

МОРФОЛОГИЯ КРИВЫХ БЛЕСКА РЕНТГЕНОВСКИХ НОВЫХ Н 1743-322 И GX 339-4 ВО ВРЕМЯ ИХ ВСПЫШЕК В ПЕРИОД 2005–2019 гг.

© 2020 г. А. С. Гребенев^{1*}, Ю. А. Дворкович¹, В. С. Князева¹,
К. Д. Осташенко¹, С. А. Гребенев², И. А. Мереминский², А. В. Просветов²

¹Школа 444 г. Москвы, Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 16.12.2019 г.; принята к публикации 21.12.2019 г.

По данным многолетних наблюдений обсерваториями SWIFT, RXTE и MAXI рентгеновских новых Н 1743-322 (IGR J17464-3213) и GX 339-4 исследована морфология и выполнена классификация кривых блеска их рентгеновских вспышек. В частности, подтверждено существование у обоих источников двух кардинально отличающихся типов вспышек: мягких (S) и жестких (H), выявлены их разновидности: ультраяркие (U) и промежуточные (I) вспышки. В рамках модели “усеченного диска” обсуждены свойства и происхождение различий в кривых блеска этих вспышек.

Ключевые слова: черные дыры, маломассивные рентгеновские двойные, рентгеновские транзиенты, рентгеновские новые, нестационарная аккреция.

DOI: 10.31857/S0320010820040063

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновскими новыми называют нестационарные (вспыхивающие) рентгеновские двойные системы, компактным объектом в которых служит черная дыра звездной ($M_1 \lesssim 10 M_\odot$) массы (или нейтронная звезда со слабым $B < 10^9$ Гс магнитным полем), а нормальным компонентом — маломассивная ($M_2 \lesssim M_\odot$) звезда главной последовательности. Во время вспышек рентгеновские новые становятся ярчайшими источниками на рентгеновском небе (Сюняев и др., 1988, 1991; Гребенев и др., 1993, 1997; Танака, Шибасаки, 1996; Грове и др., 1998; Ремиллард, МакКлинтон, 2006; Беллони, 2010).

Орбитальные периоды рентгеновских новых, как правило, равны нескольким часам (Черепашук, 2013), что обеспечивает заполнение (или почти заполнение) полости Роша нормальной звездой и возможность эффективного перетекания ее вещества через внутреннюю точку либрации (L1). Энерговыделение при аккреции этого вещества черной дырой (нейтронной звездой) и питает рентгеновскую вспышку системы. Поскольку перетекающее вещество обладает большим угловым моментом, аккреция происходит с образованием

вокруг компактного объекта протяженного аккреционного диска, в котором вещество медленно по спирали движется по направлению к центру.

В настоящее время не ясно, связаны вспышки рентгеновских новых с какими-то процессами в нормальной звезде, приводящими к ее раздуванию до объема полости Роша, или перетекание происходит постоянно, но большую часть времени вещество не достигает черной дыры, а накапливается во внешних областях диска и лишь по достижении некоторой критической массы протекает вовнутрь. Типичные вспышки рентгеновских новых продолжаются месяцы, длительность особо мощных может достигать года. Во время спокойного (“выключенного”) состояния поток от новых падает ниже уровня регистрации широкоугольными рентгеновскими телескопами и мониторами всего неба, тем не менее, наблюдения некоторых известных рентгеновских новых телескопами с зеркальной оптикой показали, что рентгеновский поток не исчезает полностью, а лишь падает на 4–5 порядков величины. Интервалы между вспышками у некоторых новых составляют десятки и более лет. Почти каждый год открывают ранее неизвестные источники этого типа, т.е. в эпоху рентгеновской астрономии они вспыхивают впервые. У других новых вспышки происходят квазирегулярно на масштабе года-двух. Правда, мы знаем лишь

*Электронный адрес: grebenev@iki.rssi.ru

несколько таких рекуррентных объектов, тогда как полное число наблюдавшихся рентгеновских новых приближается уже к пяти десяткам (например, Черепашук, 2013).

Вещество, “прорвавшееся” к черной дыре в результате эпизода нестационарной аккреции, “размазывается” по аккреционному диску, формируя наблюдаемую кривую рентгеновского блеска (Любарский, Шакура, 1987; Липунова, Шакура, 2000; Сулейманов и др., 2008). Как правило, у мощных вспышек в стандартном рентгеновском диапазоне 2–10 кэВ она имеет характерную форму, называемую FRED (“Fast Rise — Exponential Decay”, т.е. “быстрый подъем — экспоненциальный спад”). Жесткое > 20 кэВ излучение наблюдается в первые дни и на спаде кривой блеска. Но есть и различия, как между вспышками разных источников, так и между отдельными вспышками одного и того же объекта. Известны вспышки, во время которых жесткое излучение доминировало на протяжении всей ее длительности (Сюняев и др., 1991; Грове и др., 1998; Мереминский и др., 2017).

Изменения жесткости отражают тот факт, что в процессе развития вспышки рентгеновские новые проходят поочередно несколько разных состояний, отличающихся энергетическими спектрами их рентгеновского излучения: жесткое, промежуточное жесткое, мягкое, промежуточное мягкое, двухкомпонентное (Макишима и др., 1986; Гребенев и др., 1997; Беллони, 2010). Ясно, что эти состояния связаны с разными режимами дисковой аккреции, реализуемыми в этих системах в данный конкретный момент времени.

Разнообразие спектральных состояний рентгеновских новых находит естественное объяснение в так называемой модели “усеченного диска”. Согласно этой модели, аккреционный диск состоит из двух геометрически разделенных областей: внешней — холодной ($kT \lesssim 1$ кэВ), геометрически тонкой, непрозрачной и поэтому излучающей чернотельным образом (она отвечает за мягкую компоненту в рентгеновском спектре излучения новой, Шакура, Сюняев, 1973), и внутренней — высокотемпературной ($kT \lesssim 100$ кэВ), геометрически толстой, но оптически тонкой — полупрозрачной (она отвечает за жесткую степенную компоненту рентгеновского излучения, см., например, Шапиро и др., 1976; Сюняев, Трюмпер, 1979). Переход между областями определяется испарением холодного внешнего диска под действием вязкого энерговыделения в нем. Согласно модели, в зависимости от положения границы между внешней и внутренней областями (и соответственно — площадями их поверхностей и вкладами в общий спектр излучения) наблюдается то или иное состояние рентгеновской новой. Радиус границы между областями, казалось бы, должен увеличиваться с ростом темпа аккреции

(площадь высокотемпературной зоны должна расти с ростом энерговыделения, см. Шакура, Сюняев, 1973). Однако наблюдения показывают, что этого не происходит, по крайней мере, прямой пропорциональности здесь нет.

В настоящей работе предпринята попытка проверить справедливость описанной картины смены состояний и вообще модели “усеченного диска” путем изучения рентгеновских кривых блеска вспышек двух рекуррентных, широко известных рентгеновских новых H 1743–322 и GX 339–4, наблюдавшихся у них на протяжении почти 15 лет. Большая часть этих вспышек в той или иной степени исследовалась разными приборами непосредственно во время их развития и затухания, но сравнения свойств разных вспышек и анализа всей их совокупности, насколько нам известно, никто не проводил.

ИСТОЧНИКИ H 1743–322 И GX 339–4

Рентгеновский транзиент H 1743–322 был открыт обсерваторией HEAO–1 во время мощной вспышки 1977 г., длившейся ~230 дней. Однако его положение на небе было определено неоднозначно и в каталоге основного прибора A1 обсерватории (Вуд и др., 1984) дано с большим смещением (источник в этом каталоге даже назывался иначе — H 1741–322). После этой вспышки источник много лет оставался в выключенном состоянии. Новая вспышка из этой области была зарегистрирована лишь в марте 2003 г. (Ревнивцев и др., 2003) обсерваторией INTEGRAL (Винклер и др., 2003) и из-за ошибки положения в каталоге Вуда и др. (1984) принята за вспышку нового транзиента, получившего наименование IGR J17464–3213. Ассоциация с H 1743–322 была прояснена Марквардтом (2003), который указал на упоминание в работе Гурского и др. (1978), основанной на данных прибора A3 обсерватории HEAO–1, другого возможного положения источника H 1741–322, в пределах ошибок совпадающего с положением IGR J17464–3213.

Вспышка 2003 г. была очень мощной, продолжалась 8 мес и прошла через весь спектр состояний — от жесткого (Ревнивцев и др., 2003) к мягкому (Кречмар и др., 2003) и обратно (Гребенев и др., 2003; Томсик, Калемси, 2003). В июле 2004 г. Сванк (2004), основываясь на данных обсерватории RXTE (Ягода и др., 1996), сообщила о начале новой вспышки источника. Слабая вспышка была зарегистрирована RXTE также в августе 2005 г. (Сванк и др., 2005). Ее наблюдала уже и обсерватория SWIFT (Джерелс и др., 2004). Кривая блеска источника, измеренная монитором всего неба ASM обсерватории RXTE во время этих трех вспышек, показана на рис. 1. Первые две

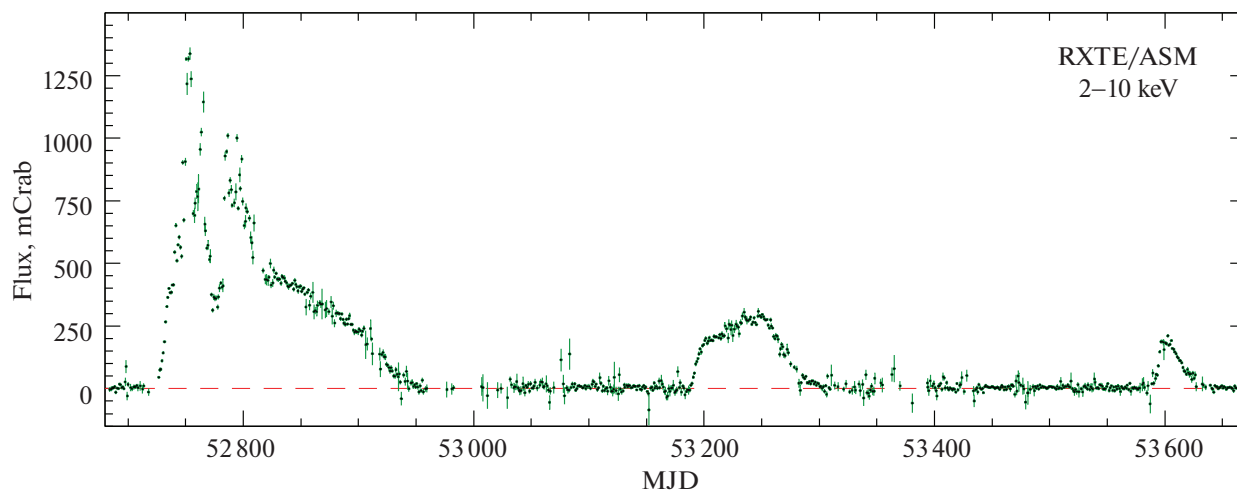


Рис. 1. Кривая блеска гигантской вспышки 2003 г. и двух последующих вспышек рентгеновской новой H 1743–322 в диапазоне энергий 2–10 кэВ (согласно измерениям монитором ASM обсерватории RXTE в период с февраля 2003 г. по октябрь 2005 г., MJD 52680–53670).

вспышки по своей мощности, длительности, временному профилю сильно отличаются от третьей и всех последующих вспышек, наблюдавшихся с этого момента через каждые 8–9 мес. В данной работе мы будем исследовать именно третью и последующие вспышки, более типичные для этой рентгеновской новой.

Оптический компаньон источника H 1743–322 все еще не установлен. Предположение об аккреции на черную дыру основано на общности рентгеновских свойств этого источника с наблюдательными проявлениями других рентгеновских новых, в частности, на наблюдении у него радио- и рентгеновского джета (Корбел и др., 2005). Из-за близости положения источника на небе к направлению на центр Галактики принято считать, что он действительно расположен вблизи центра на расстоянии $d \simeq 8$ кпк. Стейнер и др. (2012), анализируя данные по кинематике джета, оценили расстояние до источника более строго: $d = 8.5 \pm 0.8$ кпк.

Рентгеновский транзиент GX 339-4 (обозначаемый также как источник 4U 1658-48), подобно рентгеновскому источнику Cyg X-1, является давно известной и наиболее изученной (канонической) галактической двойной системой, содержащей черную дыру. В отличие от Cyg X-1 источник GX 339-4 — член маломассивной рентгеновской системы. Источник является и первым известным рекуррентным транзиентом, вспышки которого повторяются на масштабе нескольких лет.

Открытый спутником OSO-7 в 1973 г. как необычный сильно переменный рентгеновский источник (Маркерт и др., 1973), GX 339-4 детально исследовался спутниками ARIEL-6 (Мотч и др., 1983), TENMA (Макишима и др., 1986), GINGA

(Миямото и др., 1991), GRANAT (Гребенев и др., 1991, 1993) и всеми последующими миссиями.

