

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ КАНДИДАТА В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ GRS 1739-278

© 2019 г. С. Д. Быков^{1,2*}, Е. В. Филиппова^{1**},
И. А. Мереминский¹, А. Н. Семена¹, А. А. Лутовинов^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 30.10.2018 г.; после доработки 28.11.2018 г.; принята к публикации 28.11.2018 г.

Проведен совместный спектральный и временной анализ вспышки системы GRS 1739-278 в 2014 г. по данным обсерваторий Swift и ИНТЕГРАЛ. Показано, что во время этой вспышки система продемонстрировала оба промежуточных состояния: жесткое и мягкое. От системы зарегистрированы пики квазипериодических осцилляций (КПО) в диапазоне частот 0.1–5 Гц, которые классифицированы как КПО типа С. С помощью данных телескопа Swift/BAT показано, что после вспышки 2014 г. система перешла в режим мини-вспышечной активности: помимо упомянутых в литературе трех мини-вспышек в работе было обнаружено еще 4 мини-вспышки со сравнимым (~ 20 мКраб) потоком в жестком диапазоне энергий (15–50 кэВ). Исследовано влияние предыстории аккреции на характеристики вспышки: получена зависимость максимального потока излучения в жестком диапазоне энергий в низком/жестком состоянии от временного интервала между текущим максимумом и предыдущим (для вспышек, во время которых система переходила в высокое/мягкое состояние).

Ключевые слова: рентгеновские новые, черные дыры, аккреция, GRS 1739-278.

DOI: 10.1134/S0320010819030021

ВВЕДЕНИЕ

Во время вспышек транзистентные системы с кандидатами в черные дыры демонстрируют несколько характерных состояний. Для их классификации используют диаграммы “жесткость–поток” и “жесткость–переменность”, на которых системы, как правило, демонстрируют характерные зависимости (Гребенев и др., 1993; Танака, Шибазак, 1996; Ремиллард, МакКлинток, 2006; Беллони, 2010, 2016). Изначально было обнаружено два состояния таких систем — низкое/жесткое и высокое/мягкое (Ремиллард, МакКлинток, 2006, и ссылки там же). Согласно наиболее распространенной модели аккреционного потока, в таких системах считается, что в низком/жестком состоянии аккреционный диск обрезан на большом внутреннем радиусе, а область между диском и компактным объектом заполнена оптически тонкой горячей плазмой — короной, которая дает основной вклад в излучение источника в виде степенного закона с завалом на высоких энергиях. По мере развития

вспышки внутренний радиус аккреционного диска уменьшается и в высоком/мягком состоянии аккреционный диск дает основной вклад в излучение системы (Гребенев и др., 1997; Гильфанов, 2010).

В дальнейшем было обнаружено, что между этими хорошо определенными состояниями система может находиться в переходных, устоявшаяся классификация которых на сегодняшний день отсутствует (Ремиллард, МакКлинток, 2006; Беллони, 2016). В настоящей работе мы использовали классификацию, приведенную в работе Беллони (2016), согласно которой источник демонстрирует промежуточные жесткое и мягкое состояния. Они характеризуются наличием как тепловой, так и степенной компоненты в энергетическом спектре источника, однако с точки зрения спектральных характеристик отличаются несильно. Тем не менее есть несколько отличительных особенностей этих состояний. В промежуточном жестком (а также низком/жестком) состоянии в спектре мощности излучения источника часто наблюдаются пики квазипериодических осцилляций (КПО) типа С и широкополосный шум на низких частотах с мощностью переменности обеих компонент десятки процентов. В промежуточном мягком

* Электронный адрес: sdbykov@edu.hse.ru

** Электронный адрес: kate@iki.rssi.ru

состоянии регистрируются КПО типа В, имеющие, как правило, мощность переменности несколько процентов, и слабый ($rms < 10\%$), зависящий от частоты шум на низких частотах (Белонни, 2016). Частота КПО имеет обратную (тип С) и прямую (тип В) зависимость от потока в степенной компоненте (Мотта и др., 2011). Наиболее популярная модель формирования КПО основана на прецессии Лензе-Тирринга горячей короны вблизи компактного объекта (Инграм и др., 2009), однако полная физическая картина формирования КПО разных типов отсутствует. В низком/жестком и промежуточном жестком состояниях системы с кандидатами в черные дыры наблюдаются в радиодиапазоне. Во время перехода в промежуточное мягкое состояние источник пересекает так называемую “линию струй” и перестает излучать в радиодиапазоне (Ремиллард, МакКлинток, 2006; Беллони, 2010). Таким образом, исследование промежуточных состояний необходимо для более детального изучения физических процессов, отвечающих за формирование КПО и струй.

Считается, что во время вспышки система должна перейти из низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние и обратно, демонстрируя промежуточные состояния и характерную “q”-форму на диаграмме “жесткость—поток” (Беллони, 2016). Однако многие источники с кандидатами в черные дыры демонстрируют так называемые провалившиеся вспышки, когда система не доходит до высокого/мягкого состояния (Ферригно и др., 2012, 2014а; Дель Санто и др., 2015; Мереминский и др., 2017).

Одна и та же система может демонстрировать оба типа вспышек (Мотта и др., 2010; Фюрст и др., 2015; Мереминский и др., 2017), причем один и тот же тип вспышек происходит при отличающихся в десятки раз максимальных светимостях. Например, в системе GRS 1739-278 переход в высокое/мягкое состояние наблюдался как во время ярких вспышек, когда максимум потока достигал 300 мКраб (15–50 кэВ), так и во время минивспышек с максимумом потока 40 мКраб (15–50 кэВ) (Ян, Ю, 2017). При этом разные типы вспышек происходят при близких максимальных светимостях — в той же системе GRS 1739-278 была зарегистрирована “провалившаяся” вспышка при максимальном потоке 30 мКраб в диапазоне энергий 15–50 кэВ (Мереминский и др., 2017).

В настоящее время нет полного понимания, какие физические условия необходимы для перехода системы из низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние, однако понятно, что не только изменение темпа аккреции отвечает за этот процесс. Даже в рамках одной полноценной вспышки источника на диаграмме “жесткость—поток” наблюдается

гистерезисное поведение — переход из жесткого в мягкое состояние происходит при светимостях в несколько (и даже десятки) раз больше, чем светимость при переходе из мягкого состояния в жесткое. В качестве дополнительных параметров рассматриваются размер короны (Хоман и др., 2001), размер аккреционного диска (Смит и др., 2001), история эволюции внутреннего радиуса аккреционного диска (Здзиарски и др., 2004), масса аккреционного диска (Ю и др., 2004; Ю, Ян, 2009). В работах Ю и др. (2007), Ву и др. (2010) была обнаружена корреляция между светимостью, при которой происходит переход из низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние, и максимальной светимостью в высоком/мягком состоянии, на основе которой была выдвинута идея о влиянии массы аккреционного диска на эволюцию вспышки, и корреляция между максимумом потока в низком/жестком состоянии и временным интервалом между текущим и предыдущим максимумом потока в низком/жестком состоянии. На основе этих зависимостей авторы предположили, что максимум светимости в низком/жестком состоянии также определяется массой аккреционного диска, накопленного между вспышками. В работах Ю и др. (2004, 2009) для построения зависимости между светимостью перехода из низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние и максимальной светимостью в высоком/мягком состоянии в основном использовались маломассивные системы с нейтронными звездами, которые составляли около 70% используемых выборок. А корреляция между максимумом потока в низком/жестком состоянии и временным интервалом между текущим и предыдущим максимумом потока в низком/жестком состоянии получена только для одной системы GX 339-4 (на основе восьми вспышек, зарегистрированных с 1991 по 2006 г., и требует дальнейшего подтверждения по данным для вспышек с 2006 по 2018 г.). Таким образом, для развития физической модели вспышек двойных систем с кандидатами в черные дыры необходимо исследование транзитных систем, демонстрирующих несколько вспышек, что позволяет измерять эволюцию параметров системы от вспышки к вспышке. К числу таких источников относится система GRS 1739-278.

Система GRS 1739-278

Рентгеновский источник GRS 1739-278 был открыт телескопом с кодирующей маской SIGMA обсерватории GRANAT 18 марта 1996 г. (Поль и др., 1996). Максимальный поток от источника во время первой зарегистрированной вспышки составил ~800–1000 мКраб в диапазоне энергий 2–10 кэВ (Бороздин и др., 1998). Соответствующий

радиоисточник был обнаружен в работе Дурошо и др. (1996). Во время вспышки 1996 г. система перешла из низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние (Бороздин и др., 1998). У источника были обнаружены пики КПО на частоте 5 Гц (Бороздин, Трудолюбов, 2000). Исходя из формы спектра мощности и полной мощности переменности, можно сделать вывод, что система была зарегистрирована в промежуточном мягком состоянии, а зарегистрированное КПО относится к типу В.

Вторая по счету вспышка была зарегистрирована монитором Swift/BAT 9 марта 2014 г. (Кримм и др., 2014). Спектральный анализ этой вспышки по данным телескопа Swift/XRT был проведен в работах Ю, Ян (2017), Ванг и др. (2018), в которых было показано, что за время вспышки система перешла из низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние через промежуточное, однако детального анализа промежуточного состояния сделано не было. В начале вспышки (19 марта 2014 г.) система также была зарегистрирована обсерваторией ИНТЕГРАЛ. Согласно анализу этих данных источник регистрировался до энергий порядка 200 кэВ, а энергетический спектр аппроксимировался степенным законом с завалом со следующими параметрами: фотонный индекс $\Gamma = 1.4 \pm 0.2$, энергия завала $E_{cut} P_{-20}^{+40}$ кэВ (Филиппова и др., 2014б). Через 17 дней после начала вспышки (26 марта 2014 г.) были проведены наблюдения источника обсерваторией NuSTAR (Миллер и др., 2015). Спектральный анализ данных обсерватории NuSTAR показал, что система продолжает находиться в низком/жестком состоянии. В спектре источника наблюдалась отраженная компонента жесткого излучения, предположительно связанная с аккреционным диском, внутренний радиус которого должен доходить до последней устойчивой орбиты, однако самой дисковой компоненты при этом в спектре зарегистрировано не было. В работе Мереминского и др. (2018) был проведен детальный временной анализ данных обсерватории NuSTAR, на основе которого в спектре мощности переменности излучения системы GRS 1739-278 были зарегистрированы КПО на частотах 0.3–0.7 Гц. В работе Ванг и др. (2018) на основе данных монитора MAXI было показано, что система перешла обратно из высокого/мягкого в низкое/жесткое состояние в период ноября–декабря 2014 г.

Через 200 дней после этой вспышки от системы были зарегистрированы две мини-вспышки (максимальный поток в диапазоне энергий 15–50 кэВ составил ~ 40 мКраб). Спектральный анализ данных Swift/XRT показал, что во время этих мини-вспышек система перешла из низкого/жесткого

состояния в высокое/мягкое и вернулась обратно в низкое/жесткое (Ю, Ян, 2017).

Следующая вспышка от источника была зарегистрирована в сентябре 2016 г. (Мереминский и др., 2016). Во время этой вспышки максимальный поток в диапазоне энергий 20–60 кэВ составил ~ 30 мКраб. На основе анализа данных обсерваторий ИНТЕГРАЛ и Swift было показано, что во время вспышки система находилась в низком/жестком состоянии и не продемонстрировала переход в высокое состояние, т.е. вспышка оказалась “провалившейся” (Мереминский и др., 2017). Было зарегистрировано некоторое умягчение спектра — фотонный индекс увеличился с 1.73 в начале вспышки до 1.86 в максимуме потока, при этом степенной закон наблюдался вплоть до энергий ~ 150 кэВ без завалов, вклад в излучение от аккреционного диска зарегистрирован не был.

В настоящей работе было впервые проведено одновременное исследование спектральной эволюции и временной переменности системы на протяжении всей вспышки 2014 г., что позволило детально классифицировать промежуточные состояния источника, сделать сравнительный анализ поведения системы во всех зарегистрированных на сегодняшний день вспышках, а также исследовать поведение системы между вспышками.

НАБЛЮДЕНИЯ

Данные обсерватории Swift

Система GRS 1739-278 во время вспышки 2014 г. наблюдалась телескопом Swift/XRT в тайминговом оконном режиме (windowed-timing mode) (Барроус и др., 2005) с 2014-03-20 (56736 MJD) по 2014-11-01 (56962 MJD), т.е. наблюдения начались на 11-й день после начала вспышки. Всего было проведено 39 наблюдений с ObsID 000332030XY, далее мы будем использовать две последние цифры для обозначения номера наблюдения.

Кривые блеска и спектры источника по данным Swift/XRT были получены с помощью онлайн-сервиса обработки данных (Эванс и др., 2007). Для анализа энергетических спектров были отобраны события, имеющие тип (grade) 0. Спектры источника исследовались в диапазоне энергий 0.8–10 кэВ, поскольку на энергиях ниже 0.8 кэВ из-за инструментальных эффектов матрица отклика известна неточно. Полученные через онлайн-сервис спектры посредством сложения отсчетов в разных бинах были приведены с помощью утилиты `grprha` к виду, при котором на энергетический канал приходилось как минимум 100 отсчетов. Это позволило использовать χ^2 статистику при аппроксимации спектров в пакете Xspec (Арно, 1996). В

Таблица 1. Параметры моделей наилучшей аппроксимации энергетических спектров, полученных по данным XRT

