

ПОИСК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРЕДШЕСТВУЮЩЕГО СЛИЯНИЮ ДВОЙНЫХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД, В ДАННЫХ ОБЗОРА ВСЕГО НЕБА ОБСЕРВАТОРИЕЙ СПЕКТР-РГ

© 2022 г. И. А. Мереминский^{1*}, А. А. Лутовинов¹, К. А. Постнов^{2,3}, В. А. Арефьев¹,
И. Ю. Лапшов¹, С. В. Мольков¹, С. Ю. Сазонов¹, А. Н. Семена¹, А. Ю. Ткаченко¹,
А. Е. Штыковский¹, Ж. Лью⁴, Й. Вилмс⁵, А. Рау⁴, Т. Доузер⁵, И. Крейкенбом⁵

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁴Институт внеземной физики общества Макса Планка, Гархинг, Германия

⁵Обсерватория им. К. Ремейса, Центр физики астрочастиц университета Эрлангена,
Бамберг, Германия

Поступила в редакцию 01.02.2022 г.

После доработки 04.05.2022 г.; принята к публикации 05.05.2022 г.

Тесные двойные системы, состоящие из нейтронных звезд излучают гравитационные волны и сливаются на временных масштабах, меньших Хаббловского времени. Считается, что слияния нейтронных звезд в таких системах обеспечивают наблюдаемую энергетику коротких гамма-всплесков. В литературе предложено несколько механизмов, которые могут привести к существенному излучению электромагнитных волн задолго до слияния нейтронных звезд. В настоящей работе исследуется возможность наблюдения излучения, предшествующего слиянию двойных нейтронных звезд, в рентгеновском диапазоне телескопами обсерватории Спектр–Рентген–Гамма. Приведен анализ первого подобного события, короткого гамма-всплеска GRB210919A, наблюдавшегося телескопами СРГ менее, чем за два дня до слияния.

Ключевые слова: обзоры неба, рентгеновские источники, гамма-всплески.

DOI: 10.31857/S0320010822070063

ВВЕДЕНИЕ

Короткие гамма-всплески (short gamma-ray burst, sGRB) — это короткие вспышки жесткого рентгеновского и гамма-излучения, длящиеся обычно менее секунды (в исключительных случаях до нескольких десятков секунд, Растинежад и др., 2022) и составляющие значительную, хотя и меньшую часть популяции гамма-всплесков (см., например, Мазец, Голенецкий, 1981; Коувелито и др., 1993; Свинкин и др., 2016; фон Кинлин и др., 2020).

Благодаря одновременному детектированию гравитационно-волнового (ГВ) и гамма-излучения от подобного события GW170817 (Эббот и др., 2017) (см. также работу Позаненко и др., 2020,

в которой приводится еще один кандидат в подобные события — S190425z) удалось однозначно установить природу, по крайней мере, части sGRB: они рождаются при слиянии нейтронных звезд (НЗ) в двойных системах. Быстрое сближение НЗ, сопровождающееся уменьшением орбитального периода, производит характерный гравитационно-волновой сигнал (“chirp”), а релятивистские струйные истечения, запускаемые рожденной при слиянии черной дырой (ЧД), генерируют наблюдаемые гамма- и рентгеновское излучения (Резолла и др., 2011; Руиз и др., 2016). В результате слияния также производится большое количество тяжелых элементов, последующий радиоактивный распад которых приводит к появлению яркого оптического и ИК-транзита, так называемой килоновой (Ли, Пачинский, 1998; Метцгер, 2019). Следует отметить, что также был предложен альтернативный механизм, объясняющий наблюдаемое электро-

*Электронный адрес: i.a.mereminskiy@gmail.com

магнитное излучение от сближающихся НЗ — так называемое приливное обдирание (Кларк, Эрдли, 1977; Блинников и др., 1984), в котором вместо слияния происходит перенос части вещества с одной из НЗ, приводящий в конечном итоге к уменьшению ее массы до критического значения и последующего взрыва (Блинников и др., 2021).

