

GRB 231115A – ГИГАНТСКАЯ ВСПЫШКА МАГНИТАРА В ГАЛАКТИКЕ M82

© 2024 г. П. Ю. Минаев^{1, 2 *}, А. С. Позаненко^{1, 3}, С. А. Гребенев¹, И. В. Человеков¹,
Н. С. Панков^{1, 3}, А. А. Хабибуллин³, Р. Я. Инасаридзе⁴, А. О. Новичонок⁵

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³НИУ “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

⁴Грузинская национальная астрофизическая обсерватория им. Евгения Харадзе, Абастумани, Грузия

⁵Петрозаводский государственный ун-т, Петрозаводск, Россия

Поступила в редакцию 18.11.2023 г.

После доработки 20.11.2023 г.; принята к публикации 21.11.2023 г.

Представлены результаты исследования короткого гамма-всплеска GRB 231115A в рентгеновском и гамма-диапазонах по данным космических обсерваторий INTEGRAL и *Fermi*. Источник всплеска локализован телескопом IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL с точностью $\leq 1'5$, он находится в галактике Сигара (M 82). Проведены оперативные наблюдения области всплеска в оптическом диапазоне на 36-см телескопе в Китае Международной сети телескопов ИПМ им. М. В. Келдыша РАН и на 70-см телескопе AS-32 Абастуманской астрофизической обсерватории. Оптическое излучение обнаружить не удалось. Близость родительской галактики ($D_L \simeq 3.5$ Мпк) существенно ограничивает энергетику события ($E_{iso} \sim 10^{45}$ эрг) и позволяет интерпретировать его как гигантскую вспышку ранее неизвестного источника повторных мягких гамма-всплесков (Soft Gamma Repeater или SGR) – экстремального проявления активности нейтронной звезды со сверхсильным магнитным полем (магнитар). Данный вывод подтверждает нетипично жесткий для космологических гамма-всплесков энергетический спектр, а также отсутствие оптического послесвечения и гравитационно-волнового сигнала, который должен был бы быть зарегистрирован антеннами LIGO/Virgo/KAGRA, если бы всплеск был вызван слиянием нейтронных звезд. Положение всплеска на диаграммах $E_{p,i} - E_{iso}$ и $T_{90,i} - E_H$ также свидетельствует о том, что GRB 231115A был гигантской вспышкой магнитар. Отметим, что это первая хорошо локализованная гигантская вспышка внегалактического SGR.

Ключевые слова: вспышки гамма-излучения, космические гамма-всплески, слияния нейтронных звезд, источники повторных мягких гамма-всплесков, магнитары.

DOI: 10.31857/S0320010824010012, **EDN:** ORDQKU

ВВЕДЕНИЕ

Существование двух разных типов космических гамма-всплесков (GRBs) было впервые обнаружено в эксперименте КОНУС (Мазец и др., 1981) и в дальнейшем подтверждено наблюдениями прибора CGRO/BATSE (Кувелиоту и др., 1993) при анализе распределения всплесков по параметру длительности T_{90} . Короткие всплески (длительностью менее 2 с) характеризуются более жестким спектром (с большей долей высокоэнергичного излучения) и менее выраженной спектральной эволюцией (задержкой низкоэнергичного излучения относительно высокоэнергичного) по сравнению со длинными всплесками ($T_{90} \gtrsim 2$ с, например, Кувелиоту и др., 1993; Норрис и др., 2005; Минаев и др., 2010а, 2012, 2014). При этом распределения

этих двух типов по длительности и спектральной жесткости, традиционно используемые для классификации всплесков, значительно перекрываются, оставляя актуальной вплоть до настоящего времени проблему классификации всплесков в области пересечения распределений (см., например, Дезалай и др., 1997; Минаев и др., 2010б; Минаев, Позаненко, 2017; Тарнопольский, 2019).

Считается, что короткие гамма-всплески (позднее обозначенные как всплески типа I) связаны со слиянием двух нейтронных звезд (Блинников и др., 1984; Пачинский, 1986; Межарос, Рис, 1992), что недавно было подтверждено регистрацией событий GRB/GW 170817 и GRB/GW 190425 гравитационно-волновыми детекторами LIGO/Virgo (Эбботт и др., 2017а, б; Позаненко и др., 2018, 2019). Некоторые всплески типа I сопровождаются дополнительной компонентой излучения

* Электронный адрес: minaevp@mail.ru

с длительностью в десятки секунд и более мягким (по сравнению с основным эпизодом излучения) спектром — продленным излучением, природа которого до сих пор не выяснена (Коннатон, 2002; Джерелс и др., 2006; Россвог, 2007; Метцгер и др., 2008; Минаев и др., 2010а; Норрис и др., 2010; Барков, Позаненко, 2011).

Длинные гамма-всплески (типа II) считаются связанными с коллапсом ядра массивной звезды (Вусли, 1993; Пачинский, 1998; Межарос, 2006), некоторые из них, наиболее близкие к наблюдателю, сопровождаются вспышками сверхновых типа Ic (см., например, Галама и др., 1998; Пачинский, 1998; Кано и др., 2017; Вольнова и др., 2017; Белкин и др., 2020, 2024).

Существуют аномалии в соотношении длительности гамма-всплесков и их типа, когда короткие гамма-всплески сопровождались вспышками сверхновых (например, GRB 200826A, Росси и др., 2022), или, наоборот, объективно длинный GRB 230307A был ассоциирован с килоновой (Леван и др., 2023). Таким образом, корректная классификация гамма-всплесков, наряду с определением красного смещения их родительских галактик, имеет важное значение для исследования их источников.