ID^a	MJD- -56000 ^b	Эксп. XRT ^c с	N_H^d , 10^{22} см ⁻²	Γ^e	T_{in} , кэВ ^f	$R_{in} \cos^{-1/2}(i)$, км ^g	Поток ^h	f_{po}^j	χ_N^2/dof
01	736	79	$1.51^{+0.67}_{-0.63}$	$1.24^{+0.37}_{-0.36}$	—	—	$1.57^{+0.13}_{-0.29}$	100	0.31/7
02	741	2067	1.64 ± 0.04	1.38 ± 0.03	—	—	3.49 ± 0.04	100	1.09/459
03	742	1924	1.65 ± 0.03	1.38 ± 0.02	—	—	4.53 ± 0.04	100	1.06/496
			$2.08^{+0.11}_{-0.1}$	1.5	$0.24^{+0.02}_{-0.03}$	$196.05^{+70.17}_{-52.37}$	$4.44^{+0.03}_{-0.04}$	89 ± 5	1.11/495
			2.96 ± 0.09	1.8	0.18 ± 0.01	$1378.65^{+235.78}_{-198.48}$	4.2 ± 0.03	51 ± 4	1.64/495
04 [†]	747	2463	$1.82^{+0.08}_{-0.06}$	$2.05^{+0.08}_{-0.04}$	—	—	$7.29^{+0.07}_{-0.08}$	100	1.3/598
			$1.52^{+0.08}_{-0.02}$	1.5	$0.79^{+0.04}_{-0.06}$	$15.7^{+3.94}_{-0.73}$	$7.87^{+0.06}_{-0.11}$	82 ± 4	1.28/597
			$1.74^{+0.08}_{-0.06}$	1.8	$0.65^{+0.05}_{-0.09}$	$19.22^{+6.33}_{-3.96}$	$7.62^{+0.03}_{-0.1}$	90 ± 5	1.27/597
			$1.9^{+0.09}_{-0.07}$	2	$0.51^{+0.05}_{-0.06}$	$25.76^{+12.89}_{-10.15}$	$7.41^{+0.03}_{-0.23}$	94 ± 4	1.28/597
05 [†]	751	1832	$1.57^{+0.08}_{-0.07}$	1.88 ± 0.05	—	—	$6.76^{+0.06}_{-0.05}$	100	1.17/552
			1.37 ± 0.06	1.5	$0.76^{+0.1}_{-0.06}$	$12.72^{+1.98}_{-1.51}$	$7.17^{+0.05}_{-0.14}$	88 ± 5	1.18/551
			$1.62^{+0.07}_{-0.1}$	1.8	$0.55^{+0.15}_{-0.1}$	$18.49^{+13.25}_{-6.13}$	$6.87^{+0.03}_{-0.2}$	96 ± 4	1.17/551
			$1.85^{+0.1}_{-0.07}$	2	$0.26^{+0.1}_{-0.03}$	$143.63^{+22}_{-71.44}$	$6.62^{+0.04}_{-0.08}$	93 ± 7	1.18/551
06	757	1811	2.26 ± 0.03	2.25 ± 0.02	—	—	$10.67^{+0.07}_{-0.08}$	100	1.43/496
			1.74 ± 0.03	1.5	1.12 ± 0.04	$14.24^{+0.94}_{-0.85}$	$10.56^{+0.07}_{-0.11}$	53 ± 4	1.28/495
			1.85 ± 0.03	1.8	1.13 ± 0.05	$12.09^{+0.97}_{-0.84}$	10.51 ± 0.1	66 ± 6	1.25/495
			1.95 ± 0.03	2	$1.21^{+0.06}_{-0.07}$	$9.21^{+0.81}_{-0.68}$	$10.46^{+0.09}_{-0.10}$	75 ± 8	1.25/495
07	761	1612	2.15 ± 0.03	2.11 ± 0.02	—	—	$8.35^{+0.06}_{-0.05}$		1.53/514
			$2.15^{+0.05}_{-0.04}$	1.5	0.61 ± 0.02	$41.96^{+4.7}_{-4.21}$	$8.9^{+0.05}_{-0.1}$	70 ± 2	1.13/513
			$2.31^{+0.06}_{-0.05}$	1.8	0.49 ± 0.02	$62.57^{+10.74}_{-9.27}$	$8.68^{+0.05}_{-0.08}$	78 ± 3	1.1/513
			2.43 ± 0.07	2	$0.4^{+0.03}_{-0.02}$	$97.64^{+24.37}_{-20.61}$	$8.47^{+0.03}_{-0.1}$	82 ± 4	1.21/513
08*	764	808	2.27 ± 0.05	2.28 ± 0.03	—	—	$10.11^{+0.11}_{-0.10}$	100	1.36/366
			1.69 ± 0.04	1.5	1.17 ± 0.06	$13.15^{+1.23}_{-1.07}$	$9.91^{+0.11}_{-0.2}$	48 ± 7	1.16/365
			1.79 ± 0.05	1.8	1.2 ± 0.07	$11.27^{+1.15}_{-0.94}$	$9.86^{+0.16}_{-0.21}$	60 ± 10	1.16/365
			1.89 ± 0.05	2	$1.28^{+0.08}_{-0.09}$	$9.13^{+0.89}_{-0.73}$	$9.80^{+0.17}_{-0.14}$	67 ± 12	1.16/365
09 [†]	771	1872	$1.75^{+0.1}_{-0.11}$	2.08 ± 0.08	—	—	$6.14^{+0.11}_{-0.07}$	100	1.14/504
			$1.4^{+0.07}_{-0.09}$	1.5	$0.84^{+0.12}_{-0.07}$	$12.87^{+2.9}_{-2.89}$	$6.57^{+0.09}_{-0.14}$	81 ± 7	1.14/503
			$1.58^{+0.1}_{-0.09}$	1.8	$0.73^{+0.16}_{-0.1}$	$12.53^{+6.32}_{-4.37}$	$6.39^{+0.07}_{-0.18}$	90 ± 8	1.14/503
			$1.74^{+0.1}_{-0.08}$	2	$0.63^{+0.29}_{-0.15}$	$11.57^{+13.53}_{-8.42}$	$6.21^{+0.04}_{-0.19}$	96 ± 7	1.14/503
10*	776	1507	2.73 ± 0.04	2.22 ± 0.02	—	—	$16.94^{+0.1}_{-0.12}$	100	1.37/525
			2.32 ± 0.04	2	1.42 ± 0.06	$9.53^{+0.57}_{-0.52}$	$16.45^{+0.16}_{-0.14}$	68 ± 9	1.09/524
			$2.51^{+0.05}_{-0.06}$	2.4	$1.85^{+0.06}_{-0.05}$	$6.05^{+0.58}_{-0.6}$	$16.26^{+0.1}_{-0.26}$	66 ± 9	1.12/524
			1.8 ± 0.02	—	1.72 ± 0.02	$10.09^{+0.24}_{-0.23}$	$15.53^{+0.09}_{-0.13}$	0	1.64/525

Таблица 1. Продолжение

ID^a	MJD- -56000 ^b	Эксп. ХРТ ^c с	N_H^d , 10^{22} см^{-2}	Γ^e	T_{in} , кэВ ^f	$R_{in} \cos^{-1/2}(i)$, км ^g	Поток ^h	f_{po}^j	χ^2_N/dof
11*†	781	1922	$2.37^{+0.13}_{-0.09}$	$1.72^{+0.08}_{-0.03}$	—	—	$27.3^{+0.34}_{-0.41}$	100	1.74/525
			$1.92^{+0.09}_{-0.05}$	2	$1.45^{+0.03}_{-0.06}$	$15.95^{+1.6}_{-1.49}$	$19.76^{+0.22}_{-0.3}$	11 ± 7	1.11/524
			$2.02^{+0.11}_{-0.18}$	2.4	$1.46^{+0.07}_{-0.08}$	$16.07^{+1.39}_{-1.91}$	$19.63^{+0.27}_{-0.32}$	11 ± 8	1.11/524
			$1.81^{+0.12}_{-0.06}$	—	$1.49^{+0.05}_{-0.07}$	$15.58^{+1.87}_{-1.24}$	$19.55^{+0.18}_{-0.76}$	0	1.12/525
12	786	1868	2.38 ± 0.03	2.3 ± 0.02	—	—	$8.64^{+0.06}_{-0.05}$	100	1.18/495
			2.04 ± 0.03	2	1.14 ± 0.06	$9.73^{+0.86}_{-0.72}$	8.49 ± 0.08	74 ± 6	0.99/494
			2.25 ± 0.04	2.4	$1.70^{+0.08}_{-0.06}$	$4.2^{+0.54}_{-0.58}$	$8.36^{+0.04}_{-0.13}$	77 ± 9	1.04/494
13*	791	1887	2.34 ± 0.03	2.34 ± 0.02	—	—	$7.67^{+0.05}_{-0.07}$	100	1.16/497
			1.96 ± 0.03	2	1.13 ± 0.05	$9.76^{+0.77}_{-0.66}$	$7.55^{+0.07}_{-0.08}$	71 ± 6	0.99/496
			2.12 ± 0.04	2.4	1.58 ± 0.05	$4.88^{+0.47}_{-0.50}$	$7.37^{+0.04}_{-0.08}$	78 ± 9	1.02/496
			1.48 ± 0.02	—	1.55 ± 0.02	8.27 ± 0.19	$6.96^{+0.04}_{-0.07}$	0	1.99/497
14*†	796	2098	$2.85^{+0.09}_{-0.07}$	$2.27^{+0.11}_{-0.03}$	—	—	$9.67^{+0.07}_{-0.09}$	100	1.43/542
			$2.09^{+0.07}_{-0.08}$	2	1.25 ± 0.05	$11.74^{+0.64}_{-1.62}$	$8.31^{+0.07}_{-0.16}$	43 ± 10	1.09/541
			2.34 ± 0.09	2.4	1.28 ± 0.07	$10.65^{+1.59}_{-0.99}$	$8.17^{+0.08}_{-0.14}$	54 ± 10	1.09/541
			$1.59^{+0.09}_{-0.01}$	—	$1.42^{+0.06}_{-0.04}$	$10.68^{+0.79}_{-0.82}$	7.66 ± 0.07	0	1.33/542
15	801	1988	2.46 ± 0.03	2.39 ± 0.02	—	—	$8.68^{+0.07}_{-0.06}$	100	1.34/472
			2.01 ± 0.03	2	1.16 ± 0.05	$10.86^{+0.75}_{-0.65}$	$8.48^{+0.08}_{-0.10}$	65 ± 6	1.06/471
			2.22 ± 0.05	2.4	$1.48^{+0.05}_{-0.04}$	$6.06^{+0.53}_{-0.56}$	$8.36^{+0.04}_{-0.12}$	73 ± 10	1.08/471
			1.57 ± 0.02	—	1.52 ± 0.02	$9.31^{+0.23}_{-0.22}$	$7.87^{+0.05}_{-0.06}$	0	1.81/472
16*	806	1889	2.29 ± 0.03	2.35 ± 0.02	—	—	$6.74^{+0.04}_{-0.05}$	100	1.12/524
			2.01 ± 0.03	2	0.92 ± 0.05	$12.82^{+1.33}_{-1.13}$	$6.76^{+0.04}_{-0.06}$	78 ± 4	1.05/523
			2.25 ± 0.03	2.4	$1.72^{+0.24}_{-0.14}$	$2.28^{+0.69}_{-0.78}$	$6.65^{+0.03}_{-0.16}$	92 ± 8	1.11/523
			1.43	—	1.52	8.08	6.05	0	3.08/524
17*†	811	2045	$3.13^{+0.15}_{-0.39}$	$2.29^{+0.05}_{-0.03}$	—	—	10.6 ± 0.12	100	1.77/504
			$2.0^{+0.07}_{-0.11}$	2	$1.25^{+0.08}_{-0.04}$	$13.28^{+1.06}_{-1.55}$	$8.69^{+0.16}_{-0.26}$	29 ± 7	1.11/503
			$2.19^{+0.07}_{-0.12}$	2.4	$1.26^{+0.06}_{-0.05}$	$12.72^{+1.28}_{-1.26}$	$8.61^{+0.08}_{-0.13}$	37 ± 13	1.12/503
			$1.66^{+0.09}_{-0.02}$	—	$1.42^{+0.04}_{-0.07}$	$11.31^{+1.27}_{-0.67}$	$8.37^{+0.04}_{-0.32}$	0	1.23/504
19*	823	2355	2.0 ± 0.03	2	1.29 ± 0.03	$9.94^{+0.32}_{-0.3}$	$6.7^{+0.06}_{-0.04}$	41 ± 5	1.07/519
			2.15 ± 0.05	2.4	1.4 ± 0.02	8.23 ± 0.28	$6.64^{+0.05}_{-0.06}$	47 ± 7	1.12/519
			1.72 ± 0.02	—	1.46 ± 0.01	$9.22^{+0.18}_{-0.17}$	$6.43^{+0.03}_{-0.04}$	0	1.43/520
20†	826	1922	$2.65^{+0.03}_{-0.11}$	$2.58^{+0.07}_{-0.08}$	—	—	$6.76^{+0.05}_{-0.07}$	100	1.22/503
			$1.82^{+0.07}_{-0.03}$	2	$1.08^{+0.04}_{-0.06}$	$11.3^{+1.89}_{-0.95}$	$6.52^{+0.06}_{-0.14}$	64 ± 11	1.11/502
			$2.14^{+0.1}_{-0.03}$	2.4	1.12 ± 0.07	$9.49^{+1.39}_{-1.49}$	$6.35^{+0.07}_{-0.09}$	76 ± 12	1.09/502
			$1.11^{+0.04}_{-0.06}$	—	$1.48^{+0.07}_{-0.02}$	$8.13^{+0.57}_{-0.74}$	$5.8^{+0.05}_{-0.15}$	0	1.75/503

