

СПЕКТРАЛЬНЫЙ И ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ БЫСТРОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ТРАНЗИЕНТА IGR J16195–4945 ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ СРГ/ART-XC

© 2023 г. М. Н. Сатыбалдиев^{1,2*}, И. А. Мереминский¹,
А. А. Лутовинов¹, Д. И. Карасев¹, А. Н. Семена¹, А. Е. Штыковский¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, Россия

Поступила в редакцию 28.03.2003 г.

После доработки 19.05.2003 г.; принята к публикации 02.06.2003 г.

Представлены результаты временного и спектрального анализа данных, полученных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ во время наблюдений IGR J16195–4545 — быстрого рентгеновского транзиента в системе со звездой-сверхгигантом — в марте 2021 г. На кривой блеска источника регистрируются шесть ярких вспышек, при этом значимое изменение жесткости излучения во время этих вспышек не наблюдается. Спектр источника хорошо аппроксимируется моделью степенного закона с экспоненциальным завалом и сильным поглощением: $N_H = (12 \pm 2) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, $\Gamma = 0.56 \pm 0.15$, $E_{\text{cut}} = 13 \pm 2 \text{ кэВ}$. С помощью байесового блочного разложения кривой блеска были определены характеристики наблюдаемых вспышек (длительность, время нарастания и ожидания, выделенная энергия и светимость перед вспышкой), которые согласуются с моделью “оседающей” аккреции. Получена оценка скорости звездного ветра сверхгиганта: $v_w \approx 500 \text{ км с}^{-1}$. Также у источника была обнаружена необычная переменность в ближнем ИК-диапазоне.

Ключевые слова: рентгеновские двойные системы, пульсары.

DOI: 10.31857/S0320010823050030, **EDN:** GMIPRE

ВВЕДЕНИЕ

Быстрые рентгеновские транзиенты в системах со звездами-сверхгигантами (SFXT, Supergiant Fast X-ray Transients) являются подклассом (Сгуэра и др., 2005; Негуруэла и др., 2006; Смит и др., 2006; ин’т Занд и др., 2004; Гребенев, 2010; Сидоли, 2017) массивных рентгеновских двойных систем (НМХВ, High-Mass X-ray Binaries), в которых происходит аккреция неоднородного звездного ветра спутника (сверхгиганта О/В класса) на компактный релятивистский объект (нейтронную звезду или черную дыру). Отличительной чертой таких систем является их рентгеновская переменность — они демонстрируют короткие иррегулярные вспышки продолжительностью $\sim 10^3$ – 10^4 с, в ходе которых рентгеновская светимость превышает 10^{35} эрг с⁻¹, а в некоторых случаях достигает и до 10^{37} эрг с⁻¹. При этом между вспышками средняя рентгеновская светимость составляет 10^{32} – 10^{34} эрг с⁻¹.

Основными предлагаемыми моделями для объяснения подобной переменности являются: аккреция плотных сгустков звездного ветра (ин’т Занд, 2005; Уолтер, Зурита Херас, 2007), центробежная и/или магнитная блокировка аккреции и ее спорадически происходящее снятие, производящее тем самым наблюдаемые всплески (Гребенев, Сюняев, 2007; Боццо и др., 2008), аккреция асимметричного звездного ветра в системе с сильно-эллиптической орбитой (Сидоли и др., 2007), квазисферическая дозвуковая оседающая аккреция (Шакура и др., 2014).

Транзиентный рентгеновский источник IGR J16195–4945 был обнаружен телескопом IBIS/ISGRI (Лебран и др., 2003), находящимся на борту обсерватории INTEGRAL (Винклер и др., 2003; Куулкерс и др., 2021), 26 сентября 2003 г. во время яркой вспышки длительностью ~ 1.5 ч со средним потоком ~ 35 мКраб в диапазоне энергий 20–40 кэВ (Сгуэра и др., 2006). Подобная всплывающая активность сразу же сделала IGR J16195–4945 кандидатом в SFXT. Компаньон источника в

*Электронный адрес: maksatsatybaldiev@gmail.com

более мягком диапазоне был обнаружен в архивных наблюдениях обсерватории ASCA (Сидоли и др., 2005).

По результатам наблюдения обсерватории Chandra, проведенного 29 апреля 2005 г., удалось уточнить положение источника RA = 16^h19^m32.20^s, Dec = -49°44'30.7" (J2000) с точностью 0.6" (Томсик и др., 2006). Это позволило отождествить объект с источниками ближнего и среднего инфракрасного диапазонов каталогов 2MASS (2MASS J16193220-4944305) и GLIMPSE (G333.5571 + 00.3390) соответственно. По данным спектроскопии в ближнем ИК-диапазоне, Колейро и др. (2013) определили, что звездой донором в системе является голубой сверхгигант типа ON9.7Iab.