Короткие вспышки жесткого гамма-излучения характерны также для некоторых источников повторных мягких гамма-всплесков (SGR, Голенецкий и др., 1979; Мазец и др., 1979а) во время их экстремальной активности (так называемые гигантские вспышки, например, Мазец и др., 1979б, 2008; Томпсон, Дункан, 2001; Фредерикс и др., 2007). Кривая блеска гигантской вспышки состоит из короткого (доли секунды), жесткого и очень яркого основного эпизода, за которым может следовать длительное (сотни секунд) и значительно более слабое продленное излучение, характеризующееся периодичностью, связанной с вращением нейтронной звезды, в магнитосфере которой произошла гигантская вспышка. Все подтвержденные длительными наблюдениями источники мягких повторных гамма-всплесков находятся в Галактике, до сих пор гигантские вспышки были зарегистрированы от четырех из них. Однако основной короткий эпизод гигантской вспышки может быть зарегистрирован и из ближайших к нам галактик. Например, гигантская вспышка от SGR 1806–20 могла бы быть зарегистрирована на расстоянии 30–50 Мпк (Орли и др., 2005; Накар и др., 2005). Несколько кандидатов в гигантские вспышки SGR, возможно, произошедших в близких галактиках, были предложены на основе результатов триангуляции IPN (см., например, Фредерикс и др., 2007; Мазец и др., 2008).

Наблюдаемые свойства гигантских вспышек (временной профиль, жесткость и спектральная

эволюция излучения) и их частота (до сих пор не было зарегистрировано повторных гигантских вспышек ни от одного известного SGR) во многом аналогичны свойствам космических гамма-всплесков типа I. Это вносит определенную сложность при классификации транзиентных гамма-событий (Мазец и др., 2008; Минаев, Позаненко, 2020б). Самым надежным методом выявления источников SGR является обнаружение периодичностей в хвосте их кривых блеска. Периодичность была найдена для многих галактических SGR, например: SGR 0520–66 (Мазец и др., 1979б), SGR 1806–20 (Мазец и др., 2005; Палмер и др., 2005), SGR 1900+14 (Мазец и др., 1999; Ферочи и др., 1999). Были найдены пульсации после нескольких коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте BATSE/CGRO, например, GRB 930905 (Позаненко и др., 2005) и GRB 970110 (Крайдер, 2006), и эти гамма-всплески также могут рассматриваться как кандидаты в гигантские вспышки неотожествленных SGR. Источники мягких повторных гамма-всплесков, наиболее вероятно, связаны с магнитарами — одиночными нейтронными звездами со сверхсильными магнитными полями ($B \geq 10^{14}$ Гс). Невероятная мощность и физическая причина их гигантских вспышек остаются невыясненными (Дункан, Томпсон, 1992; Томпсон, Дункан, 1995; Кувелиоту и др., 1999).

Локализация короткого гамма-всплеска GRB 231115A с точностью лучше 2', выполненная в рамках оперативного (Quick Look) анализа телеметрических данных гамма-телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL, надежно связывает его с близкой галактикой Сигара (M82) с активным звездообразованием (Бернс, 2023), что позволяет предположить это событие вызванным не слиянием пары нейтронных звезд, а гигантской вспышкой ранее неизвестного источника мягких повторных гамма-всплесков, находящегося в этой галактике (см., например, Д'Авансо и др., 2023а; Минаев, Позаненко, 2023б).

В работе представлены результаты наблюдений и анализа GRB 231115A в гамма-диапазоне по данным обсерваторий INTEGRAL и *Fermi* и собственных ранних оптических наблюдений области локализации с целью выяснения природы источника всплеска, в том числе с использованием классификации, основанной на корреляции параметров полной энергии E_{iso} , спектральной жесткости $E_{p,i}$ (Амати и др., 2002) и длительности гамма-всплесков в системе источника $T_{90,i}$, предложенной Минаевым, Позаненко (2020а, б).

РЕГИСТРАЦИЯ GRB 231115A И РАННИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Всплеск GRB 231115A длительностью около 0.1 с и жестким спектром излучения, что характерно как

для гамма-всплесков типа I (коротких), так и для гигантских вспышек магнитаров (SGRs), был зарегистрирован 15 ноября 2023 г. в 15^h36^m21^s.20 UT космическими гамма-детекторами: *Fermi*/GBM (Далесси и др., 2023), *INTEGRAL*/IBIS/ISGRI (Мерегетти и др., 2023), *KONUS-Wind* (Фредерикс и др., 2023), *Glowbug* (Чеунг и др., 2023), *Insight-HXMT/HE* (Ксю и др., 2023), *Swift/BAT* (Рончини и др., 2023).

Всплеск был зарегистрирован в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI, благодаря этому его положение было определено с точностью лучше 2', что позволило установить родительскую галактику – M82 (Д'Авансо и др., 2023а; Бернс, 2023; Мерегетти и др., 2023). Высокая точность локализации инициировала поиск возможного излучения в других диапазонах энергии. Попытки наблюдения оптического послесвечения, предпринятые множеством научных групп на разных телескопах, не увенчались успехом (Липунов и др., 2023а, б; Балануца и др., 2023; Искандар и др., 2023; Чен и др., 2023; Жианг и др., 2023; Хаяцу и др., 2023; Перли и др., 2023; Д'Авансо и др., 2023; Турпин и др., 2023; Ан и др., 2023; Ху и др., 2023). Оптический кандидат, обнаруженный на 0.7-м телескопе GROWTH-India (Кумар и др., 2023а), после более глубокого анализа оказался артефактом (Кумар и др., 2023б).

Рентгеновские телескопы *Swift*/XRT и *NuSTAR* не обнаружили следов рентгеновского послесвечения спустя соответственно 2.5 и 4 часа после триггера (Осборн и др., 2023; Грегенстетте, Брайтман, 2023). В эксперименте *MAGIC* получен верхний предел на поток гамма-излучения в диапазоне выше 250 ГэВ спустя 8 часов после вспышки (Коллаборация *MAGIC*, 2023). Радиотелескоп *CHIME*/FRB также не смог обнаружить от источника какой-либо активности, например, вспышки, похожей на быстрый радиовсплеск (FRB) в диапазоне 400–800 МГц (Картин, 2023).

Наконец, гравитационно-волновые детекторы *LIGO*/*Virgo*/*KAGRA* не зарегистрировали сигнал, который должен был бы сопровождать слияние двух нейтронных звезд, если бы зарегистрированный всплеск действительно относился к коротким гамма-всплескам, вызванным такими слияниями (Коллаборация *LIGO* и др., 2023). Не обнаружен и нейтринный сигнал в эксперименте *IceCube* (Коллаборация *IceCube*, 2023).