Таблица 1. Продолжение

ID^a	MJD- -56000 ^b	Эксп. XRT ^c с	N_H^d , 10^{22} см ⁻²	Γ^e	T_{in} , кэВ ^f	$R_{in} \cos^{-1/2}(i)$, км ^g	Поток ^h	f_{po}^j	χ_N^2/dof
21 [†]	831	826	$2.95^{+0.29}_{-0.39}$	2.65 ± 0.19	—	—	$7.69^{+0.1}_{-0.16}$	100	1.33/364
			$2.04^{+0.1}_{-0.05}$	2	$1.12^{+0.08}_{-0.06}$	$14.23^{+2.52}_{-0.96}$	$6.75^{+0.12}_{-0.21}$	35 ± 10	1.07/363
			$2.26^{+0.11}_{-0.15}$	2.4	$1.13^{+0.09}_{-0.07}$	$13.1^{+2.36}_{-2.17}$	$6.67^{+0.16}_{-0.18}$	46 ± 14	1.06/363
			1.64 ± 0.07	—	1.31 ± 0.07	$12.06^{+1.32}_{-1.75}$	$6.23^{+0.07}_{-0.13}$	0	1.21/364
22 ^{★†}	850	1822	$2.09^{+0.07}_{-0.08}$	2	0.95 ± 0.03	$21.91^{+0.98}_{-1.86}$	$5.84^{+0.07}_{-0.08}$	23 ± 4	1.14/471
			$2.23^{+0.04}_{-0.08}$	2.4	$0.94^{+0.03}_{-0.02}$	$21.92^{+2.16}_{-1.91}$	$5.81^{+0.04}_{-0.11}$	32 ± 6	1.14/471
			$1.74^{+0.1}_{-0.06}$	—	$1.1^{+0.03}_{-0.05}$	$17.26^{+1.58}_{-1.52}$	$5.49^{+0.04}_{-0.14}$	0	1.45/472
23	860	2450	2.08 ± 0.02	2	1.11 ± 0.02	$17.17^{+0.44}_{-0.42}$	$7.76^{+0.04}_{-0.05}$	26 ± 3	1.22/525
			2.21 ± 0.03	2.4	1.13 ± 0.02	$15.8^{+0.35}_{-0.34}$	7.73 ± 0.04	37 ± 4	1.22/525
			1.9 ± 0.02	—	1.23 ± 0.01	15.06 ± 0.23	7.48 ± 0.03	0	1.65/526
24	870	1326	2.06 ± 0.04	2	1.16 ± 0.02	$16.16^{+0.54}_{-0.50}$	6.99 ± 0.06	12 ± 5	0.98/449
			$2.12^{+0.05}_{-0.06}$	2.4	1.17 ± 0.02	$15.68^{+0.42}_{-0.39}$	6.98 ± 0.06	16 ± 7	0.98/449
			1.98 ± 0.02	—	1.21 ± 0.01	$15.34^{+0.34}_{-0.33}$	$6.88^{+0.03}_{-0.04}$	0	1.01/450
25	880	1856	2.1 ± 0.03	2	1.11 ± 0.02	$18.36^{+0.54}_{-0.51}$	$7.53^{+0.04}_{-0.08}$	14 ± 3	0.88/470
			2.17 ± 0.04	2.4	1.12 ± 0.02	$17.71^{+0.44}_{-0.42}$	$7.51^{+0.05}_{-0.06}$	21 ± 5	0.88/470
			1.99 ± 0.02	—	1.17 ± 0.01	$16.99^{+0.32}_{-0.31}$	$7.37^{+0.03}_{-0.04}$	0	0.98/471
26	890	2164	1.88 ± 0.03	2	1.17 ± 0.02	$16.78^{+0.45}_{-0.42}$	$7.46^{+0.06}_{-0.05}$	3 ± 2	1.02/471
			$1.89^{+0.05}_{-0.04}$	2.4	1.17 ± 0.02	$16.62^{+0.35}_{-0.34}$	$7.45^{+0.07}_{-0.05}$	4 ± 2	1.02/471
			1.85 ± 0.02	—	1.18 ± 0.01	16.53 ± 0.31	7.43 ± 0.05	0	1.02/472
27	900	1909	2.05 ± 0.03	2	1.12 ± 0.02	$16.69^{+0.41}_{-0.40}$	$6.54^{+0.03}_{-0.04}$	12 ± 3	1.07/499
			2.1 ± 0.04	2.4	1.13 ± 0.01	$16.20^{+0.34}_{-0.33}$	$6.53^{+0.03}_{-0.04}$	17 ± 4	1.07/499
			1.96 ± 0.02	—	1.18 ± 0.01	$15.67^{+0.27}_{-0.26}$	$6.44^{+0.04}_{-0.03}$	0	1.15/500
28 [*]	910	982	1.98 ± 0.04	2	1.1 ± 0.02	$17.46^{+0.62}_{-0.58}$	$6.24^{+0.06}_{-0.05}$	9 ± 4	1.12/417
			2.02 ± 0.05	2.4	1.1 ± 0.02	$17.08^{+0.52}_{-0.49}$	$6.23^{+0.06}_{-0.07}$	13 ± 6	1.12/417
			1.91 ± 0.03	—	1.14 ± 0.01	$16.56^{+0.39}_{-0.38}$	$6.15^{+0.04}_{-0.06}$	0	1.15/418
29	920	638	1.98 ± 0.05	2	1.05 ± 0.03	$17.87^{+0.86}_{-0.79}$	$5.21^{+0.05}_{-0.07}$	7 ± 5	1.0/342
			2.02 ± 0.07	2.4	1.06 ± 0.03	$17.59^{+0.73}_{-0.67}$	$5.21^{+0.06}_{-0.07}$	10 ± 6	1.0/342
			1.93 ± 0.03	—	1.09 ± 0.01	$17.08^{+0.53}_{-0.51}$	5.15 ± 0.04	0	1.01/343
30 [†]	924	857	$2.23^{+0.13}_{-0.15}$	2	$0.94^{+0.06}_{-0.05}$	$22.90^{+3.17}_{-3.34}$	$4.69^{+0.00}_{-0.18}$	6 ± 3	1.08/373
			$2.25^{+0.15}_{-0.13}$	2.4	$0.95^{+0.05}_{-0.03}$	$22.19^{+3.70}_{-2.54}$	$4.68^{+0.05}_{-0.30}$	10 ± 5	1.07/373
			$2.11^{+0.13}_{-0.05}$	—	$0.99^{+0.04}_{-0.05}$	$20.82^{+3.25}_{-2.28}$	$4.62^{+0.02}_{-0.09}$	0	1.09/374

Таблица 1. Окончание

ID^a	MJD- -56000 ^b	Эксп. XRT ^c с	N_H^d , 10^{22} см^{-2}	Γ^e	T_{in} , кэВ ^f	$R_{in} \cos^{-1/2}(i)$, км ^g	Поток ^h	f_{po}^j	χ_N^2/dof
31*	932	2073	1.96 ± 0.03	2	1.0 ± 0.02	$17.13^{+0.56}_{-0.53}$	3.73 ± 0.03	8 ± 3	1.15/424
			2.0 ± 0.04	2.4	1.0 ± 0.02	$16.92^{+0.51}_{-0.48}$	$3.73^{+0.02}_{-0.03}$		1.15/424
			1.9 ± 0.02	—	1.04 ± 0.01	$16.12^{+0.35}_{-0.34}$	$3.68^{+0.02}_{-0.03}$	0	1.2/425
32	940	1680	2.13 ± 0.03	2	0.96 ± 0.01	$19.70^{+0.65}_{-0.61}$	$3.90^{+0.02}_{-0.04}$	9 ± 2	1.04/415
			2.18 ± 0.04	2.4	0.95 ± 0.01	$19.48^{+0.62}_{-0.58}$	3.89 ± 0.03	15 ± 4	1.03/415
			2.05 ± 0.02	—	1.01 ± 0.01	$18.04^{+0.40}_{-0.39}$	$3.82^{+0.02}_{-0.03}$	0	1.14/416
35	953	1793	2.06 ± 0.03	2	0.92 ± 0.02	$19.03^{+0.70}_{-0.67}$	$3.27^{+0.02}_{-0.03}$	14 ± 2	1.08/404
			2.12 ± 0.04	2.4	0.92 ± 0.02	$18.60^{+0.66}_{-0.62}$	3.26 ± 0.03	21 ± 4	1.08/404
			1.94 ± 0.02	—	0.99 ± 0.01	$16.68^{+0.39}_{-0.37}$	3.17 ± 0.02	0	1.27/405
36	954	1751	1.92 ± 0.03	2	0.93 ± 0.02	$18.66^{+0.66}_{-0.63}$	$3.36^{+0.02}_{-0.03}$	11 ± 3	1.12/400
			1.96 ± 0.04	2.4	0.94 ± 0.02	$18.28^{+0.61}_{-0.57}$	$3.35^{+0.02}_{-0.03}$	17 ± 4	1.12/400
			1.83 ± 0.02	—	0.99 ± 0.01	$16.89^{+0.38}_{-0.37}$	3.28 ± 0.02	0	1.24/401
37	955	1931	2.02 ± 0.03	2	0.9 ± 0.02	$19.51^{+0.71}_{-0.68}$	$3.14^{+0.02}_{-0.03}$	15 ± 2	1.03/409
			2.08 ± 0.03	2.4	0.9 ± 0.02	$19.05^{+0.68}_{-0.64}$	$3.13^{+0.02}_{-0.03}$	24 ± 4	1.03/409
			1.89 ± 0.02	—	0.98 ± 0.01	$16.8^{+0.38}_{-0.37}$	3.03 ± 0.02	0	1.27/410
38	956	1920	2.09 ± 0.03	2	0.88 ± 0.01	$20.73^{+0.77}_{-0.73}$	$3.28^{+0.03}_{-0.02}$	18 ± 2	1.08/409
			2.16 ± 0.03	2.4	0.88 ± 0.02	$20.26^{+0.76}_{-0.71}$	$3.27^{+0.02}_{-0.03}$	26 ± 3	1.07/409
			1.94 ± 0.02	—	0.98 ± 0.01	$17.15^{+0.39}_{-0.38}$	3.15 ± 0.02	0	1.48/410
39	959.8	540	2.09 ± 0.07	2	0.89 ± 0.03	$19.23^{+1.61}_{-1.43}$	$2.86^{+0.04}_{-0.07}$	16 ± 5	0.96/208
			2.15 ± 0.08	2.4	0.89 ± 0.03	$18.79^{+1.54}_{-1.34}$	$2.85^{+0.04}_{-0.07}$	24 ± 8	0.95/208
			1.95 ± 0.05	—	0.97 ± 0.02	$16.35^{+0.77}_{-0.73}$	2.75 ± 0.03	0	1.06/209
40	960.3	2055	1.91 ± 0.03	2	0.89 ± 0.01	$18.36^{+0.67}_{-0.64}$	2.62 ± 0.02	13 ± 2	1.0/387
			1.96 ± 0.03	2.4	0.89 ± 0.02	$18.01^{+0.65}_{-0.61}$	$2.62^{+0.02}_{-0.03}$	20 ± 3	1.01/387
			1.80 ± 0.02	—	0.96 ± 0.01	$16.03^{+0.38}_{-0.37}$	$2.54^{+0.01}_{-0.02}$	0	1.23/388
41	961	1018	1.73 ± 0.04	2	0.94 ± 0.02	$16.36^{+0.83}_{-0.77}$	$2.60^{+0.02}_{-0.04}$	7 ± 4	1.09/314
			$1.75^{+0.05}_{-0.06}$	2.4	0.94 ± 0.02	$16.1^{+0.75}_{-0.69}$	$2.59^{+0.03}_{-0.04}$	10 ± 6	1.09/314
			1.68 ± 0.03	—	0.97 ± 0.01	$15.41^{+0.50}_{-0.49}$	2.56 ± 0.02	0	1.11/315
42	962	809	1.82 ± 0.05	2	0.89 ± 0.03	$17.91^{+1.18}_{-1.06}$	$2.37^{+0.03}_{-0.05}$	8 ± 5	1.04/259
			$1.84^{+0.06}_{-0.07}$	2.4	0.89 ± 0.03	$17.6^{+1.07}_{-0.96}$	$2.37^{+0.03}_{-0.04}$	12 ± 8	1.05/259
			1.75 ± 0.04	—	0.93 ± 0.01	$16.58^{+0.65}_{-0.62}$	$2.32^{+0.02}_{-0.03}$	0	1.07/260

Примечание. а — номер наблюдения XRT; b — время наблюдения, MJD-56000; с — экспозиция XRT; d — уровень межзвездного поглощения; e — фотонный индекс; f — внутренняя температура диска; g — внутренний радиус диска для расстояния до системы 8.5 кпк; h — полный поглощенный поток модели в диапазоне 0.8–10 кэВ в единицах $10^{-9} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; j — вклад степенной компоненты в полный поток в диапазоне 0.8–10 кэВ. Символом † отмечены спектры, при аппроксимации которых использовалась команда gain fit (параметры наклона и смещения приведены в табл. 2). Символом * отмечены наблюдения, в которых использована позиционно-зависимая матрица отклика (см. текст).

Таблица 2. Параметры команды gain fit, использованной при аппроксимации спектров, полученных по данным телескопа XRT

ID	Модель	Slope	Offset, keV
4	po	1.02 ± 0.01	0.03 ± 0.02
	$(po + disk)\Gamma = 1.5$	$0.97^{+0.01}_{-0.0}$	0.1 ± 0.02
	$(po + disk)\Gamma = 1.8$	1.0 ± 0.01	0.05 ± 0.02
	$(po + disk)\Gamma = 2$	$1.02^{+0.01}_{-0.0}$	0.02 ± 0.02
5	po	1.02 ± 0.01	$0.06^{+0.02}_{-0.03}$
	$(po + disk)\Gamma = 1.5$	0.99 ± 0.01	0.12 ± 0.02
	$(po + disk)\Gamma = 1.8$	$1.02^{+0.0}_{-0.01}$	$0.05^{+0.02}_{-0.01}$
	$(po + disk)\Gamma = 2$	$1.04^{+0.01}_{-0.0}$	0.01 ± 0.02
9	po	1.03 ± 0.02	$0.04^{+0.04}_{-0.03}$
	$(po + disk)\Gamma = 1.5$	0.99 ± 0.01	$0.12^{+0.03}_{-0.02}$
	$(po + disk)\Gamma = 1.8$	1.0 ± 0.01	$0.08^{+0.02}_{-0.03}$
	$(po + disk)\Gamma = 2$	1.02 ± 0.01	0.04 ± 0.02
11	po	0.89 ± 0.01	$0.18^{+0.02}_{-0.03}$
	$(po + disk)\Gamma = 2$	$1.04^{+0.02}_{-0.01}$	-0.01 ± 0.03
	$(po + disk)\Gamma = 2.4$	$1.05^{+0.01}_{-0.02}$	$-0.03^{+0.04}_{-0.03}$
	disk	$1.04^{+0.02}_{-0.01}$	$-0.0^{+0.03}_{-0.04}$
14	po	$1.0^{+0.02}_{-0.01}$	$-0.04^{+0.03}_{-0.02}$
	$(po + disk)\Gamma = 2$	$1.07^{+0.02}_{-0.01}$	-0.06 ± 0.02
	$(po + disk)\Gamma = 2.4$	$1.08^{+0.02}_{-0.01}$	$-0.09^{+0.02}_{-0.03}$
	disk	$1.08^{+0.01}_{-0.02}$	$-0.03^{+0.03}_{-0.02}$
17	po	0.95 ± 0.01	$-0.0^{+0.04}_{-0.0}$
	$(po + disk)\Gamma = 2$	$1.04^{+0.01}_{-0.02}$	$-0.05^{+0.04}_{-0.02}$
	$(po + disk)\Gamma = 2.4$	1.04 ± 0.01	$-0.07^{+0.03}_{-0.02}$
	disk	$1.03^{+0.01}_{-0.02}$	-0.01 ± 0.03
20	po	$1.04^{+0.01}_{-0.02}$	-0.08 ± 0.03
	$(po + disk)\Gamma = 2$	1.02 ± 0.01	$0.02^{+0.02}_{-0.03}$
	$(po + disk)\Gamma = 2.4$	1.05 ± 0.01	$-0.04^{+0.01}_{-0.02}$
	disk	$1.03^{+0.01}_{-0.02}$	$0.1^{+0.04}_{-0.03}$
21	po	$1.01^{+0.02}_{-0.01}$	-0.03 ± 0.06
	$(po + disk)\Gamma = 2$	$1.07^{+0.02}_{-0.03}$	$-0.06^{+0.05}_{-0.04}$
	$(po + disk)\Gamma = 2.4$	1.08 ± 0.02	-0.08 ± 0.04
	disk	$1.08^{+0.01}_{-0.03}$	$-0.03^{+0.06}_{-0.02}$
22	$(po + disk)\Gamma = 2$	1.06 ± 0.02	-0.1 ± 0.03
	$(po + disk)\Gamma = 2.4$	1.07 ± 0.02	$-0.12^{+0.03}_{-0.02}$
	disk	1.07 ± 0.02	-0.07 ± 0.03
30	$(po + disk)\Gamma = 2$	1.08 ± 0.03	-0.03 ± 0.01
	$(po + disk)\Gamma = 2.4$	$1.07^{+0.03}_{-0.01}$	-0.03 ± 0.01
	disk	$1.07^{+0.03}_{-0.02}$	-0.02 ± 0.1

ряде спектров (отмеченных в табл. 1 символом †) были обнаружены инструментальные особенности на энергиях 1.8 и 2.3 кэВ¹. Поэтому при аппроксимации этих данных мы, следуя рекомендациям, приведенным в упомянутой ссылке, использовали команду gain в пакете Xspec, которая модифицирует матрицу отклика путем смещения энергий, на которых она определена. Значения параметров смещения приведены в табл. 2. Так же в ряде спектров (отмеченных в табл. 1 символом *) наблюдались отклонения данных от модели на энергиях ниже 1 кэВ. Эта особенность спектра связана с положением изображения источника на детекторе телескопа². Использование матрицы отклика телескопа, зависящей от положения источника на детекторе (swxwt0s6psf1_20131212v001.rmf), позволило улучшить качество аппроксимации этих данных на низких энергиях.