В работе Моррис и др. (2009) было проанализировано наблюдение IGR J16195-4945 обсерваторией Suzaku в 2006 г. Во время этого наблюдения объект продемонстрировал яркую вспышку длительностью ~5000 с с увеличением потока в ~10 раз, что еще раз подтвердило его принадлежность к классу SFXT. Проведенный спектральный анализ указал на значительную толщину межзвездного вещества в направлении на систему ($N_H \simeq 1.1 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$) и отсутствие в спектре сильной эмиссионной линии нейтрального железа ($EW < 43 \text{ эВ}$).

Используя данные обзоров телескопа Swift/BAT с декабря 2004 по март 2015 г. и данные наблюдений телескопа Swift/XRT, Кусумано и др. (2016) показали, что двойная система является затменной с орбитальным периодом 3.945 дня и длительностью затмения ~3.5% орбитального периода.

В настоящей работе приведены результаты временного и спектрального анализа длительного наблюдения IGR J16195-4945 телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского. Наблюдаемая вспышечная переменность источника была интерпретирована в рамках модели “оседающей” аккреции. Кроме того, у источника была обнаружена иррегулярная переменность в ближнем ИК-диапазоне, с характерной амплитудой в 0.1 зв. величину в *K*-фильтре.

НАБЛЮДЕНИЯ

IGR J16195-4945 наблюдался телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021) обсерватории СРГ (Сюняев и др., 2021) 3 марта 2021 г. в течение суток. Данные ART-XC были обработаны с использованием пакета программного обеспечения ARTPRODUCTS v1.0 и версии калибровочной базы данных v20220908. Спектры и кривые блеска были извлечены из круглой области радиуса $R = 135''$ с центром в положении источника. Для построения кривых

блеска мы использовали широкий диапазон энергий 4–20 кэВ, а также два поддиапазона: 4–8 и 8–20 кэВ, в то время как для спектрального анализа был использован диапазон 5–25 кэВ. На энергиях ниже 5 кэВ отклик прибора требует более тщательной калибровки, в связи с чем эта область была исключена из спектрального анализа.

ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ

На рис. 1 приведена кривая блеска источника с временным разрешением 500 с в энергетическом диапазоне 4–20 кэВ. В кривой блеска хорошо видны характерные для SFXT вспышки продолжительностью в несколько килосекунд. Для дальнейшего анализа мы выделили периоды времени, в течение которых источник находился в “низком” (A, C, G), “промежуточном” (E) или “вспышечном” (B, D, F) состояниях. К сожалению, из-за большой неопределенности эфемерид двойной системы (Кусумано и др., 2016) нельзя точно указать, каким орбитальным фазам соответствует наблюдение, однако затмение (с ожидаемой продолжительностью в 12 кс) в наблюдение не попало. Динамический диапазон переменности (отношение темпа счета в максимумах вспышек к среднему темпу счета в “низком” состоянии) составляет ~11.

Мы также построили кривые блеска в мягком (4–8 кэВ) и жестком (8–20 кэВ) диапазонах энергий. Поскольку нейтронная звезда в SFXT погружена в плотный комковатый ветер оптического компаньона-сверхгиганта, то можно ожидать, что при прохождении плотных сгустков звездного ветра между нейтронной звездой и наблюдателем будет значительно изменяться наблюдаемое поглощение (Оскинова и др., 2012), модулируя в первую очередь наблюдаемый поток в мягком рентгеновском диапазоне. Однако мягкая и жесткая кривые блеска оказались подобными, без очевидных эпизодов изменения жесткости. Для более детального изучения этого вопроса нами были также рассчитаны жесткости (отношения темпа счета в жестком диапазоне к темпу счета в мягком), усредненные по указанным выше периодам времени разной интенсивности. Заметно, что во вспышках излучение становится немного жестче, однако в целом можно заключить, что источник демонстрирует “бесцветную” переменность, которая также наблюдается в других SFXT-системах (см., например, Сидоли и др., 2020).

В некоторых SFXT наблюдаются периодические модуляции рентгеновского потока, вызванные вращением НЗ с характерными периодами ~10–1000 с (Уолтер и др., 2015). Нами был проведен поиск периодического сигнала в диапазоне энергий 4–20 кэВ методом наложения эпох (Лихи и др., 1083). На периодах до ~300 с на уровне 4.5σ

