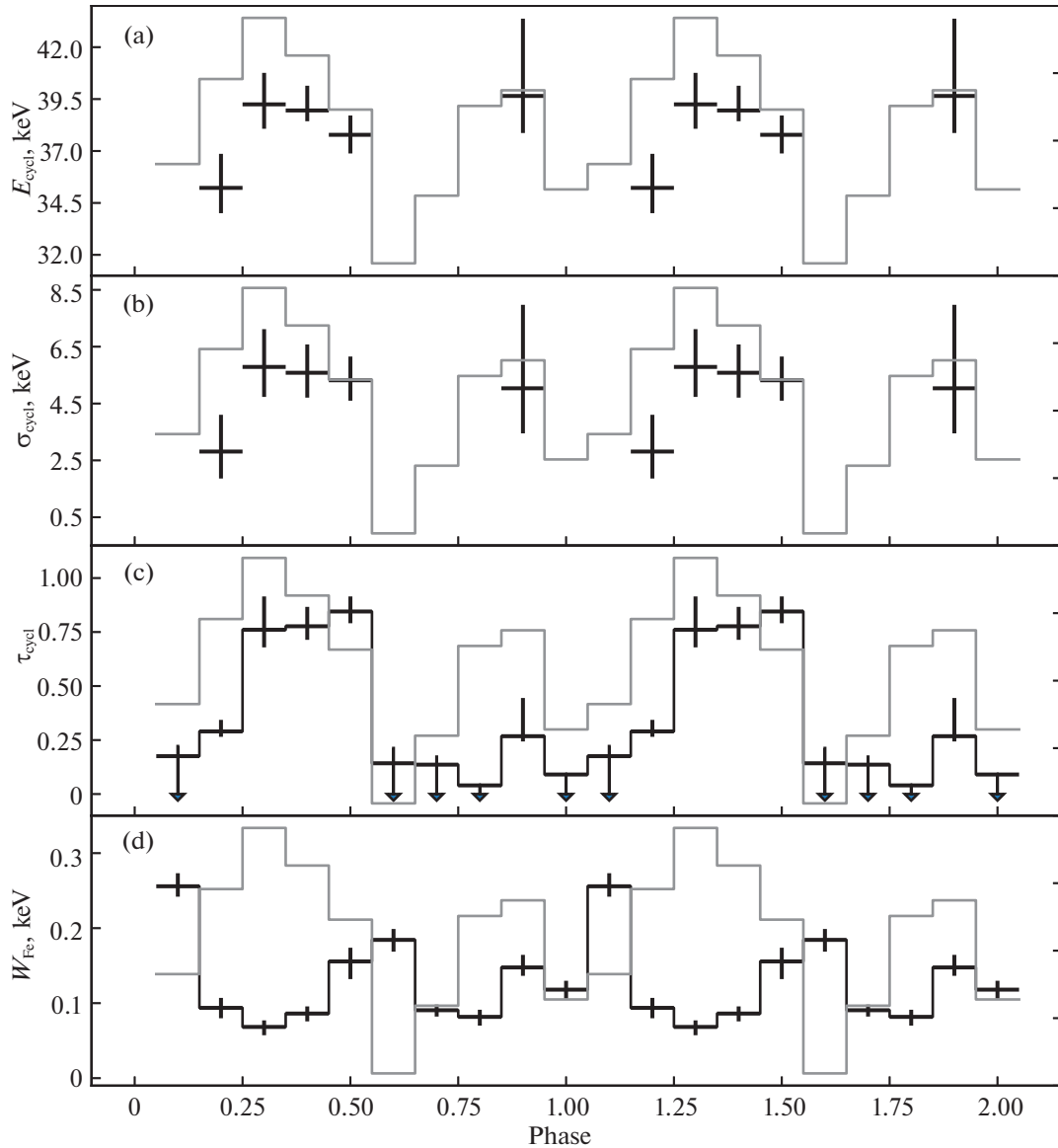


Рис. 6. Зависимость спектральных параметров ХТЕ J1946+274 от фазы импульса: (а) — циклотронная энергия, (б) — ширина циклотронной линии, (с) — оптическая глубина циклотронной линии, (д) — эквивалентная ширина линии железа. Серой линией показан профиль импульса в полном энергетическом диапазоне обсерватории NuSTAR.