При построении кривых блеска мы использовали энергетический диапазон 0.5–10 кэВ, тип событий (grade) — 0–2, данные усреднялись за одно наблюдение. Типичная экспозиция для наблюдений телескопа XRT была ~1–2 кс (см. табл. 1). Кривые блеска, используемые для анализа Фурье, были построены в энергетических диапазонах 0.5–10, 0.5–3 и 3–10 кэВ, с временным разрешением 0.01 с.

Кривая блеска источника по данным телескопа Swift/BAT была получена из онлайн-базы данных кривых блеска (Кримм и др., 2013).

Данные обсерватории ИНТЕГРАЛ

В работе были также использованы данные телескопов JEM-X и ISGRI/IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ (Винклер и др., 2003), обработанные с помощью сервиса HEAVENS (Вальтер и др., 2010). Эти данные совместно с квазиодновременными спектральными данными телескопа Swift/XRT использовались для построения широкополосных спектров источника в диапазоне энергий 0.8–200 кэВ. При аппроксимации спектров были учтены систематические ошибки 1% и 3% для инструментов ISGRI³ и JEM-X⁴ соответственно. Времена и экспозиции наблюдений для широкополосных спектров приведены в табл. 3.

При аппроксимации широкополосных спектров были добавлены константы кросс-калибровки

¹ https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/caldb/swift/docs/xrt/SWIFT-XRT-CALDB-09_v19.pdf

² https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/caldb/swift/docs/xrt/SWIFT-XRT-CALDB-09_v20.pdf

³ https://www.isdc.unige.ch/integral/download/osa/doc/10.2/osa_um_ibis/index.html

⁴ https://www.isdc.unige.ch/integral/download/osa/doc/10.2/osa_um_jemx/index.html

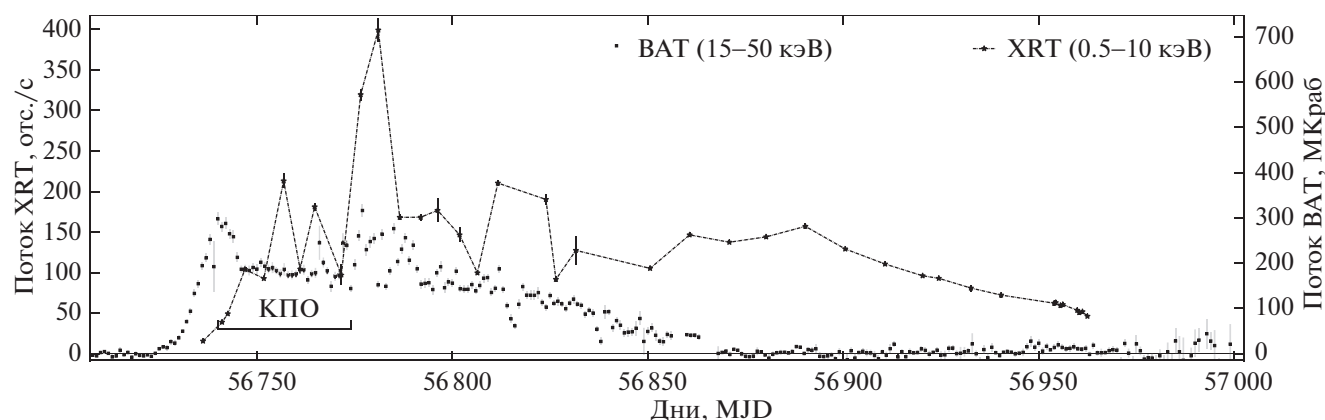


Рис. 1. Кривая блеска системы GRS 1739-278 во время вспышки 2014 г. по данным телескопов Swift/XRT (обозначена звездочками, данные усреднены за наблюдение) и Swift/BAT (обозначена черными квадратами, данные усреднены за один день). Горизонтальной линией показан период наблюдения КПО в спектрах мощности переменности излучения источника (наблюдения 02-09).

между тремя инструментами, чтобы учесть эффект неодновременности наблюдений. Различие констант кросс-калибровки между инструментами JEM-X и ISGRI/IBIS наблюдается при работе с данными обсерватории ИНТЕГРАЛ (см., например, Филиппова и др., 2014а).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Кривая блеска во время вспышки 2014 года

На рис. 1 показана кривая блеска источника, полученная по данным телескопов Swift/XRT и Swift/BAT в энергетических диапазонах 0.5–10 кэВ (точки усреднены за наблюдение) и 15–50 кэВ (точки усреднены за один день) соответственно. Для пересчета потока в диапазоне 15–50 кэВ в единицы, соответствующие потоку от

Крабовидной туманности, использовалось соотношение $1 \text{ Краб} = 0.22 \text{ отсч. с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. На рисунке видно, что в диапазоне энергий 15–50 кэВ поток от источника достиг максимума $\sim 0.3 \text{ Краб}$ через ~ 15 дней от начала вспышки, затем за 5 дней он упал в 1.5 раза и был примерно на постоянном уровне в течение ~ 25 дней, после чего начал демонстрировать “пикообразную” переменность, которая продолжалась около 50 дней и перешла в фазу затухания вспышки. Излучение от источника в этом диапазоне энергий перестало регистрироваться через ~ 140 дней.

В диапазоне энергий 0.5–10 кэВ вспышка достигла максимума ($\sim 1.1 \text{ Краб}$) с задержкой относительно максимума в диапазоне энергий 15–50 кэВ — через 55 дней после начала, однако практически сразу с начала вспышки источник демонстрировал “пикообразную” переменность потока. По окончании такой активности, через 135 дней после начала вспышки, поток вышел на постоянный уровень $\sim 150 \text{ отсч./с}$ ($\sim 400 \text{ МКраб}$) и оставался таким в течение ~ 30 дней, после чего начал падать. Наблюдения прекратились на ~ 240 день вспышки из-за попадания источника в область вблизи Солнца, недоступную для наблюдений. В этот момент поток в диапазоне энергий 0.5–10 кэВ был на уровне $\sim 50 \text{ отсч./с}$ ($\sim 140 \text{ МКраб}$).

На рис. 2 (верхняя панель) показана зависимость потока излучения в мягком диапазоне энергий (0.5–10 кэВ) от жесткости излучения источника (отношение потоков в диапазонах энергий 4–10 кэВ к 0.5–4 кэВ). На рисунке видно, что зависимость имеет форму, похожую на верхнюю часть типичной “q”-диаграммы.

Таблица 3. Время наблюдений и экспозиция наблюдений широкополосных спектров, полученных по данным телескопов INTEGRAL и XRT

ID^a	MJD-56000 ^b	Эксп. XRT с	Эксп. ISGRI с	Эксп. JEM-X с
01	736	79	4735	11244
03	742	1925	44637	10080
05	751	1832	4219	5006
07	761	1613	25806	68580
09	771	1872	5791	10738

Примечание. а — номер наблюдения XRT; b — время наблюдения, MJD-56000.

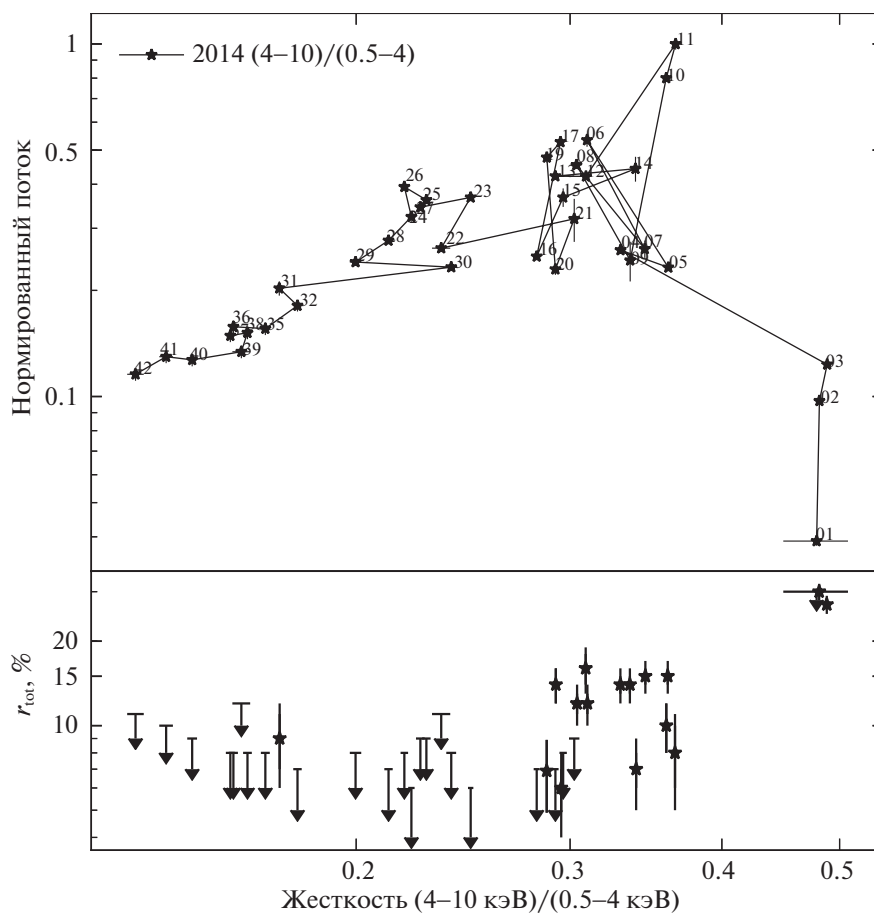


Рис. 2. Диаграммы жесткость—поток и жесткость—переменность для вспышки 2014 г. По оси абсцисс отложено значение жесткости, полученное как отношение скорости счета в диапазонах энергий 4–10 кэВ и 0.5–4 кэВ. На верхней панели показана зависимость нормированного на максимум темпа счета фотонов (в диапазоне энергий 0.5–10 кэВ) по данным Swift/XRT от жесткости. На нижней панели нанесена зависимость полной мощности переменности излучения в диапазоне энергий 0.5–10 кэВ и в диапазоне частот 0.01–50 Гц от жесткости. Каждая точка на верхней диаграмме подписана согласно номеру наблюдения.

Спектральный анализ во время вспышки 2014 г.

При аппроксимации спектров мы использовали типичные модели, описывающие спектр источника: 1) в низком/жестком состоянии — степенной закон с завалом на высоких и поглощением на низких энергиях, $phabs * cutoffpl$ (либо в случае аппроксимации только данных телескопа Swift/XRT — степенной закон и поглощение на низких энергиях, $phabs * powerlaw$), 2) в промежуточных состояниях — степенной закон с завалом на высоких энергиях, многотемпературный аккреционный диск и поглощение на низких энергиях, $phabs * (cutoffpl + diskbb)$ (либо в случае аппроксимации только данных телескопа Swift/XRT — степенной закон, многотемпературный аккреционный диск и поглощение на низких энергиях, $phabs * (powerlaw + diskbb)$), 3) в высоком/мягком состоянии — многотемпературный ак-

креционный диск и поглощение на низких энергиях, $phabs * diskbb$ либо предыдущую модель, $phabs * (powerlaw + diskbb)$. Качество имеющихся данных не позволяет нам применить более сложную спектральную модель, учитывающую отражение комптонизированного излучения от аккреционного диска, которая использовалась при аппроксимации данных обсерватории NuSTAR (Миллер и др., 2015; Мереминский и др., 2019).

Результаты аппроксимации спектров, полученных по данным Swift/XRT, представлены в табл. 1. Ошибки на параметры приведены для доверительного интервала, равного 90%. В таблице также указан вклад непоглощенной степенной компоненты в общий непоглощенный поток излучения, поглощенный поток в диапазоне 0.8–10 кэВ и оценка внутреннего радиуса аккреционного диска, полученная из нормировки в модели $diskbb-N =$

Таблица 4. Параметры моделей наилучшей аппроксимации широкополосных энергетических спектров источника GRS 1739-278 моделями $phabs * powerlaw$, $phabs * (diskbb + cutoffpl)$ и $phabs * highecut * simpl * diskbb$ с зафиксированным параметром $E_c = 0.0001$ кэВ

ID	C_{JEM-X}^a	C_{XRT}^a	N_H , 10^{22} см^{-2b}	Γ^c	E_{cut} , кэВ ^d	f_{scat}^e	T_{in} , кэВ ^f	$R_{in} \cos^{-1/2}(i)$, км ^g	f_{po} , % ^h	Поток ^j	χ^2/dof
01	$0.51^{+0.09}_{-0.08}$	$1.24^{+0.46}_{-0.34}$	$1.9^{+0.46}_{-0.42}$	$1.45^{+0.22}_{-0.21}$	95^{+74}_{-29}		—	—	100	$1.2^{+0.2}_{-0.5}$	1.76/17
03	0.74 ± 0.05	$1.42^{+0.12}_{-0.11}$	1.6 ± 0.04	1.2 ± 0.03	$20.7^{+1.4}_{-1.2}$		—	—	100	3.1 ± 0.2	1.22/506
	0.74 ± 0.05	$1.42^{+0.13}_{-0.12}$	$1.84^{+0.17}_{-0.15}$	1.21 ± 0.05	$20.6^{+1.5}_{-1.4}$		$0.33^{+0.09}_{-0.05}$	46^{+48}_{-28}	93	$3.1^{+0.2}_{-0.3}$	1.21/504
	0.73 ± 0.05	$1.37^{+0.12}_{-0.11}$	2.05	$1.26^{+0.03}_{-0.02}$	$21.4^{+1.3}_{-1.2}$	0.68	0.28 ± 0.01	211^{+25}_{-22}		$3.2^{+0.2}_{-0.3}$	1.22/506
05	$0.81^{+0.08}_{-0.07}$	$1.8^{+0.18}_{-0.16}$	1.83 ± 0.03	1.8 ± 0.03	$35.9^{+4.7}_{-3.9}$		—	—	100	3.9 ± 0.3	1.64/564
	$0.84^{+0.08}_{-0.07}$	$2.19^{+0.24}_{-0.21}$	2.04 ± 0.06	$1.51^{+0.06}_{-0.07}$	$25.0^{+2.9}_{-2.5}$		$0.47^{+0.04}_{-0.03}$	$38.8^{+10.0}_{-7.5}$	80	$3.3^{+0.2}_{-0.5}$	1.33/562
	$0.84^{+0.08}_{-0.07}$	$2.21^{+0.24}_{-0.21}$	1.93	1.5 ± 0.06	$24.9^{+2.9}_{-2.4}$	0.58 ± 0.01	0.47 ± 0.02	$64.5^{+8.2}_{-6.8}$		$3.3^{+0.2}_{-0.3}$	1.33/563
07	0.64 ± 0.03	$1.54^{+0.1}_{-0.09}$	2.15 ± 0.03	2.03 ± 0.03	$38.5^{+3.1}_{-2.8}$		—	—	100	$5.3^{+0.4}_{-0.3}$	1.61/524
	$0.67^{+0.04}_{-0.03}$	$1.79^{+0.13}_{-0.12}$	$2.43^{+0.09}_{-0.08}$	1.88 ± 0.05	$32.2^{+2.7}_{-2.4}$		0.38 ± 0.03	$84.5^{+29.5}_{-21.2}$	81	$4.7^{+0.3}_{-0.4}$	1.43/522
	$0.67^{+0.04}_{-0.03}$	$1.8^{+0.13}_{-0.12}$	2.34	1.87 ± 0.05	$31.9^{+2.6}_{-2.3}$	0.5 ± 0.02	0.38 ± 0.02	$137.1^{+20.6}_{-16.6}$		$4.6^{+0.2}_{-0.4}$	1.43/523
09	0.65 ± 0.05	$1.22^{+0.11}_{-0.10}$	1.95 ± 0.03	1.97 ± 0.03	$37.0^{+4.4}_{-3.7}$		—	—	100	5.3 ± 0.4	1.32/516
	$0.71^{+0.06}_{-0.05}$	$1.54^{+0.16}_{-0.14}$	$2.08^{+0.07}_{-0.06}$	1.67 ± 0.07	$26.5^{+3.0}_{-2.6}$		0.49 ± 0.04	$40.4^{+11.0}_{-8.1}$	82	$4.3^{+0.3}_{-0.6}$	1.11/514
	$0.71^{+0.06}_{-0.05}$	$1.54^{+0.15}_{-0.14}$	1.97	$1.67^{+0.06}_{-0.07}$	$26.5^{+2.9}_{-2.5}$	0.55 ± 0.02	0.48 ± 0.03	$71.2^{+10.3}_{-8.4}$		$4.2^{+0.3}_{-0.5}$	1.1/515