Оптическая звезда V 821 Ara этой двойной системы обращается вокруг компактного объекта с периодом 1.76 дня (Черепашук, 2013); функция масс компактного объекта $f(M_1) = 5.8 \pm 0.5 M_\odot$ (Хинес и др., 2003) не оставляет сомнений, что им является черная дыра. Расстояние до источника оценивается, как лежащее в пределах $6 \text{ кпк} < d < 15 \text{ кпк}$ (Хинес и др., 2004).

ПРИБОРЫ И НАБЛЮДЕНИЯ

Работа основана на архивных общедоступных данных наблюдений указанных рентгеновских источников орбитальными астрофизическими обсерваториями SWIFT (Джерелс и др., 2004) (использовались данные жесткого рентгеновского телескопа BAT с кодирующей апертурой, Бартелми и др., 2005), RXTE (Ягода и др., 1996) (использовались данные рентгеновского монитора всего неба ASM) и MAXI (Мацуока и др., 2009) (находится на борту Международной космической станции ISS, использовались данные рентгеновского монитора всего неба GSC, Михара и др., 2011). Эти приборы имеют широкое поле зрения и проводят квазирегулярные наблюдения многих ярких космических источников.

Кривые блеска новых H 1743–322 и GX 339-4 в жестком диапазоне 15–50 кэВ были взяты с сайта swift.gsfc.nasa.gov/results/transients. Они получены по данным телескопа SWIFT/BAT разработчиками телескопа в рамках программы мониторинга рентгеновских транзиентов (Кримм и др., 2013). Каждая точка кривых представляет собой усредненное за сутки значение потока,

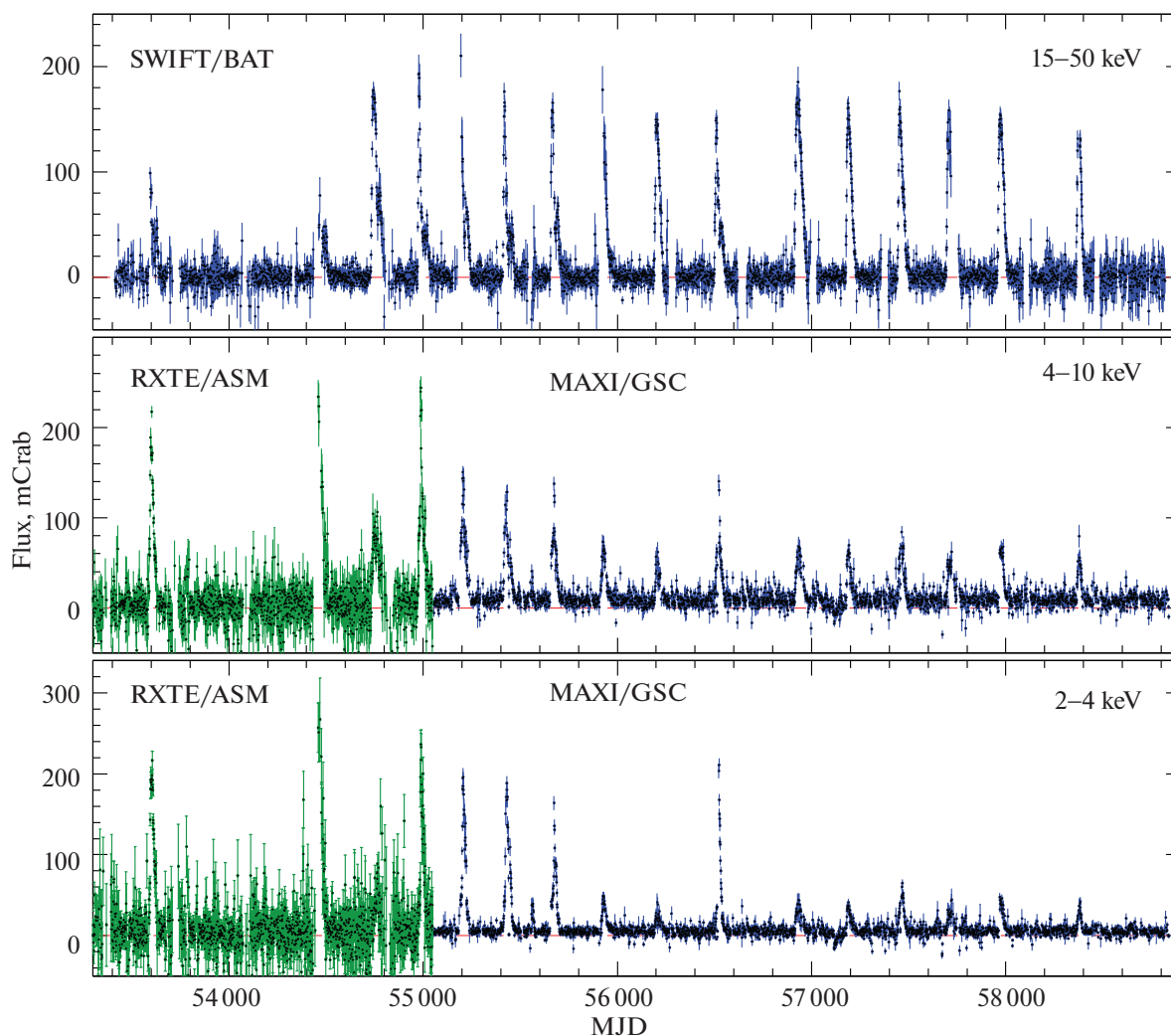


Рис. 2. Долговременная кривая блеска рентгеновской новой H 1743–322 в трех диапазонах энергии (согласно измерениям телескопами SWIFT/BAT, MAXI/GSC (показано синим) и RXTE/ASM (зеленым) в период с января 2005 г. по декабрь 2019 г., MJD 53300–MJD 58900). За это время произошло 17 вспышек новой разного типа. Каждая точка представляет усредненные за один день данные; реальные наблюдения, как правило, заметно короче.

основанное не менее чем на 64 с наблюдений источника. Кривые охватывают интервал времени от 12 февраля 2005 г. до 24 декабря 2019 г. Полное подробное описание процедуры получения кривых блеска и учитываемых при этом ограничений можно найти в упомянутой работе Кримма и др. (2013).

Кривые блеска в более мягких рентгеновских диапазонах в период до MJD 55200 взяты с сайта xte.mit.edu/asmlc.html монитора ACS обсерватории RXTE. Они предоставлены разработчиками прибора в диапазонах 1.3–3 и 3–12.2 кэВ. После MJD 55200 (с 15 августа 2009 г. до 24 декабря 2019 г.) использовались данные монитора GSC обсерватории MAXI: кривые блеска в диапазонах 2–4 и 4–10 кэВ взяты с сайта maxi.riken.jp/top/slist.html. Каждая точка

на кривых блеска обоих приборов представляет собой усредненное за сутки значение потока от источника. В случае RXTE/ASM оно основано на 5–10 сканах длительностью ~ 90 с, в случае MAXI/GSC — на нескольких сканах длительностью ~ 60 с, выполняемых каждые 92 мин.

Для всех приборов измеренные потоки фотонов были пересчитаны в мКрабы (10^{-3} потока от Крабовидной туманности), исходя из приведенных на указанных сайтах результатов регулярных наблюдений туманности этими приборами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны долговременные (полученные в период 2005–2019 гг.) кривые блеска рентгеновской новой H 1743–322 в трех диапазонах

Таблица 1. Параметры вспышек рентгеновской новой H 1743–322 по данным телескопа SWIFT/BAT и мониторов всего неба RXTE/ASM и MAXI/GSC

Вспышка ^а		T_m^b		ΔT^b	T_r^c	$F_m(H)^d$	$F_m(S)^d$	SHR^e	Тип ^ж
N	MJD	YYYY–MM	MJD	дней	дней	мКраб	мКраб		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	53590–53640	2005–08	53595	50	—	98.95 ± 5.58	216.71 ± 11.09	2.19 ± 0.17	U
2	54464–54512	2008–01	54469	48	874	77.61 ± 16.50	267.34 ± 51.15	3.44 ± 0.98	U
3	54732–54804	2008–10	54744	72	268	177.69 ± 8.26	160.00 ± 34.09	0.90 ± 0.20	II
4	54973–55036	2009–05	54979	63	241	193.57 ± 9.62	236.46 ± 17.55	1.22 ± 0.11	S
5	55195–55245	2010–01	55195	50	222	210.33 ± 20.43	194.66 ± 6.96	0.93 ± 0.10	S
6	55411–55471	2010–08	55418	60	216	176.44 ± 8.28	188.48 ± 8.98	1.07 ± 0.07	S
7 ^з	55535–55577	2011–01	55565	42	124	$<42(3\sigma)$	39.38 ± 8.46	$>0.94(3\sigma)$	M
8	55656–55712	2011–04	55667	56	121	165.74 ± 9.88	164.04 ± 8.60	0.99 ± 0.08	I2
9	55924–55972	2011–12	55924	48	268	178.13 ± 22.47	48.99 ± 5.13	0.28 ± 0.05	H
10	56191–56233	2012–10	56199	42	267	149.75 ± 6.86	38.46 ± 9.06	0.26 ± 0.06	H
11	56500–56556	2013–08	56510	56	309	151.18 ± 7.89	210.96 ± 8.52	1.39 ± 0.09	S
12	56911–56974	2014–10	56930	63	411	185.51 ± 14.80	43.97 ± 8.40	0.24 ± 0.05	H
13	57177–57229	2015–06	57188	52	266	165.32 ± 6.75	41.28 ± 4.48	0.25 ± 0.03	H
14	57442–57500	2016–03	57452	58	265	176.78 ± 9.05	64.93 ± 4.77	0.37 ± 0.03	H
15	57694–57760	2016–11	57707	66	252	158.66 ± 10.30	43.09 ± 8.75	0.27 ± 0.06	H
16	57957–58013	2017–08	57971	56	263	154.64 ± 7.38	47.72 ± 5.00	0.31 ± 0.04	H
17	58361–58404	2018–09	58383	43	404	131.65 ± 8.44	42.20 ± 5.17	0.32 ± 0.04	H

^а Условный номер и даты (MJD) начала—конца вспышки.^б Год, месяц и дата (MJD) достижения максимального потока во вспышке.^в Длительность вспышки.^г Время рекуррентности (интервал между началом этой и началом предыдущей вспышки).^д Максимальный поток в жестком (H: 15–50 кэВ) и мягком (S: 2–4 или 1.3–3 кэВ — при наблюдении соответственно мониторами MAXI/GSC и RXTE/ASM) диапазонах.^е Мягкость излучения (отношение потоков в S и H диапазонах).^ж Тип вспышки (жесткая — H, мягкая — S, ультрамягкая — U, промежуточная — I, микровспышка — M).^з Временные характеристики для этой вспышки определены по мягкому (S) диапазону.

энергий 2–4 и 4–10 кэВ (по данным прибора GSC обсерватории MAXI/ISS или монитора ASM обсерватории RXTE) и 15–50 кэВ (по данным телескопа BAT обсерватории SWIFT).

За прошедшие с января 2005 г. ~15 лет источник испытал 17 вспышек. Последняя вспышка произошла в 2018 г. (Гребенев, Мереминский, 2018; Вильямс и др., 2020). Из рисунка следует, что в жестком диапазоне, за исключением первых 5 лет его наблюдений обсерваторией SWIFT (во

время которых произошли 2 не слишком сильные $\lesssim 50$ мКраб вспышки), все вспышки имели практически одинаковую интенсивность, достигая в максимуме ~150–200 мКраб. Иное дело в мягких диапазонах, 4–10 кэВ и особенно 2–4 кэВ; здесь, наряду с 3 ультраяркими (с потоком ~250–300 мКраб) и 4 умеренно яркими вспышками (с потоком ~200 мКраб), регулярно наблюдались вспышки, максимальный поток в которых не превышал ~50 мКраб. Ясно, что излучение

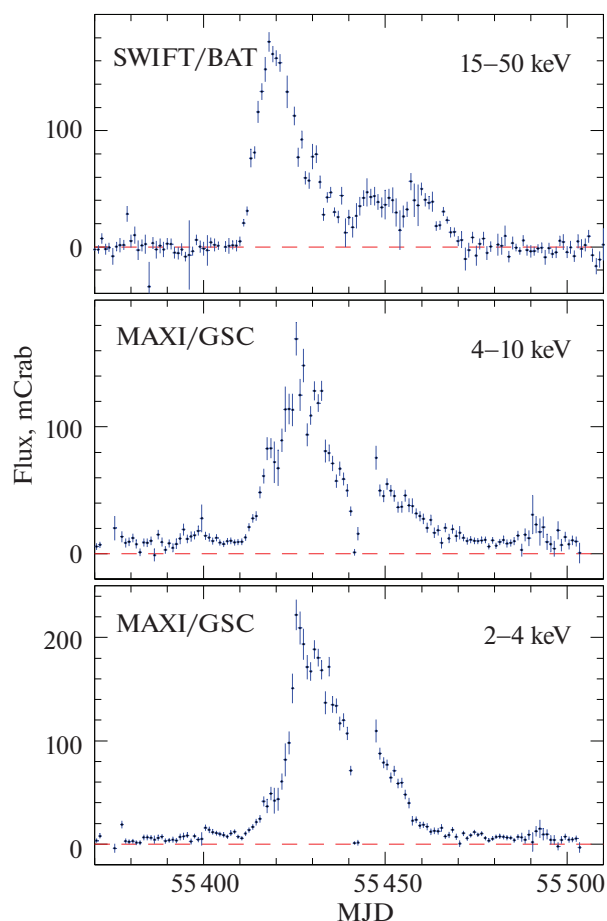


Рис. 3. Кривая блеска вспышки рентгеновской новой H 1743-322 в августе 2010 г. (вспышка 6 в табл. 1, типа S) в разных диапазонах энергий (согласно измерениям телескопами SWIFT/BAT и MAXI/GSC).