Заманчиво предположить, что в подобных тесных двойных системах из НЗ возможны механизмы, приводящие к значительному энерговыделению задолго до слияния. И действительно, по крайней мере на коротких временных масштабах (за ≈ 1 с до гамма-всплеска) иногда наблюдаются предвсплески (Кошут и др., 1995) — вспышки рентгеновского излучения более слабые, чем основные импульсы. Впрочем, предвсплески наблюдаются редко, менее чем в 1% всех sGRB (Минаяев, Позаненко, 2017). Механизм, ответственный за это раннее излучение, до сих пор окончательно не установлен — некоторые авторы связывают его генерацию с образованием разломов в коре НЗ из-за приливной деформации (Цанг и др., 2012; Суворов, Коккотас, 2020), в то время как другие указывают на возможное взаимодействие магнитосфер НЗ (Хансен, Лютиков, 2001; Лай, 2012; Метцгер, Зиванцев, 2016; Ванг и др., 2018). В случае, если в системе происходит приливное обдирание, то излучение предвсплеска может быть связано с ускорением переноса вещества на более массивную НЗ перед потерей стабильности мало-массивной компонентой (Блинников и др., 2021).

Кроме того, существует предполагаемый класс сверхновых — сверхновые с релятивистскими струями в общей оболочке (common envelope jet supernovae (CEJSN); Гилкис и др., 2019), в которых слияние НЗ может происходить в оболочке красного гиганта. Такие транзиенты должны ярко светить в широком диапазоне электромагнитных волн (от оптического до рентгеновского) в течение месяцев перед слиянием (Сокер, 2021). Однако отметим: чтобы произвести классический короткий гамма-всплеск в такой системе, слияние должно произойти достаточно близко к поверхности красного гиганта.

Из-за своей непредсказуемости до сих пор не было установлено строгих пределов на рентгеновское излучение до слияния НЗ на временных масштабах дней — тысяч секунд до всплеска. В настоящей работе показано, что обсерватория *СРГ* (Сюняев и др., 2021) во время проведения обзора всего неба с большой вероятностью сможет наблюдать одно или несколько таких событий за несколько часов — дней до вспышки. Также обсуждается короткий гамма-всплеск GRB210919A, наблюдавшийся обсерваторией менее, чем за два дня до слияния.

ВОЗМОЖНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ РАННЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СЛИВАЮЩИХСЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД ОБСЕРВАТОРИЕЙ *СРГ*

Наблюдения двойных НЗ в последние дни перед слиянием могут быть только случайными. Благодаря используемой стратегии обзора всего неба, *СРГ* наилучшим образом подходит для поисков подобных объектов. Покрывая примерно 1% всего неба ежедневно, телескопы ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021) и *eROSITA* (Предель и др., 2021) значительно увеличивают шансы на регистрацию таких событий по сравнению с другими рентгеновскими телескопами с зеркалами косого падения.

Однако, чтобы отождествить такой транзиент со слиянием двойных НЗ, рентгеновских данных недостаточно, необходим дополнительный внешний сигнал, например, регистрация хорошо локализованного sGRB или обнаружение килоновой в оптическом или ближнем ИК-диапазонах. Существующие космические мониторы гамма-всплесков детектируют около 40 sGRB в год, однако только обсерватория *Swift* предоставляет достаточно точную локализацию для дальнейших поисков соответствующих рентгеновских транзиентов. Каталог всплесков¹, зарегистрированных телескопом *Swift*/*BAT* (подробнее см. Лин и др., 2016) содержит около 90 sGRB, обнаруженных за последние 17 лет и локализованных по данным телескопа *Swift*/*XRT*, т.е. с точностью лучше $10''$. Таким образом, частота регистрации таких событий составляет приблизительно 5.3 год^{-1} . В оптических обзорах, например, *Zwicky Transient Facility* (*ZTF*, Бельм и др., 2019) или в готовящемся к запуску *Large Synoptic Survey Telescope* (*LSST*, Ивезич и др., 2019), также могут появляться кандидаты, в том числе в события, наблюдающиеся под большим углом к оси джета, как в случае *GW170817* (Маргутти и др., 2017; Позаненко и др., 2018), которые слабее в гамма-диапазоне и из-за этого с меньшей вероятностью будут зарегистрированы гамма-мониторами. В работе Андреони и др. (2021) оценивается, что с помощью специально разработанной наблюдательной программы *LSST* могут быть обнаружены 0.3–3.2 килоновые в год. Целенаправленный поиск в данных 23 мес наблюдений *ZTF* не выявил достоверных кандидатов в килоновые (Андреони и др., 2020).