Примечание. а — константа кросс-калибровки JEM-X и XRT относительно ISGRI соответственно; б — величина межзвездного поглощения; с — фотонный индекс; д — энергия завала модели cutoffpl; е — доля излучения дисковой компоненты, подверженная комптонизации (simpl); ф — температура аккреционного диска; г — внутренний радиус диска для расстояния до системы 8.5 кпк; h — вклад степенной компоненты в полный поток в диапазоне 0.8–10 кэВ; j — поглощенный поток широкополосной модели в диапазоне 0.8–10 кэВ, в единицах 10^{-9} эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Ошибки приведены для доверительного интервала, равного 90%.

$= (R_{in}/D_{10kpc})^2 \cos i$, где R_{in} — “видимый” внутренний радиус диска в км, D_{10kpc} — расстояние до источника в единицах 10 кпк, а i — угол наклона к картинной плоскости. Расстояние до источника было принято равным 8.5 кпк.

При аппроксимации спектров, полученных только по данным телескопа Swift/XRT, имеющийся диапазон энергий 0.8–10 кэВ не позволяет получить однозначные ограничения на параметры степенной компоненты в случае использования многокомпонентной модели $phabs * (powerlaw + diskbb)$, поэтому при аппроксимации данных на начальных этапах вспышки (с 03 по 09 наблюдения) мы зафиксировали фотонный индекс на значениях 1.5 и 1.8, которые были получены при аппроксимации широкополосных спектров, а также на значении 2, а в последующих наблюдениях — на значениях 2 и 2.4, характерных для промежу-

точного состояния (Ремиллард, МакКлинтон, 2006; Беллони, 2016).

Для аппроксимации широкополосных спектров мы также использовали модель $phabs * highecut * simpl * diskbb$ (параметр E_c в модели *highecut* был заморожен на минимальном значении 0.0001 кэВ, что позволило имитировать модель *cutoffpl*), которая упрощенным образом учитывает физический завал степенной компоненты на низких энергиях. При оценке ошибок на параметры модели $phabs * highecut * simpl * diskbb$ мы фиксировали значение поглощения N_H (а также значение параметра f_{scat} для наблюдения 03) на их найденном значении. Результаты аппроксимации широкополосных спектров приведены в табл. 4. Из таблицы видно, что эта модель дает систематически больший внутренний радиус аккреционного диска по сравнению с использованием компоненты *cutoffpl*, при этом остальные параметры отличаются несильно.

Из табл. 1 и 4 видно, что в наблюдениях с 01 по 03 модель со степенным законом хорошо описывает спектры, а в 03 наблюдении спектр системы можно также описать моделью степенного закона с многотемпературным диском (критерий χ^2 практически одинаковый для моделей $phabs * (powerlaw + diskbb)$ и $phabs * powerlaw$). Начиная с четвертого наблюдения, аппроксимация данных моделью многотемпературного диска со степенным законом предпочтительней модели только со степенным законом. Вплоть до 23 наблюдений аппроксимация данных степенным законом или многотемпературным диском с поглощением на низких энергиях дает критерий χ^2 систематически хуже, чем многокомпонентная модель. При этом поглощение на низких энергиях, температура и внутренний радиус аккреционного диска зависят от выбранного фотонного индекса, т.е. имеющиеся данные позволяют указать лишь интервал значений (приведенный в табл. 1), в котором могут находиться параметры модели.

В наблюдениях 24–42 данные хорошо аппроксимируются моделью многотемпературного диска с поглощением на низких энергиях. И хотя при аппроксимации некоторых спектров добавление степенной компоненты формально уменьшает критерий χ^2 , вклад степенной компоненты настолько мал ($\leq 30\%$), что изменение значения фотонного индекса в пределах 2–2.4 практически не сказывается на значениях остальных параметров модели.

Временная переменность во время вспышки 2014 г.

Для анализа переменности излучения источника мы построили спектры мощности в нескольких диапазонах энергий: 0.5–10 кэВ (F), 0.5–3 кэВ (A), 3–10 кэВ (B).

В спектрах мощности, построенных для наблюдений 02–09, были обнаружены КПО. В качестве модели аппроксимации спектров мощности, полученных в этих наблюдениях, использовалась модель, состоящая из двух профилей Лоренца (один профиль Лоренца описывал широкополосный шум, второй — КПО) и константы, отвечающей за Пуассоновский шум.

$$P(f) = \frac{N_{qpo}}{\pi} \frac{\delta f_{qpo}/2}{(f - f_{qpo})^2 + (\delta f_{qpo}/2)^2} + \frac{N_{sub}}{\pi} \frac{\delta f_{sub}/2}{(f - f_{sub})^2 + (\delta f_{sub}/2)^2} + P_{noise},$$

где f_{qpo} и δf_{qpo} — частота и ширина Лоренцианы, отвечающей за КПО, f_{sub} и δf_{sub} — частота и ширина Лоренцианы, отвечающей за широкополосный шум, N_{qpo} и N_{sub} — нормировки компонент

КПО и широкополосного шума, P_{noise} — константа, отвечающая за уровень Пуассоновского шума. В дальнейшем анализе было принято, что $f_{sub} = 0$. Такая модель хорошо описывает спектры мощности кандидатов в черные дыры в низком/жестком и промежуточном низком состояниях (Беллони, 2016).

Для определения параметров модели наилучшей аппроксимации данных мы использовали метод максимального правдоподобия (см. Лихи и др., 1983; Вихлинин и др., 1994). В качестве функции правдоподобия использовалось произведение функций плотности вероятности для распределения χ^2 с $2n$ степенями свободы:

$$L = \prod f_{\chi^2_{2n}} \left(\frac{P_{i,src} 2n}{P_{i,model}} \right),$$

где $P_{i,src}$ — измеренное значение мощности переменности источника в i -м частотном интервале, $P_{i,model}$ — значение мощности переменности источника в этом же интервале, полученное из модели, n — количество интервалов, на которые была разбита кривая блеска.

Для того чтобы найти ошибку на параметры модели наилучшей аппроксимации, мы использовали метод Монте-Карло. Данные 1000 раз разыгрывались вокруг модели наилучшей аппроксимации $P_{i,model}$ по закону $P_i = \chi^2_{2n}(P_{i,model}/2n)$. Разыгранные данные также аппроксимировались моделью с помощью метода максимального правдоподобия. Искомая ошибка на параметр находилась как разность между средним значением и нижней (верхней) оценкой на параметр, соответствующей 16% (84%) квантилю распределения.

Для того чтобы определить значимость КПО, мы вычисляли удвоенную разность логарифмических функций правдоподобия $2 \log(L_{qpo}/L_{null})$, где L_{qpo} — значение функции правдоподобия для модели с КПО, L_{null} — для модели без КПО, а также вероятность, что такая разность является случайной величиной. Разность функций правдоподобия имеет распределение χ^2_k (Кэш, 1979), где k — разность количества свободных параметров в модели с КПО и без, в нашем случае $k = 3$.

Результаты аппроксимации спектров мощности с КПО представлены в табл. 5. В 06 наблюдении КПО не регистрировалось в диапазоне А, а в 08 наблюдении и в А, и в В. Для этих спектров мощности мы вычислили верхний предел на уровень мощности переменности КПО на уровне значимости 90%. При этом мы полагали, что частота и добротность КПО в диапазоне А и В совпадают с частотой и добротностью КПО в диапазоне F. Для наблюдения 06 в диапазоне А верхний предел

Таблица 5. Параметры аппроксимации спектров мощности переменности излучения источника GRS 1739-278

ID	Диапазон ^a	$\delta f_{qpo}, \Gamma_{\text{ц}}^b$	$f_{qpo}, \Gamma_{\text{ц}}^c$	$\delta f_{zl}, \Gamma_{\text{ц}}^d$	$Q = \frac{f_{qpo}}{\delta f_{qpo}} e$	$rms_{qpo}, \%^f$	$rms_{tot}, \%^f$	$2\Delta L^g(\log(p)^h)$
02	F	0.03 ± 0.01	0.106 ± 0.004	0.33 ± 0.03	3.4 ± 1.3	13.9 ± 1.8	30.0 ± 1.0	39(−7.8)
	A	0.04 ± 0.02	0.103 ± 0.005	$0.32^{+0.04}_{-0.05}$	8.0 ± 4.2	$13.5^{+2.3}_{-2.5}$	27.0 ± 1.0	28(−5.4)
	B	$0.03^{+0.01}_{-0.02}$	$0.113^{+0.004}_{-0.012}$	$0.31^{+0.03}_{-0.04}$	4.2 ± 2.5	$14.5^{+2.4}_{-2.7}$	32.0 ± 1.0	27(−5.2)
03	F	0.03 ± 0.01	$0.377^{+0.004}_{-0.003}$	$0.62^{+0.05}_{-0.04}$	11.7 ± 3.4	$9.9^{+0.9}_{-1.0}$	27.0 ± 1.0	81(−16.7)
	A	0.03 ± 0.01	0.379 ± 0.005	0.57 ± 0.09	11.6 ± 5.1	$8.7^{+1.2}_{-1.3}$	23.0 ± 1.0	37(−7.3)
	B	0.04 ± 0.01	$0.377^{+0.005}_{-0.004}$	0.61 ± 0.05	10.3 ± 3.6	11.2 ± 1.3	31.0 ± 1.0	58(−11.8)
04	F	0.29 ± 0.03	2.182 ± 0.012	1.59 ± 0.28	7.6 ± 0.9	10.3 ± 0.4	14.0 ± 1.0	338(−72.2)
	A	$0.32^{+0.1}_{-0.11}$	2.208 ± 0.039	$1.47^{+0.64}_{-0.84}$	6.8 ± 2.3	$7.2^{+0.8}_{-0.9}$	10.0 ± 1.0	45(−9.0)
	B	0.21 ± 0.03	2.19 ± 0.01	$5.09^{+0.64}_{-0.67}$	10.4 ± 1.5	13.5 ± 0.6	25.0 ± 1.0	295(−62.9)
05	F	0.34 ± 0.04	1.69 ± 0.01	$0.89^{+0.19}_{-0.20}$	5.0 ± 0.6	12.6 ± 0.5	15.0 ± 0.0	262(−55.8)
	A	$0.31^{+0.11}_{-0.13}$	1.73 ± 0.04	$1.08^{+0.44}_{-0.66}$	5.6 ± 2.3	7.7 ± 1.1	10.0 ± 1.0	31(−6.1)
	B	$0.24^{+0.04}_{-0.03}$	1.7 ± 0.01	$5.17^{+0.83}_{-0.77}$	7.2 ± 1.1	15.5 ± 0.8	27.0 ± 1.0	235(−49.7)
06	F	$0.4^{+0.15}_{-0.17}$	5.07 ± 0.06	$1.5^{+0.32}_{-0.34}$	12.7 ± 5.3	6.7 ± 0.9	12.0 ± 1.0	32(−6.3)
	A	—	—	$0.75^{+0.21}_{-0.52}$	—	—	$6.0^{+1.0}_{-2.0}$	0(—)
	B	0.24 ± 0.10	5.06 ± 0.03	$2.18^{+0.49}_{-0.48}$	21.1 ± 9.1	8.9 ± 1.2	19.0 ± 1.0	34(−6.7)
07	F	0.48 ± 0.08	2.48 ± 0.03	$0.93^{+0.18}_{-0.19}$	5.2 ± 0.9	10.6 ± 0.6	15.0 ± 1.0	120(−25.1)
	A	$0.34^{+0.20}_{-0.24}$	2.41 ± 0.09	$0.99^{+0.35}_{-0.58}$	7.1 ± 4.9	$6.4^{+1.5}_{-1.7}$	10.0 ± 1.0	13(−2.3)
	B	0.49 ± 0.09	2.52 ± 0.03	$1.12^{+0.20}_{-0.22}$	5.1 ± 1.0	$15.2^{+0.9}_{-1.0}$	22.0 ± 1.0	90(−18.7)
08	F	$0.54^{+0.33}_{-0.35}$	5.09 ± 0.14	$1.08^{+0.37}_{-0.38}$	9.4 ± 6.2	7.2 ± 1.6	12.0 ± 1.0	14(−2.5)
	A	—	—	$2.63^{+1.04}_{-1.44}$	—	—	12.0 ± 2.0	0(—)
	B	—	—	$9.55^{+3.34}_{-3.78}$	—	—	21.0 ± 3.0	0(—)
09	F	0.31 ± 0.06	2.19 ± 0.02	0.28 ± 0.08	7.1 ± 1.5	11.7 ± 0.8	14.0 ± 1.0	91(−18.9)
	A	$0.39^{+0.21}_{-0.23}$	2.25 ± 0.09	$0.47^{+0.10}_{-0.31}$	5.8 ± 3.5	$7.4^{+1.6}_{-1.5}$	10.0 ± 1.0	18(−3.4)
	B	0.18 ± 0.05	2.15 ± 0.02	$2.7^{+0.92}_{-0.90}$	11.9 ± 3.1	$15.0^{+1.4}_{-1.3}$	25.0 ± 2.0	80(−16.5)

Примечание. а — диапазон энергий 0.5–10 кэВ (F), 0.5–3 кэВ (A), 3–10 кэВ (B); b — ширина пика КПО; с — частота пика КПО; d — ширина подложки; e — добротность пика КПО; f — мощность переменности КПО и полная мощность переменности; g — значение статистики теста отношения правдоподобия; h — логарифм вероятности, что такая разность функций правдоподобия является случайной величиной. Ошибка определена на уровне 68% доверительного интервала (см. текст).