значительные изменения эквивалентной ширины линии железа. При этом максимумы эквивалентной ширины сдвинуты по отношению к максимумам профиля импульса (рис. 6d). Похожее поведение наблюдалось ранее для других пульсаров (см., например, Цыганков, Лутовинов, 2009; Штыковский и др. 2017). Этот фазовый сдвиг в случае ХТЕ J1946+274 можно оценить как $\Delta\phi \sim 0.8$. Для определения фазового сдвига проводилась кросс-корреляция, в ходе которой было определено наиболее вероятное значение фазового отклонения. Таким образом, указанный выше фазовый сдвиг соответствует задержке по времени

$\Delta t \sim 12.6$ с при периоде вращения пульсара $P_{\text{spin}} \simeq 15.755$ с. Расстояние, которое пройдут фотоны за 12.6 с, составляет $\sim 3.78 \times 10^{11}$ см. При этом внешний радиус аккреционного диска имеет примерное значение между радиусом циркуляризации $\sim 1.1 \times 10^{12}$ см (радиус, на котором угловой момент вещества на круговой орбите становится равным угловому моменту вещества, перенесенного из точки L1, Хасаяки, Оказаки, 2004) и радиусом полости Роша $\sim 5.6 \times 10^{12}$ см, при этом внутренняя граница аккреционного диска имеет радиус $\sim 6 \times 10^8$ см. Расстояние, соответствующее задержке между максимумами профиля импульса и эквива-

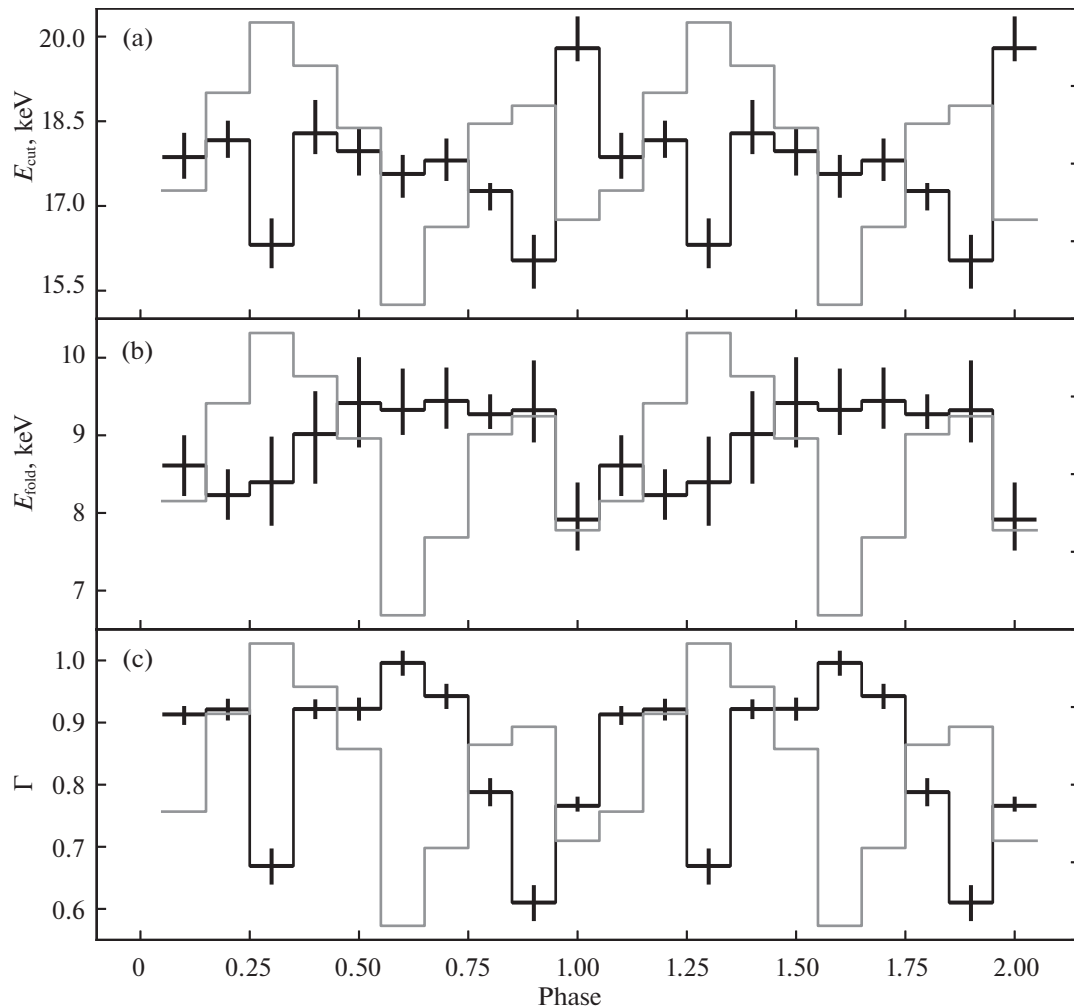


Рис. 7. Зависимость спектральных параметров континуума ХТЕ J1946+274 от фазы импульса: (а) — энергия завала, (b) — энергия экспоненциального спада, (с) — фотонный индекс.