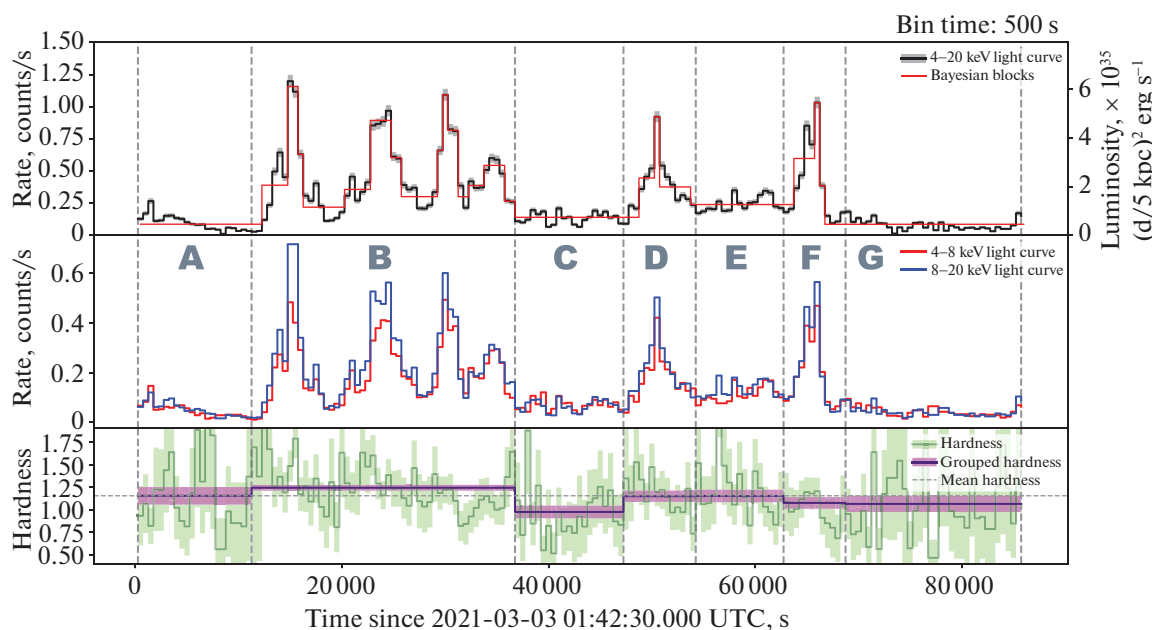


Рис. 1. На верхней панели изображена кривая блеска источника в диапазоне энергий 4–20 кэВ с временным разрешением 500 с вместе с ее байесовой блочной сегментацией, разделением на интервалы со статистически значимым различием темпа счета фотонов. На средней панели показаны кривые блеска в мягком (4–8 кэВ) и жестком (8–20 кэВ) энергетических диапазонах. На нижней панели изображены полная и усредненная по сегментам кривые жесткости (отношения потока в жестком диапазоне к потоку в мягком).

значимого сигнала выявлено не было. На периодах 300–1000 с в периодограмме наблюдается сигнал, связанный, однако, не с вращением НЗ, а с наблюдаемыми вспышками, с характерными длительностями ~ 1000 с.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Длительное наблюдение, выполненное ART-XC, позволило получить качественный спектр, покрывающий диапазон энергий 5–25 кэВ. Для описания спектра мы выбрали простую модель степенного закона с экспоненциальным завалом и поглощением на низких энергиях, `tbabs*cutoffpl`, которая хорошо описывает спектры SFXT (см., например, Романо, 2015). Аппроксимация спектральной моделью выполнялась с использованием пакета `XSPEC v12.12.1`; спектры всех семи модулей телескопа ART-XC рассматривались независимо, для согласования нормировок использовался мультипликативный фактор. Все погрешности приведены в 90% доверительном интервале. Оценка величины и погрешности непоглощенного потока проводилась при помощи процедуры `cflux`.

Измеренные параметры — наклон степенного фотонного спектра и характерная энергия экспоненциального завала — оказались близкими к значениям, определенным по совместному спектру,

полученному по данным Swift/XRT и BAT, которые не являются одновременными с ART-XC (Кусумано и др., 2016). Однако из-за недостаточного покрытия в области низких энергий точно измерить поглощение только по данным телескопа ART-XC не удастся. Полученные параметры приведены в табл. 1.

Чтобы построить широкополосный спектр, мы добавили к данным телескопа ART-XC спектр по данным инструмента Swift/XRT, для получения которого были усреднены все наблюдения, в которых темп счета фотонов от источника был выше 5×10^{-2} отс/с (наблюдения 1, 2, 4, 5, 21, 22 из табл. 1 Кусумано и др., 2016), и средний спектр источника по данным 105-месячного каталога Swift/BAT (Ох и др., 2018). Полученный спектр и невязки приведены на рис. 2. Расширение энергетического диапазона позволило надежно измерить поглощение $N_{\text{H}} = (12 \pm 2) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и характерную энергию экспоненциального завала $E_{\text{cut}} = 13 \pm 2$ кэВ. Кросс-нормировочные коэффициенты оказались равны 1.991 и 1.073 для XRT и BAT соответственно.

