

## GRB 200415A: ГИГАНТСКАЯ ВСПЫШКА МАГНЕТАРА ИЛИ КОРотКИЙ ГАММА-ВСПЛЕСК?

© 2020 г. П. Ю. Минаев<sup>1\*</sup>, А. С. Позаненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 19.08.2020 г.

После доработки 28.08.2020 г.; принята к публикации 22.09.2020 г.

Проведен детальный анализ данных эксперимента GBM/Fermi с целью классификации всплеска гамма-излучения GRB 200415A. Показано, что, с одной стороны, это событие проявляет типичные для гамма-всплесков (GRB) типа I (коротких) свойства: длительность, переменность и характер спектральной эволюции. С другой стороны, локализация источника события на небесной сфере, полученная методом триангуляции, указывает на близкую ( $D_L = 3.5$  Мпк) галактику NGC 253 (Скульптор) как возможную родительскую галактику этого всплеска. Это вносит существенные ограничения на энерговыделение события ( $E_{iso} \sim 10^{46}$  эрг) и дает альтернативную интерпретацию GRB 200415A как гигантскую вспышку источника мягкого повторного гамма-излучения (SGR). В пользу этой интерпретации говорит нетипично жесткая для гамма-всплесков форма энергетического спектра. Кроме того, по положению всплеска на диаграммах  $E_{p,i} - E_{iso}$  (положение максимума в энергетическом спектре  $\nu F_\nu$  в системе источника в зависимости от изотропного эквивалента полной энергии, выделившейся в гамма-диапазоне) и  $T_{90,i} - EH$  (длительность в системе источника в зависимости от комбинации параметров  $EH = E_{p,i,2} E_{iso,51}^{-0.4}$ ) GRB 200415A однозначно классифицируется как гигантская вспышка магнетара при условии его ассоциации с галактикой NGC 253. На этих диаграммах известные гигантские вспышки в Галактике и кандидаты в гигантские вспышки в близких галактиках образуют хорошо выделяемую группу, в которую попадает источник GRB 200415A.

*Ключевые слова:* гамма-транзиенты, гамма-всплески, GRB, магнетары, SGR, GRB 200415A, NGC 253, Скульптор.

DOI: 10.31857/S0320010820090041

### ВВЕДЕНИЕ

Два различных типа космических гамма-всплесков (GRB) были впервые обнаружены в серии экспериментов КОМУС (Мазец и др., 1981) и затем подтверждены на большем статистическом материале в эксперименте BATSE/CGRO (Кувелиоту и др., 1993). Всплески типа I (короткие) характеризуются меньшей длительностью (в основном, менее 2 с), более жестким энергетическим спектром (большей долей высокоэнергетичного излучения) и менее выраженной спектральной эволюцией (задержкой низкоэнергетичного излучения) по сравнению со всплесками типа II (Кувелиоту и др., 1993; Норрис и др., 2005; Минаев и др., 2010а, 2012, 2014). При этом распределения этих двух типов гамма-всплесков по длительности и спектральной жесткости, традиционно используемые для классификации всплесков, значительно перекрываются, сохраняя актуальность проблемы

классификации, особенно в области перекрытия распределений (см., например, Минаев и др., 2010б; Минаев, Позаненко, 2017). Корректная классификация имеет ключевое значение для исследования источников гамма-всплесков.

Гамма-всплески типа I связаны со слиянием системы двух нейтронных звезд (Блинников и др., 1984; Пачинский, 1986; Межарос, Рис, 1992), что недавно было подтверждено гравитационно-волновыми детекторами LIGO/Virgo для события GRB 170817A (Эбботт и др., 2017а,б; Позаненко и др., 2018) и для события GRB 190425A (Эбботт и др., 2020; Позаненко и др., 2020а). Некоторые всплески типа I сопровождаются дополнительным компонентом с длительностью в десятки секунд и более мягким энергетическим спектром (по сравнению с основным эпизодом излучения) — prolonged излучением (extended emission), природа которого до сих пор не выяснена (Коннатон, 2002; Герелс и др., 2006; Россвог, 2007; Метцгер и др.,

\* Электронный адрес: minaevp@mail.ru

2008; Минаев и др., 2010а,б; Норрис и др., 2010; Барков, Позаненко, 2011).

Гамма-всплески типа II ассоциируются с коллапсом ядра массивной звезды (Вусли, 1993; Пачинский, 1998; Межарос, 2006), часть из них также сопровождается вспышкой яркой сверхновой типа Ic (Галама и др., 1998; Пачинский, 1998; Кано и др., 2017; Вольнова и др., 2017).

Короткое и жесткое гамма-излучение также характерно для источников мягкого повторного гамма-излучения (SGR) во время гигантских вспышек (см., например, Мазец и др., 1979; Томпсон, Дункан, 2001; Фредерикс и др., 2007а; Мазец и др., 2008). Кривая блеска гигантской вспышки состоит из короткого (доли секунды), жесткого и яркого основного эпизодов, за которыми следует длительное (сотни секунд) и значительно более слабое продленное излучение, характеризующееся сильной переменностью, в том числе квазипериодичностью (Ферочи и др., 1999; Израел и др., 2005). Большинство источников мягкого повторного гамма-излучения располагаются в Галактике, однако основной короткий эпизод гигантской вспышки можно зарегистрировать также из ближайших к нам галактик, причем его наблюдаемые свойства будут во многом аналогичны свойствам космических гамма-всплесков типа I, внося дополнительные сложности при классификации транзиентных гамма-источников (см., например, Позаненко и др., 2005; Попов, Штерн, 2006; Крайдер, 2006; Мазец и др., 2008). Источники мягкого повторного гамма-излучения, вероятно, связаны с магнетарами — сильно замедленными одиночными нейтронными звездами ( $B \sim 10^{14}$  Гс), природа их гигантских вспышек остается невыясненной (Дункан, Томпсон, 1992; Томпсон, Дункан, 1995; Кувелиоту и др., 1999).

Всплеск гамма-излучения GRB 200415A был изначально классифицирован как гамма-всплеск типа I (Биссалди и др., 2020), однако область локализации его источника на небесной сфере, полученная с помощью метода триангуляции, содержит в себе близкую галактику Скульптор (NGC 253), что указывает на возможную связь этого события с гигантской вспышкой SGR в этой галактике (Свинкин и др., 2020б). В работе мы проводим детальный спектрально-временной анализ этого события в гамма-диапазоне по данным эксперимента GBM/Fermi с целью определения природы его источника, в том числе используя новый метод классификации гамма-всплесков, основанный на корреляции полной энергии ( $E_{iso}$ ) и спектральной жесткости ( $E_{p,i}$ ) всплесков, впервые предложенный в работе (Минаев, Позаненко, 2020).

## НАБЛЮДЕНИЯ GRB 200415A

Яркий всплеск гамма-излучения GRB 200415A длительностью около 0.2 с и жестким энергетическим спектром, характерными для гамма-всплесков типа I, был зарегистрирован 15 апреля 2020 г. в 08 : 48 : 06.56 UT рядом космических гамма-экспериментов: GBM/Fermi (Биссалди и др., 2020), LAT/Fermi (Омодей и др., 2020а), Kopus-Wind (Фредерикс и др., 2020), SPI-ACS/INTEGRAL (Позаненко и др., 2020б), ASIM (Марисалди и др., 2020), Mars-Odyssey/HEND (Свинкин и др., 2020б), BAT/Swift (Свинкин и др., 2020б).

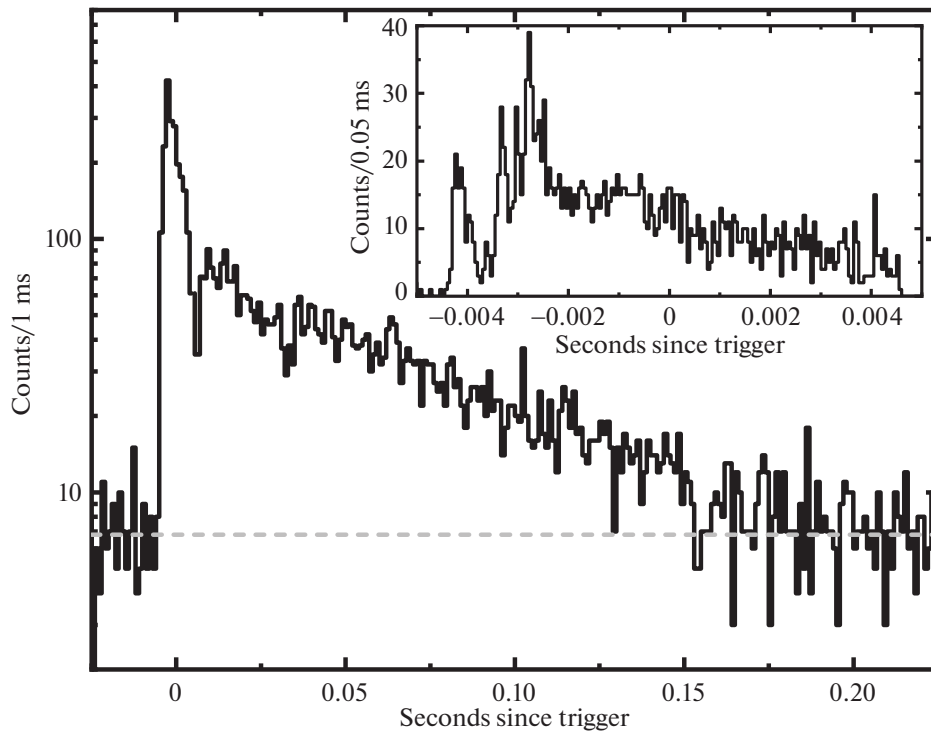
Одновременная регистрация большим количеством экспериментов позволила построить достаточно точную карту локализации источника на небесной сфере с помощью метода триангуляции IPN (Свинкин и др., 2020а,б). С помощью экспериментов GBM и LAT, размещенных на борту обсерватории Fermi, независимо построены карты локализации источника, которые согласуются с картой локализации IPN, но при этом не так точны (Омодей и др., 2020б; Биссалди и др., 2020; Кунцвайлер и др., 2020). Площадь области локализации IPN составляет менее 300 кв. угл. мин с максимальным поперечником 27 угл. мин.