Таким образом, можно оценить, что в течение четырехлетнего обзора всего неба ≈ 0.2 идентифицированных sGRB случайным образом попадут в поле зрения телескопов *СРГ* менее чем за день до

¹https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/index.php

слияния. Эта простая оценка неплохо согласуется с более аккуратным расчетом частоты детектирования ранних послесвечений от sGRB, $\approx 0.1 \text{ год}^{-1}$, проведенном в работе Хабибуллина и др. (2012).

Кроме того, задав определенный уровень светимости в рентгеновском диапазоне за день до слияния и предположив, что раннее излучение изотропно, можно оценить общее количество подобных транзиентов в обзоре всего неба для локальной Вселенной (т.е. пренебрегая космологическими эффектами). Пусть рентгеновская светимость раннего излучения $L_{X,42}$ (в единицах $10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$) в диапазоне энергий 0.2–2.3 кэВ, в котором eROSITA имеет характерную чувствительность в $F_X = 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ за день, $A_{\text{sky}} = 360/41\,253 \approx 0.009$ — доля ежедневно осматриваемого неба, а темп слияний двойных НЗ в локальной Вселенной составляет $R_{\text{NS-NS}} = 10\text{--}1700 \text{ Гпк}^{-3} \text{ год}^{-1}$ (получен по данным первых трех наблюдательных сеансов коллаборации LIGO-Virgo, Коллаборация LIGO и др., 2021). Тогда в доступном объеме $V = 0.1 L_{X,42}^{3/2} \text{ Гпк}^3$ ожидаемая частота встречаемости источников $N_{\text{observed}} \approx \approx V \times A_{\text{sky}} \times R_{\text{NS-NS}} \text{ год}^{-1}$, т.е. для светимости $10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$ находится в диапазоне 0.01–2 событий в год. Впрочем, следует еще раз подчеркнуть, что отбор подобных событий на фоне прочих рентгеновских транзиентов, обнаруживаемых СРГ, — таких как вспышечная активность на близких звездах, переменность АЯГ и т.д. — представляется крайне сложной задачей.

GRB210919A

Короткий гамма-всплеск GRB210919A был обнаружен телескопом Swift/BAT 19 сентября 2021 г. в 00:28:33 UT (Тохувавоху и др., 2021). Спустя примерно полторы минуты обсерватория перенавела на положение всплеска, что позволило начать наблюдения оптическим UVOT и рентгеновским XRT телескопами. Swift/XRT обнаружил слабое мягкое рентгеновское послесвечение всплеска, что позволило уточнить его положение RA, Dec = 80.25448, +1.31153 (FK5, J2000, 90%, доверительный радиус 4.6'', Год и др., 2021). Последовавшие наблюдения на оптических и ИК-телескопах не обнаружили ярких переменных источников в области локализации XRT (см., например, Перли и др., 2021; Жанг и др., 2021; Готтлиб и др., 2021; Пирель и др., 2021; Канн и др., 2021с), за исключением очень слабого источника ($i' = 24.14 \pm 0.30$, $R_c = 24.47 \pm 0.53$ зв. величины в АВ системе, Канн и др., 2021с,b), который вскоре потух (Канн и др., 2021a). На глубоких изображениях поля были

найжены две слабые галактики со звездными величинами в r -фильтре в 20.5 и 24 (АВ, О'Коннор и др., 2022), расположенные на одинаковом красном смещении $z = 0.2411$ (Росси и др., 2022). На этом красном смещении проецированное расстояние до затухшего оптического транзиента составляет 13 и 50 кпк. Такие большие расстояния до родительских галактик наблюдаются для коротких гамма-всплесков (см. Фонг, Бергер, 2013; Бергер, 2014, и ссылки там) и обычно объясняются тем, что двойная система приобретает значительную скорость после того, как одна из звезд взрывается как сверхновая (Фрайер, Калогера, 1997). В целом все это позволяет предположить, что наблюдавшийся слабый транзиент действительно был оптическим послесвечением GRB210919A, а слияние произошло в группе галактик на $z = 0.2411$. Глубокое наблюдение рентгеновским телескопом Chandra, состоявшееся через ≈ 2.2 дня после всплеска, не обнаружило рентгеновского источника (Сакамото и др., 2021).