Чтобы пересчитать полученную в предыдущей части кривую блеска из отсч/с в физические величины, мы аппроксимировали средний спектр, полученный телескопом ART-XC, зафиксировав по-

Таблица 1. Параметры наилучшей аппроксимации спектров IGR J16195–4945

Сегмент	$N_{\text{H}},$ 10^{22} см^{-2}	Γ	$E_{\text{cut}}, \text{ кэВ}$	$\chi^2/\text{d.o.f.}$	$F[4\text{--}20 \text{ кэВ}],$ $\text{эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$
ART-XC + XRT + BAT	12 ± 2	0.56 ± 0.15	13 ± 2	231.29/185	$(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
ART-XC	31 ± 15	1.09 ± 0.41	19_{-7}^{+28}	191.15/157	$(2.9_{-0.2}^{+0.4}) \times 10^{-11}$
ART-XC (N_{H} фикс.)	12	0.67 ± 0.27	15_{-5}^{+12}	196.49/158	$(2.4 \pm 0.3) \times 10^{-11}$
“Низкое состояние” (ACG, N_{H} , фикс.)	12	$0.58_{-0.97}^{+0.84}$	10_{-5}^{+88}	187.16/158	$(0.9 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
“Только вспышки” (BDF, N_{H} фикс.)	12	0.59 ± 0.27	15_{-5}^{+9}	184.15/158	$(4.1 \pm 0.2) \times 10^{-11}$

глошение на величине $N_{\text{H}} = 12 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Таким образом, был получен коэффициент пересчета наблюдаемого темпа счета в полную непоглощенную светимость источника в диапазоне энергий 0.1–100 кэВ $K_{\text{bol}} = 5.3 \times 10^{35} \text{ эрг отс}^{-1}$ в предположении, что расстояние до источника 5 кпк (Томсик и др., 2006), который мы далее использовали для построения кривой болометрической светимости (рис. 1), считая что основное энерговыделение системы находится в рентгеновском диапазоне. Кроме того, мы отдельно набрали спектры во вспышках (интервалы В, D, F) и в “низком” состоянии (интервалы А, С, G) и аппроксимировали их такой же моделью. Несмотря на то что средние потоки в этих состояниях отличаются в 4 раза, значимых отличий в спектральных параметрах мы не обнаружили, что подтверждает “бесцветность” наблюдаемой переменной.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВСПЛЕСКОВ

Средняя болометрическая светимость IGR J16195–4945 во время наблюдения составила $L_{\text{mean}} = (1.38 \pm 0.05) \times 10^{35} (d/5 \text{ кпк})^2 \text{ эрг с}^{-1}$. Таким образом, для диапазона возможных расстояний до системы (5–15 кпк, Томсик и др., 2006) средняя светимость оказывается меньше критического значения $L_{\text{crit}} \approx 4 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$ (Шакура и др., 2015), следовательно, в системе может протекать “оседающая” аккреция материала из плотного ветра сверхгиганта.

В работе Сидоли и др. (2019) обсуждались вспышки, происходящие в случае, когда порции плазмы из горячей оболочки проникают в магнитосферу за счет Релей-Тейлоровской неустойчивости (RTI). Серии таких вспышек могут возникать из-за флуктуаций плотности или скорости звездного ветра, например, из-за прихода сгустка ветра. Для подобных всплесков были получены зависимости

между их параметрами, такими как полное энерговыделение, время ожидания всплеска, светимость перед всплеском и другими. Эти соотношения имеют вид зависимостей

1) времени ожидания всплеска ΔT от светимости до него ($L_{\text{X, pre}}$, pre-flare)

$$\Delta T \approx 130 [\text{с}] \left(\frac{\alpha}{0.03} \right) A \zeta^{2/9} \mu_{30}^{2/3} \dot{M}_{16}^{-1};$$

2) энергии, выделенной во время всплеска, ΔE от длительности всплеска Δt

$$\Delta E \approx 3 \times 10^{35} [\text{эрг с}^{-1}] \left(\frac{\alpha}{0.03} \right) A \zeta^{2/9} \mu_{30}^{2/3} v_8^3 \Delta t;$$

3) времени нарастания всплеска δt_{rise} от светимости перед всплеском $L_{\text{X, pre}}$

$$\delta t_{\text{rise}} \simeq 30 [\text{с}] \zeta^{4/27} \mu_{30}^{7/9} \dot{M}_{16}^{-2/3};$$

4) выделенной энергии от времени ожидания всплеска $\Delta E/\Delta T$

$$\frac{\Delta E}{\Delta T} = 10^{36} [\text{эрг с}^{-1}] \dot{M}_{16}.$$

Здесь темп аккреции, измеренный до всплеска, $\dot{M}_{\text{X}} = 10^{16} [\text{г с}^{-1}] \dot{M}_{16}$ связан со светимостью как $L_{\text{X, pre}} = 0.1 \dot{M}_{\text{X}} c^2$, $\alpha \sim 0.03$ — безразмерный параметр, определяющий скорость роста зоны перемешивания на нелинейной стадии, $A \lesssim 1$ — число Этвуда, $\zeta \lesssim 1$ — безразмерный параметр, характеризующий размер зоны, в которой развивается RTI, в единицах радиусов магнитосферы R_m , $\mu = 10^{30} [\text{Гс см}^3] \mu_{30}$ — магнитный момент нейтронной звезды, $v = 10^8 [\text{см с}^{-1}] v_8$ — скорость звездного ветра.