Внутри области локализации находится близкая ( $D_L = 3.5$  Мпк) галактика Скульптор (NGC 253), которая может быть родительской галактикой источника этого всплеска. В этом случае данное событие можно интерпретировать как гигантскую вспышку источника SGR, ориентируясь, в первую очередь, на полную энергетику события, недостаточную для космических гамма-всплесков ( $E_{iso} \sim 10^{46}$  эрг, Биссалди и др., 2020; Свинкин и др., 2020а).

Поиск компонентов излучения этого события в оптическом диапазоне был проведен только группой МАСТЕР спустя сутки после всплеска внутри области локализации IPN, однако достоверных кандидатов обнаружено не было, верхний предел на оптический источник — 18.9 зв. вел. (Липунов и др., 2020а,б).

## АНАЛИЗ ДАННЫХ GBM/FERMI

Источником исходных данных эксперимента GBM/Fermi в работе является общедоступный FTP-архив (<ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/fermi/data/>). В этих данных обнаружен провал во временном интервале 0.0047–0.0063 с относительно триггера, который, вероятно, связан с переполнением телеметрии. В качестве нуля на временной шкале используется момент срабатывания триггера прибора GBM/Fermi: 15 апреля 2020 г., 08 : 48 : 06.56 UT.



**Рис. 1.** Кривая блеска GRB 200415A в энергетическом диапазоне 7–4000 кэВ по данным GBM/Fermi с временным разрешением 1 мс, штриховой линией показан уровень фона. На врезке — кривая блеска основного эпизода с разрешением 50 мкс. По горизонтальной оси — время относительно триггера GBM/Fermi в секундах, по вертикальной — количество отсчетов в бине. Провал в кривой блеска в интервале 0.0047–0.0063 с связан с отсутствием данных.

### Структура кривой блеска

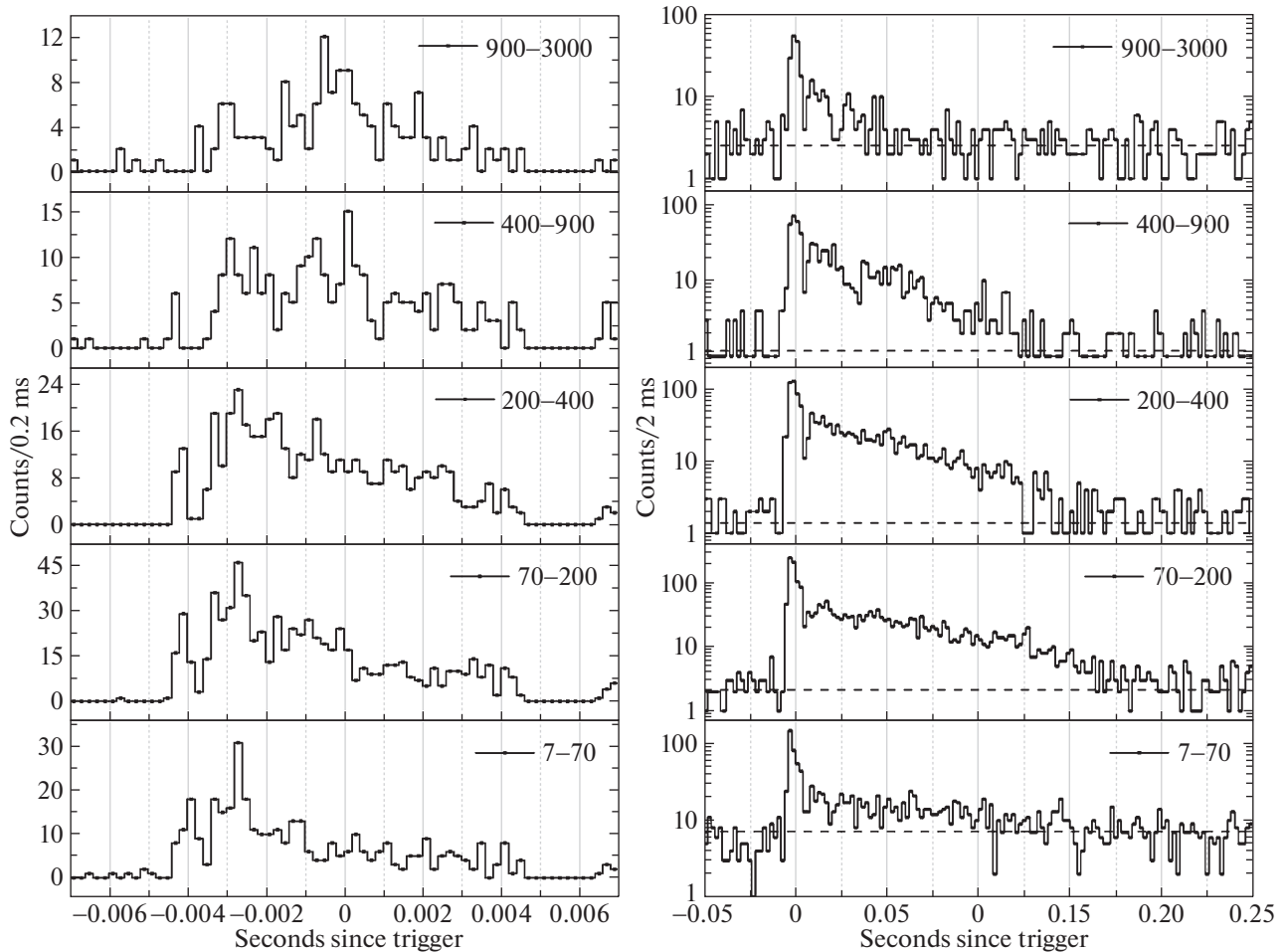
Анализ кривых блеска проведен по подсчетным (TTE) данным наиболее освещенных детекторов NaI\_00–NaI\_03, NaI\_05, BGO\_00 эксперимента GBM/Fermi. Кривая блеска в энергетическом диапазоне 7–4000 кэВ представлена на рис. 1. Она состоит из двух эпизодов излучения — короткого яркого основного эпизода длительностью около 5 мс и значительно более слабого, медленно затухающего хвоста длительностью около 15 мс. Параметр длительности  $T_{90}$  — промежуток времени, за который детектор регистрирует 90% от полного числа отсчетов (см., например, Кошут и др., 1996), для GRB 200415A составляет  $T_{90} = 0.124 \pm 0.005$  с, что характерно как для гамма-всплесков типа I (коротких), так и для основного эпизода гигантских вспышек источников SGR.

Кривая блеска основного эпизода, показанная на врезке рис. 1 с временным разрешением 50 мкс, в свою очередь, имеет сложную форму и состоит из нескольких импульсов излучения. Минимальный масштаб переменности, определенный как минимальный временной интервал, в течение которого энергетический поток от источника меняется более чем на три стандартных отклонения, наблюдается на фазе роста начального импульса основного эпи-

зода (момент времени  $T \sim -0.0045$  с) и составляет  $\sim 50$  мкс.

Подобное поведение кривой блеска основного эпизода является характерным для гамма-всплесков типа I. О наличии/отсутствии тонкой временной структуры кривых блеска подтвержденных гигантских вспышек (GF) магнетаров (SGR) на данный момент известно не так много, поскольку: 1) во время вспышек Галактических источников все космические эксперименты в момент основного эпизода “зашкаливают”; 2) вспышки кандидатов в гигантские вспышки SGR из соседних галактик не обладают достаточной для подобных исследований статистикой отсчетов; 3) имеются ограничения в режимах работы некоторых гамма-экспериментов на коротких временных шкалах (например, для эксперимента Конус-Винд — это 2 мс, для SPI-ACS/INTEGRAL — 50 мс).