лентной ширины, может примерно соответствовать радиусу аккреционного диска в случае, если отражение происходит на его внешнем крае, который может иметь искривленные области (Штыковский и др., 2017). Приведенные выше оценки показывают, что в этом случае аккреционный диск либо имеет малый размер по сравнению с полостью Роша (Хасаяки, Оказаки, 2004), либо эта задержка может быть больше, чем приведенное выше время на целое число периодов вращения нейтронной звезды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проанализированы данные наблюдений рентгеновского пульсара ХТЕ J1946+274, полученные обсерваторией NuSTAR в июне 2018 г. Показано, что широкополосный спектр источника наилучшим образом может быть описан либо моделью комптонизированного излучения СОМРТТ, либо степенным

законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях, включающими поглощение при низких энергиях и флуоресцентную линию железа на 6.4 кэВ. Кроме того, в спектре была обнаружена циклотронная линия поглощения на энергии ~ 38 кэВ (табл. 1), подтверждающая результаты предыдущих наблюдений (Уилсон и др., 2003; Дорошенко и др., 2017). Измеренная энергия линии позволяет определить напряженность магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $B \sim 3.2 \times 10^{12}$ Гс.

Наблюдаемые профили импульса заметно изменяются с увеличением энергии. На энергиях от 3 до 20 кэВ наблюдаются два пика, которые разделены примерно половиной фазы. Наиболее естественное объяснение этого факта заключается в том, что эти два пика связаны с излучением двух полюсов нейтронной звезды. С увеличением энергии эти пики трансформируются в один пик, который наблюдается до ~ 79 кэВ. Как было указано ранее,

такое поведение, вероятно, связано с эффектом углового перераспределения рентгеновского излучения за счет циклотронного резонансного рассеяния в сильном магнитном поле в сочетании с релятивистскими эффектами, а также геометрией излучающей области (Ферриньо и др., 2011; Шонхерр и др., 2014). Интересно отметить, что переход от двухпиковой структуры к однопиковой происходит в области энергии циклотронной линии. Этот наблюдательный факт хорошо согласуется с похожими результатами, ранее обнаруженными для ряда других рентгеновских пульсаров.

Для исследования поведения источника и параметров его излучения на масштабе одного импульса была проведена фазово-разрешенная спектроскопия, показавшая, что энергия и другие параметры циклотронной особенности значительно изменяются в зависимости от фазы импульса. Изменения наблюдаемых параметров циклотронной линии на масштабе одного оборота нейтронной звезды является достаточно характерным для рентгеновских пульсаров, при этом относительное изменение энергии линии $\sim 30\%$ для ХТЕ J1946+274 хорошо согласуется со значениями, измеренными для ряда других пульсаров (Штауберт и др., 2019). Важное значение для объяснения наблюдаемой модуляции параметров линии имеет светимость источника, от которой, в свою очередь, зависит физическая картина формирования наблюдаемого излучения.

Как было показано выше, светимость пульсара во время наблюдения NuSTAR составляет $L_x \sim 3 \times 10^{37}$ эрг с^{-1} , что близко к значению критической светимости, соответствующей появлению радиационно-доминированной аккреционной колонки как с теоретической (Баско, Сюняев, 1976; Бекер и др., 2012; Муштуков и др., 2015), так и с наблюдательной (пульсар V0332+53, Дорошенко и др., 2017) точек зрения. Таким образом, учитывая сходство наблюдаемых параметров ХТЕ J1946+274 и V0332+53 (Лутовинов и др., 2015), можно предположить наличие аккреционной колонки в обоих случаях. Это позволяет описать наблюдательные изменения параметров циклотронной линии в рамках модели Поутанена и др. (2013), в которой линия циклотронного поглощения образуется в отраженном от поверхности нейтронной звезды излучении. При этом интересно отметить, что несмотря на то, что источник наблюдался при разных светимостях (от 5×10^{36} до 5×10^{37} эрг с^{-1}), каких-либо изменений энергии линии обнаружено не было (Марку-Четам и др., 2015; Дорошенко и др., 2017).