АНАЛИЗ ДАННЫХ ОБСЕРВАТОРИИ INTEGRAL

Международная астрофизическая лаборатория гамма-лучей *INTEGRAL* (Винклер и др., 2003; Куулкерс и др., 2021) работает на высокоапогейной орбите уже 22-й год. На борту находятся несколько широкоугольных телескопов с кодирующей апертурой, способных строить изображение

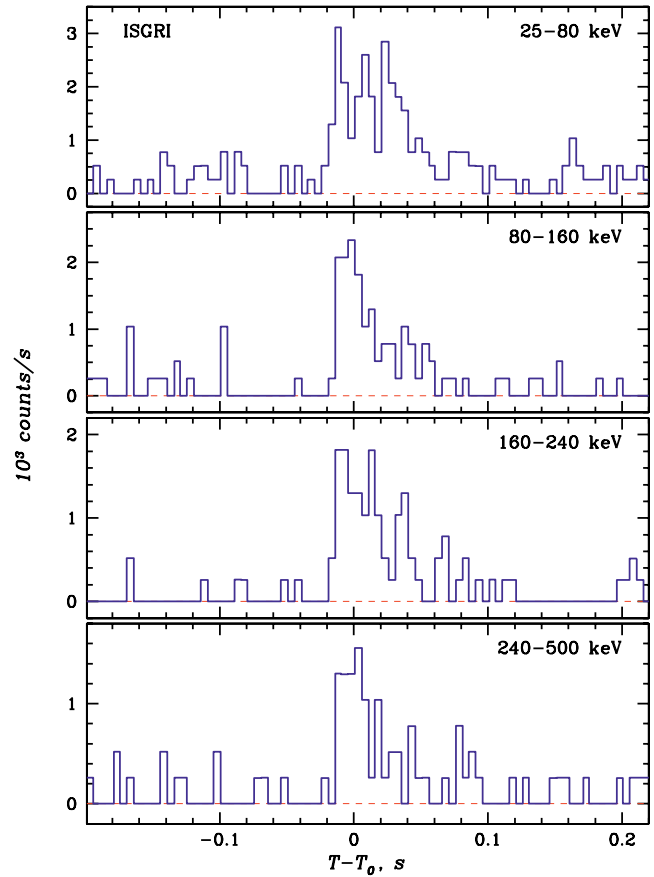


Рис. 1. Временной профиль вспышки GRB 231115A по данным телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL в четырех диапазонах энергий с разрешением 5 мс.

неба и проводить полноценный анализ энергетических спектров и переменности излучения разнообразных космических источников: гамма-телескоп IBIS с двумя детекторами: ISGRI (Лебран и др., 2003), чувствительным в диапазоне 20–400 кэВ, и PICsIT (Лабанти и др., 2003), чувствительным в диапазоне 200 кэВ – 10 МэВ, гамма-спектрометр SPI (Ведренн и др., 2003) с охлаждаемыми германиевыми детекторами, чувствительный в диапазоне 20 кэВ – 8 МэВ, и два рентгеновских телескопа JEM-X (Лунд и др., 2003), чувствительных в диапазоне 4–30 кэВ. Отметим также антисовпадательную защиту ACS гамма-спектрометра SPI (Пау и др., 2005), работающую как всенаправленный детектор большой площади в диапазоне 85 кэВ – 10 МэВ и записывающую темп счета фотонов с временным разрешением 50 мс.

Всплеск был зарегистрирован во время плановых наблюдений поля галактики M 81, проводимых по заявке АО-20 # 2020020 (рук. И. А. Мереминский). Сразу после обнаружения вспышки данные всех инструментов во временном интервале,

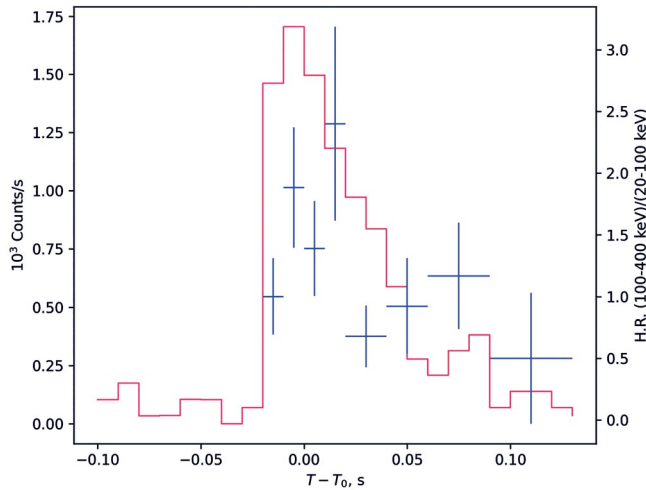


Рис. 2. Эволюция жесткости излучения GRB 231115A — отношения числа фотонов, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGR1 в диапазонах 100–400 и 20–100 кэВ (синие кресты, шкала справа). Красной линией для сравнения показан профиль всплеска с разрешением 10 мс в широком диапазоне энергий 20–400 кэВ (нормировка приведена на левой шкале). Видно, что в первые ~40 мс всплеска жесткость его излучения нарастала и была в среднем в 1.5–2 раза выше, чем в последующие ~80 мс.

начиная с 3 часов до всплеска и вплоть до 24 часов после него, были переданы авторам настоящей работы в рамках заявки АО-20 # 2040014 (рук. П. Ю. Минаев) для детального анализа и всестороннего исследования всплеска.

Временной профиль всплеска

Всплеск GRB 231115A попал в поле зрения основных телескопов обсерватории, что позволило его оперативно обнаружить и исследовать с помощью автоматической системы IBAS, осуществляющей быстрый анализ данных телескопа IBIS/ISGR1 и распространяющей оповещения о локализованных гамма-всплесках через систему GRB Coordinate Network (Мерепетти и др., 2023).