Как было отмечено во Введении, события GF SGR также характеризуются длительным (до нескольких сотен секунд) продленным излучением, характеризующимся сильной переменностью, в том числе квазипериодичностью. Относительный вклад продленного излучения в общую энергетику явления варьируется в широких пределах: от 1 до 30% (Мазец и др., 2008). В данных GBM/Fermi для события GRB 200415A мы не обнаружили



**Рис. 2.** Многоканальная кривая блеска GRB 200415A по данным GBM/Fermi. Слева — кривая блеска основного эпизода с временным разрешением 0.2 мс, справа — кривая блеска всего события с временным разрешением 2 мс, штриховой линией показан уровень фона. По горизонтальной оси — время относительно триггера GBM/Fermi в секундах, по вертикальной — количество отсчетов в бине. Границы энергетических каналов указаны на легенде. Отсутствие сигнала в интервале 0.0047–0.0063 с связано с отсутствием данных.

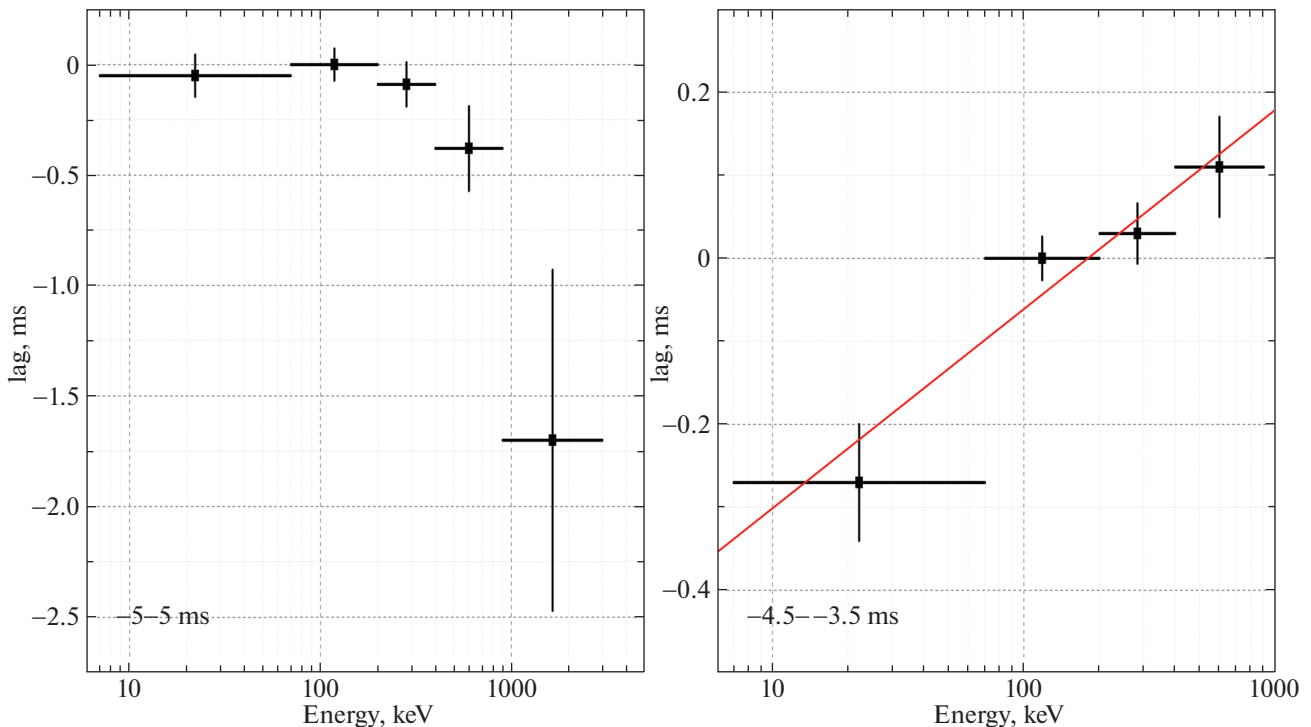
значимого продленного излучения как в широком энергетическом диапазоне 7–4000 кэВ, так и в более узких энергетических каналах. При наиболее консервативной оценке верхнего предела на поток от продленного излучения на шкале 50 с в диапазоне 7–4000 кэВ вклад продленного излучения для GRB 200415A составляет не более 25%. Таким образом, отсутствие детектирования продленного излучения не позволяет отвергнуть гипотезу о связи GRB 200415A с событиями класса GF SGR.

### *Спектральная задержка*

Известно, что космические гамма-всплески характеризуются спектральной эволюцией, которая может проявляться как относительное смещение (задержка) профилей кривых блеска в различных диапазонах энергии. Задержка считается положительной, если жесткое излучение “опережа-

ет” мягкое, и определяется либо с помощью кросс-корреляционного анализа кривых блеска (см., например, Минаев и др., 2014), либо как смещение положения максимума кривой блеска (см., например, Хаккила, Прис, 2011). Именно положительной задержкой характеризуются элементарные структуры (импульсы) кривой блеска гамма-всплесков, в то время как отрицательная задержка, наблюдающаяся в некоторых случаях, может быть следствием эффекта суперпозиции и возникать при анализе всплесков со сложной, многоимпульсной структурой кривой блеска, поскольку отдельные импульсы обладают уникальными свойствами (Минаев и др., 2014).

В данной работе для исследования спектральной задержки мы использовали кросс-корреляционный метод, предложенный и описанный в работе (Минаев и др., 2014). Для этого сформированы кривые блеска в пяти различных



**Рис. 3.** Спектральная эволюция GRB 200415A по данным GBM/Fermi. Слева — для основного эпизода (временной интервал  $-5$ – $5$  мс относительно триггера), справа — для начального импульса основного эпизода (временной интервал  $-4.5$ – $-3.5$  мс относительно триггера), красная прямая — аппроксимация зависимости логарифмической функцией. По горизонтальной оси — энергия в единицах кэВ, по вертикальной — величина спектральной задержки в единицах мс относительно канала 70–200 кэВ.

энергетических каналах: 7–70 кэВ, 70–200 кэВ, 200–400 кэВ, 400–900 кэВ и 900–3000 кэВ. В качестве опорного канала, относительно которого проводилась кросс-корреляция остальных каналов, выбран 70–200 кэВ. На рис. 2 представлены многоканальные кривые блеска основного эпизода с временным разрешением 0.2 мс (слева) и полного события с разрешением 2 мс (справа). Присутствие провала во временном интервале 0.0047–0.0063 с исключает кросс-корреляционный анализ для всего события, но позволяет провести анализ основного эпизода, а также хорошо выделенного начального импульса, находящегося вблизи отметки  $-0.004$  с.

Результаты кросс-корреляционного анализа для основного эпизода представлены на левой части рис. 3. Основной эпизод демонстрирует резкий рост отрицательной задержки, начиная с энергии 400 кэВ: временной профиль в самом жестком диапазоне 900–3000 кэВ запаздывает относительно самого мягкого профиля на  $1.7 \pm 0.7$  мс. Подобное поведение кривой спектральной задержки можно объяснить эффектом суперпозиции. На рис. 2 видно, что основной эпизод состоит из большого числа перекрывающихся импульсов, в энергетическом диапазоне 7–70 кэВ максимум кривой блеска находится вблизи отметки  $-0.003$  с, в то время как

в жестком канале 900–3000 кэВ — вблизи нуля, при этом максимумы соответствуют различным импульсам кривой блеска.

Результаты кросс-корреляционного анализа для начального импульса основного эпизода представлены на правой части рис. 3 и имеют совершенно иной характер — монотонный рост спектральной задержки с ростом энергии, который можно описать логарифмической функцией  $\text{lag} \propto A \log(E)$  с индексом задержки  $A = (2.4 \pm 0.9) \times 10^{-4}$ . За изменением положения этого импульса, находящегося вблизи отметки  $-0.004$  с, можно проследить и на рис. 2. С одной стороны, такое поведение характерно для индивидуальных импульсов кривых блеска гамма-всплесков, как было показано в работе Минаева и др. (2014), что может указывать на связь этого события с космическими гамма-всплесками. С другой стороны, кросс-корреляционный анализ гигантских вспышек магнетаров до сих пор не выполнен по тем же причинам, что и оценка минимального масштаба переменности (переполнение детекторов, см. предыдущий раздел).