Проведенная фазовая спектроскопия также показала, что максимумы эквивалентной ширины линии железа не совпадают с максимумами профиля

импульса. Это позволило определить время задержки (~ 12.6 с) между пиками излучения и эквивалентной ширины, что соответствует расстоянию $\sim 3.8 \times 10^{11}$ см. Полученное значение более чем на два порядка величины превышает внутренний размер аккреционного диска, но в то же время оказывается значительно меньшим по сравнению с расстоянием до звезды-компаньона в системе. Принимая во внимание, что флуоресцентная линия железа образуется в результате отражения жесткого рентгеновского излучения, испущенного вблизи нейтронной звезды, достаточно холодным веществом, возможно предположить, что область его формирования находится на внешней границе аккреционного диска. При этом данная область должна быть достаточно компактна, чтобы обеспечить наблюдаемую переменность эквивалентной ширины линии железа с фазой импульса.

Исследование проведено с использованием данных, полученных с помощью NuSTAR, проекта Caltech, финансируемого NASA и управляемого NASA/JPL, и данных, предоставленных UK Swift Science Data Centre (анализ данных XRT). Также в этом исследовании использовались программное обеспечение, предоставленное Исследовательским центром архива астрофизики высоких энергий (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center, HEASARC), который является службой отдела астрофизических наук NASA/GSFC (Astrophysics Science Division). Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-12-00423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айер и др. (N. Iyer, D. Mukherjee, G.C. Dewangan, D. Bhattacharya, and S. Seetha), *MNRAS* **454**, 741 (2015).
2. Арнасон и др. (R.M. Arnason, H. Papei, P. Barmby, A. Bahramian, and M.D. Gorski), *MNRAS* **502**, 5455 (2021).
3. Арно и др. (K. Arnaud, B. Dorman, and C. Gordon), *Astrophys. Source Code Library* 10005 (1999).
4. Баско, Сюняев (M.M. Basko and R.A. Sunyaev), *MNRAS* **175**, 395 (1976).
5. Бекер и др. (P.A. Becker, D. Klochkov, G. Schnherr, et al.), *Astron. Astrophys.* **544**, A123 (2012).
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. Верречиа и др. (F. Verrecchia, G.L. Israel, I. Negueruela, et al.), *Astron. Astrophys.* **393**, 1983 (2002).
8. Гайя (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A1 (2018).