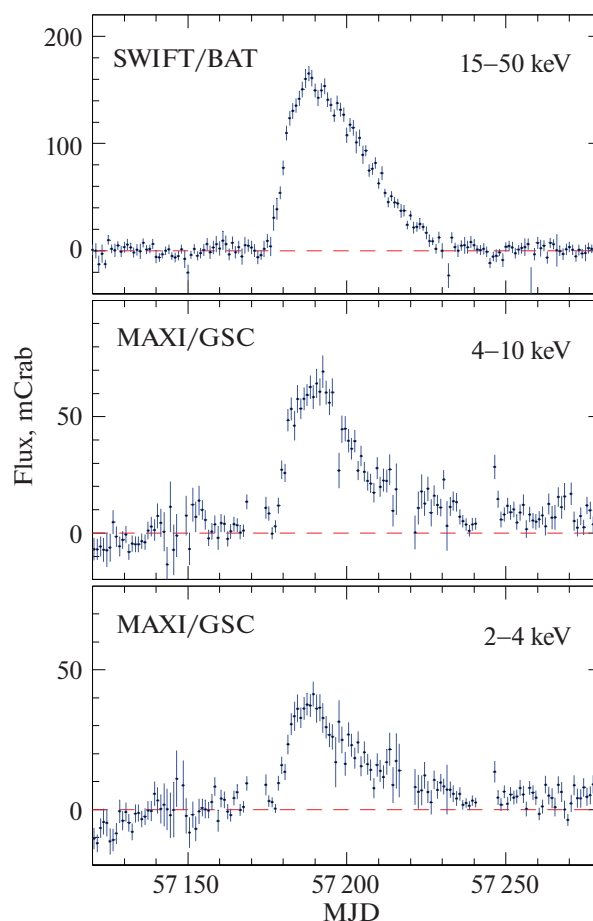


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для вспышки 2015 г. (вспышка 13, типа H). Амплитуда вспышки в диапазонах 2–4 и 4–10 кэВ заметно уменьшилась.

источника во время этих вспышек было намного более жестким, чем во время ярких.

В табл. 1 приведены некоторые параметры вспышек от этого источника: условный номер и дата (MJD) начала-конца вспышки (столбцы 1 и 2 соответственно), год и месяц достижения максимального потока (3), MJD дата достижения максимального потока (4), длительность вспышки в днях (5), время рекуррентности (время между началом данной и началом предыдущей вспышки) (6), максимальный поток в жестком (H: 15–50 кэВ) и мягком (S: 2–4 кэВ) диапазонах (столбцы 7 и 8), параметр SHR мягкости излучения источника (отношение потоков в мягком и жестком диапазонах, столбец 9). Временные характеристики определены по кривой блеска в жестком диапазоне (за исключением вспышки 7). В мягком диапазоне они слегка отличаются, в частности, максимум потока, как правило, достигается на несколько дней позже, чем в жестком. Однако точность определения этих

характеристик из-за статистических ошибок измерения кривых блеска не превышает нескольких дней и недостаточна для достоверных выводов об их зависимости от энергии. Отметим, что многие вспышки демонстрируют квазирекуррентность с периодом ~ 260 дней.

Очевидно, что вспышки этой рентгеновской новой можно разбить, по крайней мере, на два наиболее часто встречающихся типа — мягкие (тип S) и жесткие (тип H). На рис. 3 и 4 приведены характерные профили вспышек этих типов (вспышки 6 и 13 из табл. 1). Для мягких всплесков показатель SHR (столбец 9) лежит в диапазоне 0.9–1.4, для жестких всплесков — в диапазоне 0.24–0.37. Помимо в несколько раз большей амплитуды пиковых потоков в мягких диапазонах 2–4 и 4–10 кэВ, вспышки типа S характеризуются более сложной формой кривой блеска в жестком диапазоне 15–50 кэВ: после достижения максимума поток излучения достаточно быстро (на масштабе 20–30 дней) уменьшается в 4–5 раз, а затем сохраняется на этом

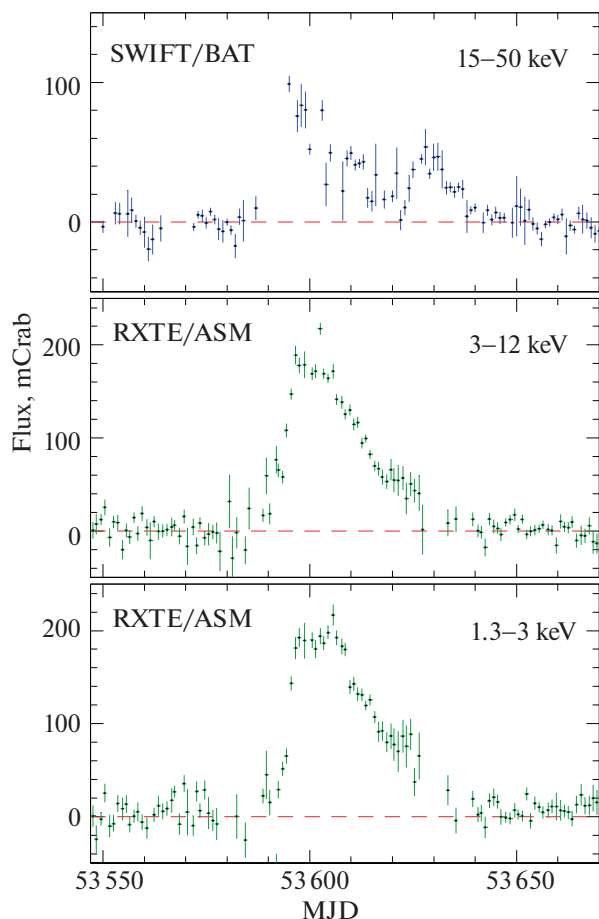


Рис. 5. То же, что на рис. 3, но для вспышки рентгеновской новой H 1743-322 в 2005 г. (вспышка 1, тип U). Формально эту вспышку следовало бы отнести к типу S, отметив, что ее амплитуда в мягких диапазонах достигает максимума. Однако в жестком диапазоне 15–50 кэВ вспышка намного слабее других вспышек типа S, не говоря уж про вспышки типа H. Отметим, что в мягких диапазонах измерения выполнены монитором RXTE/ASM.

уровне в течение еще ~ 30 дней. Во время вспышки типа H поток фотонов в жестком диапазоне спадает заметно медленнее (на масштабе 50–60 дней), а сама кривая блеска вспышки имеет простую форму без особенностей, напоминающую тип FRED. В столбце 10 таблицы для каждой вспышки указан ее тип.

Две ранние (до 2008 г.) вспышки обозначены в таблице как вспышки типа U (ультрамягкие). Они во многом подобны вспышкам типа S, но в мягких диапазонах являются несколько более яркими, чем остальные вспышки этого типа, а в жестком — намного (в 2–3 раза) более слабыми. Показатель их мягкости SHR попадает в диапазон 2.2–3.5. На рис. 5 приведена кривая блеска вспышки 2005 г. этого типа (вспышка 1 из табл. 1). Вспышка #4

2009 г. (отнесенная к типу S) так же ярка в мягких диапазонах, как вспышки типа U, но в жестком диапазоне сравнима с остальными S-вспышками (показатель мягкости ее излучения 1.22 ± 0.11 находится у верхней границы диапазона значений для S-вспышек).

Если характеризовать весь период активности рентгеновской новой H 1743-322, начиная с 2005 г. и вплоть до настоящего времени, то видно, что до 2011 г. источник подвергался в основном мягким вспышкам типа U и S, а начиная с 2011 г. полностью перешел на вспышки типа H.

Из табл. 1 видно, что существуют и более редкие другие типы вспышек (в таблице они обозначены буквами I1, I2 и M). Типы I (промежуточные) показаны на рис. 6 и 7. Первая вспышка, начавшаяся в октябре 2008 г. (#3 в таблице), имеет явные признаки вспышки типа S, но при этом низкую интенсивность в мягком диапазоне энергий 1.3–3 кэВ (в этом диапазоне вспышка наблюдалась монитором RXTE/ASM). Точка, давшая в таблице поток $160 \pm \pm 34$ мКраб, как видно из рис. 6, скорее всего, является случайным выбросом. Параметр мягкости находится вблизи нижней границы диапазона изменений этого параметра для S вспышек. Вторая вспышка (#8, с максимумом в апреле 2011 г.) также формально напоминает вспышку типа S, но в мягких диапазонах, если бы не короткий (3–4 дня) импульс излучения, она была бы намного ближе к вспышкам типа H.

Наконец, вспышка, обозначенная как M (микровспышка), под номером 7 в таблице, начавшаяся в январе 2011 г., отличалась как аномально низкой амплитудой в мягких диапазонах (39 ± 8 мКраб), что еще можно было бы отнести на счет ее жесткости, так и очень низким потоком в жестком диапазоне $\lesssim 42$ мКраб (3σ верхний предел), что не позволяет считать ее жесткой вспышкой типа H. Правда, нужно отметить, что данные телескопа SWIFT/BAT во время этой вспышки были довольно низкого качества.

Вспышки источника GX 339-4

На рис. 8, аналогичном рис. 2, показаны долговременные кривые блеска рентгеновского транзита GX 339-4. За 15 лет источник пережил 11 вспышек, т.е. они происходили в полтора раза реже, чем у рентгеновской новой H 1743-322. Самую раннюю вспышку, наблюдавшуюся в период MJD 53 200–53 500, мы далее рассматривать не будем, поскольку она не была зарегистрирована в жестком диапазоне (спутник SWIFT еще не начал работать на орбите). Характеристики остальных 10 вспышек приведены в табл. 2.

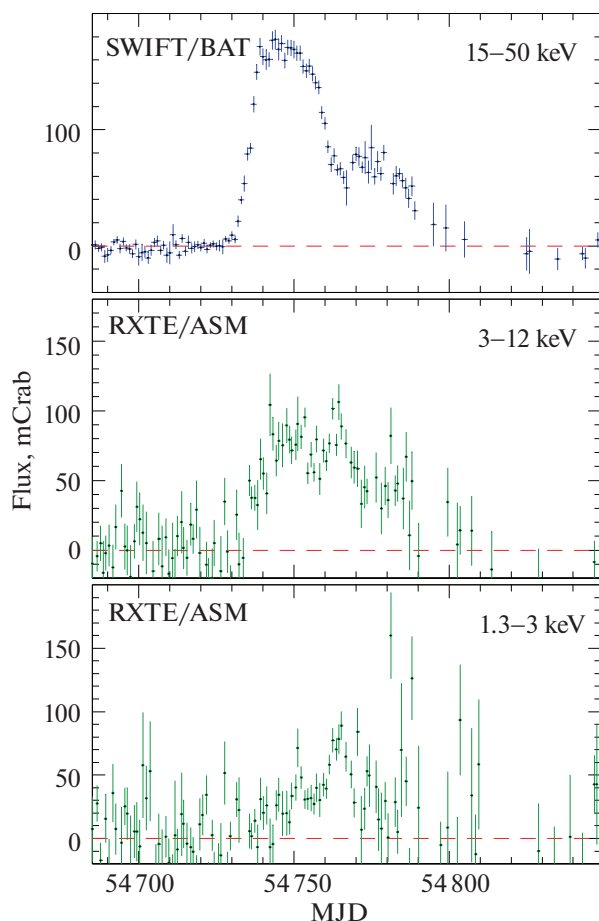


Рис. 6. То же, что на рис. 3, но для вспышки в октябре 2008 г. (вспышка 3, тип I). Формально вспышку следовало бы отнести к типу S, но в мягких диапазонах, особенно в диапазоне 1.3–3 кэВ, во время нее зарегистрирован поток излучения в 1.5–2 раза более слабый, чем во время других вспышек этого типа.

Таблица и рис. 8 показывают, что вспышки источника GX 339–4, подобно вспышкам рентгеновской новой H 1743–322, отличались большим разнообразием. В частности, среди них тоже присутствовали как мягкие (типа S или U), так и жесткие вспышки (типа H). На рис. 9 и далее на рис. 11 даны примеры кривых блеска таких вспышек с намного лучшим временным разрешением. Показаны временные профили вспышек, достигших максимума жесткого излучения в апреле 2010 г. (#5 в таблице, тип S) и в сентябре 2013 г. (#6 в таблице, тип H).