На рис. 1 приведены временные профили всплеска, полученные детектором IBIS/ISGR1 в четырех разных диапазонах энергий (записи скорости счета с разрешением 5 мс). Время отсчитывается от времени триггера события монитором *Fermi*/GBM (Далесси и др., 2023), скорректированного на 0.47 с временной задержки из-за большой удаленности спутника INTEGRAL от Земли в момент всплеска. Видно, что всплеск жесткий (отчетливо наблюдается до 500 кэВ), на энергиях >80 кэВ имеет временной профиль по форме близкий к профилю FRED (быстрый подъем — экспоненциальный спад) с длительностью менее

120 мс, что позволяет отнести его к всплескам типа I (коротким) или гигантским всплескам раннее неизвестного магнитара. В то же время видно, что максимальное число фотонов было зарегистрировано в наиболее мягком диапазоне IBIS/ISGR1 (≤ 80 кэВ). Профиль всплеска в этом диапазоне меняется, становится тумбообразным с широкой ($\Delta T \simeq 60$ мс) вершиной, возможно, из-за суперпозиции последовательности нескольких коротких всплесков.

Это подтверждается и эволюцией жесткости излучения GRB 231115A, приведенной на рис. 2. Жесткость излучения (синие кресты, правая шкала) определена как отношение числа фотонов, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGR1 в диапазонах 100–400 и 20–100 кэВ. Для сравнения красной линией показан временной профиль всплеска в широком 20–400 кэВ диапазоне (учтены только фотоны, вероятность ассоциации которых со всплеском составляет более 20%). Видно, что наиболее жесткое излучение было зарегистрировано в первые ~40 мс длительности всплеска, причем все это время жесткость плавно росла. Ее среднее значение $HR = 1.55 \pm 0.22$. В последующие ~80 мс жесткость излучения значимо (на уровне 3.9σ) уменьшилась в 1.9 раз до значения $HR = 0.80 \pm 0.17$. Падение жесткости излучения к концу события наблюдается у многих гамма-всплесков. У гигантских всплесков магнитаров эволюция жесткости исследована плохо из-за их исключительной яркости, приводящей к переполнению большинства приборов.

Всплеск был зарегистрирован и другими приборами на борту обсерватории INTEGRAL. На рис. 3 приведены его временные профили, полученные по данным гамма-телескопов SPI, IBIS/PICsIT, SPI-ACS в сравнении с интегральным (в диапазоне 25–400 кэВ) профилем, полученным телескопом IBIS/ISGR1. Видно, что всплеск уверенно регистрируется до 500 кэВ и выше. Профили во многом (с точностью до статистических ошибок) повторяют друг друга. Отметим, что слегка перекошенная форма профиля всплеска, измеренная детектором SPI/ACS, может быть объяснена тем, что первый временной бин в записи скорости счета фотонов во время всплеска начался заметно раньше всплеска, что понизило измеренное в бине суммарное число фотонов. Источник не был зарегистрирован рентгеновскими телескопами JEM-X, хотя находился всего в 3.8° от центра поля зрения этих телескопов, в области их достаточно высокой чувствительности. Верхний предел на рентгеновский поток от всплеска в диапазоне 3–20 кэВ (на уровне 1σ), полученный по данным двух телескопов JEM-X в предположении длительности события в этом диапазоне энергий 50 мс, составляет 1.9 Краб, что соответствует потоку излучения 4.7×10^{-8} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$.

Локализация

Важнейшим результатом стала локализация GRB 231115A. Первое сообщение о координатах нового всплеска было оперативно распространено автоматической системой IBAS (Д’Авансо и др., 2023а; Бернс, 2023; Мерегетти и др., 2023), что позволило быстро начать его наблюдения оптическими и радио телескопами по всему миру. На рис. 4 показано изображение неба в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI размером $29^\circ \times 29^\circ$, накопленное нами в течение 120 мс длительности всплеска в диапазоне энергий 20–400 кэВ. За столь короткое время в поле на значимом уровне (отношения сигнала к шуму $S/N \simeq 10.5$) был зарегистрирован лишь сам всплеск. Но главное – рисунок ясно показывает, что всплеск произошел в близкой, хорошо известной галактике M82 (Сигара), расположенной на расстоянии $D_L = 3.5$ Мпк. Координаты источника R.A. = $09^h55^m59^s82$, Decl. = $+69^\circ 41'02''.40$ (148.997°, $+69.684^\circ$; эпоха 2000.0, неопределенность $1'.5$). На рис. 5 показаны контуры, соответствующие разным уровням отношения S/N для источника всплеска на этом изображении, наложенные на оптическое (в фильтре R) изображение галактики M82, полученное нами на 70-см телескопе AS-32 Абастуманской астрофизической обсерватории (через 10.7 часов после всплеска). Видно, что центр локализации попадает на диск галактики, не оставляя никаких сомнений в том, что она является родительской для GRB 231115A. В поле зрения телескопа находилось еще несколько известных внегалактических рентгеновских источников, в том числе ультраяркие источники в галактиках M81 и M82, ни один из них за столь короткую экспозицию на изображении не проявился и, очевидно, не мог внести вклада во временной профиль всплеска.

Спектр излучения

На рис. 6 показан спектр излучения $\nu F_\nu(\nu)$ гамма-всплеска GRB 231115A, полученный по данным телескопа IBIS/ISGRI в диапазоне 20–400 кэВ. Спектр накоплен за все время события. Видно, что он очень жесткий, энергия, содержащаяся в излучении, растет с увеличением энергии фотонов. Попытка аппроксимации спектра с помощью простых однокомпонентных моделей powerlaw (PL), cutoffpl (CPL) или bbodyrad (BBR) оказалась не слишком успешной, что подтверждает визуальное впечатление о наличии в спектре двух компонент – мягкой и жесткой. При аппроксимации использовался пакет XSPEC, разработанный в NASA/HEASARC (Арно и др., 1996). Результаты аппроксимации (значения параметров и потоки излучения) сведены в табл. 1. Чуть лучшую аппроксимацию дает модель CPL:

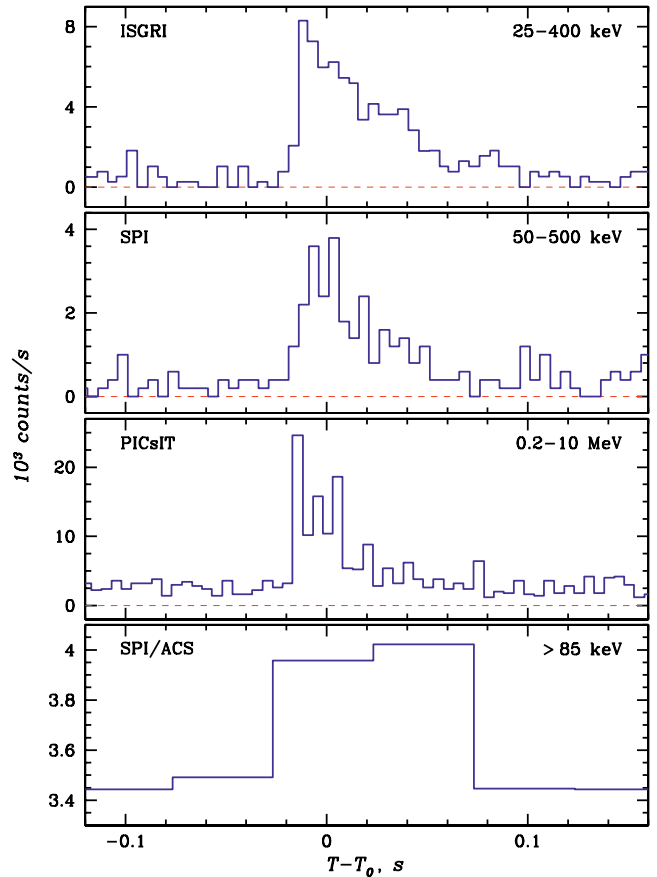


Рис. 3. Временной профиль всплеска GRB 231115A по данным четырех приборов обсерватории INTEGRAL: телескопов IBIS/ISGRI (25–400 кэВ) и IBIS/PICsIT (0.2–10 МэВ), гамма-спектрометра SPI (20–500 кэВ) и его защиты SPI-ACS (>85 кэВ). Временное разрешение 5 мс, кроме профиля, полученного детектором SPI-ACS с предельным разрешением 50 мс.

$$I_\nu = AE^{-\alpha} \exp(-E / E_c), \quad (1)$$

где I_ν – фотонный спектр излучения, α – фотонный индекс и E_c – характерная энергия завала на высоких энергиях. Отметим, что средний фотонный индекс всплеска (по модели PL) $\alpha \simeq 0.46$, а значит спектральный индекс излучения ($= \alpha - 1$) отрицательный и спектральная плотность излучения растет с энергией. Отметим также, что экспоненциальный завал в спектре на высоких энергиях по данным телескопа IBIS/ISGRI, на самом деле, не слишком достоверен. В частности, энергия завала $E \simeq 330$ кэВ, полученная при аппроксимации спектра моделью CPL, была определена с большими ошибками, а поэтому затем была зафиксирована и как свободный параметр не использовалась. Благодаря точному знанию родительской галактики всплеска (M 82) и болометрического