9. Дженке и др. (P. Jenke, C.A. Wilson-Hodge, and C. Malacaria), *Astron. Telegram*. 11700 (2018).
10. Дикей, Локман (J.M. Dickey and F.J. Lockman), *АРАА* **28**, 215 (1990).
11. Дорошенко и др. (V. Doroshenko, S.S. Tsygankov, A.A. Mushtukov, A.A. Lutovinov, A. Santangelo, V.F. Suleimanov, and J. Poutanen), *MNRAS* **466**, 2143 (2016).
12. Дорошенко и др. (R. Doroshenko, A. Santangelo, V. Doroshenko, and S. Piraino), *Astron. Astrophys.* **600**, 1 (2017).
13. Кабаллеро и др. (I. Caballero, K. Pottschmidt, E. Bozzo, et al.), *Astron. Telegram*. 2692 (2010).
14. Кампана и др. (S. Campana, G. Israel, and L. Stella), *Astron. Astrophys.* **352**, L91 (1999).
15. Кримм и др. (H.A. Krimm, S.D. Barthelmy, W. Baumgartner, et al.), *Astron. Telegram*. 2663 (2010).
16. Лутовинов, Цыганков (A.A. Lutovinov and S.S. Tsygankov), *Astron. Lett.* **35**, 433 (2009).
17. Лутовинов и др. (A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, V.F. Suleimanov, et al.), *MNRAS* **448**, 2175 (2015).
18. Лутовинов и др. (A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, K.A. Postnov, et al.), *MNRAS* **466**, 593 (2016).
19. Майтра, Пол (S. Maitra and B. Paul), *Astrophys. J.* **771**, 96 (2013).
20. Марку-Четам и др. (D.M. Marcu-Cheatham, K. Pottschmidt, M. Kuhnel, et al.), *Astrophys. J.* **815**, 44 (2015).
21. Муштуков и др. (A.A. Mushtukov, V.F. Suleimanov, S.S. Tsygankov, and J. Poutanen), *MNRAS* **447**, 1847 (2015).
22. Мюллер и др. (S. Muller, M. Kuhnel, I. Caballero, et al.), *Astron. Astrophys.* **546**, 125 (2012).
23. Озбей Арабаси и др. (M. Ozbey Arabaci, A. Camero-Agranz, C. Zurita, J. Gutierrez-Soto, E. Nespoli, J. Suso, F. Kiaeerad, J. Garcia-Rojas, and U. Kiziloglu), *Astron. Astrophys.* **582**, 9 (2015).
24. Пoutанен и др. (J. Poutanen, A.A. Mushtukov, V.F. Suleimanov, S.S. Tsygankov, D.I. Nagirner, V.A. Doroshenko, and A.A. Lutovinov), *Astrophys. J.* **777**, 115 (2013).
25. Смит, Такешима (D.A. Smith and T. Takeshima), *IAU Circ.* **7014**, 1 (1998a).
26. Смит, Такешима (D.A. Smith and T. Takeshima), *Astron. Telegram*. 36 (1998b).
27. Уилингейл и др. (R. Willingale, R.L.C. Starling, A.P. Beardmore, N.R. Tanvir, and P.T. O'Brien), *MNRAS* **431**, 394 (2013).
28. Уилсон и др. (C.A. Wilson, M.H. Finger, R.B. Wilson, and D.M. Scott), *IAU Circ.* **7014**, 2 (1998).
29. Уилсон и др. (C.A. Wilson, M.H. Finger, M.J. Coe, and I. Negueruela), *Astrophys. J.* **996**, 584 (2003).
30. Ферриньо и др. (C. Ferrigno, P.A. Becker, A. Segreto, et al.), *Astron. Astrophys.* **498**, 825 (2009).
31. Ферриньо и др. (C. Ferrigno, M. Falanga, E. Bozzo, P.A. Becker, D. Klochkov, and A. Santangelo), *Astron. Astrophys.* **532**, A76 (2011).
32. Фингер (M.H. Finger), *Astron. Telegram*. 2847 (2010).
33. Харрисон (F.A. Harrison, et al.), *Astrophys. J.* **770**, 103 (2013).
34. Хейндл и др. (W.A. Heindl, W. Coburn, D.E. Gruber, et al.), *Astrophys. J.* **563**, L35 (2001).
35. Хемпфилл и др. (P.B. Hemphill, R.E. Rothschild, and I. Caballero), *Astrophys. J.* **777**, 61 (2013).
36. Цыганков, Лутовинов (S.S. Tsygankov and A.A. Lutovinov), *Proc. The Extreme Sky: Sampling the Universe above 10 keV*, 70 (2009).
37. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, A.A. Lutovinov, E.M. Churazov, and R.A. Sunyaev), *MNRAS* **371**, 19 (2006).
38. Цыганков и др. С.С., Лутовинов А.А., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **33**, (2007) [S.S. Tsygankov, A.A. Lutovinov, E.M. Churazov, and R.A. Sunyaev), *Astron. Lett.* **33**, 368 (2007)].
39. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, A.A. Lutovinov, R.A. Krivonos, S.V. Molkov, P.J. Jenke, M.H. Finger, and J. Poutanen), *MNRAS* **457**, 258 (2015).
40. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, R. Wijnands, A.A. Lutovinov, N. Degenaar, and J. Poutanen), *MNRAS* **470**, 126 (2017).
41. 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, 8 (2017).
42. Штыковский А.Е., Лутовинов А.А., Арефьев В.А., Мольков С.В., Цыганков С.С., Ревнивцев М.Г., Письма в Астрон. журн. **43**, 203 (2017) [A.E. Shtykovsky, A.A. Lutovinov, V.A. Arefiev, S.V. Molkov, S.S. Tsygankov, and M.G. Revnivitsev), *Astron. Lett.* **43**, 175 (2017)].
43. Шонхерр и др. (G. Schonherr, F.-W. Schwarm, S. Falkner, T. Dauser, C. Ferrigno, M. Khnel, D. Klochkov, P. Kretschmar, et al.), *Astron. Astrophys.* **564**, L8 (2014).
44. Штауберт и др. (R. Staubert, J. Trumper, E. Kendziorra, D. Klochkov, K. Postnov, P. Kretschmar, K. Pottschmidt, F. Haberl, et al.), *Astron. Astrophys.* **622**, A61 (2019).
45. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, R.L.C. Starling, D.N. Burrows, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).