Чтобы наглядно показать рентгеновскую кривую блеска GRB210919A, мы перевели все наблюдаемые потоки в стандартный диапазон 0.3–10 кэВ, предполагая, что в любой момент времени спектр описывался поглощенным степенным законом с толщиной нейтрального водорода на луче зрения в $1.6 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (Виллингейл и др., 2013). Для основного импульса всплеска мы использовали показатель степенного спектра $\Gamma = 1.58$ (Бартелми и др., 2021), измеренный по данным телескопа Swift/BAT. Данные телескопа Swift/XRT были обработаны с использованием онлайн-инструментов (Эванс и др., 2009). Раннее послесвечение было зарегистрировано Swift/XRT с потоком $4.5 \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, его спектр описывался степенным законом с наклоном $\Gamma = 2.1^{+1.4}_{-1.2}$ и поглощением, совместимым с Галактическим в данном направлении.

Несколько рентгеновских наблюдений было проведено после затухания послесвечения: два были выполнены телескопом Swift/XRT через ~ 5 и ~ 280 кс после вспышки, еще одно наблюдение, как уже отмечалось выше, было проведено обсерваторией Chandra через ~ 180 кс после события. Его экспозиция составила около 20 кс. Наиболее жесткий 3σ -верхний предел, полученный в этих наблюдениях, составляет $7.5 \times 10^{-15} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне энергий 0.3–10 кэВ (Сакамото и др., 2021). Он получен в предположении, что спектр послесвечения оставался постоянным.

Телескоп ART-XC покрыл область локализации GRB210919A примерно за два дня до всплеска, причем половина экспозиции была накоплена за 1.9 дней до события. Данные были обработаны стандартным образом, используя

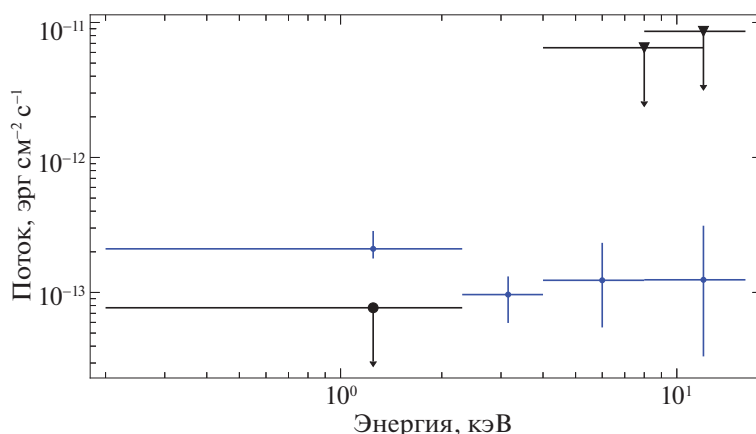


Рис. 1. Верхние пределы на поток рентгеновского излучения от GRB210919A в разных энергетических диапазонах по данным телескопов обсерватории СРГ: кружок — данные телескопа eROSITA, треугольники — данные ART-XC. Голубыми точками показаны оценки потока послесвечения, наблюдавшегося в течение первого часа после всплеска телескопом Swift/XRT, полученные по наилучшей аппроксимации измеренного спектра.

пакет программного обеспечения ARTPRODUCTS v0.9 и последнюю версию калибровочной базы данных v20200401. На месте GRB не было зарегистрировано источника ни в стандартном диапазоне (4–12 кэВ), ни в более жестком канале (8–16 кэВ). Верхние пределы (95% доверительный интервал), рассчитанные для спектра, аналогичного спектру Крабовидной туманности ($\Gamma = 2.1$, $N_H = 3.8 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$), составляют $6.5 \times 10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $8.6 \times 10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в стандартном и жестком каналах соответственно.