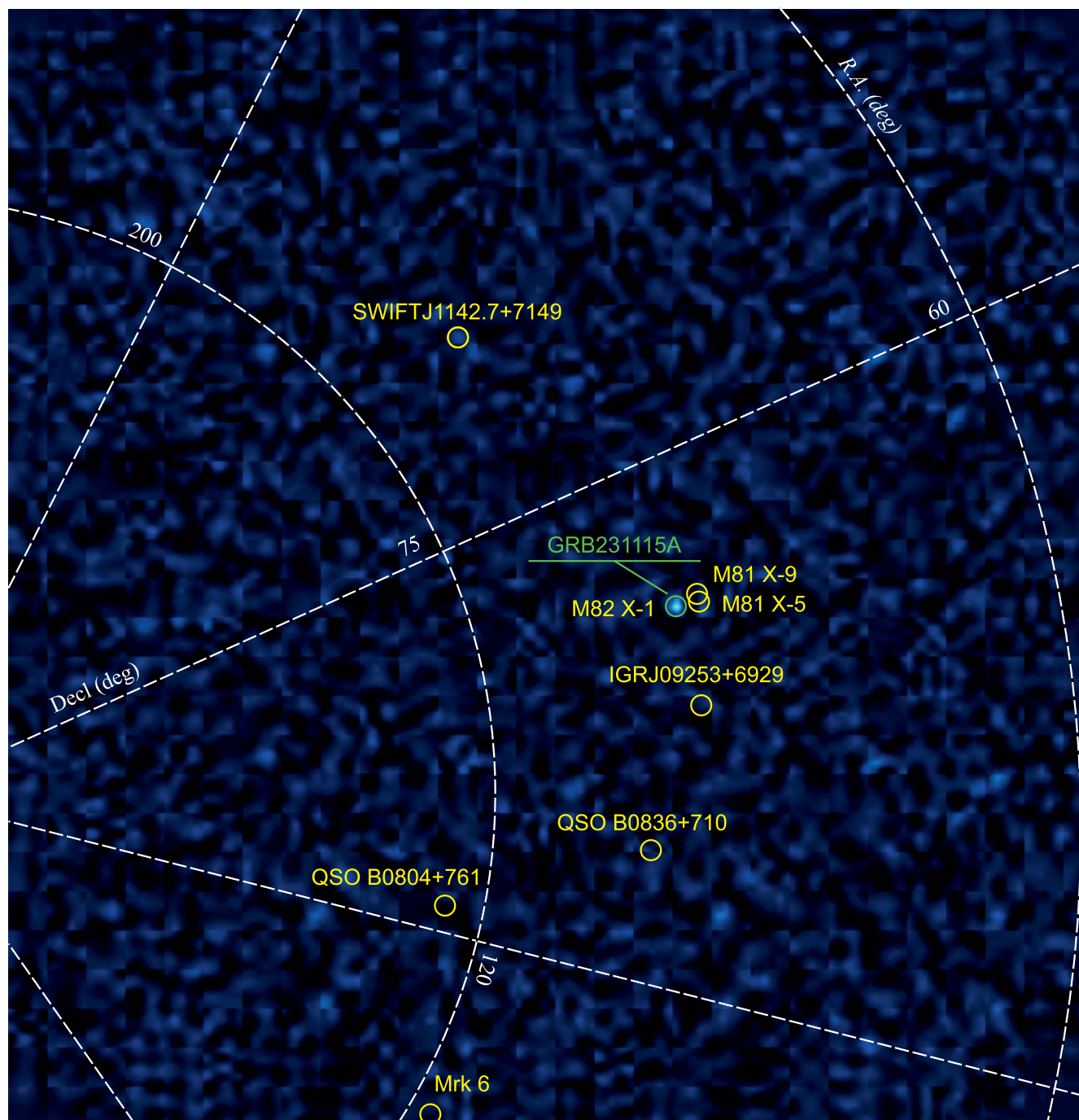


Рис. 4. Рентгеновское изображение неба (карта отношения S/N) в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL, полученное во время гамма-всплеска GRB 231115A. Размер $29^\circ \times 29^\circ$, экспозиция 120 мс, диапазон энергий 20–400 кэВ. Обозначены известные в поле источники постоянного излучения. GRB 231115A – единственный, достоверно зарегистрированный источник ($S/N \simeq 10.5$), совпадает по положению с галактикой M82 (на карте – с положением ультраяркого рентгеновского источника M82 X-1, расположенного в ее центральной области).

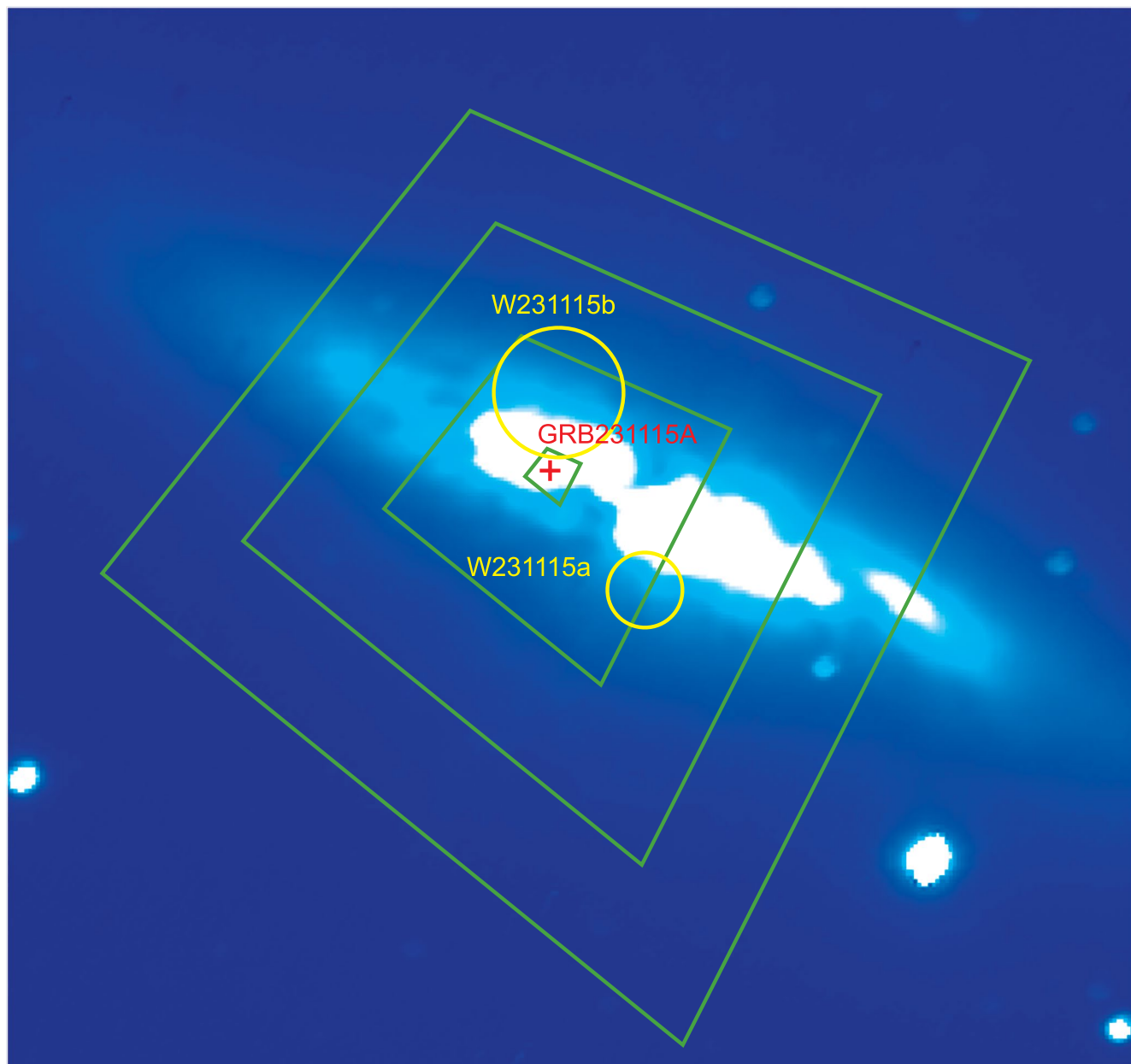


Рис. 5. Изображение области локализации всплеска GRB 231115A, полученное на 70-см телескопе AS-32 Абастуманской астрофизической обсерватории (спустя 10.7 часов после всплеска). Зеленые ромбы показывают контуры локализации всплеска на рентгеновской карте отношения S/N , полученной телескопом IBIS/ISGR1 обсерватории INTEGRAL, третий контур от центра соответствует 90% уровню значимости (неопределенность $1'5$). Кружки – два предложенных оптических кандидата (Ху и др., 2023, см. текст). Видно, что на самом деле источник всплеска с большой вероятностью расположен в ярком диске галактики M82, где его трудно выявить, а предложенные кандидаты выбраны в областях пониженной яркости на краю области локализации.