Вспышка на рис. 9, так же как и все другие мягкие вспышки, была в несколько раз ярче, чем подобные вспышки источника H 1743–322, слегка мягче ($SHR \simeq 1.74–1.87$) и заметно их дольше (300–500 дней). Из табл. 2 (столбцы 7 и 9) следует, что максимальный поток в мягком диапазоне во время этих вспышек достигался на 15–20 (а в

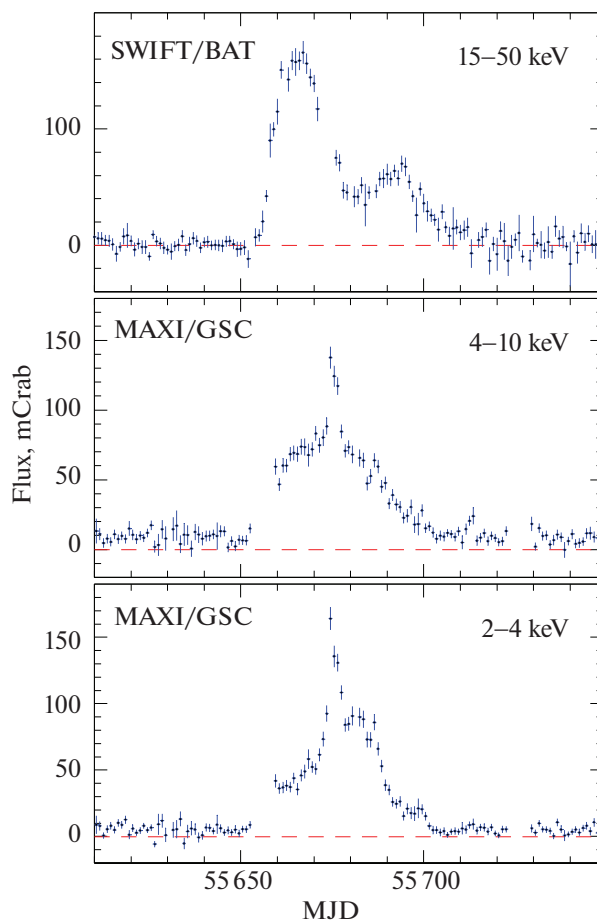


Рис. 7. То же, что на рис. 3, но для вспышки в апреле 2011 г. (вспышка 8, тип I). Формально вспышку следовало бы отнести к типу S, но в мягких диапазонах, если бы не короткий (3–4 дня) импульс излучения, она бы была гораздо ближе к вспышкам типа H.

случае вспышки 7 — почти на 50) дней позже, чем в жестком, поэтому использование показателя SHR для их описания выглядит несколько формальным. Тем не менее параметр неплохо характеризует мягкость рентгеновского излучения вспышек, и для поддержания общности их анализа у этих двух источников мы продолжим его использование. Вспышка 7 была отнесена к сверхмягким U-вспышкам, поскольку показатель SHR достиг у нее значения 2.56 ± 0.16 . В целом же вспышки типов S и U источника GX 339–4 имеют много общего с гигантской вспышкой источника H 1743–322 в 2003 г. В частности, они демонстрируют явно выраженные фазы начального жесткого (фаза I), протяженного мягкого (фаза II) и заключительного жесткого (фаза III) спектральных состояний источника.

На рис. 10 в сравнении приведены кривые блеска всех мягких (S и U) вспышек источника

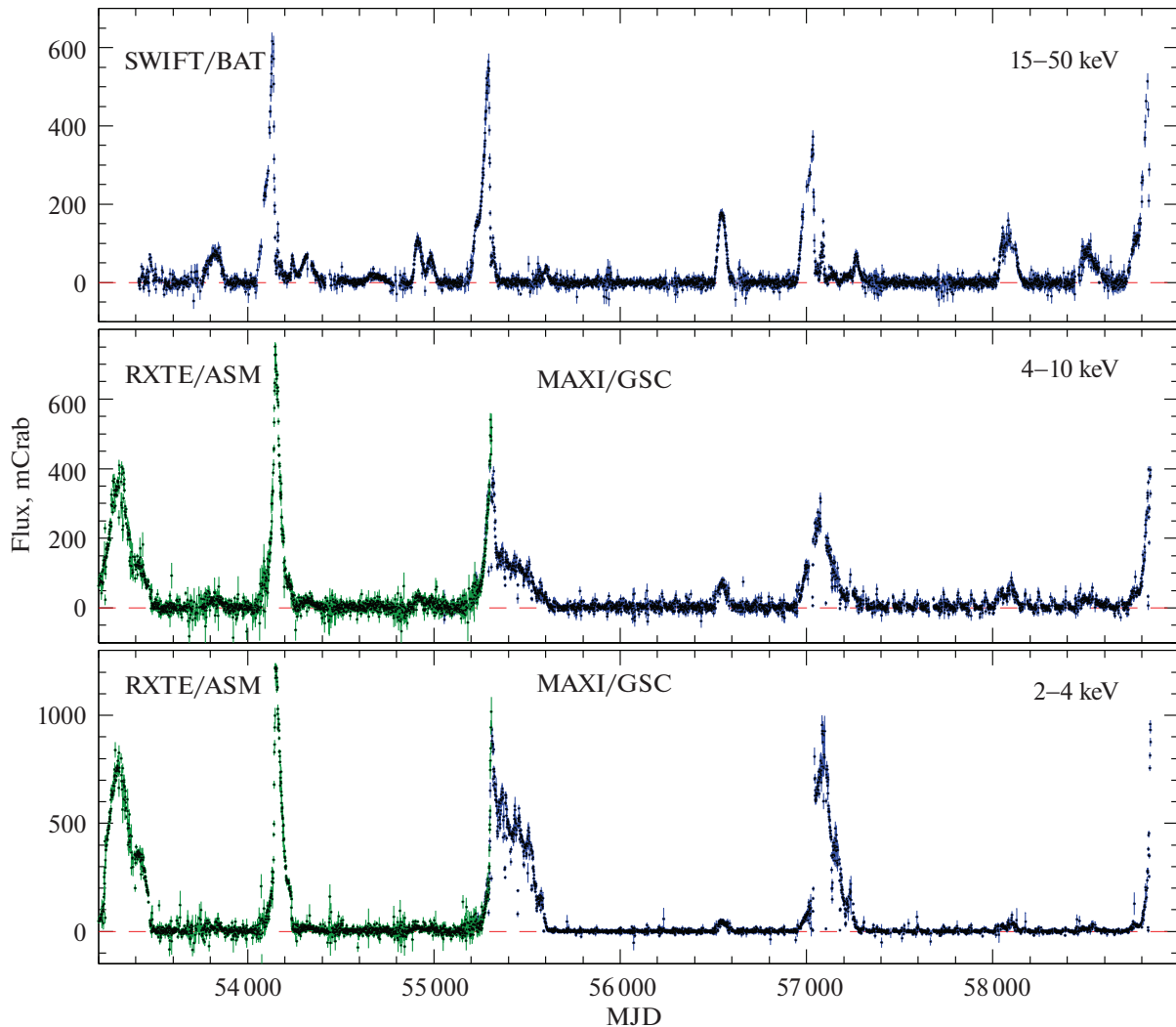


Рис. 8. Долговременные кривые блеска рентгеновской новой GX 339-4 в трех диапазонах энергий согласно измерениям телескопами SWIFT/BAT, RXTE/ASM и MAXI/GSC в период с января 2005 г. по декабрь 2019 г.

GX 339-4 в двух диапазонах энергий: жестком 15–50 кэВ (синие точки) и мягком 2–4 кэВ (красные или зеленые точки). На верхней панели рисунка римскими цифрами указаны фазы кривой блеска. Интересно, что во время фазы I (жесткого состояния) кривые блеска источника в мягком и жестком диапазонах нарастают скоррелированно, одинаковым образом. Это означает, что, во-первых, какая-то доля мягкого рентгеновского излучения испускается источником даже в этом состоянии и, во-вторых, оно формируется, скорее всего, в той же области, где и жесткое излучение. Видно также, что фаза II мягкого состояния (вспышка в мягком диапазоне) сильно отличается у разных вспышек как по длительности, так и по времени достижения максимума потока и форме самой кривой блеска. Во время этой фазы жесткий поток излучения с

задержкой в 20–30 дней относительно момента начала мягкой вспышки падает почти до нуля.

Еще через 10–20 дней, во время фазы II (вблизи максимума мягкого потока), на кривых блеска этих вспышек в жестком диапазоне наблюдается кратковременное проявление активности — слабый всплеск жесткого излучения. На рисунке такие всплески указаны стрелками, обозначенными буквой “Λ”. Возможно, эта активность связана с повышением температуры внутренних областей чернотельного диска (Шакура, Сюняев, 1973), либо с появлением высокотемпературной короны над холодным чернотельным диском (Галеев и др., 1979). Таким образом, она может иметь происхождение, отличное от происхождения жесткого комптонизированного излучения источника, наблюдаемого во время фаз I и III.

Таблица 2. Параметры вспышек рентгеновской новой GX 339-4 по данным телескопа SWIFT/BAT и мониторов всего неба RXTE/ASM и MAXI/GSC

Вспышка ^а		$T_m(H)^b$		ΔT^b	T_d^r	$F_m(H)^d$	$T_m(S)^e$	$F_m(S)^d$	$SHR^ж$	Тип ^з
N	MJD	YYYY–MM	MJD	дней	дней	мКраб	дней	мКраб		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	53759–53878	2006–04	53846	119	—	89.98 ± 8.31	—	$<81(3\sigma)$	$<0.90(3\sigma)$	H
2	54060–54385	2007–02	54131	325	301	702.26 ± 38.39	54150	1223.25 ± 17.14	1.74 ± 0.10	S
3	54631–54758	2008–07	54675	127	571	35.64 ± 6.33	—	$<33(3\sigma)$	$<0.93(3\sigma)$	H
4	54884–55023	2009–03	54912	139	253	116.64 ± 11.52	—	47.53 ± 13.26	0.41 ± 0.12	H
5	55178–55632	2010–04	55293	454	294	563.80 ± 20.25	55308	1016.73 ± 67.96	1.80 ± 0.14	S
6	56508–56604	2013–09	56543	96	1330	178.40 ± 8.10	—	53.39 ± 5.70	0.30 ± 0.03	H
7	56946–57300	2015–01	57035	354	438	372.45 ± 16.07	57083	55.20 ± 45.15	2.56 ± 0.16	U
8	58020–58160	2017–11	58082	140	1074	158.51 ± 20.53	58104	76.18 ± 18.06	0.48 ± 0.13	H
9	58475–58599	2018–12	58483	124	455	108.65 ± 34.09	58537	34.57 ± 10.45	0.32 ± 0.14	H
10*	58716– <u>58841</u>	2019–12	58831	<u>125</u>	241	513.85 ± 21.03	58846	959.48 ± 18.09	1.87 ± 0.08	S

^а Условный номер и даты (MJD) начала–конца вспышки.^б Год, месяц и дата (MJD) достижения максимального потока во вспышке в H диапазоне.^в Длительность вспышки.^г Время рекуррентности (интервал между началом этой и началом предыдущей вспышки).^д Максимальный поток в жестком (H: 15–50 кэВ) и мягком (S: 2–4 или 1.3–3 кэВ — при наблюдении соответственно мониторами MAXI/GSC и RXTE/ASM) диапазонах.^е Дата (MJD) достижения максимального потока во вспышке в S диапазоне.^ж Мягкость излучения (отношение потоков в S и H диапазонах).^з Тип вспышки (жесткая — H, мягкая — S, ультрамягкая — U).

* Подчеркнутые значения — оценка снизу, т.к. вспышка не закончена.

Нельзя не отметить и провал на границе фаз I и II в мягкой кривой блеска длительностью ~ 10 дней, присутствующий во всех мягких вспышках. Провалы указаны на рис. 10 стрелками, обозначенными буквой “V”. Принимая во внимание очевидное подобие кривых блеска в жестком и мягком диапазонах во время фазы I, можно предположить, что излучение в мягком диапазоне в разных фазах вспышки имеет разную природу. Во время фазы I оно тесно связано с жесткой спектральной компонентой — является ее продолжением (например, степенным) и соответственно формируется в той же высокотемпературной области; оно исчезает одновременно с жесткой компонентой. Во время фазы II оно имеет совершенно другую природу и

формируется в геометрически отделенной холодной непрозрачной области. Провал связан с тем, что когда мягкое излучение, скоррелированное с жестким, уже исчезло, поток мягкого чернотельного излучения еще не достиг величины, необходимой для обеспечения плавного монотонного хода кривой блеска. В какой-то степени его появление является результатом выбора достаточно узкого мягкого диапазона. Боллометрическая кривая блеска, скорее всего, должна быть плавной, а недостающее во время провала излучение высвечивается в промежуточном диапазоне 4–15 кэВ.