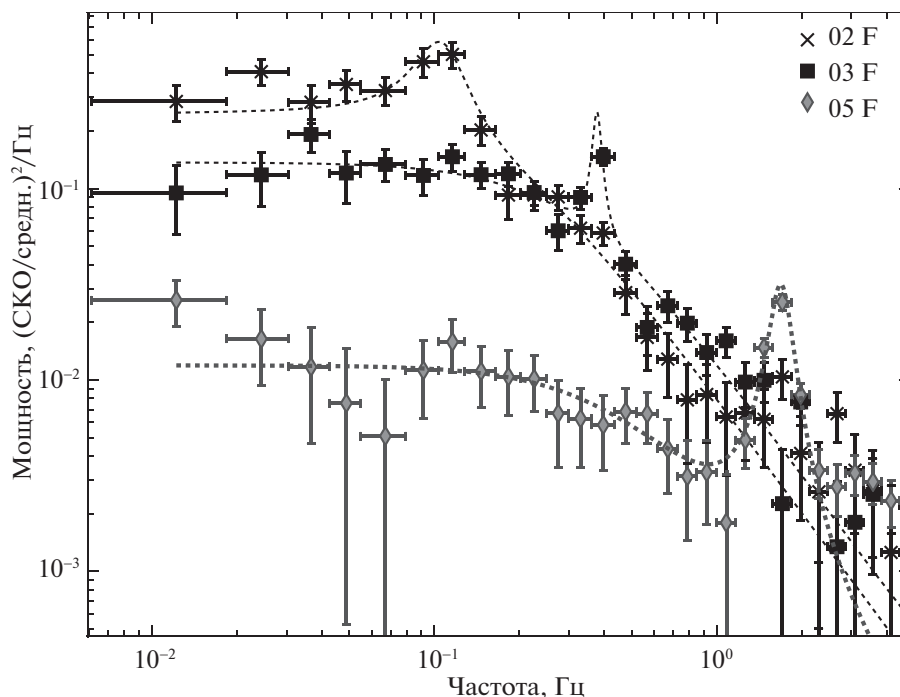


Рис. 3. Спектры мощности переменности источника в процентной нормировке для наблюдений 02 (черные кресты), 03 (черные квадраты) и 05 (серые ромбы) в диапазоне F (0.5–10 кэВ). Тонкими линиями показаны аппроксимации спектров моделями. Уровень Пуассоновского шума вычтен.

$r_{qro} < 6\%$, в наблюдении 08 $r_{qro} < 10\%$ и 15% для диапазонов А и В соответственно.

Из табл. 5 видно, что частота КПО не зависит от энергетического диапазона. Отметим, что из литературы следует, что системы с кандидатами в черные дыры демонстрируют как отсутствие корреляции между частотой КПО и энергией, так и прямую и обратную пропорциональность (Ян и др., 2012; Ли и др., 2013а,б).

На рис. 3 приведены спектры мощности с КПО в полном диапазоне энергий (0.5–10 кэВ) для нескольких наблюдений (02, 03 и 05). Хорошо видно, что частота КПО меняется от наблюдения к наблюдению.

Для того чтобы определить тип КПО, необходимо измерить как параметры самого пика КПО, так и широкополосного шума. Из рис. 3 и табл. 5 следует, что на низких частотах в исследуемых спектрах мощности присутствует широкополосный шум, полная мощность переменности которого больше 10% , что, как было сказано во “Введении”, характерно для КПО типа С. Мы построили зависимость частоты пиков КПО от потока в мягком (0.5–10 кэВ) и жестком (15–50 кэВ) диапазонах энергий (рис. 4). Поскольку вклад дисковой компоненты в энергетическом диапазоне 15–50 кэВ мал, можно считать, что это и есть зависимость частоты

КПО от потока в степенной компоненте. Из рисунка видно, что зависимость частоты КПО от потока в мягком диапазоне энергий прямая, а от потока в жестком диапазоне энергий обратная, такое поведение также характерно для КПО типа С (Мотта и др., 2011). В работе Стиеле и др. (2011) было показано, что КПО типа В наблюдаются лишь при определенных значениях фотонного индекса спектральной компоненты, описывающей Комптонизированное излучение. На стадии перехода из жесткого в мягкое состояние фотонный индекс должен быть больше или порядка 2.2. В нашем случае из табл. 4 видно, что фотонный индекс меньше или порядка 2, что опять же свидетельствует в пользу КПО типа С.

Для нескольких систем на основе фурье-спектроскопии было показано, что основной вклад в переменность излучения системы дает корона (Чуразов и др., 2001; Соболевска, Житски, 2006), т.е. мощность переменности должна уменьшаться с уменьшением вклада степенной компоненты в поток, что мы и наблюдаем. В наблюдениях 02 и 03, когда мощность переменности в диапазонах энергии А и В определяется степенной компонентой, полная мощность переменности излучения в мягком диапазоне энергий (А) меньше, чем в жестком (В) диапазоне энергий, в 1.2–1.3 раза. В то же время в наблюдениях 04–09, когда в

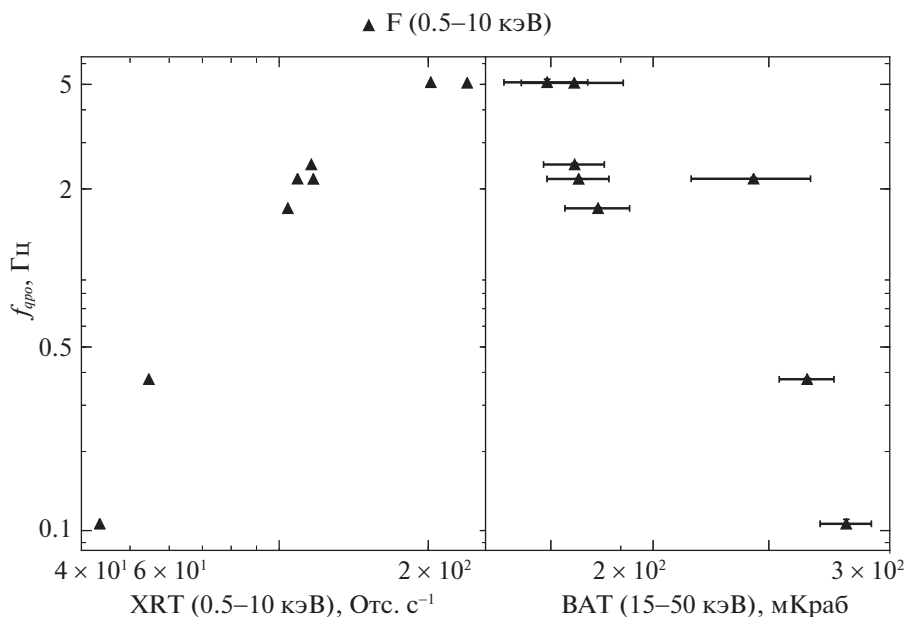


Рис. 4. На левой панели показана зависимость частоты КПО от потока в диапазоне энергий 0.8–10 кэВ. На правой панели — зависимость частоты КПО от потока в диапазоне 15–50 кэВ.

мягком диапазоне энергий также присутствует и дисковая компонента, мощность переменности в диапазоне А в 2–3 раза меньше, чем в диапазоне В.

Для наблюдений 10–42, в которых КПО не регистрировалось, мы определили полную мощность переменности излучения в диапазоне энергий 0.5–10 кэВ. Для этого мы аппроксимировали спектры мощности либо степенным законом с константой, либо только константой методом максимального правдоподобия. Если выделить степенную компоненту не удавалось, то оценивалась предельная мощность белого шума источника. Для этого мы искали значение P_{source} , при котором измеренная мощность в частотном диапазоне 0.01–50 Гц являлась 10% квантилью нормального распределения $\mathcal{N}(P_{noise} + P_{source}, (P_{noise} + P_{source})/Nn)$, где N — число частотных интервалов, P_{noise} — измеренный уровень Пуассоновского шума.

Диаграмма полученной зависимости полной мощности переменности излучения от жесткости излучения (отношение потоков в диапазонах энергий 4–10 кэВ и 0.5–4 кэВ) показана на рис. 2 (нижняя панель). Из рисунка следует, что полная мощность переменности источника за время наблюдений уменьшилась с $\sim 30\%$ до $\sim 8\%$ и меньше.

Наблюдаемые состояния во время вспышки 2014 г.

Из спектрального анализа следует (см. табл. 1 и 4), что во время наблюдений 01–03 фотонный индекс степенной компоненты имел значение порядка

1.2–1.4, а из табл. 5 следует, что полная мощность переменности излучения во время наблюдений 02 и 03 была 30% и 27% соответственно. Значения этих параметров указывают на то, что система в период с 01 по 03 наблюдения находилась в низком/жестком состоянии.

С 04 по 09 наблюдения полная мощность переменности излучения уменьшилась до 12–15%, в спектре мощности переменности наблюдались КПО типа С, в энергетическом спектре источника наряду со степенной компонентой регистрируется вклад аккреционного диска, что свойственно промежуточному жесткому состоянию. Во время наблюдения 10 полная мощность переменности излучения была равна $10 \pm 2\%$, в 11 наблюдении — $8 \pm 3\%$, а в 12 и 13 — 14–16%, что также свидетельствует в пользу промежуточного жесткого состояния.

С 14 по 23 наблюдения энергетический спектр источника по-прежнему описывается моделью аккреционного диска со степенной компонентой, однако мощность переменности излучения источника упала ниже 10%. Во многих наблюдениях нам удалось получить только верхние пределы на уровне $< 10\%$. Таким образом, можно сделать вывод, что система перешла в промежуточное мягкое состояние между 13 и 14 наблюдением.

Возможно, что во время 11 наблюдения (когда не только полная мощность переменности, но и вклад степенной компоненты в поток от системы уменьшился практически в 2 раза по сравнению с

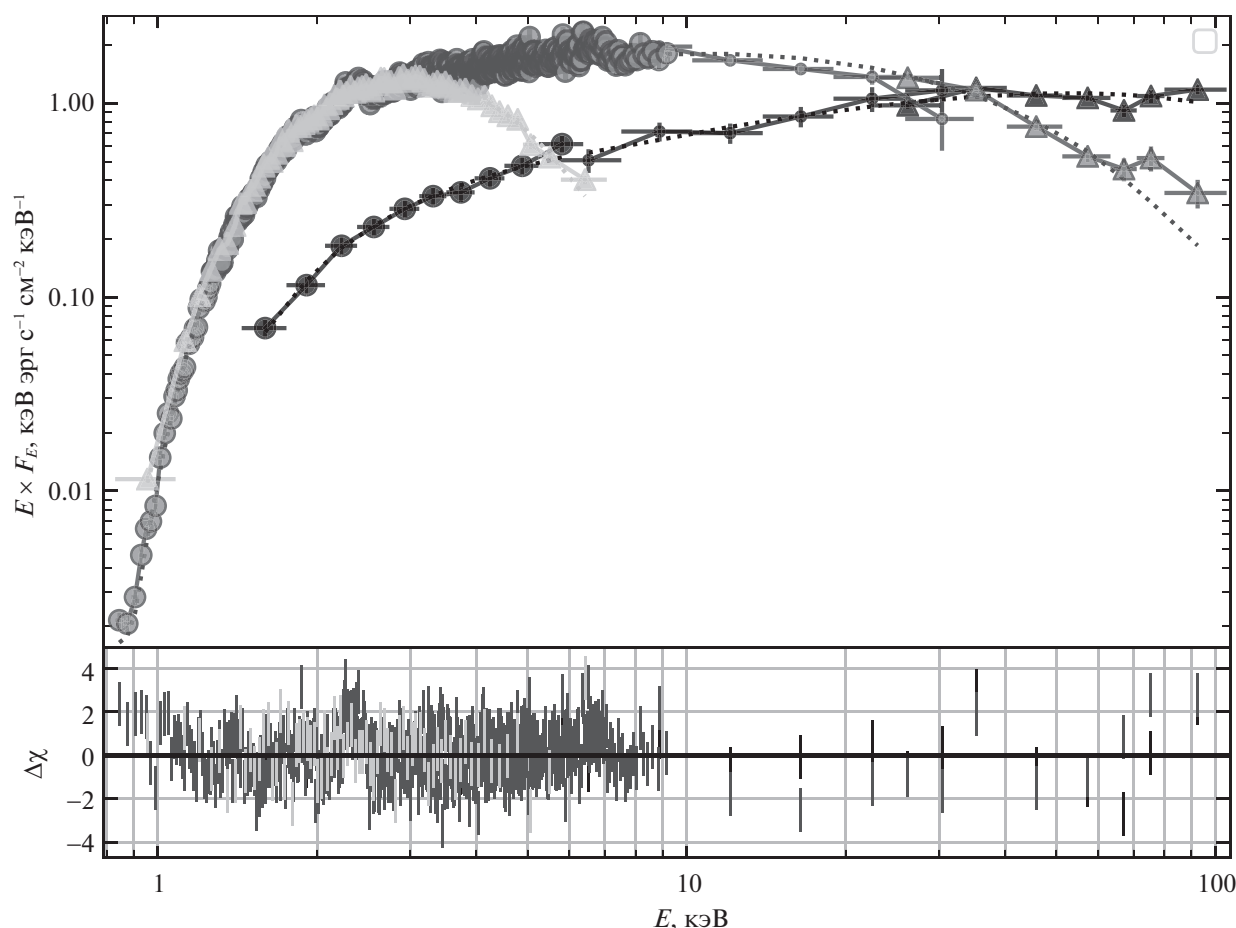


Рис. 5. Характерные энергетические спектры источника GRS 1739-278 и модели их наилучшей аппроксимации во время разных спектральных состояний: наблюдение 01 (низкое/жесткое состояние) — черные кружки, точки и треугольники: данные Swift/XRT, INTEGRAL/JEMX, INTEGRAL/ISGR1 соответственно; наблюдение 09 (промежуточное состояние) — темно-серые кружки, точки и треугольники: данные Swift/XRT, INTEGRAL/JEMX, INTEGRAL/ISGR1 соответственно; наблюдение 42 (высокое/мягкое состояние) — светло-серые треугольники (данные Swift/XRT). Тонкими штрихпунктирными линиями показаны модели наилучшей аппроксимации (см. табл. 1 и 3). На нижней панели показано отклонение данных от моделей.