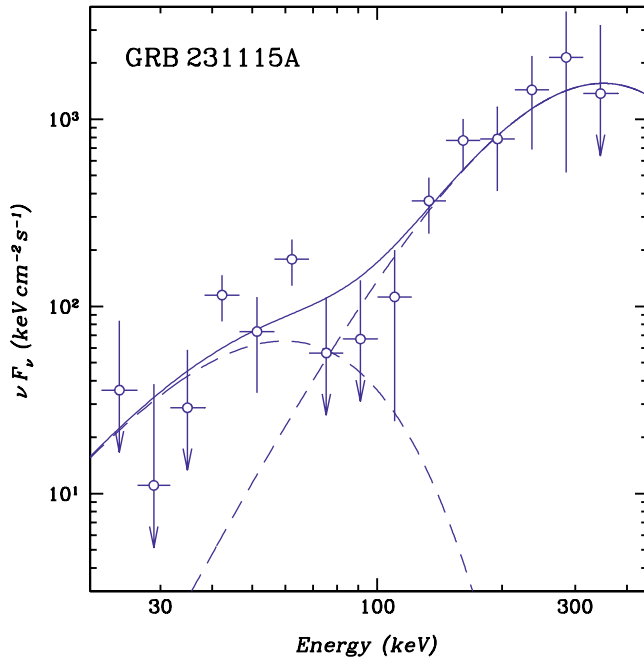


Рис. 6. Усредненный по полной длительности (~ 120 мс) спектр излучения νF_ν всплеска GRB 231115A по данным телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL (в диапазоне 20–400 кэВ). Сплошной линией показан результат наилучшей аппроксимации моделью BBR+CPL, штриховыми линиями — отдельные компоненты модели.

расстояния до нее ($D_L = 3.5$ Мпк), можно определить среднюю светимость источника всплеска в диапазоне 20–400 кэВ $L_X \sim 2.9 \times 10^{45}$ эрг с $^{-1}$.

Более успешно спектр всплеска был аппроксимирован двухкомпонентными моделями BBR+BBR и BBR+CPL. Как видно из табл. 1, в обоих случаях мягкая компонента излучения может быть описана спектром чернотельного излучения с температурой $kT_{bb} \sim 15$ кэВ и радиусом излучающей поверхности $R_{bb} \sim 170$ км. Отметим, что величина R_{bb} намного превосходит радиус типичной нейтронной звезды $R_{ns} \sim 12$ км, да и значение температуры kT_{bb} почти на порядок величины превосходит эддингтоновскую температуру для нейтронной звезды (если наблюдалась действительно вспышка магнитара), следовательно чернотельная фотосфера с такой температурой должна интенсивно оттекать. Очевидно, что использование чернотельного спектра для описания мягкой компоненты излучения всплеска физически не оправдано, а применялось нами для простоты и удобства. Если эта компонента действительно связана с раздувшейся фотосферой нейтронной звезды, ее спектр должен был формироваться в результате комптонизации и иметь виновскую форму. Отметим, что спектральный индекс жесткой степенной компоненты излучения (в модели CPL) отрицательный, а следовательно спектр

излучения очень круто растет в сторону высоких энергий. В использованной нормировке $\nu F_\nu(\nu)$ из рисунка сразу видно, что основная энергия излучения приходится на самую жесткую часть спектра — содержится в фотонах с энергиями $h\nu > 300$ кэВ.

АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРА *FERMI*/GBM

Монитор гамма-всплесков (GBM), размещенный на борту обсерватории *Fermi*, состоит из 12 сцинтилляционных детекторов NaI, чувствительных в диапазоне 8–1000 кэВ, и 2 сцинтилляционных детекторов BGO, чувствительных в диапазоне 0.2–40 МэВ. Он предназначен для регистрации и детального изучения гамма-всплесков (Миган и др., 2009; Пацейсас и др., 2012).

Источником исходных данных монитора *Fermi*/GBM в работе является общедоступный FTP-архив (legacy.gsfc.nasa.gov/fermi/data/). В качестве нуля на временной шкале используется момент срабатывания триггера прибора *Fermi*/GBM: 15 ноября 2023 г. в 15^h36^m21^s.20 UT.

Структура кривой блеска

Анализ кривых блеска проведен по пособийным (TTE) данным наиболее освещенных детекторов NaI_06 – NaI_09, NaI_11, BGO_01 эксперимента *Fermi*/GBM. Кривая блеска в трех каналах, охватывающих энергетический диапазон 10–850 кэВ, представлена на рис. 7. Параметр длительности T_{90} — промежуток времени, за который детектор регистрирует 90% полного числа отсчетов (см., например, Кошут и др., 1996), для GRB 231115A составляет $T_{90} = 65 \pm 1$ мс, что характерно как для гигантских вспышек SGRs, так и для коротких гамма-всплесков.

На рис. 7 видно, что форма кривой блеска GRB 231115A меняется в зависимости от энергетического диапазона — всплеск наиболее короткий в мягком диапазоне 10–70 кэВ, а наиболее долгий — в среднем 70–200 кэВ, что нетипично для гамма-всплесков, длительность которых обычно падает с ростом энергии степенным образом (Фенимор и др., 1995)¹. Вероятно, кривая блеска состоит из двух эпизодов излучения: главного (временной интервал от -0.02 до 0.01 с) и второстепенного (интервал от 0.01 до 0.05 с), различающихся формой энергетического спектра (см. следующий раздел).

Минимальный масштаб переменности, определенный как минимальный временной интервал,

¹ Это также противоречит выводу, сделанному при анализе кривых блеска, полученных телескопом IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL, о том, что в самом мягком канале профиль всплеска становится шире, чем в жестких каналах. Отметим однако, что чувствительность *Fermi*/GBM в таких низких энергиях заметно проседает, фоновая скорость счета возрастает.