Кривые блеска приведенной на рис. 11 вспышки, как и кривые блеска других жестких вспышек этого источника, очень похожи на кривые жестких вспышек рентгеновской новой H 1743-322. Однако

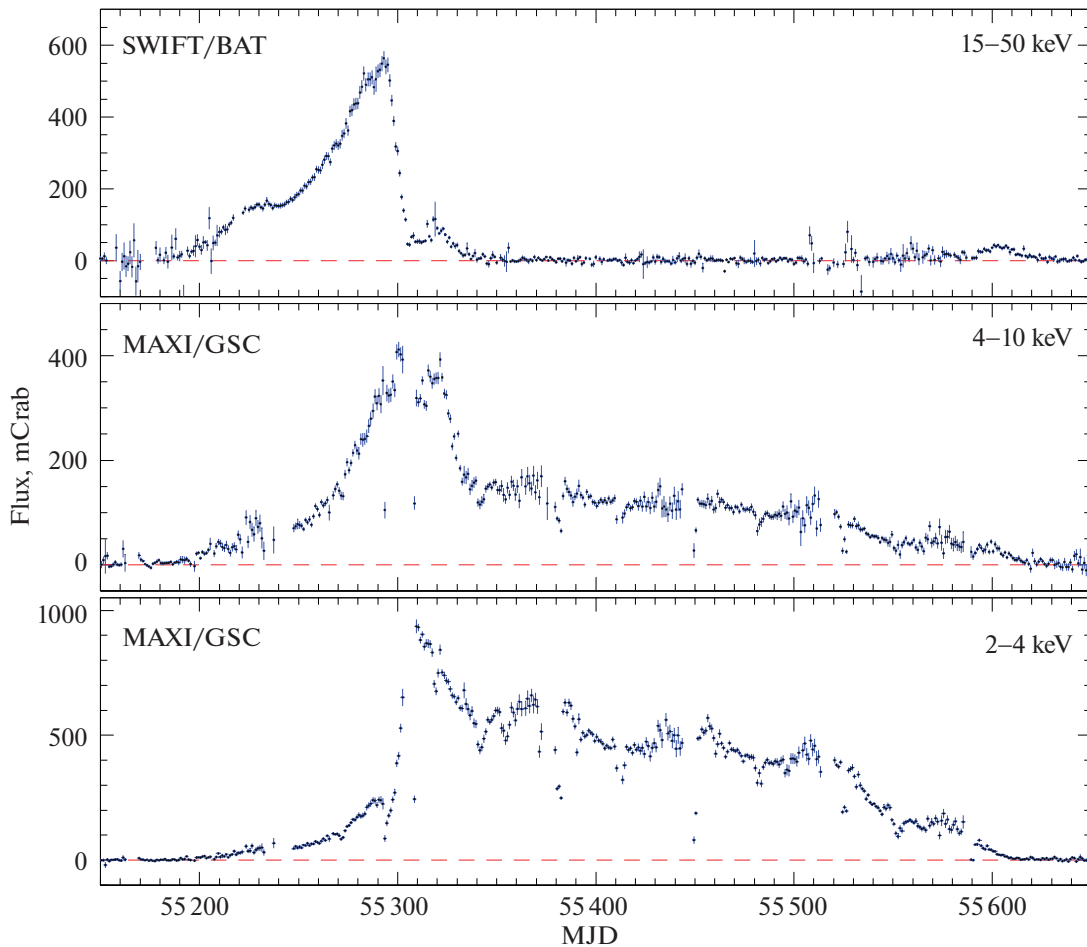


Рис. 9. Кривые блеска вспышки рентгеновского транзита GX 339-4 в 2010 г. (вспышка 4 в табл. 2, типа S) в разных диапазонах энергий (согласно измерениям телескопами SWIFT/BAT и MAXI/GSC).

их профиль имеет более симметричную (треугольную) форму с приблизительно одинаковыми фазами подъема и спада интенсивности. Максимальный поток жестких вспышек менялся от вспышки к вспышке в 2–3 раза, а показатель мягкости излучения источника (столбец 10 табл. 2) во время отдельных вспышек в ~ 1.5 раза ($SHR \simeq 0.41\text{--}0.48$) превышал этот показатель у жестких вспышек источника H 1743-322 ($SHR \simeq 0.22\text{--}0.35$). Длительность вспышек тоже в среднем в 1.5–2 раза превышала длительность H-вспышек источника H 1743-322.

Любопытно, что жесткие вспышки этого источника всегда предшествуют началу мягкой вспышки, что сильно отличается от поведения вспышек рентгеновской новой H 1743-322. При этом, если в начале задержка между жесткой и мягкой вспышками составляла $\sim 200\text{--}300$ дней, в последующих вспышках она достигла уже $\sim 500\text{--}700$ дней, а у самой последней вспышки, которая в момент окончания наших наблюдений только достигла максимума потока, наблюдались сразу две жесткие вспышки-

прекурсоры. Ясно, что такая корреляция вспышек H и S далеко не случайна, и между ними должна быть какая-то скрытая связь. Но прямо отнести их к одному вспышечному событию, как было сделано со слабыми вспышками жесткого излучения, наблюдающимися на спаде кривых блеска мощных событий типа S (#2, #5 и #7 в таблице и рис. 10), у нас оснований нет.

Интерес представляет вспышка 4 из табл. 2, начавшаяся в марте 2009 г. Хотя она точно относится к типу H (в двух мягких диапазонах энергий она едва была зарегистрирована), в жестком диапазоне (см. рис. 8) ее профиль имеет явно выраженную двухкомпонентную форму, которая, как мы видели выше на примере источника H 1743-322, является одним из признаков вспышек типа S. На рис. 12 кривые блеска, измеренные во время этой вспышки, приведены с лучшим временным разрешением¹. Видно, что двухкомпонентный профиль вспышки 4

¹ На этом же рисунке показана предыдущая очень слабая жесткая вспышка 3, произошедшая в июле 2008 г.

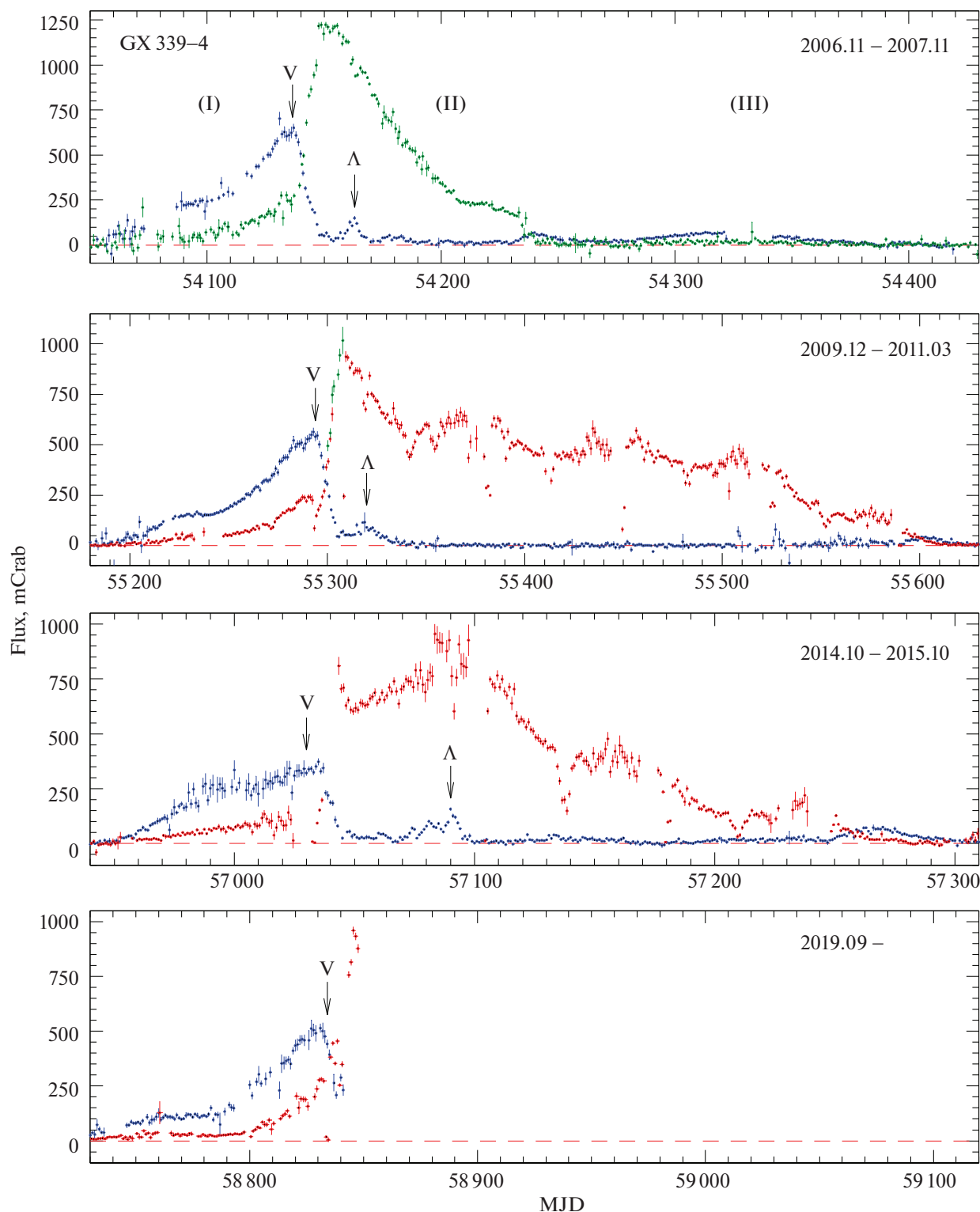


Рис. 10. Кривые блеска вспышек типа S и U рентгеновского транзиента GX 339-4 согласно измерениям в жестком (15–50 кэВ, телескопом SWIFT/BAT — синие точки) и мягком (1.3–3 или 2–4 кэВ, мониторами RXTE/ASM — зеленые точки и MAXI/GSC — красные точки) диапазонах.

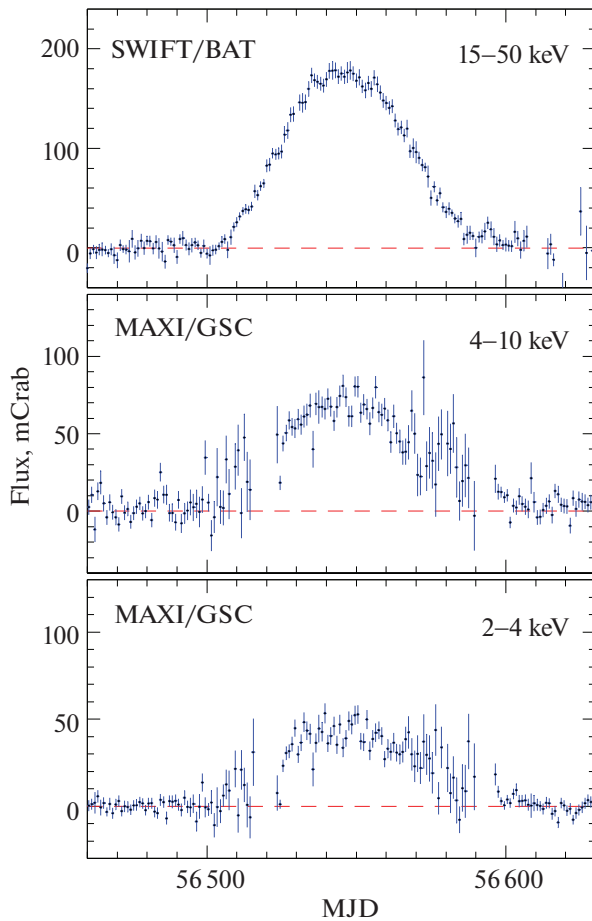


Рис. 11. Кривые блеска вспышки рентгеновского транзита GX 339-4 в 2013 г. (вспышка 6 в табл. 2, типа Н) в разных диапазонах энергий (согласно измерениям телескопами SWIFT/BAT и MAXI/GSC).