Телескоп eROSITA наблюдал поле GRB210919A 8 раз, с 16 сентября 13:13:46UTC до 17 сентября 17:13:48UTC. За это время была накоплена полная экспозиция в ~ 261 с. Следует отметить, что последнее наблюдение состоялось существенно ближе к моменту вспышки по сравнению с наблюдениями телескопа ART-XC, что обусловлено большим полем зрения телескопа eROSITA. Данные были обработаны с использованием стандартного пакета eROSITA Science Analysis Software System (eSASS, версия eSASS_users201009) (Брюннер и др., 2018). Предполагая, что спектр описывался степенным законом с Галактическим поглощением и наклоном $\Gamma = 1.9$, мы получили верхний предел 3σ на мягкий поток (0.2–2.3 кэВ) на момент наблюдений: $7.7 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Итоговые пределы на раннее излучение GRB210919A, полученные по данным телескопов СРГ, представлены на рис. 1, а общая кривая блеска показана на рис. 2.

ВЕРХНИЕ ПРЕДЕЛЫ НА РЕНТГЕНОВСКУЮ СВЕТИМОСТЬ ДО СЛИЯНИЯ

Как было отмечено выше, для GRB210919A отсутствует однозначное измерение красного сме-

щения оптического послесвечения, а качество имеющейся спектральной информации об основном импульсе на высоких энергиях ($\gtrsim 100$ кэВ) не позволяет использовать соотношения Амати и подобные (см. Минаев, Позаненко, 2020, и ссылки там) для оценки расстояния. Однако, предполагая, что обнаруженная группа галактик (О’Коннор и др., 2021; Росси и др., 2022) на $z = 0.2411$ (т.е. на расстоянии $D \simeq 1.2$ Гпк) является родительской для этого события, мы можем ограничить изотропную рентгеновскую светимость значениями $L_{\text{eROSITA}} \leq 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$ и $L_{\text{ART-XC}} \leq 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$.

Полное энергосодержание всплеска оказывается в этом случае $E_{\text{iso}} \approx 10^{50}$ эрг, исходя из флюэнса всплеска и экстраполяции измеренного Swift/BAT энергетического спектра. Исходя из теоретической зависимости между энергосодержанием и углом между лучом зрения и осью джета (см. Салафия и др., 2019, и ссылки там) можно предположить, что орбитальная плоскость исходной двойной системы была ориентирована примерно перпендикулярно лучу зрения. Считая, что обе НЗ в системе имеют массу в $1.4 M_{\odot}$, за два дня до слияния расстояние между ними должно быть порядка $a_0 \sim 100 R_{NS} \sim 10^8$ см. Это расстояние может быть меньше радиуса светового цилиндра одной из НЗ, $R_l = c/\omega = 5 \times 10^9 (P/1 \text{ s}) \text{ см}$, где P — период вращения НЗ. В таком случае ожидаемая мощность электромагнитного излучения составит (Хансен, Лютиков, 2001) $L_{\text{em}} \sim 10^{38} (B_s/10^{15} \text{ G})^2 (a_0/10^8 \text{ см})^{-7} \text{ эрг с}^{-1}$, где B_s — напряженность магнитного поля НЗ. Случай более короткого периода вращения НЗ, когда радиус светового цилиндра меньше расстояния между компонентами, рассматривался в работе Ванг и др. (2018). При наиболее оптимистичной конфигурации противонаправленных дипольных