#### Спектральный анализ

Для построения и аппроксимации энергетических спектров в данной работе использовался

**Таблица 1.** Результаты спектрального анализа по данным GBM/Fermi с использованием степенной модели с экспоненциальным завалом (CPL)

Интервал <sup>1</sup> , мс	$\alpha$	$E_p$ , кэВ	Поток <sup>2</sup> , $10^{-5}$ эрг см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	$HR_{21}$ <sup>3</sup>	$HR_{32}$ <sup>4</sup>
(-6, 150)	$0.05 \pm 0.05$	$976 \pm 44$	$5.51 \pm 0.22$	$5.8 \pm 0.5$	$1.10 \pm 0.04$
(-6, 0)	$-0.33 \pm 0.06$	$1208^{+117}_{-102}$	$38.9 \pm 2.8$	$3.5 \pm 0.4$	$0.90 \pm 0.06$
(0, 150)	$0.21 \pm 0.07$	$929 \pm 47$	$4.4 \pm 0.2$	$7.2 \pm 0.8$	$1.21 \pm 0.05$
(-6, -4)	$0.4 \pm 0.4$	$430^{+204}_{-70}$	$3.4 \pm 0.8$	$5.5 \pm 2.9$	$0.49 \pm 0.14$
(-4, -2)	$-0.35 \pm 0.09$	$885^{+123}_{-103}$	$42.4 \pm 4.1$	$3.2 \pm 0.5$	$0.73 \pm 0.07$
(-2, -0)	$-0.3 \pm 0.1$	$1800^{+250}_{-210}$	$75.2 \pm 9.0$	$4.0 \pm 0.8$	$1.12 \pm 0.12$
(0, 2)	$0.25 \pm 0.25$	$1690^{+316}_{-212}$	$55.2 \pm 8.0$	$8.9 \pm 4.1$	$1.9 \pm 0.3$
(2, 4)	$0.26 \pm 0.27$	$1003^{+189}_{-142}$	$20.0 \pm 3.5$	$7.9 \pm 3.6$	$1.35 \pm 0.24$
(8, 14)	$0.63^{+0.48}_{-0.38}$	$1138^{+226}_{-147}$	$14.6 \pm 1.9$	$14.1 \pm 7.7$	$2.1 \pm 0.4$
(14, 22)	$1.0 \pm 0.3$	$965^{+100}_{-84}$	$11.3 \pm 1.2$	$24 \pm 15$	$2.3 \pm 0.4$
(22, 36)	$0.3 \pm 0.2$	$877^{+121}_{-101}$	$5.2 \pm 0.6$	$8.0 \pm 2.9$	$1.24 \pm 0.15$
(36, 50)	$0.42 \pm 0.23$	$885^{+109}_{-91}$	$5.8 \pm 0.7$	$9.8 \pm 3.8$	$1.37 \pm 0.17$
(50, 70)	$0.66 \pm 0.32$	$734^{+99}_{-79}$	$3.9 \pm 0.4$	$12.3 \pm 4.7$	$1.31 \pm 0.15$
(70, 100)	$0.49 \pm 0.28$	$480^{+70}_{-54}$	$1.43 \pm 0.16$	$7.6 \pm 2.5$	$0.64 \pm 0.08$
(100, 150)	$0.47 \pm 0.33$	$377^{+70}_{-50}$	$0.57 \pm 0.07$	$6.1 \pm 2.0$	$0.41 \pm 0.08$

<sup>1</sup> Временной интервал относительно триггера GBM/Fermi.

<sup>2</sup> Энергетический поток в диапазоне 1 кэВ–10 МэВ.

<sup>3</sup> Отношение потока фотонов в диапазонах 50–300 кэВ и 15–50 кэВ.

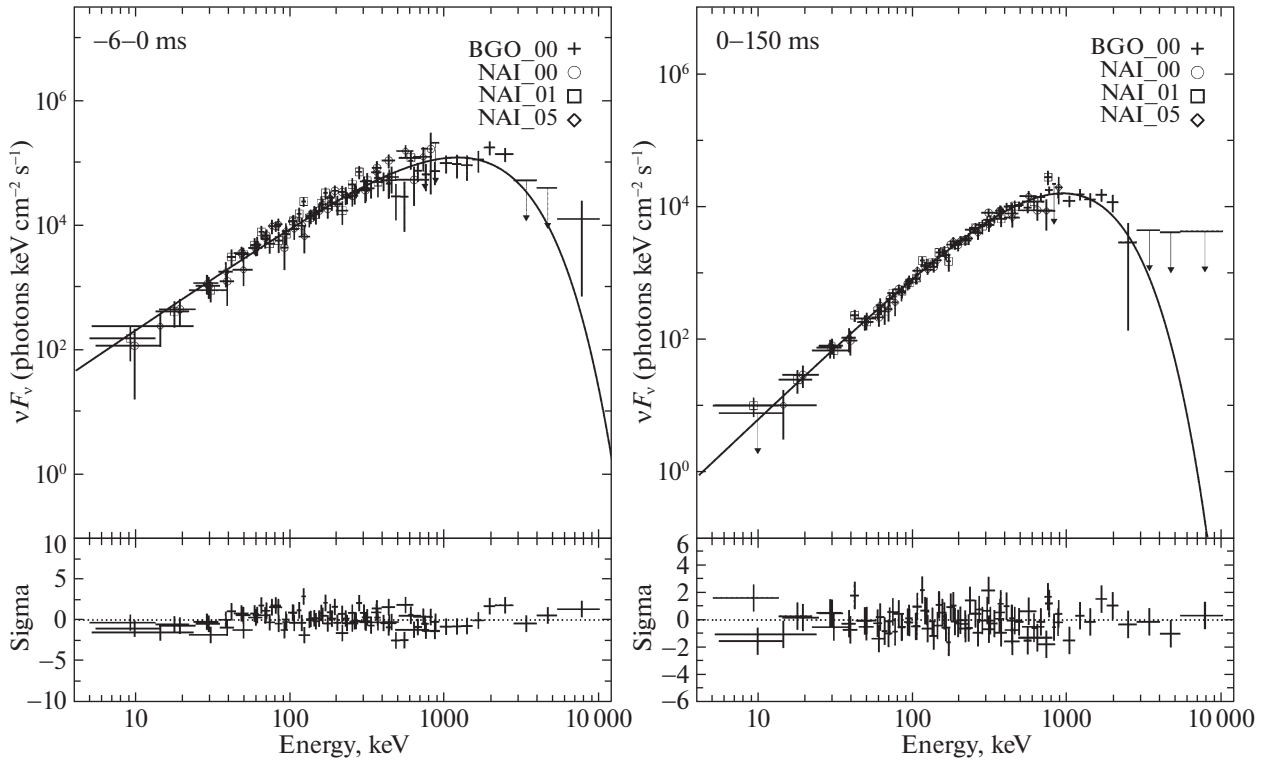
<sup>4</sup> Отношение потока фотонов в диапазонах 300–900 кэВ и 50–300 кэВ.

программный пакет RMfit v4.3.2, специально разработанный для анализа данных GBM обсерватории Fermi (<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/rmfit/>). Методика спектрального анализа аналогична предложенной в работе (Грубер и др., 2014). Энергетические спектры анализировались по данным детекторов NaI\_00, NaI\_01, NaI\_05, BGO\_00 эксперимента GBM/Fermi. Энергетический спектр всех исследованных компонентов GRB 200415A неудовлетворительно описывается как простой степенной моделью (PL), так и тепловой моделью (kT), оптимальная модель — степенная с экспоненциальным завалом (CPL). Результаты спектрального анализа с использованием этой модели представлены в табл. 1.

Энергетический спектр всего события (временной интервал  $-0.006$ – $0.15$  с) имеет фактически экспоненциальную форму ( $F(E) \propto E^\alpha \times \exp\left[-\frac{(\alpha+2)E}{E_p}\right]$ ,  $\alpha \simeq 0$ ) с положением экспоненциального завала  $E_p \simeq 1$  МэВ (табл. 1). Данное значение спектрального индекса крайне нетипично для коротких гамма-всплесков, для которых более характерно значение  $\alpha \simeq -0.7$  (см., например, Берджес и др., 2019). Это дает повод усомниться

в принадлежности данного события к классу коротких гамма-всплесков. Действительно, подобное значение спектрального индекса наблюдалось у гигантских вспышек SGR (см., например, Фредерикс и др., 2007б).

В предположении нахождения источника события в галактике NGC 253 ( $D_L = 3.5$  Мпк), изотропный эквивалент полной энергии, излученной в гамма-диапазоне, составит  $E_{iso} = (1.26 \pm 0.05) \times 10^{46}$  эрг, что почти в 4 раза меньше значения для наиболее тусклого из зарегистрированных на данный момент гамма-всплесков типа I GRB 170817A, и типично для гигантских вспышек SGR. С другой стороны, аномально низкое значение  $E_{iso}$  для GRB 170817A связано с наблюдением под большим углом к оси джета, составляющим, по разным оценкам, около 25 градусов (см., например, Мули и др., 2018; Хаджела и др., 2019). Тогда для GRB 200415A, если он является гамма-всплеском типа I, и предположении одинаковых условий излучения (энерговыведение, угол раствора джета и т.п.) можно оценить нижний предел на угол между наблюдателем и осью джета как  $\sim 25$  градусов. Однако в случае GRB 170817A после основного короткого импульса был зарегистрирован тепловой



**Рис. 4.** Энергетический спектр  $\nu F_\nu$  GRB 200415A по данным GBM/Fermi. Слева — для основного эпизода (временной интервал  $-6-0$  мс относительно триггера), справа — для хвоста (временной интервал  $0-150$  мс относительно триггера). На верхних панелях — энергетический спектр, построенный по данным детекторов NaI\_00, NaI\_01, NaI\_05, BGO\_00 эксперимента GBM/Fermi. Гладкой кривой показана аппроксимация спектра степенной моделью с экспоненциальным завалом (CPL). На нижних панелях — отклонение спектральной модели от экспериментальных данных, выраженное в единицах стандартных отклонений.

эпизод длительностью около 2 с, связанный с прогревом оболочки при выходе джета на поверхность (Позаненко и др., 2018; Готлиб и др., 2018), что не наблюдается в случае GRB 200415A.