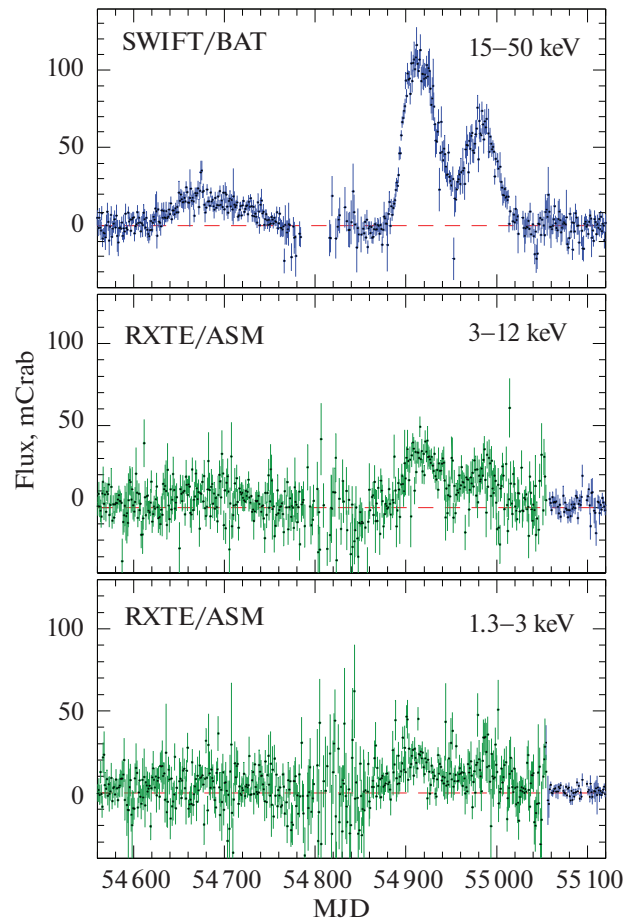


Рис. 12. Кривые блеска составной вспышки рентгеновского транзита GX 339-4 в 2009 г. (вспышка 4 в табл. 2, типа Н) в разных диапазонах энергий (согласно измерениям телескопами SWIFT/BAT и RXTE/ASM). Показана также самая слабая из зарегистрированных вспышек источника, начавшаяся в июле 2008 г. (вспышка 3, типа Н).

на самом деле не похож на профиль S-вспышек источника Н 1743-322 (вторая компонента имеет вид совсем не ступеньки, а новой, почти столь же мощной вспышки, причем во всех диапазонах). Скорее всего, в данном случае мы имеем дело с наложением двух вспышек типа Н. Далее мы покажем, что это действительно так.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемые различия во вспышках рентгеновских новых, помимо формального различия в максимальном достигнутом темпе аккреции, можно объяснить присутствием (или отсутствием) в широкополосном спектре их рентгеновского излучения мягкой компоненты, связанной с внешней холодной, оптически толстой областью аккреционного диска, излучающей чернотельным образом (Шакура, Сюняев, 1973).

Испарение аккреционного диска

Холодная непрозрачная область всегда должна присутствовать в диске — по крайней мере, на его далекой периферии, где происходит внезапное выпадение или накопление перетекающего с нормальной звезды вещества (правда, в этом случае излучение холодной области попадает в оптический и инфракрасный диапазон). Нас интересует рентгеновское излучение, поэтому речь идет о том, как близко по направлению к черной дыре простирается эта область, т.е. на каком радиусе происходит переход от холодного диска к высокотемпературной внутренней области.

Причиной такого перехода может служить испарение холодного диска (Майер и др., 2000) в условиях, когда механизмы отвода в нем тепла (излучением или теплопроводностью) не могут спра-

виться с растущим к центру диска вязким выделением гравитационной энергии аккрецирующего вещества. Поскольку на первой стадии развития вспышки (Любарский, Шакура, 1987) из вещества, накопившегося на периферии, по направлению к черной дыре протекает его не так много — формируется начальный диск (“язык”) сравнительно небольшой поверхностной плотности, образование вблизи черной дыры протяженной высокотемпературной области, излучающей в жестком рентгеновском диапазоне, не должно вызывать удивления. В дальнейшем темп аккреции растет, поверхностная плотность вещества в диске и его оптическая толщина увеличиваются. Это позволяет более эффективно отводить тепло излучением, соответственно площадь холодной области диска растет, а высокотемпературной — уменьшается.

Чем ближе холодный диск приближается к черной дыре, тем большая доля гравитационной энергии его вещества, высвобождающейся при аккреции, переизлучается в мягкой чернотельной компоненте широкополосного спектра рентгеновской новой, и тем выше должна быть температура этого излучения. Соответственно доля энергии, излучаемой во внутренней высокотемпературной зоне, должна уменьшаться.

Положение “радиуса обрыва” холодного диска

Подтверждением этой картины развития вспышки в модели “усеченного диска” могла бы стать проверка того, что соотношение энерговыделения в двух частях диска меняется. Ведь в принципе, возможен альтернативный вариант развития вспышки, в котором радиус, разделяющий аккреционный диск на две компоненты, остается неизменным, а наблюдаемая переменность связана исключительно с изменением темпа аккреции и соответствующим изменением температуры холодного диска. Температура внутренней зоны диска в этом случае также может меняться с изменением темпа аккреции, но не доля выделяющейся в ней энергии. Помимо этого, обсуждаются совсем другие механизмы, ответственные за происхождение жесткого рентгеновского излучения при аккреции на черную дыру, — формирование его в горячей оптически тонкой короне, образующейся над поверхностью холодного диска (Галеев и др., 1979; Хаардт, Мараски, 1991), или в релятивистских струях (джетах), испускаемых из ядра черной дыры и наблюдаемых у ряда источников в радио-, оптическом и мягком рентгеновском диапазонах (см., например, Эспиназе, Фендер, 2018).

Перераспределение энергии в спектре излучения рентгеновских новых (изменение соотношения энерговыделения в двух частях диска) ясно видно по форме кривой блеска их вспышек в жестком диапазоне: по сравнению с правильной кривой блеска H-вспышек (типа FRED), кривые блеска S- и U-вспышек, начиная с некоторого момента, искажаются — в них образуется провал, как будто определенная доля их светимости вдруг исчезает и восстанавливается на ожидаемом для правильной кривой блеска уровне лишь существенно позже. Понятно, куда эта доля светимости в жестком диапазоне пропадает, — как раз в это время начинается вспышка источника в мягких рентгеновских лучах.

Болометрические кривые блеска

Интересно, как плавно при таком переходе изменяется темп аккреции на черную дыру — как ведет себя болометрическая светимость источника. На рис. 13 мы попытались ответить на этот вопрос, восстановив широкополосные рентгеновские кривые блеска рентгеновских новых H 1743-322 (слева) и GX 339-4 (справа) во время некоторых из их вспышек типов S и H. Для этого потоки фотонов (в мКраб) от этих новых в трех диапазонах энергии² 2–4, 4–10 и 15–50 кэВ были пересчитаны в потоки излучения (в эрг с⁻¹ см⁻²) через спектр Крабовидной туманности. Фотонный спектр туманности задавался в виде

$$F(E) = 9.8 \times (E/1 \text{ кэВ})^{-2.1} \text{ фот с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}.$$

Поток в диапазоне 4–10 кэВ был пересчитан в поток излучения в диапазоне 4–15 кэВ, так что в итоге была получена оценка потока излучения рентгеновских новых в широком непрерывном диапазоне 2–50 кэВ.

Видно, что восстановленные таким образом болометрические кривые блеска вспышек источника H 1743-322 типов S (вспышки 2010 и 2013 гг.) и H (2016 г.) были во многом похожи — имели одинаковую форму профиля (FRED) и отличались лишь нормировкой (вспышка H была более слабой). Переход от жесткого состояния к мягкому во вспышках типа S не сопровождался особенностями в болометрических кривых блеска. Это же можно сказать и про болометрические кривые блеска рентгеновского транзита GX 339-4 — кривая блеска мягкой вспышки источника в 2007 г. имеет плавный куполообразный вид, ничто в ней не

² Вспышки источника GX 339-4 в 2007 и 2009 г. исследовались с помощью монитора RXTE/ASM, соответственно при построении кривых блеска этих вспышек использовались мягкие диапазоны 1.3–3 и 3–12.2 кэВ.

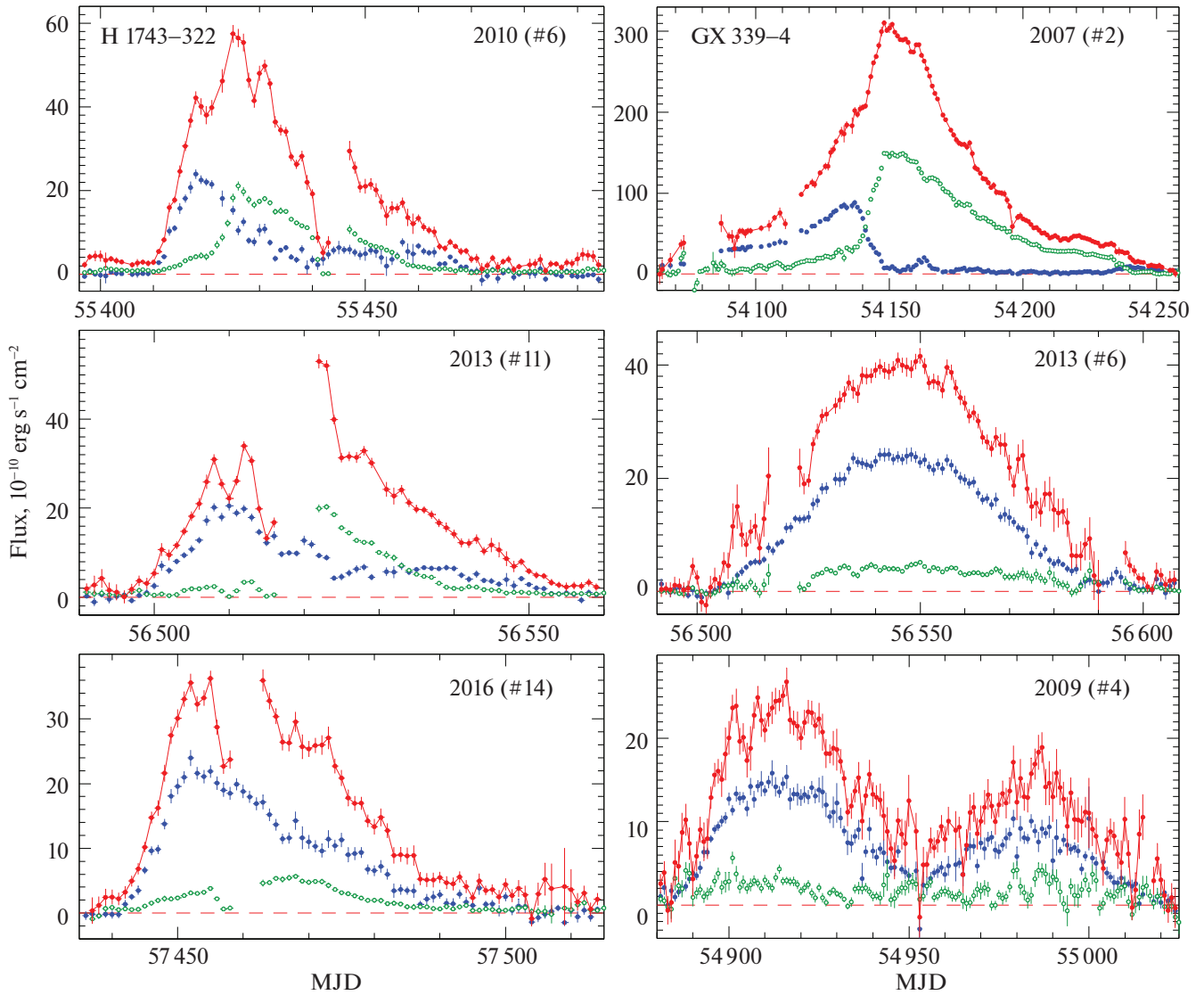


Рис. 13. Широкополосные (2–50 кэВ, красные точки и линия) кривые блеска вспышек рентгеновских новых H 1743-322 (слева) и GX 339-4 (справа), полученные суммированием потоков излучения в диапазонах 2–4, 4–15 и 15–50 кэВ (преобразованных из потоков фотонов через спектр Крабовидной туманности). Также показаны потоки излучения в диапазонах 15–50 кэВ (синие заштрихованные точки) и 2–4 кэВ (зеленые открытые), основанные на данных измерений телескопом SWIFT/BAT и мониторами RXTE/ASM и MAXI/GSC.

указывает на переход от мягкого к жесткому состоянию. Кривые блеска жестких вспышек, произошедших в 2009 и 2013 гг., во многом напоминают эту кривую, но характеризуются меньшей яркостью и более пологой вершиной.

По форме приведенные кривые блеска источника GX 339-4 несколько отличаются от кривых блеска источника H 1743-322: их фаза роста и спада имеет почти одинаковый наклон и длительность³. Согласно автомодельному решению Лю-

барского, Шакуры (1987) нелинейного дифференциального уравнения в частных производных, которым описывается нестационарная дисковая аккреция на черную дыру, такое возможно, если на обоих фазах в непрозрачности вещества в области основного энерговыделения доминирует рассеяние на электронах. При этом изменение темпа аккреции зависит от времени как $\dot{M} \sim t^\alpha$, где показатель степени $\alpha_r \simeq 1.67$ на фазе роста потока и $\alpha_d \simeq -1.63$ на фазе его спада, когда по диску стекают остатки выпавшего вещества. Если в непрозрачности вещества доминируют тормозные процессы, то $\alpha_r \simeq 2.47$ и $\alpha_d \simeq -1.25$ (Любарский, Шакура, 1987). Учитывая мощность вспышек источника

³ Это заведомо не относится к вспышке 2009–2011 гг. этого источника, имевшей сильно асимметричную форму, но, по-видимому, справедливо и для вспышки 2014–2015 гг. (см. рис. 10).