На рис. 3 приведены ожидаемые соотношения между параметрами вспышек, а также показаны

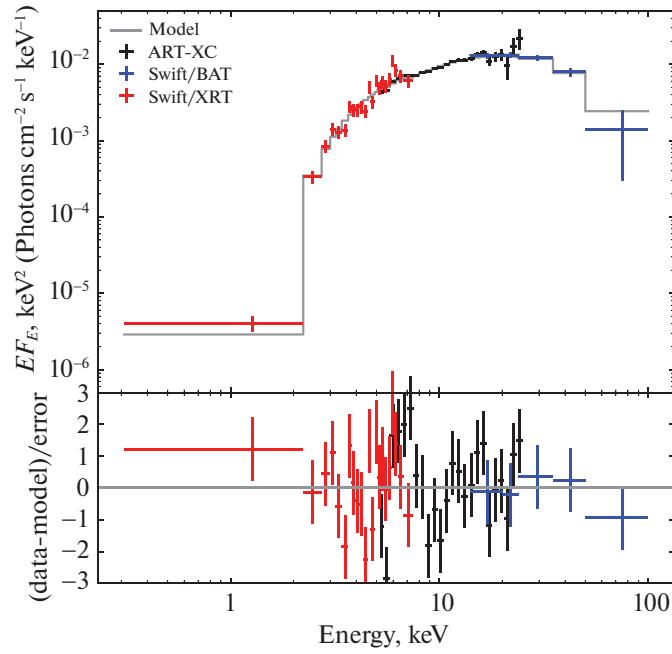


Рис. 2. Энергетический спектр источника IGR J16195–4945 по данным телескопов Swift/XRT (красные точки), СРГ/ART-XC (черные точки) и Swift/BAT (синие точки). Сплошной серой линией показана модель наилучшей аппроксимации.

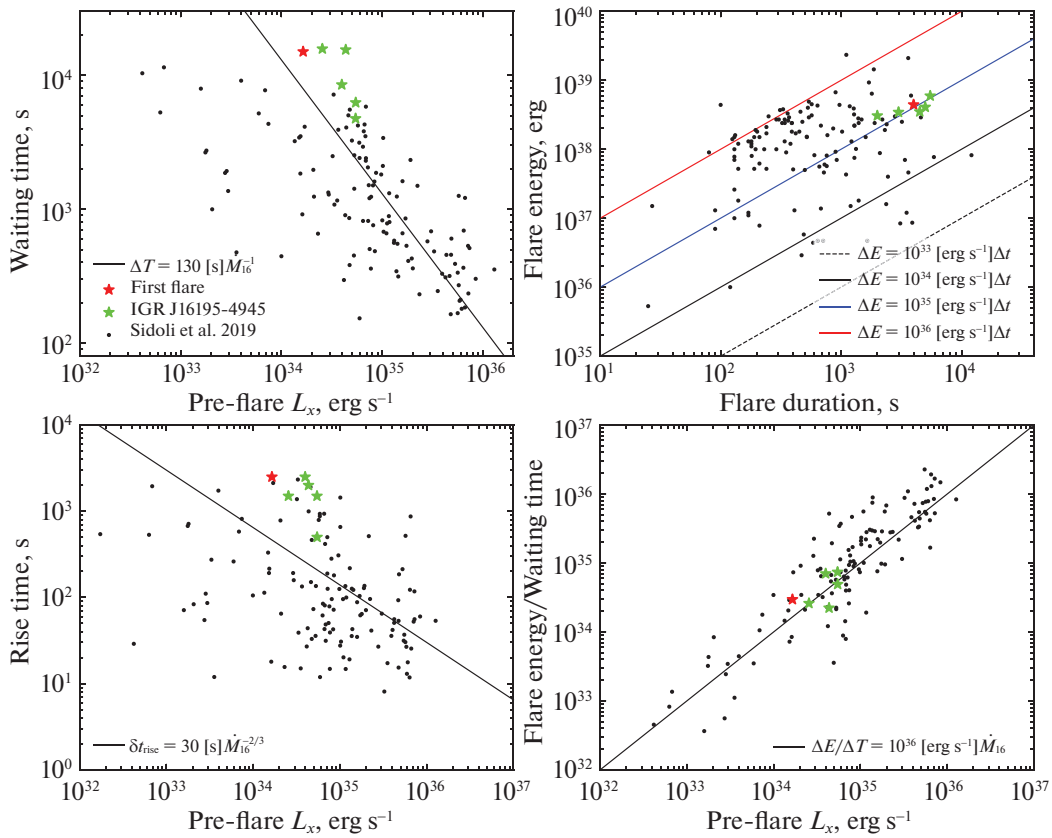


Рис. 3. Характеристики всплесков IGR J16195–4945 и зависимости, описываемые моделью “оседающей” аккреции.