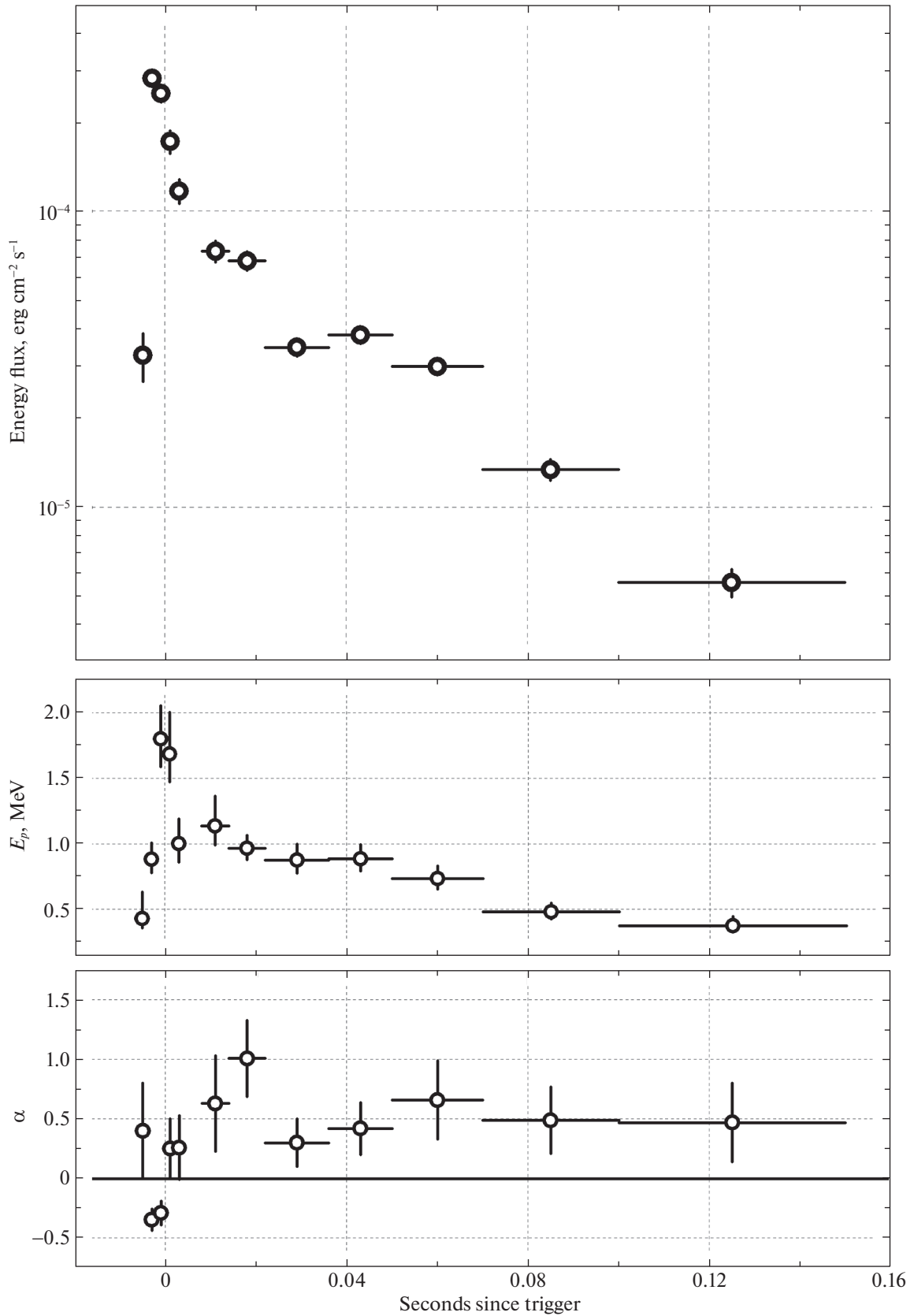
Значение спектральной жесткости, вычисленной как отношение полного потока в диапазоне 50–300 кэВ к потоку в диапазоне 15–50 кэВ, выраженных в фотонах и вычисленных в рамках оптимальной модели энергетического спектра, составляет  $HR_{21} = 5.8 \pm 0.5$  и наряду с полученной ранее длительностью  $T_{90} = 0.124 \pm 0.005$  с характеризует GRB 200415A как одного из самых жестких и коротких всплесков в эксперименте GBM/Fermi (см., например, Бхат и др., 2016), также подтверждая его пекулярность.

Спектральный анализ двух компонентов GRB 200415A, выявленных при анализе кривых блеска, — основного эпизода (временной интервал  $-0.006-0.0$  с) и хвоста (временной интервал  $0.0-0.15$  с), подтверждает их различную природу: хотя положение экспоненциального завала в спектрах отличается незначительно ( $E_p \simeq 1$  МэВ), значения степенных индексов отличаются очень существенно:  $\alpha = -0.33 \pm 0.06$  для основного эпизода и  $\alpha = 0.21 \pm 0.07$  для хвоста (см. табл. 1 и рис. 4).

Кроме того, проведен анализ спектральной эволюции события. Для этого кривая блеска была разбита на 12 бинов с примерно равным отношением сигнал/шум в каждом бине, в которых проведена аппроксимация энергетического спектра тремя моделями (PL, kT, CPL). Оптимальная модель во всех бинах — степенная с завалом (CPL). Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 5. Прослеживается эволюция спектра от мягкого излучения к жесткому внутри основного эпизода излучения, достигая в максимуме значения  $E_p = 1.80^{+0.25}_{-0.21}$  МэВ с показателем степени  $\alpha = -0.3 \pm 0.1$ . Подобное поведение связано, по-видимому, с эффектом суперпозиции: кривая блеска основного эпизода состоит из нескольких импульсов различной спектральной жесткости (см. раздел Спектральная задержка). После прохождения максимума в кривой блеска энергетический спектр начинает эволюционировать от жесткого излучения к мягкому (второй компонент кривой блеска — хвост), что проявляется в сдвиге положения завала в спектре вниз до значения  $E_p \sim 400$  кэВ при почти неизменном значении степенного индекса  $\alpha \sim 0.5$ .

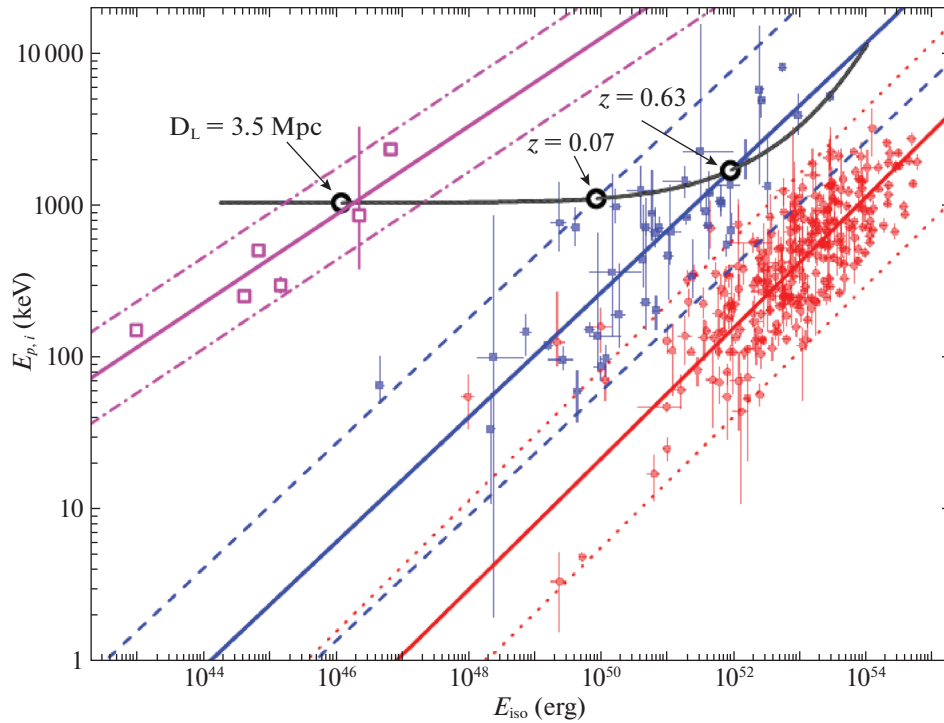
Таким образом, результаты спектрального анализа GRB 200415A подтверждают сложную струк-





**Рис. 5.** Спектральная эволюция GRB 200415A по данным GBM/Fermi в рамках степенной модели с экспоненциальным завалом (CPL). На верхней панели — кривая блеска в единицах  $\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$ , на средней панели — эволюция положения экспоненциального завала в спектре  $E_p$  в единицах МэВ, на нижней панели — эволюция спектрального индекса  $\alpha$ . По горизонтальной оси — время в секундах относительно срабатывания триггера.