GX 339-4, доминирование в непрозрачности рассеяния кажется естественным.

Вспышка 2009 г.

Особенности в кривых блеска

Как уже отмечалось, переход между состояниями в мягких вспышках обоих источников не приводил к явным особенностям на болометрических кривых их блеска. В то же время особенности (“провалы” и “колена” разной интенсивности) в другие моменты времени на кривых блеска присутствовали (см. рис. 13). Они видны и на кривых блеска в узких диапазонах 2–4 и 15–50 кэВ, полученных разными приборами, т.е. точно не являются инструментальным эффектом. На кривой блеска жесткой вспышки источника H 1743-322 в 2016 г. также можно видеть сильный провал вскоре после прохождения момента достижения максимального потока, наряду с несколькими более слабыми особенностями. Провалы и всплески видны также на кривых блеска жестких всплесков рентгеновского транзиента GX 339-4. На кривой блеска мягкой вспышки источника в 2007 г. эти особенности менее выражены, возможно, из-за ее большой яркости.

Данные особенности могут формироваться из-за неустойчивостей аккреционного течения, возникающих в диске, прежде всего в его внутренней радиационно-доминированной части (Шакура, Сюняев, 1976). При этом, хотя в среднем по диску темп аккреции сохраняется постоянным, локально и на короткой временной шкале он может претерпевать значительные изменения.

Другой причиной появления “ступенек” и провалов в болометрической кривой блеска может быть переход в непрозрачности вещества диска от томсоновского режима, при котором во взаимодействии излучения с веществом преобладает рассеяние на электронах, к тормозному, когда начинают лидировать свободно-свободные процессы поглощения (Липунова, Шакура, 2000).

Самая большая особенность (провал или “ступенька”) длительностью ~ 10 дней, наблюдаемая в кривых блеска всех трех всплесков источника H 1743-322, может быть связана и с некоторой крупномасштабной неоднородностью протекания вещества в диске, например, прохождением кольцевого возмущения — волны, содержащей много остаточного вещества, и затемнением ею области основного энерговыделения (внутренних областей холодного диска и частично — горячего облака).

Вспышка 2009 г. источника GX 339-4 имеет двухкомпонентную кривую блеска, в жестком диапазоне напоминающую кривую блеска вспышки типа S. Ранее мы уже отмечали, что, скорее всего, в данном случае наблюдается наложение двух всплесков типа H, а не вспышка типа S. Болометрическая кривая блеска этого события на рис. 13 подтверждает это предположение: двухкомпонентная кривая блеска этой вспышки сохранилась и даже усилилась, тогда как соответствующие провалы на жестких кривых блеска всплесков типа S на их болометрических кривых замываются и фактически исчезают (особенно хорошо это видно на кривых блеска всплесков источника H 1743-322, произошедших в 2010 и 2013 гг.).

Мягкое излучение в жестком состоянии

Выше уже отмечалось, что во время фазы I развития S-всплесков источника GX 339-4 его кривые блеска в мягком и жестком диапазонах вели себя скоррелированно. Это хорошо видно и на рис. 13 (вспышка 2007 г.). Такое поведение можно объяснить, только предположив, что наблюдаемое мягкое рентгеновское излучение источника формируется в той же области диска, что и его жесткое излучение, т.е. во внутренней высокотемпературной зоне. На рис. 13 показано, что и во время жестких всплесков типа H, когда граница холодной области аккреционного диска далеко отступает от черной дыры, обе рентгеновские новые GX 339-4 и H 1743-322 также излучают заметный поток мягкого рентгеновского излучения. Очевидно, что это излучение должно формироваться в высокотемпературном облаке, окружающем черную дыру.

Гребеневым (2020) показано, что именно так должен вести себя рентгеновский спектр излучения, образующийся в облаке высокотемпературной плазмы при комптонизации ее собственного низкочастотного излучения. В результате детальных численных расчетов, учитывающих как комптоновские, так и тормозные процессы рождения и поглощения фотонов в плазме, им было продемонстрировано, что жесткий степенной спектр излучения, характерный для рентгеновских новых, естественным образом простирается до инфракрасного, оптического и ультрафиолетового диапазонов и лишь на более низких энергиях переходит в быстро спадающий рэлей-джинсовский спектр. Поэтому наблюдаемое во время жесткого состояния новой мягкое рентгеновское излучение должно быть просто степенным продолжением жесткого рентгеновского излучения источника.

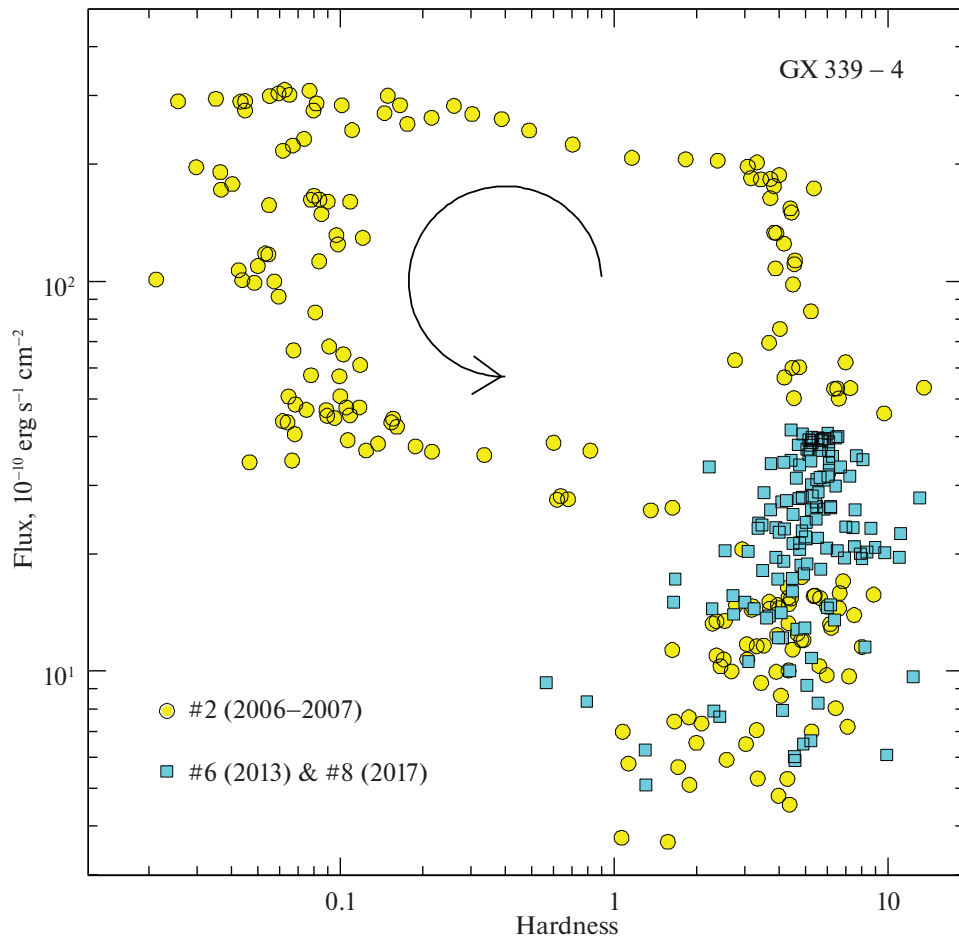


Рис. 14. Сравнение диаграмм “жесткость–интенсивность” для мягкой (типа S, желтые кружки) и двух жестких (типа H, голубые квадратики) вспышек рентгеновского транзientа GX 339-4. Мягкая вспышка наблюдалась телескопами SWIFT/BAT и RXTE/ASM в 2006–2007 гг. (#2 в табл. 2), жесткие — телескопами SWIFT/BAT и MAXI/GSC в 2013 и 2017 гг. (#6 и 8 в таблице). Жесткость определена как отношение потоков излучения в диапазонах 15–50 и 2–4 кэВ, интенсивность — интегральный поток излучения в диапазоне 2–50 кэВ (значения кривых блеска на рис. 13).

Природа двух типов вспышек

Мы видели, что спектральное состояние источника в конкретный момент времени во многом определяется положением “радиуса обрыва” (радиуса, на котором происходит испарение холодного непрозрачного диска и его превращение в высокотемпературный полупрозрачный диск). Не ясно, однако, зависит ли это положение только от темпа аккреции на черную дыру, либо также от всей предыстории развития рентгеновской вспышки. Не ясно также, что определяет выбор типа вспышки, реализуемой в данном эпизоде аккреции.

На рис. 14 приведены диаграммы “жесткость–интенсивность” для вспышек разного типа, наблюдавшихся у рентгеновской новой GX 339-4 в 2006–2007 гг. (типа S, желтые точки на рисунке) и в 2013 и 2017 г. (типа H, голубые точки). В качестве “жесткости” было взято отношение HSR потоков

излучения в диапазонах 15–50 и 2–4 кэВ (поток в диапазоне 1.3–3 кэВ, измеренный монитором RXTE/ASM, был приведен к диапазону 2–4 кэВ), в качестве “интенсивности” — интегральный поток излучения в диапазоне 2–50 кэВ. Потоки пересчитаны из фотонных потоков так же, как было описано выше при получении рис. 13. Подобные диаграммы строились и изучались ранее Беллони (2010).

Круговая стрелка на рисунке показывает ход развития мягкой вспышки источника. Видно, что в начале вспышки источник находился в жестком состоянии с показателем жесткости излучения $HSR \gtrsim 1$. В какой-то момент, по достижении максимума потока в диапазоне 15–50 кэВ, край холодного диска начинает ощутимо сдвигаться по направлению к черной дыре, приводя к доминированию в рентгеновском спектре источника мягкой

чернотельной компоненты. Жесткость излучения падает до $HSR \lesssim 0.2$, т.е. источник переходит в мягкое спектральное состояние. Возможно даже, что холодный край диска достигает радиуса последней устойчивой круговой орбиты вблизи черной дыры ($3 R_g$) и высокотемпературная область полностью исчезает. При переходе между состояниями полная светимость источника (температура аккреции) продолжает медленно увеличиваться. Именно из-за этого максимальный поток в мягком диапазоне в таких вспышках, как правило, достигается позже и оказывается больше по абсолютной величине максимального потока в жестком диапазоне (см. рис. 10).

Спустя какое-то время температура аккреции начинает падать, центральная зона холодного диска — испаряться, вокруг черной дыры вновь образуется облако высокотемпературной плазмы, которое начинает увеличиваться в размере. Жесткость спектра быстро возрастает до исходного значения $HSR \gtrsim 1$. Важно, что обратный переход от мягкого состояния источника к жесткому совершается при заметно (на порядок величины) более низкой болометрической светимости (низком темпе аккреции), чем прямой переход. Ясно, что в развитии вспышки присутствует некоторая временная задержка, зависящая от предыстории (гистерезис). Однако в конце своего развития вспышка выходит все на ту же кривую зависимости “жесткость — интенсивность”, с которой она стартовала.

Поведение жестких вспышек (типа H) на начальном этапе мало отличается от поведения мягких. Однако в дальнейшем обе рассмотренные жесткие вспышки в своем развитии остановились, и произошло это в самом начале петли, выполненной на этой диаграмме мягкой вспышкой. Через некоторое время они вернулись обратно в область малых потоков вдоль той же кривой жесткости, по которой пришли.

Кажется вполне вероятным, что в этих эпизодах аккреции на черную дыру перетекло слишком мало вещества, для того чтобы могла сформироваться нормальная мощная (мягкая) вспышка. Не был достигнут необходимый уровень темпа аккреции, при котором бы сформировался достаточно протяженный внешний диск с высокой поверхностной плотностью. Поскольку гистерезисных проявлений не наблюдалось, положение “радиуса обрыва” этого диска (его края) либо полностью контролировалось темпом аккреции, либо край диска находился слишком далеко от центра и излучение диска не оказывало заметного влияния на наблюдаемый рентгеновский спектр источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ данных непрерывного мониторинга обсерваториями RXTE, SWIFT и MAXI рекуррентных рентгеновских новых H 1743-322 и GX 339-4 в период 2005–2019 гг. показывает, что:

1. В зависимости от формы профиля кривых блеска в мягком 2–4 кэВ и жестком 15–50 кэВ диапазонах энергий вспышки этих рентгеновских новых можно отнести к одному из нескольких характерных типов: жесткие H, мягкие S, ультрамягкие U, промежуточные I и, возможно, микровспышки M.
2. Отличие между типами вспышек успешно объясняется в модели “усеченного” аккреционного диска и связано с присутствием (вспышки типа I, S и U) или отсутствием (вспышки типа H) в широкополосном рентгеновском спектре излучения источника мощной мягкой чернотельной компоненты, формирующейся во внешней холодной непрозрачной области аккреционного диска.
3. Появление чернотельной компоненты в рентгеновском спектре источника (фаза II вспышек типа I, S и U) сопровождается резким уменьшением потока его жесткого излучения (таким образом, оно связано не просто с изменением температуры поверхности внешнего диска, а со сдвигом его внутреннего края по направлению к черной дыре).
4. Мягкая рентгеновская компонента в спектре рентгеновских новых во время их жесткого спектрального состояния (во время вспышек типа H или во время фаз I и III вспышек S и U) не связана с холодной областью диска и формируется в той же высокотемпературной внутренней области, что и жесткое излучение (на это указывает отмеченное выше подобие мягкой и жесткой кривых блеска новых в этом спектральном состоянии, см. также Гребенев и др., 2016; скорее всего, эта компонента является просто продолжением в более мягкий рентгеновский диапазон жесткого степенного спектра источника, образующегося во внутренней области диска в результате комптонизации).