соседними наблюдениями, см. табл. 1) система переходила в промежуточное мягкое состояние, однако утверждать это на основе имеющихся данных нельзя. Несмотря на то что аппроксимация данных моделями $phabs * (diskbb + powerlaw)$ и $phabs * diskbb$ дает одинаковые значения критерия χ^2 , мы считаем, что первая модель наиболее вероятная, потому что источник демонстрирует значительный поток (150 мКраб) в диапазоне энергий 15–50 кэВ.

С 24 по 42 наблюдения энергетические спектры источника хорошо описываются моделью многотемпературного диска с поглощением на низких энергиях, т.е. можно утверждать, что система перешла в высокое/мягкое состояние. И хотя при аппроксимации некоторых спектров добавление степенной компоненты формально уменьшает критерий χ^2 , однако, во-первых, вклад степенной

компоненты оказывается мал ($\leq 30\%$), а во-вторых, присутствие слабого степенного закона может наблюдаться и в высоком/мягком состоянии (Беллони, 2016). Стоит отметить, что модель *powerlaw* не имеет завала на низких энергиях, и оценка вклада степенной компоненты в общий поток является верхним пределом, т.е. фактически доля нетепловой компоненты меньше. Кроме того, на рис. 1 видно, что после 23 наблюдения источник практически не регистрируется в диапазоне энергий 15–50 кэВ, что так же свидетельствует в пользу перехода в высокое/мягкое состояние.

Характерные спектры источника, соответствующие низкому/жесткому, промежуточному низкому/жесткому и высокому/мягкому состояниям (наблюдения 01, 09 и 42 соответственно), представлены на рис. 5.

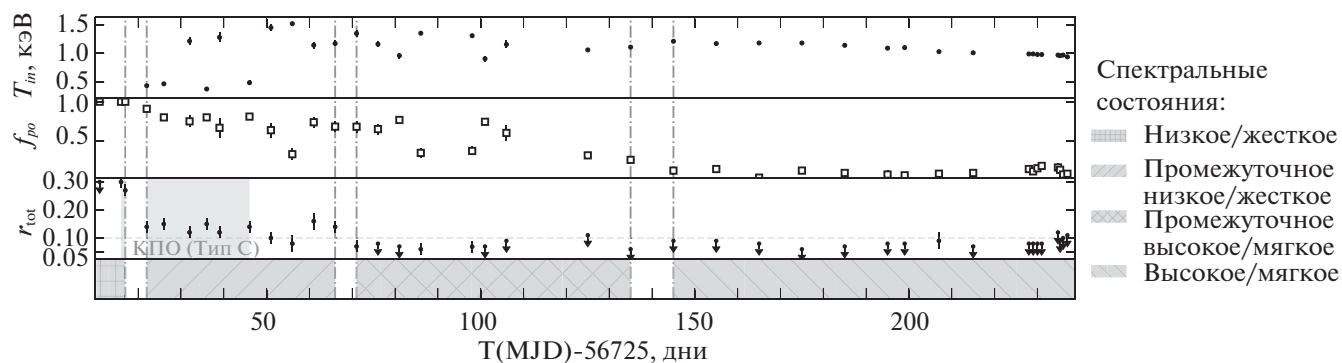


Рис. 6. Верхняя панель: зависимость температуры аккреционного диска на внутреннем радиусе от времени. Средняя панель: зависимость вклада степенной компоненты в общее излучение от времени. Нижняя панель: зависимость полной мощности переменности излучения от времени. Температура аккреционного диска на внутреннем радиусе и вклад степенной компоненты приведены для модели, в которой фотонный индекс был зафиксирован на значении 2. На рисунке также обозначены периоды времени, когда источник находился в низком/жестком, промежуточном жестком и мягком, высоком/мягком состояниях.

На рис. 6 показано, в какие периоды времени, в каком состоянии находился источник, а также приведены зависимости температуры аккреционного диска на внутреннем радиусе, вклада степенной компоненты в общее излучение и полной мощности переменности излучения от времени. Температура аккреционного диска на внутреннем радиусе и вклад степенной компоненты взяты из модели, в которой фотонный индекс был зафиксирован на значении 2.

В целом наши результаты о переходах между состояниями согласуются с результатами, приведенными в работах Яна и Ю (2017) и Ванг и др. (2018).

Мини-вспышки системы

Мы провели анализ кривой блеска системы GRS 1739-278 за все время наблюдений с момента открытия источника с целью поиска незарегистрированных вспышек. С 1996 до середины 2011 г. источник регулярно наблюдался монитором всего неба ASM/RXTE в диапазоне энергий 1.2–12 кэВ (Левине и др., 1996). Согласно этим данным после яркой вспышки 1996 г. источник не проявлял вспышечной активности и не детектировался. Начиная с 2005 г. источник почти непрерывно наблюдался телескопом Swift/BAT в диапазоне энергий 15–50 кэВ. В период с 2005 по 2014 г. вспышек на кривой блеска не обнаружено и средний поток был равен 1.0 ± 0.4 мКраб. После окончания вспышки 2014 г. средний поток от источника увеличился до 9.7 ± 0.2 мКраб.

Детальный анализ кривой блеска, полученной по данным телескопа Swift/BAT, после вспышки 2014 г. показал, что помимо упомянутых в литературе мини-вспышек, система продемонстрировала еще несколько похожих событий. Для того чтобы определить статистическую значимость обнаруженных вспышек, мы провели анализ, в котором разбили кривую блеска на интервалы, содержащие эти вспышки (на рис. 7 показаны серыми прямоугольниками), и аппроксимировали зависимость потока от времени двумя моделями: константой и константой с профилем Гаусса в качестве первого приближения для профиля вспышки. Значимость регистрирования вспышек определялась как вероятность разницы критериев χ^2 для обеих моделей наилучшей аппроксимации данных (F-тест). Результаты анализа показаны на рис. 8, значимость детектирования вспышек приведена над каждой панелью. Из рисунка следует, что упомянутые в литературе мини-вспышки имели значимость 7–8 σ (мини-вспышки 2,3 и 8), а обнаруженные 4 мини-вспышки имеют значимость 4–5.5 σ . Поскольку вспышка под номером 7 имеет маленькую значимость 2.6 σ , мы не включили ее в окончательные выводы. После сорванной вспышки 2016 г. система вернулась в спокойное состояние со средним потоком 5.0 ± 0.3 мКраб.

Эволюция вспышек системы в 1996, 2014 и 2015 гг.

С помощью архивных данных монитора RXTE/ASM мы построили диаграмму “жесткость–поток” для вспышки 1996 г. и сравнили ее с диаграммой для вспышки 2014 г. и мини-вспышек 2015 г.,

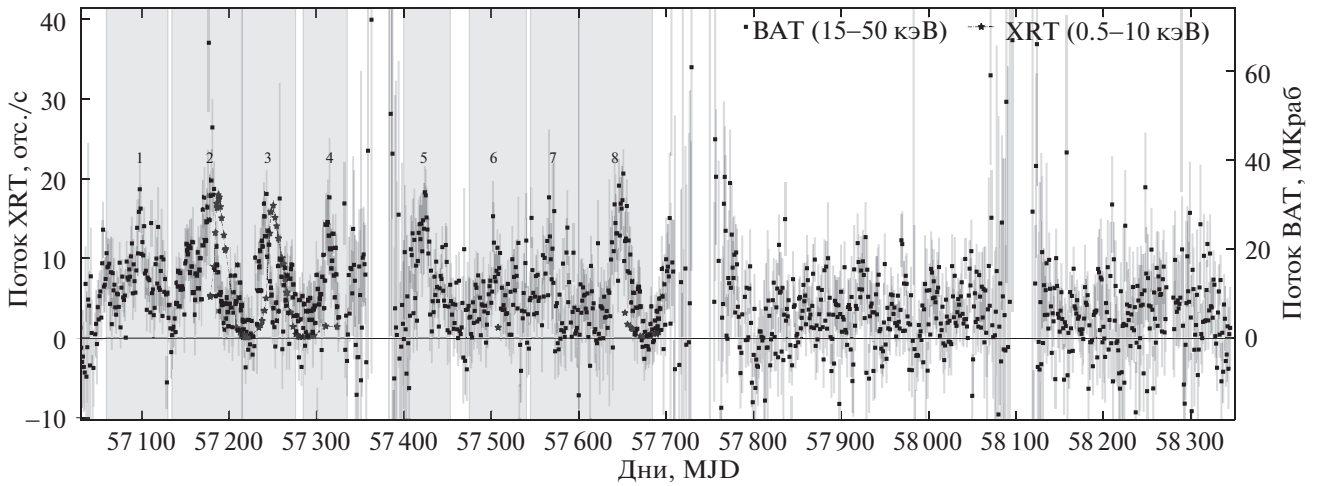


Рис. 7. Кривая блеска источника GRS 1739-278 за 2015–2016 гг. по данным Swift/XRT (черные звездочки, данные усреднены за наблюдение) и Swift/BAT (черные квадраты, данные усреднены за один день). Затемненными областями показаны временные интервалы, во время которых определялась значимость исследуемой вспышки (см. текст и рис. 8).

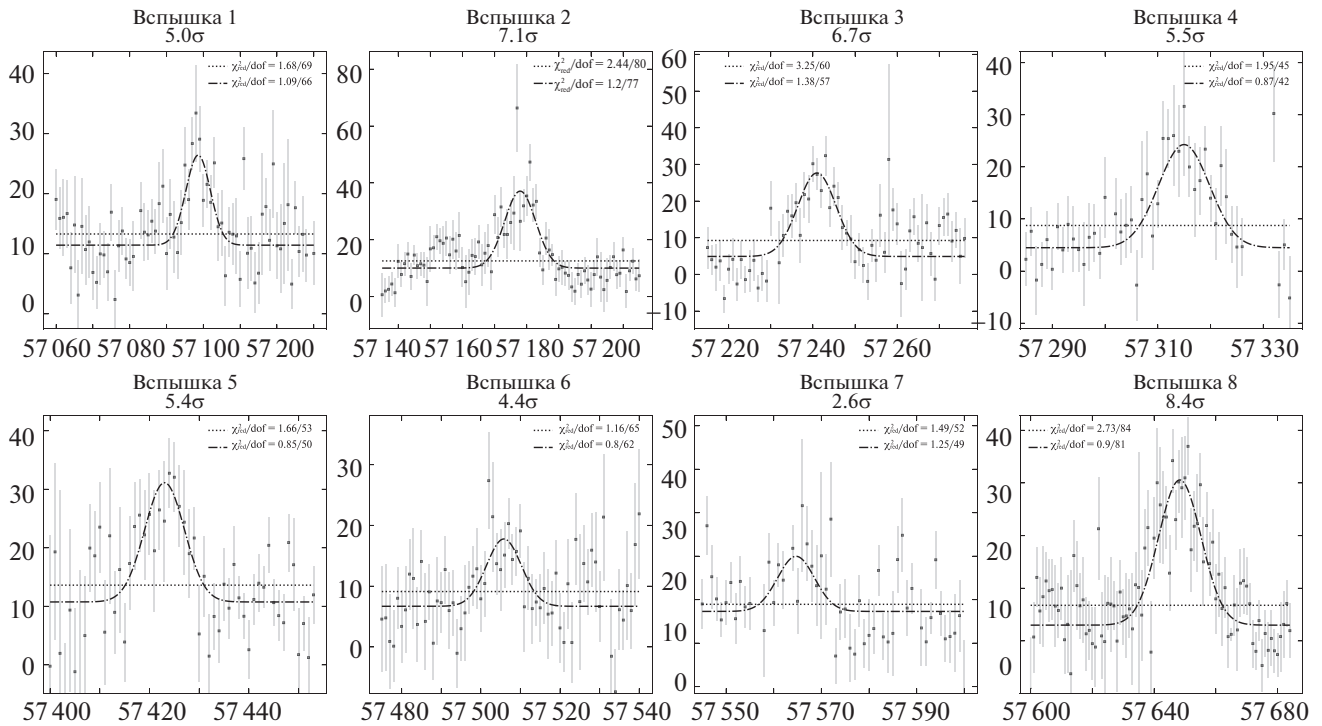


Рис. 8. Аппроксимация вспышек источника, обнаруженных по данным Swift/BAT (15–50 кэВ) (см. рис. 7) константой (черная пунктирная линия) и константой с добавлением профиля Гаусса (черная штрихпунктирная линия). Приведено значение χ^2 для аппроксимации каждой моделью. Значимость детектирования вспышки указана в заголовке панели.

когда система переходила в высокое/мягкое состояние. Чтобы сделать корректное сравнение диаграмм, необходимо принять во внимание разницу в энергетических диапазонах и характеристиках инструментов. Для этого мы посчитали жесткость

излучения с помощью спектральных моделей наилучшей аппроксимации для нескольких состояний. Во вспышке 1996 г. были выбраны наблюдения телескопом КВАНТ/ТТМ от 6–7 февраля 1996 г.; наблюдение телескопом RXTE/РСА

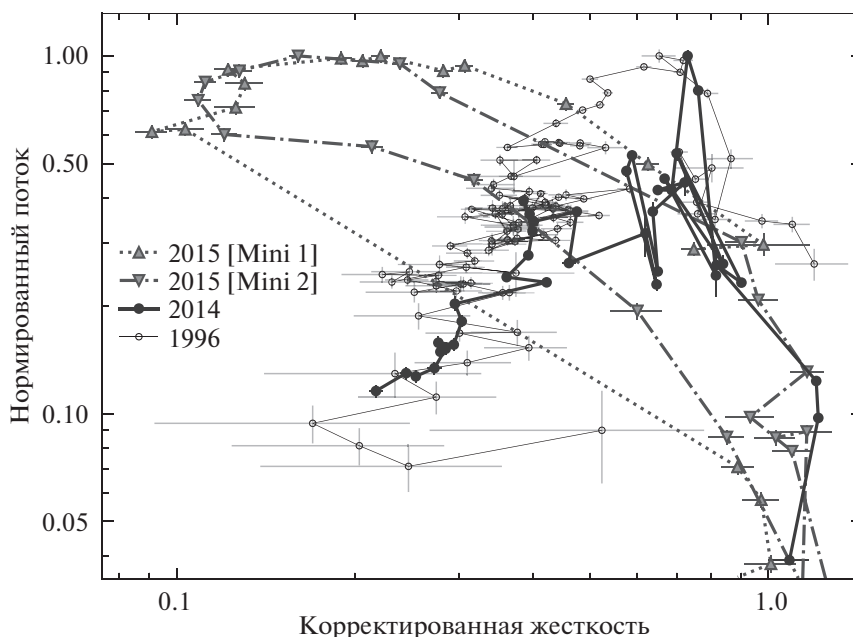


Рис. 9. Диаграммы жесткость—поток для вспышек 1996, 2014, а также первой и второй мини-вспышек 2015 гг. (во время которых система продемонстрировала переход из низкого/жесткого в высокое/мягкое состояние), отмечены белыми кружками, черными кружками, серыми верхними и нижними треугольниками соответственно. По оси абсцисс отложены значения скорректированной жесткости (см. текст), по оси ординат — отсчеты, нормированные на максимум каждой вспышки: по данным монитора ASM — в диапазоне энергий 1.2–12 кэВ, по данным телескопа XRT — 0.5–10 кэВ.