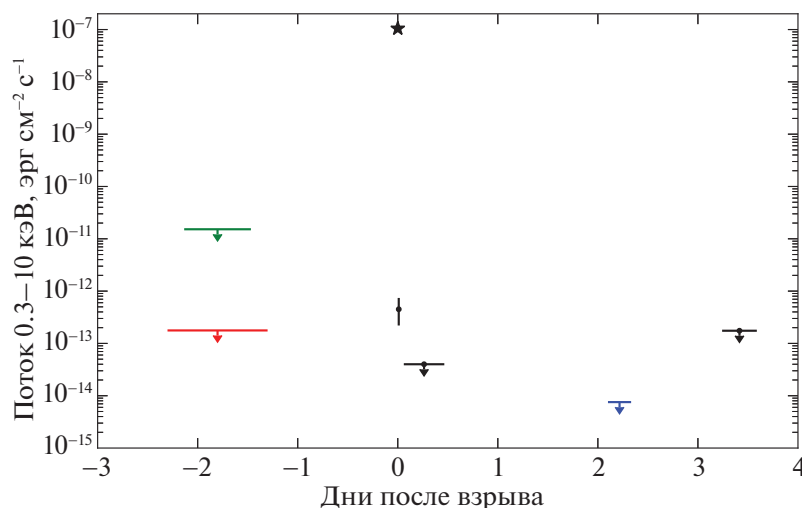


Рис. 2. Наблюдавшиеся потоки от GRB210919A, пересчитанные в стандартный рентгеновский диапазон энергий 0.3–10 кэВ. Черная звездочка указывает на главный импульс, черные точки показывают поток от наблюдавшегося послесвечения и верхние пределы на него по данным Swift/XRT. Верхние пределы, полученные по наблюдениям до всплеска, показаны красным (eROSITA) и зеленым (ART-XC); предел после всплеска по данным Chandra показан синим цветом.

моментов НЗ ожидаемая светимость составит $L_{\text{em}} \sim 4 \times 10^{41} (B_s/10^{12} \text{ Г})^2 (a/10^8 \text{ см})^{-2} \text{ эрг с}^{-1}$. Хотя по порядку величины эта светимость близка к верхним пределам на светимость, полученным по данным eROSITA, ожидаемый модельный спектр в этом случае должен быть существенно мягче и не доходит до рентгеновского диапазона. Таким образом, полученные верхние пределы недостаточно строги для того, чтобы ограничить физические характеристики системы двух НЗ примерно за два дня до всплеска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регистрация раннего излучения от сливающихся НЗ является привлекательной, но крайне сложной наблюдательной задачей. Однако, благодаря используемой наблюдательной стратегии в ходе обзора всего неба, телескопы обсерватории СРГ могут обнаруживать подобные события. В настоящей работе был проанализирован гамма-всплеск GRB210919A, область локализации которого попадала в поле зрения телескопов СРГ менее чем за двое суток до вспышки, впервые получены верхние пределы на рентгеновский поток до слияния на таких масштабах времени: предполагая, что слияние действительно произошло в группе галактик на $z = 0.2411$, полученные пределы составили $L_{\text{eROSITA}} \leq 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$ и $L_{\text{ART-XC}} \leq 10^{45} \text{ эрг с}^{-1}$.

Полученные оценки показывают, что в ходе 4-летнего обзора всего неба, около 0.2 sGRB случайным образом попадут в поле зрения телескопов СРГ менее чем за день до слияния.

В данной работе использованы данные телескопов обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (СРГ): телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского и телескопа eROSITA. 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”. Телескоп eROSITA был построен консорциумом германских институтов под руководством MPE при поддержке DLR. Научные данные с космического аппарата принимаются на антенны дальней космической связи в Медвежьих Озерах, Уссурийске и Байконуре при финансовой поддержке госкорпорации “Роскосмос”. Данные телескопа eROSITA были обработаны с использованием ПО eSASS, разработанного германским консорциумом eROSITA.