**Рис. 6.** Корреляция  $E_{p,i} - E_{iso}$  для гамма-всплесков типа I (синие квадраты), типа II (красные кружки) и гигантских вспышек SGR (розовые незаполненные квадраты) с соответствующими результатами аппроксимации, в том числе  $2\sigma_{cor}$  областями корреляции, показанных соответствующими цветами. Траектория (зависимость от красного смещения) для GRB 200415A показана гладкой черной кривой. Незаполненные черные кружки соответствуют положению всплеска в предположении ассоциации с галактикой NGC 253 ( $D_L = 3.5$  Мпк) и точкам пересечения траектории с верхней границей  $2\sigma_{cor}$  области корреляции ( $z = 0.07$ ) и линией тренда корреляции ( $z = 0.63$ ) для всплесков типа I.

туру этого события и указывают на его связь с событиями класса гигантских вспышек SGR.

### Корреляция $E_{p,i} - E_{iso}$

В работе (Минаев, Позаненко, 2020) было показано, что корреляция между изотропным эквивалентом полной энергии, излученной в гамма-диапазоне,  $E_{iso}$  и положением максимума в энергетическом спектре  $\nu F_\nu$  в системе источника,  $E_p$  (формула (1)), может быть эффективно использована для классификации гамма-всплесков. Этому способствует тот наблюдательный факт, что данная корреляция для различных типов гамма-всплесков описывается степенным законом с единым показателем степени  $a \simeq 0.4$ , при этом область корреляции гамма-всплесков типа I находится выше области корреляции всплесков типа II:

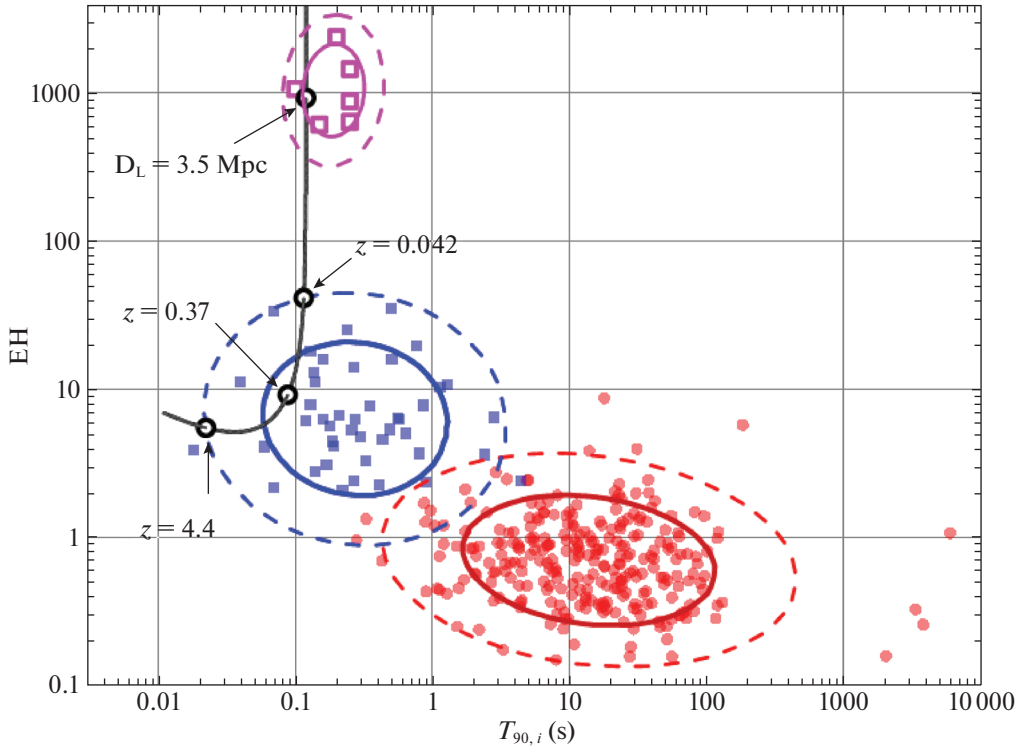
$$\lg\left(\frac{E_{p,i}}{100 \text{ кэВ}}\right) = a \lg\left(\frac{E_{iso}}{10^{51} \text{ эрг}}\right) + b. \quad (1)$$

С одной стороны, параметры  $E_{iso}$  и  $E_{p,i}$  можно вычислить только при известном расстоянии до источника, которое в случае GRB 200415A не было определено (если не считать возможную ассоциацию с галактикой NGC 253). С другой стороны, можно проанализировать положение GRB

200415A на диаграмме  $E_{p,i} - E_{iso}$  в зависимости от красного смещения его источника, т.е. выяснить, пересекает ли траектория области корреляции для обоих типов гамма-всплесков, или пересекает лишь область всплесков типа I. В последнем случае положение точек пересечения траектории с областью корреляции для гамма-всплесков типа I позволит оценить расстояние до источника.

Для решения данной задачи мы использовали выборку из 320 гамма-всплесков с известным красным смещением, а также результаты анализа корреляции  $E_{p,i} - E_{iso}$  для этой выборки, опубликованные в работе (Минаев, Позаненко, 2020). Кроме того, мы включили в анализ шесть известных гигантских вспышек магнетаров по данным из работы (Мазец и др., 2008). Соответствующая диаграмма  $E_{p,i} - E_{iso}$  представлена на рис. 6. Из рис. 6 следует, что гигантские вспышки SGR расположены на диаграмме обособленно — в левом верхнем углу как тусклые, но спектрально жесткие события. Таким образом, корреляцию  $E_{p,i} - E_{iso}$  можно использовать не только для классификации гамма-всплесков, но и для отделения гамма-всплесков типа I от гигантских вспышек источников SGR.

Отдельного внимания заслуживает тот факт, что рассмотренные гигантские вспышки сами подчиняются корреляции  $E_{p,i} - E_{iso}$ : коэффициент корреляции



**Рис. 7.** Диаграмма  $T_{90,i}-EH$  для гамма-всплесков типа I (синие квадраты), типа II (красные кружки) и гигантских вспышек SGR (розовые незаполненные квадраты) с соответствующими результатами кластерного анализа,  $1\sigma_{cor}$  и  $2\sigma_{cor}$  области кластера показаны жирными сплошными и тонкими штриховыми кривыми соответствующих цветов. Траектория (зависимость от красного смещения) для GRB 200415A показана гладкой черной кривой. Незаполненные черные кружки соответствуют положению всплеска в предположении ассоциации с галактикой NGC 253 ( $D_L = 3.5$  Мпк), точкам пересечения — траектории с границами  $2\sigma_{cor}$  области кластера вспышек типа I ( $z = 0.042$  и  $z = 4.4$ ) и ближайшей к центру кластера вспышек типа I точки траектории ( $z = 0.37$ ).

ляции Спирмена и соответствующее ему значение вероятности случайности корреляции составляют  $\rho = 0.94$  и  $P_\rho = 4.8 \times 10^{-3}$ , а при включении в выборку GRB 200415A —  $\rho = 0.93$  и  $P_\rho = 2.5 \times 10^{-3}$ . При аппроксимации корреляции получаем значения параметров  $a = 0.29 \pm 0.05$ ,  $b = 2.4 \pm 0.3$ , т.е. показатель степени для гигантских вспышек SGR в пределах  $2\sigma$  совпадает с показателем для гамма-всплесков, вероятно, указывая на аналогичный механизм излучения. Существование и возможные механизмы возникновения корреляции для гигантских вспышек магнетаров также обсуждаются в работах (Женг и др., 2020; Чанд и др., 2020; Янг и др., 2020). Результаты аппроксимации представлены на рис. 6.

Траектория GRB 200415A, построенная по интегральному спектру события в интервале  $-0.006-0.15$  с, на диаграмме пересекает лишь область гигантских вспышек SGR и гамма-всплесков типа I, исключая связь этого события с гамма-всплесками типа II. Если предположить, что источник всплеска действительно находится в галактике NGC 253, то положение этого события на диаграмме позволяет однозначно классифицировать его как гигантскую вспышку магнетара. С другой стороны, если источник события находится в другой, более далекой

галактике и является гамма-всплеском типа I, то можно оценить нижний предел ( $z = 0.07$ ) и наиболее вероятное значение красного смещения ( $z = 0.634$ ) как точки пересечения траектории с верхней границей  $2\sigma$  области корреляции и аппроксимационной кривой корреляции для вспышек типа I соответственно.

#### Диаграмма $T_{90,i}-EH$

Для решения задачи классификации гамма-всплесков в работе (Минаев, Позаненко, 2020) был предложен еще один метод, использующий помимо особенностей корреляции  $E_{p,i}-E_{iso}$  бимодальность распределения гамма-всплесков по длительности в системе отсчета источника  $T_{90,i}$ . Для этой цели был введен параметр  $EH$  (формула (2)), характеризующий положение гамма-всплеска на диаграмме  $E_{p,i}-E_{iso}$ :

$$EH = \frac{(E_{p,i}/100 \text{ кэВ})}{(E_{iso}/10^{51} \text{ эрг})^{0.4}}. \quad (2)$$

На рис. 7 представлена диаграмма  $T_{90,i}-EH$  для 320 гамма-всплесков из работы (Минаев, Позаненко, 2020) и шесть гигантских вспышек SGR

из работы (Мазец и др., 2008). Гамма-всплески типа I по сравнению с гамма-всплесками типа II обладают большей жесткостью спектра  $E_{p,i}$  при меньшем значении полной энергии  $E_{iso}$  и, как следствие, большим значением параметра  $EH$ , и при этом имеют меньшую длительность  $T_{90,i}$ . Гигантские вспышки SGR имеют ту же длительность, что и гамма-всплески типа I, но гораздо меньшую энергетику при сходной жесткости спектра, что проявляется в крайне высоких значениях параметра  $EH$ . Таким образом, диаграмму  $T_{90,i} - EH$  также можно использовать не только для классификации гамма-всплесков, но и для отделения гигантских вспышек SGR от гамма-всплесков типа I.