31 марта 1996 г. и 29 мая 1996 г. (см. Бороздин и др., 1998). Для вспышки 2014 г. мы использовали наблюдения 01, 11 и 32. Первые наблюдения для каждой вспышки соответствуют моменту самой большой зарегистрированной жесткости излучения, вторые — относятся к моменту максимальной яркости системы в мягком диапазоне энергий, третьи — к высокому/мягкому состоянию, когда вклад степенного закона в общий поток мал. Используя данную выборку наблюдений, мы посчитали жесткость излучения для энергетических диапазонов 5–10 кэВ и 1.5–5 кэВ. Во вспышке 1996 г. показатели жесткости получились равными 1.29, 0.57 и 0.30 соответственно, во вспышке 2014 г. — 1.29, 0.64 и 0.23. Вычислив жесткость по кривым блеска в опорных наблюдениях, обозначенных выше, мы получили отношения “истинной” (полученной на основе моделей) жесткости и наблюдаемой (полученной из кривых блеска). Разброс этих отношений относительно среднего значения составляет 12–15%, поэтому мы использовали среднее значение как коэффициент для перевода наблюдаемой диаграммы “жесткость—поток” в “истинную”. Для вспышки 2014 г. и мини-вспышек 2015 г. использовался один и тот же коэффициент. Также для удобства сравнения формы диаграмм мы нормировали поток на максимальное значение. Полученные диаграммы приведены на

рис. 9. На рисунке видно, что во время ярких вспышек кривые имеют схожую форму, при этом поведение источника на диаграмме “жесткость—поток” во время ярких вспышек существенно отличается от поведения во время мини-вспышек. Мы оценили светимость, при которой достигалась минимальная жесткость во время вспышек, приняв расстояние до системы равным 8.5 кпк. Для вспышки 1996 г. — $L_{1.2-12 \text{ кэВ}} \sim 1.5 \times 10^{37}$ эрг/с, для вспышки 2014 г. — $L_{0.5-10 \text{ кэВ}} \sim 2 \times 10^{37}$ эрг/с, а для мини-вспышек — $L_{0.5-10 \text{ кэВ}} \sim (5-6) \times 10^{36}$ эрг/с.

В работах Ю и др. (2007), Ву и др. (2010) для системы GX 339-4 (маломассивная двойная система с кандидатом в черные дыры) построена зависимость максимума потока в диапазоне энергий 20–160 кэВ во время низкого/жесткого состояния от времени между текущим и предыдущим максимумом потока в низком/жестком состоянии, и была предпринята попытка аппроксимировать эту зависимость линейным законом. Мы построили такую же зависимость максимального потока в энергетическом диапазоне 15–50 кэВ в низком/жестком состоянии от времени до предыдущего максимума излучения в низком/жестком состоянии для системы GRS 1739-278, учитывая яркие вспышки 1996, 2014 гг. и мини-вспышки 2015 г. (рис. 10). Момент

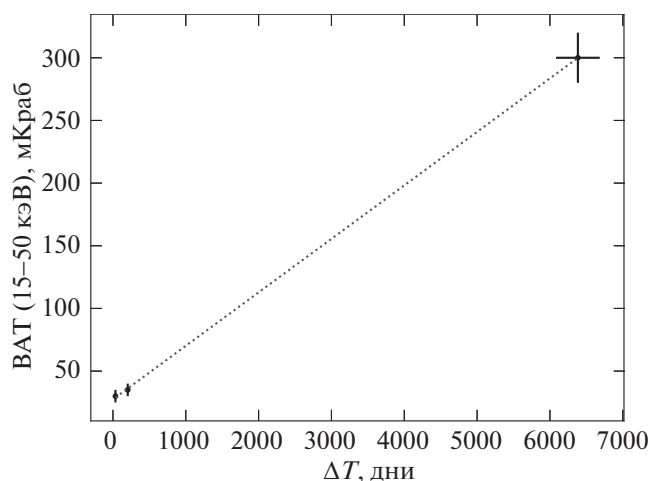


Рис. 10. Зависимость потока ВАР (в мКраб) в пике низкого/жесткого состояния вспышки от времени, прошедшего с максимума излучения в низком/жестком состоянии в предыдущей вспышке. Пунктирной линией показана модель наилучшей аппроксимации линейным законом, который имеет вид $0.043 \text{ мКраб/день} \cdot \Delta T + 27 \text{ мКраб}$.

перехода в жесткое состояние в конце вспышки 2014 г. взят из работы Ванга и др. (2018). Линейная зависимость, наилучшим образом аппроксимирующая данные для источника GRS 1739-278, выглядит следующим образом: $F_{\text{hard}}(\Delta T) = (0.043 \pm \pm 0.003) \frac{\text{мКраб}}{\text{день}} \Delta T + (27 \pm 2) \text{ мКраб}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено совместное исследование спектральной и временной эволюции системы GRS 1739-278 во время вспышки 2014 г., а также сделан сравнительный анализ поведения системы во время остальных вспышек, упомянутых в литературе, и в периоды между ними. Полученные результаты могут быть кратко суммированы следующим образом.

- показано, что во время вспышки 2014 г. система перешла в промежуточное жесткое состояние через 22 дня от начала вспышки, через 66 дней в промежуточное мягкое состояние (возможно, продемонстрировав это состояние на 55 день и вернувшись в промежуточное жесткое состояние не позднее чем через 4 дня) и через 145 дней в высокое/мягкое состояние.
- Во время вспышки системы GRS 1739-278 в 2014 г. были обнаружены КПО в диапазоне частот 0.1–5 Гц. Все КПО относятся к типу С. Зависимость частоты КПО от энергии не обнаружена.
- Показано, что после вспышки 2014 г. система перешла в режим мини-вспышечной активности и, помимо упомянутых в литературе трех мини-вспышек (Ю, Ян, 2017; Мереминский и др., 2017), нами было зарегистрировано еще 4 мини-вспышки со сравнимым ($\sim 20 \text{ мКраб}$) потоком в жестком диапазоне энергий (15–50 кэВ).
- Показано, что диаграмма “жесткость–поток” для мини-вспышек 2015 г., во время которых система продемонстрировала переход в высокое/мягкое состояние, отличается от диаграммы для ярких вспышек 1996 и 2014 г.: минимальная жесткость излучения во время мини-вспышек была достигнута при потоках не менее 60–80% от максимального, в то время как в ярких вспышках минимальная жесткость излучения была достигнута при потоках порядка 10% от максимального. При этом светимость источника в диапазоне 0.5–10 кэВ, соответствующая этим моментам, отличалась примерно в три раза: для яркой вспышки $L_{0.5-10 \text{ кэВ}} \sim 2 \times 10^{37} \text{ эрг/с}$, для мини-вспышек — $L_{0.5-10 \text{ кэВ}} \sim (5-6) \times 10^{36} \text{ эрг/с}$.
- Построена зависимость максимума потока в жестком диапазоне энергий во время низкого/жесткого состояния от интервала между вспышками. Эта зависимость может быть аппроксимирована линейным законом, что, возможно, указывает на зависимость максимального потока излучения системы в низком/жестком состоянии от массы накапливаемого аккреционного диска.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 14-12-01287. В работе использованы данные, предоставленные научным центром данных обсерватории Swift в университете Лейстер и центрами научных данных обсерватории ИНТЕГРАЛ в университете Женевы и Институте космических исследований РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арно (K.A. Arnaud), *Astron. Data Analys. Software and Systems V* **101**, 17 (1996).
2. Барроус и др. (D.N. Burrows, J.E. Hill, J.A. Nousek et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 165 (2005).
3. Белонни (T.M. Belloni), *Lect. Not. Phys.*, Berlin Springer Verlag **794**, 53 (2010).
4. Белонни, Мотта (T.M. Belloni and S.E. Motta), *Astrophys. of Black Holes: From Fundamental Aspects to Latest Developments* **440**, 61 (2016).
5. Бороздин и др. (K. Borozdin, N. Alexandrovich, R. Sunyaev et al.), *IAU Circ.* **6350** (1996).
6. Бороздин и др. (K.N. Borozdin, M.G. Revnivtsev, S.P. Trudolyubov et al.), *Astron. Lett.* **24**, 435 (1998).
7. Бороздин, Трудюлюбов (K.N. Borozdin, S.P. Trudolyubov), *Astrophys. J.* **533**, L131 (2000).
8. Ванг и др. (S. Wang, N. Kawai, M. Shidatsu et al.), *PASJ* **70**, 67 (2018).
9. Варагас и др. (M. Vargas, A. Goldwurm, J. Paul et al.), *Astron. Astrophys.* **313**, 828 (1996).
10. Вольтер и др. (R. Walter, R. Rohlfs, M.T. Meharga et al.), *Eighth Integral Workshop. The Restless Gamma-ray Universe (INTEGRAL 2010)*, **162** (2010).
11. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, E. Churazov, M. Gilfanov et al.), *Astrophys. J.* **424**, 395 (1994).
12. Ву и др. (Y.X. Wu, W.Yu, Z. Yan et al.), *Astron. Astrophys.* **512**, A32 (2010).
13. Гильфанов (M.R. Gilfanov), *Lect. Not. Phys.* **794**, 17 (2010).
14. Гребенев и др. (S. Grebenev, R. Sunyaev, M. Pavlinsky et al.), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **97**, 281 (1993).
15. Гребенев и др. (S. Grebenev, R. Sunyaev, M. Pavlinsky), *Adv. Space Res.* **19**, 15 (1997).
16. Дель Санто и др. (M. Del Santo, T.M. Belloni, J.A. Tomsick et al.), *MNRAS* **456**, 3585 (2016).
17. Дуршо и др. (P. Durouchoux, I.A. Smith, K. Hurley et al.), *IAU Circ.* **6383** (1996).
18. Здриарзски и др. (A.A. Zdziarski, M. Gierliński, J. Mikołajewska et al.), *MNRAS* **351**, 791 (2004).
19. Инграм и др. (A. Ingram, C. Done, P.C. Fragile), *MNRAS* **397**, L101 (2009).
20. Капитанио и др. (F. Capitanio, T. Belloni, M. Del Santo et al.), *MNRAS* **398**, 1194 (2009).
21. ван дер Клис (M. van der Klis), *Timing Neutron Stars* (Ed. H. Ogelman, E. P.J. van den Heuvel. NATO ASI Series C, Vol. 262, p. 27–70. Dordrecht: Kluwer, 1988. **262**, 27, 1988).
22. Кримм и др. (H.A. Krimm, S.D. Barthelmy, W. Baumgartner et al.), *The Astronomer's Telegram* **5986** (2014).
23. Кримм и др. (H.A. Krimm, S.T. Holland, R.H.D. Corbet et al.), *Astrophys. J.* **209**, 14 (2013).
24. Кэш (W. Cash), *Astrophys. J.* **228**, 939 (1979).
25. Левине и др. (A.M. Levine, H. Bradt, Cui et al.), *Astrophys. J.* **469**, L33 (1996).
26. Ли и др. (Z.B. Li, J.L. Qu, L.M. Song et al.), *MNRAS* **428**, 1704 (2013a).
27. Ли и др. (Z.B. Li, S. Zhang, J.L. Qu et al.), *MNRAS* **433**, 412 (2013b).
28. Лихи и др. (D.A. Leahy, W. Darbro, R.F. Elsner et al.), *Astrophys. J.* **266**, 160 (1983).
29. Мереминский и др. (I. Mereminskiy, R. Krivonos, S. Grebenev et al.), *The Astronomer's Telegram* **9517** (2016).
30. Мереминский и др. (I.A. Mereminskiy, E.V. Filippova, R.A. Krivonos et al.), *Astron. Lett.* **43**, 167 (2017).
31. Мереминский и др. (I.A. Mereminskiy, A.N. Semena, S.D. Bykov et al.), *MNRAS* **482**, 1392 (2019).
32. Миллер и др. (J.M. Miller, J.A. Tomsick, M. Bachetti et al.), *Astrophys. J.* **799**, L6 (2015).
33. Мотта и др. (S. Motta, T. Muñoz-Darias, T. Belloni), *MNRAS* **408**, 1796 (2010).
34. Мотта и др. (S. Motta, T. Muñoz-Darias, P. Casella et al.), *MNRAS* **418**, 2292 (2011).
35. Поль и др. (J. Paul, L. Bouchet, E. Churazov et al.), *IAU Circ.* **6348** (1996).
36. Ремиллард, Макклиток (R.A. Remillard, J.E. McClintock), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **44**, 49 (2006).
37. Родригез и др. (J. Rodriguez, S. Corbel, E. Kalemci et al.), *Astrophys. J.* **612**, 1018 (2004).
38. Смит и др. (D.M. Smith, W.A. Heindl, C.B. Markwardt et al.), *Astrophys. J.* **554**, L41 (2001).
39. Соболевска, Житски (M.A. Sobolewska, P.T. Życki), *MNRAS* **370**, 405 (2006).
40. Стиеле и др. (H. Stiele, S. Motta, T. Muñoz-Darias et al.), *MNRAS* **418**, 1746 (2011).
41. Танака, Шибазакки (Y. Tanaka, N. Shibazaki), *ARA&A* **34**, 607 (1996).
42. Ферригно и др. (C. Ferrigno, E. Bozzo, M. Del Santo et al.), *Astron. Astrophys.* **537**, L7 (2012).
43. Филиппова и др. (E. Filippova, E. Bozzo, C. Ferrigno), *Astron. Astrophys.* **563**, A124 (2014a).

44. Филиппова и др. (E. Filippova, E. Kuulkers, N.M. Skådt et al.), *The Astronomer's Telegram* **5991** (20146).
45. Фюрст и др. (F. Fürst, M.A. Nowak, J.A. Tomsick et al.), *Astrophys. J.* **808**, 122 (2015).
46. Хоман и др. (J. Homan, R. Wijnands, M. van der Klis et al.), *Astrophys. J.* **132**, 377 (2001).
47. Штейнер и др. (J.F. Steiner, R. Narayan, J.E. McClintock et al.), *PASP* **121**, 1279 (2009).
48. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page et al.), *Astron. Astrophys.* **469**, 379 (2007).
49. Ю и др. (W. Yu, F.K. Lamb, R. Fender et al.), *Astrophys. J.* **663**, 1309 (2007).
50. Ю и др. (W. Yu, M. van der Klis, R. Fender), *Astrophys. J.* **611**, L121 (2004).
51. Ю, Ян (W. Yu, Z. Yan), *Astrophys. J.* **701**, 1940 (2009).
52. Ян и др. (S.P. Yan, J.L. Qu, G.Q. Ding et al.), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **337**, 137 (2012).
53. Ян, Ю (Z. Yan, W. Yu), *MNRAS* **470**, 4298 (2017).