Авторы благодарят рецензентов за критические замечания. Работа поддержана грантом РФФИ 19-29-11029. Работа КАП (интерпретация результатов) поддержана Программой Казанского федерального университета “Приоритет-2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреони и др. (I. Andreoni, E.C. Kool, A. Sagués Carracedo, M.M. Kasliwal, M. Bulla, T. Ahumada, et al.), *Astrophys. J.* **904**(2), 155 (2020).
2. Андреони и др. (I. Andreoni, M.W. Coughlin, M. Almualla, E.C. Bellm, F.B. Bianco, M. Bulla, et al.), arXiv e-prints p. arXiv:2106.06820 (2021).
3. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy, H.A. Krimm, S. Laha, A.Y. Lien, C.B. Markwardt, D.M. Palmer, et al.), *GRB Coordinates Network* **30863**, 1 (2021).
4. Бельм и др. (E.C. Bellm, S.R. Kulkarni, M.J. Graham, R. Dekany, R.M. Smith, R. Riddle, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131**(995), 018002 (2019).
5. Бергер (E. Berger), *Ann. Rev. of Astron. Astrophys.* **52**, 43 (2014).
6. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, I.D. Novikov, T.V. Perevodechikova, and A.G. Polnarev), *Sov. Astron. Lett.* **10**, 177 (1984).
7. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, D.K. Nadyozhin, N.I. Kramarev, and A.V. Yudin), *Astron. Rep.* **65**(5), 385 (2021).
8. Брюннер и др. (H. Brunner, T. Boller, D. Coutinho, T. Dauser, K. Dennerl, T. Dwelly, et al.), in J.-W.A. den Herder, S. Nikzad, and K. Nakazawa (eds.), *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray*, Vol. 10699 of Society of Photo-Optical Instrument. Engineers (SPIE) Conf. Ser., p. 106995G (2018).
9. Ванг и др. (J.-S. Wang, F.-K. Peng, K. Wu, and Z.-G. Dai), *Astrophys. J.* **868**(1), 19 (2018).
10. Виллингейл и др. (R. Willingale, R.L.C. Starling, A.P. Beardmore, N.R. Tanvir, and P.T. O'Brien), *MNRAS* **431**(1), 394 (2013).
11. Гилкис и др. (A. Gilkis, N. Soker, and A. Kashi), *MNRAS* **482**(3), 4233 (2019).
12. Год и др. (M.R. Goad, J.P. Osborne, A.P. Beardlinebreak more, P.A. Evans, and Swift-XRT Team.), *GRB Coordinates Network* **30850**, 1 (2021).
13. Готтлиб и др. (A. Gottlieb, S. Dichiaro, S.B. Cenko, E. Troja, J.M. Durbak, A. Kutyrev, et al.), *GRB Coordinates Network* **30860**, 1 (2021).
14. Жанг и др. (J. Zhang, J. Cooke, G. Canalizo, S.M. Doan, S. Satyapal, T. Bohn, et al.), *GRB Coordinates Network* **30858**, 1 (2021).
15. Ивезич и др. (Ž. Ivezić, S.M. Kahn, J.A. Tyson, B. Abel, E. Acosta, R. Allsman, et al.), *Astrophys. J.* **873**(2), 111 (2019).
16. Канн и др. (D.A. Kann, D.B. Malesani, V. D'Elia, A. de Ugarte Postigo, A. Rossi, C.C. Thoene, et al.), *GRB Coordinates Network* **30983**, 1 (2021a).
17. Канн и др. (D.A. Kann, A. Rossi, A. de Ugarte Postigo, C. Thoene, M. Blazek, J.F. Agui Fernandez, et al.), *GRB Coordinates Network* **30884**, 1 (2021b).
18. Канн и др. (D.A. Kann, A. Rossi, A. de Ugarte Postigo, C. Thoene, M. Blazek, J.F. Agui Fernandez, et al.), *GRB Coordinates Network* **30883**, 1 (2021c).
19. Кларк, Эрдли (J.P.A. Clark and D.M. Eardley), *Astrophys. J.* **215**, 311 (1977).
20. Коллаборация LIGO и др. (The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, et al.), arXiv e-prints p. arXiv:2111.03634 (2021).
21. Коувелито и др. (C. Kouveliotou, C.A. Meegan, G.J. Fishman, N.P. Bhat, M.S. Briggs, T.M. Koshut, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **413**, L101 (1993).
22. Кошут и др. (T.M. Koshut, C. Kouveliotou, W.S. Paciesas, J. van Paradijs, G.N. Pendleton, M.S. Briggs, et al.), *Astrophys. J.* **452**, 145 (1995).
23. Лай (D. Lai), *Astrophys. J. (Lett.)* **757**(1), L3 (2012).
24. Ли, Пачинский (L.-X. Li and B. Paczynski), *Astrophys. J. (Lett.)* **507**(1), L59 (1998).
25. Лин и др. (A. Lien, T. Sakamoto, S.D. Barthelmy, W.H. Baumgartner, J.K. Cannizzo, K. Chen, et al.), *Astrophys. J.* **829**(1), 7 (2016).
26. Мазец, Голенецкий (E.P. Mazets and S.V. Golenskii), *Astrophys. Space Sci.* **75**(1), 47 (1981).
27. Маргutti и др. (R. Margutti, E. Berger, W. Fong, C. Guidorzi, K.D. Alexander, B.D. Metzger, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **848**(2), L20 (2017).
28. Метцгер, Зиванцев (B.D. Metzger and C. Zivancev), *MNRAS* **461**(4), 4435 (2016).
29. Метцгер (B.D. Metzger), *Liv. Rev. Relativ.* **23**(1), 1 (2019).
30. Минаев, Позаненко (P.Y. Minaev and A.S. Pozanenko), *Astron. Lett.* **43**(1), 1 (2017).
31. Минаев, Позаненко (P.Y. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **492**(2), 1919 (2020).
32. О'Коннор и др. (B. O'Connor, E. Hammerstein, S.B. Cenko, E. Troja, A. Gottlieb, S. Dichiaro, et al.), *GRB Coordinates Network* **30934**, 1 (2021).
33. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
34. Перли и др. (D.A. Perley, Z.P. Zhu, D. Xu, S.Y. Fu, D.B. Malesani, and A. Avramova-Boncheva), *GRB Coordinates Network* **30852**, 1 (2021).
35. Пирель и др. (J. Pierel, J. Cooke, A. Rest, R. Foley, and R. Ridden-Harper), *GRB Coordinates Network* **30868**, 1 (2021).
36. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Y. Minaev, A.A. Volnova, E.D. Mazaeva, A.S. Moskvitin, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **852**(2), L30 (2018).
37. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, P.Y. Minaev, S.A. Grebenev, and I.V. Chelovekov), *Astron. Lett.* **45**(11), 710 (2020).
38. Предель и др. (P. Predehl, R. Andrichke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
39. Растинежад и др. (J.C. Rastinejad, B.P. Gompertz, A.J. Levan, W. Fong, M. Nicholl, G.P. Lamb, et al.), arXiv e-prints p. arXiv:2204.10864 (2022).
40. Резолла и др. (L. Rezzolla, B. Giacomazzo, L. Baiotti, J. Granot, C. Kouveliotou, and M.A. Aloy), *Astrophys. J. (Lett.)* **732**(1), L6 (2011).
41. Росси и др. (A. Rossi, F. Cusano, E. Palazzi, L. Amati, D.B. Malesani, S. Savaglio, et al.), *GRB Coordinates Network* **31453**, 1 (2022).