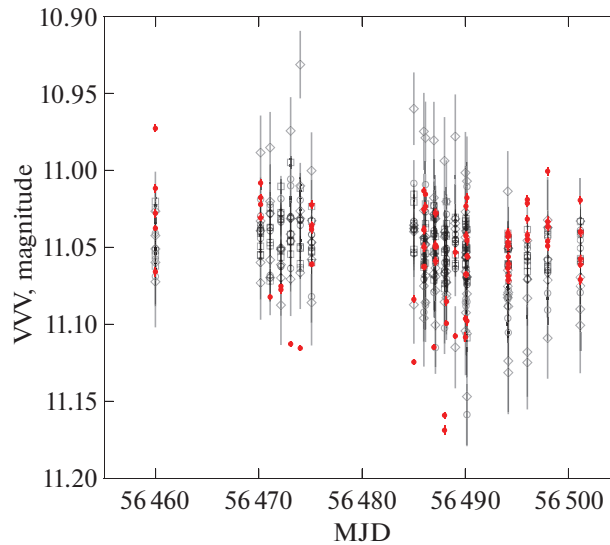


Рис. 4. Кривая блеска IGR J16195–4945 в Ks -фильтре (красные точки) по данным обзора VVV. Черными незакрашенными символами показаны измерения блеска звезд сравнения, нормированные на средний блеск IGR J16195–4945.

измеренные в работе Сидоли и др. (2019) параметры отдельных вспышек для девяти известных SFXT, наблюдавшихся обсерваторией XMM-Newton.

Мы повторили анализ из работы Сидоли и др. (2019), используя байесовское разбиение (Скаргл и др., 2013) кривой блеска, чтобы выделить отдельные вспышки и измерить их параметры (рис. 1). Полученные значения полного энерговыделения, продолжительности, времени нарастания и проч. приведены в табл. 2. Для первого всплеска за время ожидания было принято время, прошедшее от начала наблюдения. Чтобы сравнить вспышки IGR J16195–4945 с данными по другим SFXT, все наблюдаемые характеристики были пересчитаны в более мягкий энергетический диапазон 1–10 кэВ. Для этого был использован средний спектр источника за все наблюдение, поскольку ранее было показано, что он значимо не изменяется с интенсивностью.

В целом вспышки от IGR J16195–4945 следуют предсказаниям теории “оседающей” аккреции. Вместе с тем необходимо напомнить, что точное расстояние до системы неизвестно, и приведенные светимости могут быть систематически занижены на фактор вплоть до ≈ 10 , если система на самом деле расположена дальше, на расстоянии в 15 кпк. На диаграмме “светимость перед вспышкой — время ожидания” вспышки IGR J16195–4945 лежат выше линии $\Delta T \approx 130 \text{ [с]} \dot{M}_{16}^{-1}$, что может указывать на большее значение фактора $(\alpha/0.03) A \zeta^{2/9} \mu_{30}^{2/3}$. Характерные продолжительности вспышек позволяют оценить скорость

звездного ветра сверхгиганта. Из формулы $\Delta t \approx 400 \text{ [с]} (v_w/1000 \text{ [км с}^{-1}\text{]})^{-3}$ из работы Сидоли и др. (2019) следует, что для IGR J16195–4945 $v_w \approx 500 \text{ км с}^{-1}$, что типично для НМХВ (Мартинес-Нунез и др., 2017).

ИНФРАКРАСНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

IGR J16195–4945 расположен в Галактической плоскости ($l, b = 333.56^\circ, 0.34^\circ$) в области неба, покрытой обзором VISTA Variables in the Via Lactea (VVV) (Миннити и др., 2010) в ближнем инфракрасном диапазоне. Из каталога VVV DR5 мы отобрали все надежные (флаг $errBits \leq 16$) значения звездной величины источника в Ks -фильтре, измеренные в апертуре радиусом $2''$ ($aperMag5$). Всего было отобрано 190 измерений за период времени с 2010 по 2015 г. Для сравнения мы использовали измерения блеска нескольких достаточно ярких соседних звезд в том же поле (ближе $40''$).

Из кривой блеска (рис. 4) хорошо видно, что источник демонстрирует быструю инфракрасную переменность, изменяя свой блеск на 0.1–0.15 величины за несколько дней. Такая переменность не характерна для одиночных голубых сверхгигантов, амплитуда переменности которых обычно составляет 0.02–0.04 величины в оптическом диапазоне (Бюскар и др., 2015; Аэртс и др., 2017).