Для трех выборок событий (гамма-всплески типа I и II, гигантские вспышки SGR) проведена аппроксимация соответствующих кластеров на диаграмме тремя гауссианами с помощью expectation-maximization (EM) алгоритма — итеративного метода нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей, зависящих от нескольких скрытых переменных. На E-шаге (expectation) вычисляется ожидаемое значение функции правдоподобия, при этом скрытые переменные рассматриваются как наблюдаемые. На M-шаге (maximization) вычисляется оценка максимального правдоподобия, таким образом, увеличивается ожидаемое правдоподобие, вычисляемое на E-шаге. Затем это значение используется для E-шага на следующей итерации. Соответствующие  $1\sigma$  и  $2\sigma$  области изображены на рис. 7.

Траектория GRB 200415A на диаграмме  $T_{90,i} - EH$  в зависимости от красного смещения источника пересекает области гигантских вспышек SGR и гамма-всплесков типа I. В предположении нахождения источника в галактике NGC 253 событие однозначно классифицируется как гигантская вспышка SGR. В противном случае, предполагая, что GRB 200415A представляет собой гамма-всплеск типа I, можно оценить нижний ( $z = 0.042$ ) и верхний ( $z = 4.4$ ) пределы на красное смещение как точки пересечения его траектории с  $2\sigma$  областью кластера гамма-всплесков типа I, а также наиболее вероятное значение ( $z = 0.37$ ) в ближайшей к центру кластера точке траектории.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена выяснению природы источника всплеска гамма-излучения GRB 200415A. Для выполнения этой задачи проведен анализ этого события в гамма-диапазоне по данным эксперимента GBM/Fermi.

Анализ кривой блеска выявил наличие двух компонентов излучения: яркого и короткого основного эпизода длительностью около 5 мс и более

тусклого и длительного хвоста длительностью около 15 мс. Основной эпизод также имеет сложную форму и состоит из нескольких импульсов. Подобное поведение кривой блеска является характерным для гамма-всплесков типа I, при этом тонкая структура кривых блеска известных гигантских вспышек достаточно слабо изучена. Длительное (сотни секунд) продленное излучение, характерное для гигантских вспышек магнетаров, для GRB 200415A не обнаружено. Однако полученный верхний предел на относительный поток от продленного излучения не исключает ассоциации всплеска с гигантской вспышкой магнетара. Таким образом, особенности кривой блеска не позволяют сделать однозначный вывод о природе GRB 200415A.

С помощью кросс-корреляционного анализа исследована спектральная эволюция основного эпизода GRB200415A и его хорошо изолированного начального импульса. Показано, что зависимость спектральной задержки от энергии для начального импульса подчиняется логарифмическому закону с положительным индексом задержки (жесткое излучение регистрируется раньше мягкого). В то же время данная зависимость для комплекса импульсов основного эпизода имеет более сложный вид, что может объясняться эффектом суперпозиции (нагромождения импульсов). Явленные особенности спектральной эволюции являются типичными для гамма-всплесков, однако, как и в случае с тонкой структурой кривой блеска, для гигантских вспышек магнетаров они слабо изучены, что также не позволяет сделать однозначный вывод о природе GRB 200415A.

Спектральный анализ, проведенный как для временного интервала, охватывающего весь всплеск, так и для отдельных его компонентов, продемонстрировал особенности, не характерные для гамма-всплесков. Хотя энергетические спектры всех исследованных компонентов хорошо описываются степенной моделью с экспоненциальным завалом (CPL), показатель степени имеет пекулярное, близкое к нулю значение для интегрального спектра, и положительное ( $\alpha = 0.21 \pm 0.07$ ) — для второго компонента излучения. При этом некоторые известные гигантские вспышки магнетаров обладали похожими особенностями. Таким образом, результаты спектрального анализа действительно указывают на связь GRB 200415A с гигантскими вспышками SGR.

Также, если бы GRB 200415A был коротким гамма-всплеском (Тип I) в галактике NGC 253, то можно было бы ожидать регистрации тепловой компоненты, аналогично регистрации ее в случае GRB 170817A, где источник был расположен на расстоянии 40 Мпк. Это является еще одним свидетельством в пользу классификации GRB

200415A как гигантской вспышки от SGR (при условии его ассоциации с галактикой NGC 253).

Исследовано положение GRB 200415A на диаграммах  $E_{p,i}-E_{iso}$  и  $T_{90,i}-EH$ , и показано, что если источник всплеска действительно находится в галактике NGC 253, на которую указывает IPN-локализация источника на небесной сфере, то он однозначно классифицируется как гигантская вспышка SGR, обладая типичными для гамма-всплесков типа I длительностью ( $T_{90,i} = 0.12$  с) и положением максимума спектра ( $E_{p,i} \sim 1$  МэВ), но при этом очень низкой полной энергией, излученной в гамма-диапазоне ( $E_{iso} \sim 10^{46}$  эрг).

Таким образом, мы классифицируем этот всплеск как гигантскую вспышку магнетара из галактики NGC 253. На возможность наблюдения такой вспышки из галактики NGC 253 ранее указывалось в работе Попова и Штерна (2006).

Известные гигантские вспышки SGR образуют хорошо выделяемую группу на диаграммах  $E_{p,i}-E_{iso}$  и  $T_{90,i}-EH$ , аналогично группам длинных и коротких гамма-всплесков. Это позволяет не только классифицировать источники гамма-всплесков и выделять события класса гигантских вспышек SGR, но и предположить одинаковый механизм излучения гигантских вспышек от SGR и космических гамма-всплесков.

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за полезные замечания и предложения, способствующие улучшению статьи. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00522.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барков, Позаненко (M.V. Barkov and A.S. Pozanenko), MNRAS **417**, 2161 (2011).
2. Берджес и др. (J.M. Burgess, J. Greiner, D. Begue, and F. Berlato), MNRAS **490**, 927 (2019).
3. Биссалди и др. (E. Bissaldi, M. Briggs, E. Burns, O.J. Roberts, and P. Veres), GRB Coordinates Network Rep. **27587**, 1 (2020).
4. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, I.D. Novikov, T.V. Perevodchikova, and A.G. Polnarev), Sov. Astron. Lett. **10**, 177 (1984).
5. Бхат и др. (P.N. Bhat, C.A. Meegan, A. von Kienlin, W.S. Paciesas, M.S. Briggs, J.M. Burgess, E. Burns, V. Chaplin, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **223**, 28 (2016).
6. Вольнова и др. (A.A. Volnova, M.V. Pruzhinskaya, A.S. Pozanenko, S.I. Blinnikov, P.Yu. Minaev, O.A. Burkhonov, A.M. Chernenko, Sh.A. Ehgamberdiev, et al.), MNRAS **467**, 3500 (2017).
7. Вусли (S.E. Woosley), Astrophys. J. **405**, 273 (1993).
8. Галама и др. (T.J. Galama, P.M. Vreeswijk, J. van Paradijs, C. Kouveliotou, T. Augusteijn, O.R. Hainaut, F. Patat, H. Boehnhardt, et al.), Nature **395**, 670 (1998).
9. Герелс и др. (N. Gehrels, J.P. Norris, S.D. Barthelmy, J. Granot, Y. Kaneko, C. Kouveliotou, C.B. Markwardt, P. Meszaros, et al.), Nature **444**, 1044 (2006).
10. Готлиб и др. (O. Gottlieb, E. Nakar, T. Piran, and K. Hotokezaka), MNRAS **479**, 588 (2018).
11. Грубер и др. (D. Gruber, A. Goldstein, V. Weller von Ahlefeld, N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, D. Byrne, W.H. Cleveland, et al.), The Astrophysical Journal Supplement Series **211**, 12 (2014).
12. Дункан, Томпсон (R.C. Duncan and C. Thompson), Astrophys. J. Lett. **392**, L9LL13 (1992).
13. Жэнг и др. (H.M. Zhang, R.Y. Liu, S.Q. Zhong, and X.Y. Wang), arXiv:2008.05097 (2020).
14. Израел и др. (G.L. Israel, T. Belloni, L. Stella, Y. Rephaeli, D.E. Gruber, P. Casella, S. Dall'Osso, N. Rea, M. Persic, and R.E. Rothschild), Astrophys. J. Lett. **628**, L53–L56 (2005).
15. Кано и др. (Z. Cano, S.-Q. Wang, Z.-G. Dai, and X.-F. Wu), Adv. Astron., ID 8929054 (2017).
16. Коннатон (V. Connaughton), Astrophys. J. **567**, 1028 (2002).
17. Кошут и др. (T. Koshut, W. Paciesas, C. Kouveliotou, J. van Paradijs, G.N. Pendleton, G.J. Fishman, and C.A. Meegan), Astrophys. J. **463**, 570 (1996).
18. Крайдер (A. Crider), AIP Conf. Proceed. **836**, 64 (2006).
19. Кувелиоту и др. (C. Kouveliotou, C.A. Meegan, G.J. Fishman, N.P. Bhat, M.S. Briggs, T.M. Koshut, W.S. Paciesas, and G.N. Pendleton), Astrophys. J. **413**, L101 (1993).
20. Кувелиоту и др. (C. Kouveliotou, T. Strohmayer, K. Hurley, J. van Paradijs, M.H. Finger, S. Dieters, P. Woods, C. Thompson, and R.C. Duncan), Astrophys. J. **510**, L115–L118 (1999).
21. Кунцвайлер и др. (F. Kunzweiler, B. Biltzinger, F. Berlato, J. Burgess, and J. Greiner), GRB Coordinates Network Rep. **27580**, 1 (2020).
22. Липунов и др. (V. Lipunov, E. Gorbovskey, V. Kornilov, N. Tyurina, P. Balanutsa, A. Kuznetsov, F. Balakin, V. Vladimirov, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **27590**, 1 (2020a).
23. Липунов и др. (V. Lipunov, N. Tyurina, E. Gorbovskey, V. Kornilov, P. Balanutsa, A. Kuznetsov, F. Balakin, V. Vladimirov, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **27599**, 1 (2020b).
24. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golenskii, V.N. Ilinskii, R.L. Aptekar, and Iu.A. Guryan), Nature **282**, 587 (1979).
25. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golenetskii, V.N. Ilinskii, V.N. Panov, R.L. Aptekar, I.A. Gurian, M.P. Proskura, I.A. Sokolov, Z.I. Sokolova, and I.V. Kharitonova), Astrophys. Space Sci. **80**, 3 (1981).
26. Мазец и др. (E.P. Mazets, R.L. Aptekar, T.L. Cline, D.D. Frederiks, J.O. Goldsten, S.V. Golenetskii, K. Hurley, A. von Kienlin, and V.D. Pal'shin), Astrophys. J. **680**, 545 (2008).
27. Марисалди и др. (M. Marisaldi, A. Mezentsev, N. Ostgaard, V. Reglero, and T. Neubert), GRB Coordinates Network Rep. **27622**, 1 (2020).