42. Руиз и др. (M. Ruiz, R.N. Lang, V. Paschalidis, and S.L. Shapiro), *Astrophys. J. (Lett.)* **824(1)**, L6 (2016).
43. Сакамото и др. (T. Sakamoto, E. Troja, J. Norris, S.D. Barthelmy, J.L. Racusin, N. Kawai, et al.), *GRB Coordinates Network* **30879**, 1 (2021).
44. Салафия и др. (O.S. Salafia, G. Ghirlanda, S. Ascenzi, and G. Ghisellini), *Astron. Astrophys.* **628**, A18 (2019).
45. Свинкин и др. (D. Svinkin, D. Frederiks, R. Aptekar, S. Golenetskii, V. Pal'Shin, P.P. Oleynik, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **224(1)**, 10 (2016).
46. Сокер (N. Soker), *MNRAS* **506(2)**, 2445 (2021).
47. Суворов, Коккотас (A.G. Suvorov and K.D. Kokkotas), *Phys. Rev. D* **101(8)**, 083002 (2020).
48. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
49. Тохувавоу и др. (A. Tohuvavohu, S.D. Barthelmy, A.Y. Lien, B. Sbarufatti, and Neil Gehrels Swift Observatory Team), *GRB Coordinates Network* **30846**, 1 (2021).
50. Фонг, Бергер (W. Fong and E. Berger), *Astrophys. J.* **776(1)**, 18 (2013).
51. Фрайер, Калогера (C. Fryer and V. Kalogera), *Astrophys. J.* **489(1)**, 244 (1997).
52. Хабибуллин и др. (I. Khabibullin, S. Sazonov, and R. Sunyaev), *MNRAS* **426(3)**, 1819 (2012).
53. Хансен, Лютиков (B.M.S. Hansen and M. Lyutikov), *MNRAS* **322(4)**, 695 (2001).
54. Цанг и др. (D. Tsang, J.S. Read, T. Hinderer, L. Piro, and R. Bondarescu), *Phys. Rev. Lett.* **108(1)**, 011102 (2012).
55. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **848(2)**, L13 (2017).
56. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, et al.), *MNRAS* **397(3)**, 1177 (2009).
57. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, C.A. Meegan, W.S. Paciesas, P.N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, et al.), *Astrophys. J.* **893(1)**, 46 (2020).