5. Боллометрические кривые блеска ряда вспышек рентгеновской новой GX 339-4 имели почти симметричную форму с равными фазам подъема и спада интенсивности, они резко отличались от кривых блеска рентгеновской новой H 1743-322, характеризовавшихся быстрым подъемом и медленным спадом; симметричная форма кривых может возникать из-за большей мощности вспышек новой GX 339-4 и преобладания в непрозрачности аккрецирующего вещества в ее диске томсоновского рассеяния.
6. Провал в кривой блеска рентгеновской новой GX 339-4 в мягком 2–4 кэВ диапазоне при переходе от фазы I к фазе II мягких вспышек (типов S и U) как раз и связан с изменением формы спектра новой при исчезновении в нем мягкой степенной рентгеновской компоненты и появлении мягкой чернотельной рентгеновской компоненты (а также с узостью диапазона, использованного для построения этой кривой).
7. Слабый повторный всплеск активности, наблюдаемый в жестких 15–50 кэВ кривых блеска S- и U-вспышек рентгеновской новой GX 339-4 во время ее фазы II (одновременно с достижением максимума потока ее излучения в мягком 2–4 кэВ диапазоне), тоже может иметь другую природу по сравнению с природой жестких вспышек во время фаз I и III; он может быть следствием повышения температуры поверхности холодной части диска вблизи ее внутреннего края (Шакура, Сюняев, 1973), либо появления над диском высокотемпературной короны (Галеев и др., 1979).
8. Жесткие вспышки рентгеновского транзита GX 339-4 (одна или несколько) всегда предшествуют долгим мягким вспышкам, тогда как вспышки рентгеновской новой H 1743-322 имели более сложное распределение — после гигантской вспышки 2003 г. в течение 6–7 лет наблюдались лишь мягкие вспышки типов U, S и I, в последующем происходили практически одни жесткие вспышки.
9. Выбор, вспышка какого типа реализуется в данный момент времени, похоже, зависит только от достигнутого максимального темпа аккреции на источник и соответственно от полной массы вещества, перетекшего во время вспышки на черную дыру. Мягкая (мощная) вспышка развивается только в случае, когда темп аккреции достигает

некоторого критического значения. Положение “радиуса обрыва”, на котором происходит испарение холодного непрозрачного диска и его превращение в высокотемпературный полупрозрачный диск, в этих вспышках определяется не только темпом аккреции, но и всей предысторией развития вспышки. В жестких вспышках положение “радиуса обрыва” либо полностью контролируется темпом аккреции, либо вообще холодный диск обрывается слишком далеко от черной дыры, чтобы он мог оказывать заметное влияние на излучение источника.

Исследование основано на данных наблюдений обсерватории MAXI, предоставленных RIKEN (JAXA) и командой MAXI, данных обсерватории SWIFT, предоставленных NASA и командой SWIFT, и данных обсерватории RXTE, предоставленных командой монитора всего неба ASM/RXTE.

А.Г., Ю.Д., В.К. и К.О. благодарны ИКИ РАН за организацию производственной практики, во время которой была выполнена эта работа. С.Г., И.М. и А.П. благодарны за финансовую поддержку Программе фундаментальных исследований РАН 12 (“Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований”) и Российскому фонду фундаментальных исследований (грант 17-02-01079-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy, L.M. Barbier, J.R. Cummings, E.E. Fenimore, N. Gehrels, D. Hullinger, H.A. Krimm, C.B. Markwardt, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 143 (2005).
2. Беллони (Т.М. Belloni), *Lecture Notes in Physics*, **53** (Berlin: Springer Verlag, 2010, ed. T. Belloni), p. 794.
3. Вильямс и др. (D.R.A. Williams, S.E. Motta, R. Fender, J. Bright, I. Heywood, E. Tremou, P. Woudt, D.A.H. Buckley, et al.), *MNRAS*, in press (2020) [arXiv:1910.00349].
4. Винклер и др. (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Gimenez, S. Grebenev, W. Hermsen, J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
5. Вуд и др. (K.S. Wood, J.F. Meekins, D.J. Yentis, H.W. Smathers, D.P. McNutt, R.D. Bleach, E.T. Byram, T.A. Chupp, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **56**, 507 (1984).

6. Галеев и др. (A.A. Galeev, R. Rosner, and G.S. Vaiana), *Astrophys. J.* **229**, 318 (1979).
7. Гребенев С.А., Письма в Астрон. журн. **46**, в печати (2020) [S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **46**, in press (2020)].
8. Гребенев, Мереминский (S.A. Grebenev and I.A. Mereminskiy), *Astron. Telegram* **12007**, 1 (2018).
9. Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Павлинский М.Н., Деханов И.А., Письма в Астрон. журн. **17**, 985 (1991) [S.A. Grebenev, et al., *Sov. Astron. Lett.* **17**, 413 (1991)].
10. Гребенев и др. (S. Grebenev, R. Sunyaev, M. Pavlinsky, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Dyachkov, N. Khavenson, K. Sukhanov, et al.), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **97**, 281 (1993).
11. Гребенев и др. (S.A. Grebenev, R.A. Sunyaev, and M.N. Pavlinsky), *Adv. Space Res.* **19**, 15 (1997).
12. Гребенев и др. (S.A. Grebenev, A.A. Lutovinov, and R.A. Sunyaev), *Astron. Telegram* **189**, 1 (2003).
13. Гребенев С.А., Просветов А.В., Буренин Р.А., Кривонос Р.А., Мещеряков А.В., Письма в Астрон. журн. **42**, 88 (2016) [S.A. Grebenev, et al., *Astron. Lett.* **42**, 69 (2016)].
14. Грове и др. (J.E. Grove, W.N. Johnson, R.A. Kroeger, K. McNaron-Brown, J.G. Skiboe, and B.F. Philips), *Astrophys. J.* **500**, 899 (1998).
15. Гурский и др. (H. Gursky, H. Bradt, R. Doxsey, D. Schwartz, J. Schwarz, R. Dower, G. Fabbiano, R.E. Griffiths, et al.), *Astrophys. J.* **223**, 973 (1978).
16. Джерелс и др. (N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi, K.O. Mason, J.A. Nousek, A.A. Wells, N.E. White, S.D. Barthelmy, et al.), *Astrophys. J.* **611**, 1005 (2004).
17. Корбел и др. (S. Corbel, P. Kaaret, R.P. Fender, A.K. Tzioumis, J.A. Tomsick, and J.A. Orosz), *Astrophys. J.* **632**, 504 (2005).
18. Кречмар и др. (P. Kretschmar, J. Chenevez, F. Capitanio, A. Orr, G. Palumbo, and S. Grebenev), *Astron. Telegram* **180**, 1 (2003).
19. Кримм и др. (H.A. Krimm, S.T. Holland, R.H.D. Corbet, A.B. Pearlman, P. Romano, J.A. Kennea, J.S. Bloom, S.D. Barthelmy, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **209**, 14 (2013).
20. Липунова, Шакура (G.V. Lipunova and N.I. Shakura), *Astron. Astrophys.* **356**, 363 (2000).
21. Любарский Ю.Э., Шакура Н.И., Письма в Астрон. журн. **13**, 917 (1987) [Yu.E. Lyubarskii and N.I. Shakura, *Sov. Astron. Lett.* **13**, 386 (1987)].
22. Майер и др. (F. Meyer, B.F. Liu, and E. Meyer-Hofmeister), *Astron. Astrophys.* **361**, 175 (2000).
23. Макишима и др. (K. Makishima, Y. Maejima, K. Mitsuda, H.V. Bradt, R.A. Remillard, I.R. Tuohy, R. Hoshi, and M. Nakagawa), *Astrophys. J.* **308**, 635 (1986).
24. Марквардт (C.B. Markwardt), *Astron. Telegram* **136**, 1 (2003).
25. Маркерт и др. (T.H. Markert, C.R. Canizares, G.W. Clark, W.H.G. Lewin, H.W. Schnopper, and G.F. Sprott), *Astrophys. J.* **184**, L67 (1973).
26. Мацуока и др. (M. Matsuoka, K. Kawasaki, S. Ueno, H. Tomida, M. Kohama, M. Suzuki, Y. Adachi, M. Ishikawa, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **61**, 999 (2009).
27. Мереминский И.А., Филиппова Е.В., Кривонос Р.А., Гребенев С.А., Буренин Р.А., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 194 (2017) [I.A. Mereminskiy, et al., *Astron. Lett.* **43**, 167 (2017)].
28. Михара и др. (T. Mihara, M. Nakajima, M. Sugizaki, M. Serino, M. Matsuoka, M. Kohama, K. Kawasaki, H. Tomida, S. Ueno, and N. Kawai), *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, S623 (2011).
29. Миямото и др. (S. Miyamoto, K. Kimura, and S. Kitamoto), *Astrophys. J.* **383**, 784 (1991).
30. Мотч и др. (C. Motch, M.J. Ricketts, C.G. Page, S.A. Ilovaisky, and C. Chevalier), *Astron. Astrophys.* **119**, 171 (1983).
31. Ревнивцев и др. (M. Revnivtsev, M. Chernyakova, F. Capitanio, N.J. Westergaard, V. Shoenfelder, N. Gehrels, and C. Winkler), *Astron. Telegram* **132**, 1 (2003).
32. Ремиллард, Макклиток (R.A. Remillard and J.E. McClintock), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **44**, 49 (2006).
33. Сванк (J. Swank), *Astron. Telegram* **301**, 1 (2004).
34. Сванк и др. (J.H. Swank, R. Remillard, and C.B. Markwardt), *Astron. Telegram* **576**, 1 (2005).
35. Стейнер и др. (J.F. Steiner, J.E. McClintock, and M.J. Reid), *Astrophys. J.* **745**, L7 (2012).
36. Сулейманов и др. (V.F. Suleimanov, G.V. Lipunova, and N.I. Shakura), *Astron. Astrophys.* **491**, 267 (2008).
37. Сюняев, Трюмпер (R.A. Sunyaev and J. Truemper), *Nature* **279**, 506 (1979).
38. Сюняев Р., Арефьев В., Бороздин К., Гильфанов М., Ефремов В., Каниовский А., Чуразов Е., Кендзиора Е. и др., Письма в Астрон. журн. **17**, 975 (1991) [R. Sunyaev, et al., *Sov. Astron. Lett.* **17**, 413 (1991)].
39. Сюняев Р.А., Лапшов И.Ю., Гребенев С.А., Ефремов В.В., Каниовский А.С., Степанов Д.К., Юнин С.Н., Гаврилова Е.А. и др., Письма в Астрон. журн. **14**, 771 (1988) [R.A. Sunyaev, et al., *Sov. Astron. Lett.* **14**, 327 (1988)].
40. Танака, Шибазакки (Y. Tanaka and N. Shibazaki), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **34**, 607 (1996).
41. Томсик, Калемси (J.A. Tomsick and E. Kalemci), *Astron. Telegram* **198**, 1 (2003).
42. Хаардт, Мараски (F. Haardt and L. Maraschi), *Astrophys. J.* **380**, L51 (1991).

43. Хинес и др. (R.I. Hynes, D. Steeghs, J. Casares, P.A. Charles, and K. O'Brien), *Astrophys. J.* **583**, L95 (2003).
44. Хинес и др. (R.I. Hynes, D. Steeghs, J. Casares, P.A. Charles, and K. O'Brien), *Astrophys. J.* **609**, 317 (2004).
45. Черепашук А.М., *Тесные двойные звезды* (М.: Физматлит, 2013).
46. Шакура, Сюняев (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **24**, 337 (1973).
47. Шакура, Сюняев (N.I. Shakura and R.A. Sunyaev), *MNRAS* **175**, 613 (1976).
48. Шапиро и др. (S.L. Shapiro, A.P. Lightman, and D.M. Eardley), *Astrophys. J.* **204**, 187 (1976).
49. Эспиназе, Фендер (M. Espinasse and R. Fender), *MNRAS* **473**, 4122 (2018).
50. Ягода и др. (K. Jahoda, J.H. Swank, A.B. Giles, M.J. Stark, T. Strohmayer, W. Zhang, and E.H. Morgan), *SPIE* **2808**, 59 (1996).