Подобные быстрые изменения светимости, на десятки процентов за несколько дней, не могут быть связаны с собственной переменностью звезды-супергиганта. Переработка рентгеновского

Таблица 2. Измеренные характеристики всплесков

N	Полное энерговыделение, 10^{38} эрг (1–10 кэВ)	Время ожидания, с	Продолжи- тельность, с	Время роста, с	Светимость до вспышки L_x , 10^{34} эрг s^{-1} (1–10 кэВ)
1	4.4 ± 0.2	15 000(*)	4000	2500	1.6 ± 0.1
2	5.9 ± 0.3	8500	5500	2500	4.0 ± 0.2
3	3.1 ± 0.3	6250	2000	500	5.5 ± 0.3
4	3.5 ± 0.2	4750	4500	1500	5.4 ± 0.4
5	4.1 ± 0.2	15 750	5000	1500	2.6 ± 0.1
6	3.4 ± 0.2	15 500	3000	2000	4.3 ± 0.2

излучения поверхностью супергиганта также не может обеспечить наблюдаемые быстрые изменения его блеска, так как даже для самых ярких наблюдававшихся вспышек полная болометрическая светимость составляет около 10^{37} эрг s^{-1} , что на порядок меньше болометрической светимости голубых сверхгигантов ($\gtrsim 10^5 L_{\odot}$).

Для определения природы наблюдаемой быстрой переменности необходимы дополнительные спектроскопические наблюдения в ближнем-ИК диапазоне, желательны совмещенные с рентгеновским мониторингом системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря длительному непрерывному наблюдению IGR J16195–4945, проведенному телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в 2021 г., удалось исследовать переменность источника на масштабах 10–10 000 с. В кривой блеска обнаружено шесть характерных для SFXT вспышек продолжительностью в несколько тысяч секунд. Во время вспышек не происходит сильного изменения жесткости рентгеновского излучения. Значимого периодического сигнала обнаружено не было.

Широкополосный спектр, построенный по совокупным данным ART-XC и телескопов обсерватории Swift, хорошо описывается моделью степенного закона с экспоненциальным завалом на энергии ≈ 13 кэВ и существенным поглощением $N_H \approx 10^{23}$ cm^{-2} .

Поскольку средняя светимость источника оказалась ниже критической, мы сравнили параметры наблюдававшихся вспышек в IGR J16195–4945 со вспышками в других SFXT и с предсказаниями модели “оседающей” аккреции (Шакура и др., 2012). Параметры вспышек от источника близки к таковым для других известных систем. У системы обнаружена значительная быстрая переменность

в ближнем инфракрасном диапазоне, которая не может быть объяснена в простых предположениях и требует дальнейшего исследования.

Авторы благодарят рецензентов за полезные замечания, позволившие улучшить статью. В работе использованы данные телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (СРГ). Обсерватория СРГ разработана в АО “НПО Лавочкина” (входит в госкорпорацию “Роскосмос”) при участии Германского центра авиации и космонавтики (DLR) в рамках Федеральной космической программы России по заказу Российской академии наук. Команда ART-XC благодарит госкорпорацию “Роскосмос”, Российскую академию наук и госкорпорацию “Росатом” за поддержку проекта СРГ, а также АО “НПО Лавочкина” и партнеров за создание и работу с космическим аппаратом и платформой “Навигатор”. Работа поддержана грантом РФФИ 19-12-00423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэртс и др. (C. Aerts, S. Simon-Díaz, S. Bloemen, J. Debosscher, P.I. Pápics, S. Bryson, et al.), *Astron. Astrophys.* **602**, A32 (2017).
2. Боццо и др. (E. Bozzo, M. Falanga, and L. Stella), *Astrophys. J.* **683**(2), 1031 (2008).
3. Бюскар и др. (B. Buyschaert, C. Aerts, S. Bloemen, J. Debosscher, C. Neiner, M. Briquet, et al.), *MNRAS* **453**(1), 89 (2015).
4. Винклер и др. (C. Winkler, T.J.L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Giménez, S. Grebenev, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
5. Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **33**, № 3 (2007) [S.A. Grebenev and R.A. Sunyaev, *Astron. Lett.* **33**, 149 (2007)].
6. Гребенев (S.A. Grebenev), arXiv e-prints p. arXiv:1004.0293 (2010).