28. Metzger и др. (B.D. Metzger, E. Quataert, and T.A. Thompson), *MNRAS* **385**, 1455 (2008).
29. Межарос, Рис (P. Meszaros and M.J. Rees), *Astrophys. J.* **397**, 570 (1992).
30. Межарос (P. Meszaros), *Rep. Progress Phys.* **69**, 2259 (2006).
31. Минаев П., Позаненко А., Лозников В., Письма в Астроном. журн. **36**, 744 (2010a) [P. Minaev, A. Pozanenko, and V. Loznikov, *Astron. Lett.* **36**, 707 (2010a)].
32. Минаев и др. (P. Minaev, A. Pozanenko, and V. Loznikov), *Astrophys. Bull.* **65**, 343 (2010b).
33. Минаев и др. (P.Yu. Minaev, S.A. Grebenev, A.S. Pozanenko, S.V. Molkov, D.D. Frederiks, and S.V. Golenetskii), *Astron. Lett.* **38**, 613 (2012).
34. Минаев и др., (P.Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, S.V. Molkov, and S.A. Grebenev), *Astron. Lett.* **40**, 235 (2014).
35. Минаев, Позаненко (P. Minaev and A. Pozanenko), *Astron. Lett.* **43**, 1 (2017).
36. Минаев, Позаненко (P. Minaev and A. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2020).
37. Мули и др., (K.P. Mooley, A.I. Deller, O. Gottlieb, E. Nakar, G. Hallinan, S. Bourke, D.A. Frail, A. Horesh, A. Corsi, and K. Hotokezaka), *Nature* **561**, 355 (2018).
38. Норрис и др. (J.P. Norris, J.T. Bonnell, D. Kazanas, J.D. Scargle, J. Hakkila, and T.W. Giblin), *Astrophys. J.* **627**, 324 (2005).
39. Норрис и др. (J.P. Norris, N. Gehrels, and J.D. Scargle), *Astrophys. J.* **717**, 411 (2010).
40. Омодей и др. (N. Omodei, M. Axelsson, F. Piron, F. Longo, D. Kocevski, E. Bissaldi and A. Berretta), *GRB Coordinates Network Rep.* **27586**, 1 (2020a).
41. Омодей и др. (N. Omodei, F. Piron, M. Axelsson, F. Longo, D. Kocevski, E. Bissaldi, and A. Berretta), *GRB Coordinates Network Rep.* **27597**, 1 (2020b).
42. Пачинский (B. Paczynski), *Astrophys. J.* **308**, L43 (1986).
43. Пачинский (B. Paczynski), *Astrophys. J. Lett.* **494**, L45 (1998).
44. Позаненко и др. (A. Pozanenko, V. Loznikov, and R. Preece), *Proceedings of the XLth Rencontres de Moriond* (Ed. J. Dumarchez, d Jean Tran Thanh, 253, 2005).
45. Позаненко и др., (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Y. Minaev, A.A. Volnova, E.D. Mazaeva, A.S. Moskvitin, M.A. Krugov, V.A. Samodurov, V.M. Loznikov, and M. Lyutikov), *Astrophys. J.* **852**, L30 (2018).
46. Позаненко и др. (A. Pozanenko, P. Minaev, S. Grebenev, and I. Chelovekov), *Astron. Lett.* **45**, 710 (2020a).
47. Позаненко и др. (A. Pozanenko, P. Minaev, I. Chelovekov, and S. Grebenev), *GRB Coordinates Network Rep.* **27627**, 1 (2020b).
48. Попов, Штерн (S.B. Popov and B.E. Stern), *MNRAS* **365**, 885 (2006).
49. Россвог (S. Rosswog), *MNRAS* **376**, L48 (2007).
50. Свинкин и др. (D. Svinkin, K. Hurley, D. Frederiks, I.G. Mitrofanov, D.V. Golovin, A.S. Kozyrev, M.L. Litvak, A.B. Sanin, et al.), *GRB Coordinates Network Rep.* **27585**, 1 (2020a).
51. Свинкин и др. (D. Svinkin, S. Golenetskii, R. Aptekar, D. Frederiks, A. Ridnaia, T. Cline, K. Hurley, I.G. Mitrofanov, et al.), *GRB Coordinates Network Rep.* **27595**, 1 (2020b).
52. Томпсон, Дункан (C. Thompson and R.C. Duncan), *MNRAS* **275**, 255 (1995).
53. Томпсон, Дункан (C. Thompson and R.C. Duncan), *Astrophys. J.* **561**, 980 (2001).
54. Ферочи и др. (M. Feroci, F. Frontera, E. Costa, L. Amati, M. Tavani, M. Rapisarda, and M. Orlandini), *Astrophys. J. Lett.* **515**, L9–L12 (1999).
55. Фредерикс и др. (D.D. Frederiks, S.V. Golenetskii, V.D. Palshin, R.L. Aptekar, V.N. Ilyinskii, F.P. Oleinik, E.P. Mazets, and T.L. Cline), *Astron. Lett.* **33**, 1 (2007a).
56. Фредерикс и др. (D.D. Frederiks, V.D. Palshin, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, T.L. Cline, and E.P. Mazets), *Astron. Lett.* **33**, 19 (2007b).
57. Фредерикс и др. (D. Frederiks, S. Golenetskii, R. Aptekar, A. Lysenko, A. Ridnaia, D. Svinkin, A. Tsvetkova, M. Ulanov, and T. Cline), *GRB Coordinates Network Rep.* **27596**, 1 (2020).
58. Хаджела и др. (A. Hajela, R. Margutti, K.D. Alexander, A. Kathirgamaraju, A. Baldeschi, C. Guidorzi, D. Giannios, W. Fong, et al.), *Astrophys. J.* **886**, L17 (2019).
59. Хаккила, Прис (J. Hakkila and R. Preece), *Astrophys. J.* **740**, id. 104 (2011).
60. Чанд и др. (V. Chand, J.C. Joshi, R. Gupta, Y.H. Yang, Dimple, V. Sharma, J. Yang, M. Chakraborty, J.H. Zou, et al.), *arXiv:2008.10822* (2020).
61. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L12 (2017a).
62. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L13 (2017b).
63. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, S. Abraham, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, R.X. Adhikari, et al.), *Astrophys. J.* **1892**, L3 (2020).
64. Янг и др. (J. Yang, V. Chand, B.B. Zhang, Y.H. Yang, J.H. Zou, Y.S. Yang, X.H. Zhao, L. Shao, S.L. Xiong, et al.), *Astrophys. J.* **899**, 106 (2020).