7. ин'т Занд и др. (J. in't Zand, J. Heise, P. Ubertini, A. Bazzano, and C. Markwardt), in V. Schoenfelder, G. Lichti, and C. Winkler (eds.), 5th INTEGRAL Workshop on the INTEGRAL Universe, Vol. 552 of ESA Special Publ., p. 427 (2004).
8. ин'т Занд (J.J.M. in't Zand), *Astron. Astrophys.* **441(1)**, L1 (2005).
9. Колейро и др. (A. Coleiro, S. Chaty, J.A. Zurita Heras, F. Rahoui, and J.A. Tomsick), *Astron. Astrophys.* **560**, A108 (2013).
10. Кусумано и др. (G. Cusumano, V. La Parola, A. Segreto, and A. D'Ai), *MNRAS* **456(3)**, 2717 (2016).
11. Куулкерс и др. (E. Kuulkers, C. Ferrigno, P. Kretschmar, J. Alfonso-Garzón, M. Baab, A. Bazzano, et al.), *New Astron. Rev.* **93**, 101629 (2021).
12. Лебран и др. (F. Lebrun, J.P. Leray, P. Lavocat, J. Crétonne, M. Arqu'ès, C. Blondel, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L141 (2003).
13. Лихи и др. (D.A. Leahy, W. Darbro, R.F. Elsner, M.C. Weisskopf, P.G. Sutherland, S. Kahn, et al.), *Astrophys. J.* **266**, 160 (1983).
14. Мартинес-Нунез и др. (S. Martí nez-Núñez, P. Kretschmar, E. Bozzo, L.M. Oskinova, J. Puls, L. Sidoli, et al.), *Space Sci. Rev.* **212(1-2)**, 59 (2017).
15. Миннити и др. (D. Minniti, P.W. Lucas, J.P. Emerson, R.K. Saito, M. Hempel, P. Pietrukowicz, et al.), *New Astron.* **15(5)**, 433 (2010).
16. Моррис и др. (D.C. Morris, R.K. Smith, C.B. Markwardt, R.F. Mushotzky, J. Tueller, T.R. Kallman, et al.), *Astrophys. J.* **699(1)**, 892 (2009).
17. Негуруэла и др. (I. Negueruela, D.M. Smith, P. Reig, S. Chaty, and J.M. Torrejón), in A. Wilson (ed.), *The X-ray Universe 2005*, Vol. 604 of ESA Special Publ., p. 165 (2006).
18. Оскинова и др. (L.M. Oskinova, A. Feldmeier, and P. Kretschmar), *MNRAS* **421(4)**, 2820 (2012).
19. Ох и др. (K. Oh, M. Koss, C.B. Markwardt, K. Schawinski, W.H. Baumgartner, S.D. Barthelmy, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235(1)**, 4 (2018).
20. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
21. Романо (P. Romano), *J. High Energy Astrophys.* **7**, 126 (2015).
22. Сгуэра и др. (V. Sguera, E.J. Barlow, A.J. Bird, D.J. Clark, A.J. Dean, A.B. Hill, et al.), *Astron. Astrophys.* **444(1)**, 221 (2005).
23. Сгуэра и др. (V. Sguera, A. Bazzano, A.J. Bird, J. Dean, P. Ubertini, E.J. Barlow, et al.), *Astrophys. J.* **646(1)**, 452 (2006).
24. Сидоли и др. (L. Sidoli, S. Vercellone, S. Mereghetti, and M. Tavani), *Astron. Astrophys.* **429**, L47 (2005).
25. Сидоли и др. (L. Sidoli, P. Romano, S. Mereghetti, A. Paizis, S. Vercellone, V. Mangano, et al.), *Astron. Astrophys.* **476(3)**, 1307 (2007).
26. Сидоли и др. (L. Sidoli, K.A. Postnov, A. Belfiore, M. Marelli, D. Salvetti, R. Salvaterra, et al.), *MNRAS* **487(1)**, 420 (2019).
27. Сидоли и др. (L. Sidoli, K. Postnov, A. Tiengo, P. Esposito, V. Sguera, A. Paizis, et al.), *Astron. Astrophys.* **638**, A71 (2020).
28. Сидоли (L. Sidoli), in XII Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources Workshop (MULTIF2017), p. 52 (2017).
29. Скаргл и др. (J.D. Scargle, J.P. Norris, B. Jackson, and J. Chiang), *Astrophys. J.* **764(2)**, 167 (2013).
30. Смит и др. (D.M. Smith, W.A. Heindl, C.B. Markwardt, J.H. Swank, I. Negueruela, T.E. Harrison, et al.), *Astrophys. J.* **638(2)**, 974 (2006).
31. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
32. Томсик и др. (J.A. Tomsick, S. Chaty, J. Rodriguez, L. Foschini, R. Walter, and P. Kaaret), *Astrophys. J.* **647(2)**, 1309 (2006).
33. Уолтер, Зурита Херас (R. Walter and J. Zurita Heras), *Astron. Astrophys.* **476(1)**, 335 (2007).
34. Уолтер и др. (R. Walter, A.A. Lutovinov, E. Bozzo, and S.S. Tsygankov), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **23**, 2 (2015).
35. Шакура и др. (N. Shakura, K. Postnov, A. Kochetkova, and L. Hjalmarsdotter), *MNRAS* **420(1)**, 216 (2012).
36. Шакура и др. (N. Shakura, K. Postnov, L. Sidoli, and A. Paizis), *MNRAS* **442(3)**, 2325 (2014).
37. Шакура и др. (N.I. Shakura, K.A. Postnov, A.Y. Kochetkova, L. Hjalmarsdotter, L. Sidoli, and A. Paizis), *Astron. Rep.* **59(7)**, 645 (2015).