Таблица 1. Результаты анализа интегрального спектра GRB 231115A в диапазоне 20–400 кэВ по данным телескопа IBIS/ISGRI

Модель	χ^2/N^a	A	α^b	kT_{bb} , E_c^d , кэВ	Поток ^c , 10^{-6} эрг с ⁻¹ см ⁻²
PL	30.6/29	1.97 ± 0.26^b	0.46 ± 0.03	—	1.72 ± 0.23
BBR	31.1/29	22.2 ± 1.48^g	—	91 ± 5	1.99 ± 0.27
CPL	29.8/28	2.91 ± 0.38^b	-0.07 ± 0.03	328	1.92 ± 0.24
BBR	26.6/27	17.6 ± 1.3^g	—	106 ± 7	1.92 ± 0.29
+					
BBR		170 ± 35^g	—	14.1 ± 1.6	0.09 ± 0.04
CPL	24.9/26	4.91 ± 0.77^b	-2.50 ± 0.03	78 ± 5	2.01 ± 0.31
+					
BBR		123 ± 19^g	—	15.2 ± 1.3	0.13 ± 0.04

^a — Минимальное значение χ^2 и число степеней свободы N .^b — Фотонный индекс степенной компоненты $I_{100} (E/100 \text{ кэВ})^{-\alpha}$.^b — Нормировка этой компоненты I_{100} на 100 кэВ [10^{-2} фот с⁻¹ см⁻² кэВ⁻¹].^г — Радиус излучающей поверхности R_{bb} [км] на расстоянии $D_L = 3.5$ Мпк.^д — Температура kT_{bb} или энергия экспоненциального завала E_c .^е — Поток излучения в диапазоне 20–400 кэВ.

в течение которого энергетический поток от источника изменяется более чем на 3 стандартных отклонения по сравнению с соседними интервалами, наблюдается в середине основного эпизода (момент времени $T = -0.006$ с) и составляет ~ 2 мс. Однако это не может быть индикатором вспышки именно SGR, так как такого рода быстрая переменность наблюдается также и у многих гамма-всплесков (Митрофанов и др., 1990).

Галактические гигантские вспышки SGRs также характеризуются длительным (до нескольких сотен секунд) продленным излучением с детектируемым периодическим сигналом. Относительный вклад продленного излучения в общую энергетику явления варьируется в широких пределах от 1 до 30% (Мазец и др., 2008). В данных монитора *Fermi*/GBM для события GRB 231115A мы не обнаружили значимого продленного излучения как в широком энергетическом диапазоне 10–850 кэВ, так и в более узких энергетических каналах 10–70, 70–200 и 200–850 кэВ. Верхний предел (на уровне трех стандартных отклонений) на интегральный по времени поток от продленного излучения на шкале 50 с в диапазоне 10–850 кэВ превышает поток от GRB 231115A почти в три раза. Таким образом, отсутствие регистрации продленного излучения не может служить причиной для отказа от ассоциации GRB 231115A с гигантской вспышкой ранее неизвестного SGR.

Спектральная эволюция

Космические гамма-всплески характеризуются спектральной эволюцией, которая может проявляться как относительное смещение (задержка)

профилей кривых блеска в разных диапазонах энергии. Задержка считается положительной, если жесткое излучение “опережает” мягкое, и определяется либо с помощью кросс-корреляционного анализа кривых блеска (Минаев и др., 2014), либо как смещение положения максимума кривой блеска (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 работе для исследования спектральной эволюции мы использовали кросс-корреляционный метод, описанный в работе (Минаев и др., 2014). Для этого сформированы кривые блеска с временным разрешением 1 мс в семи различных энергетических каналах, охватывающих энергетический диапазон 10–1000 кэВ. Кривые блеска по данным детекторов NaI_06 – NaI_09, NaI_11 суммировались, а кривая блеска, построенная по данным детектора BGO_01, исследовалась отдельно. В качестве опорной кривой блеска, относительно которой проводилась кросс-корреляция кривых блеска в остальных каналах, выбрана кривая в канале 120–220 кэВ, сформированная по данным детекторов NaI_06 – NaI_09, NaI_11.

Кросс-корреляционный анализ не выявил значимой спектральной эволюции, в отличие от GRB

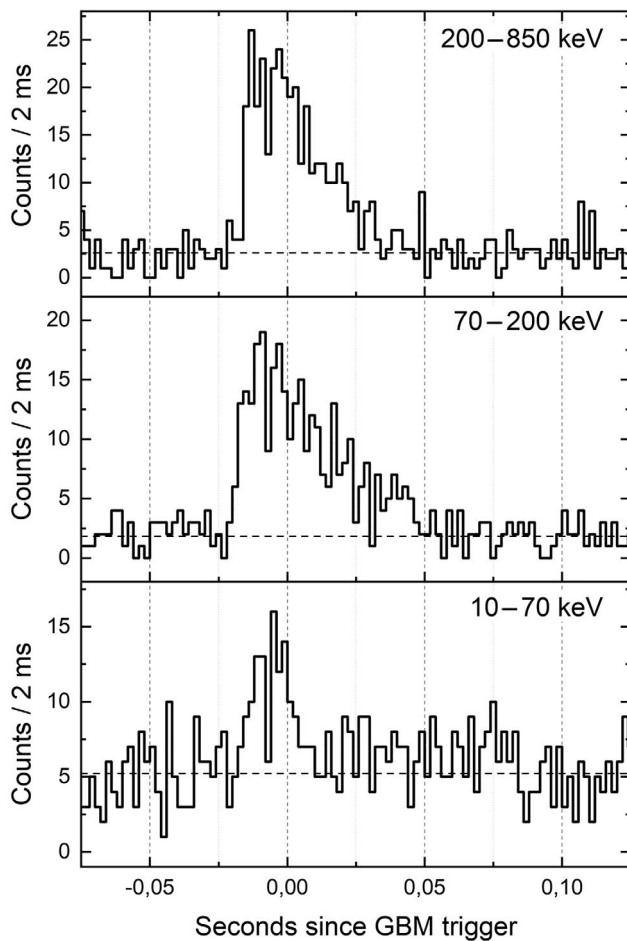


Рис. 7. Кривые блеска GRB 231115A по данным эксперимента *Fermi*/GBM с временным разрешением 2 мс, в диапазоне 200–850 кэВ – по данным детекторов NaI_06 – NaI_09, NaI_11, BGO_01, в диапазонах 10–70 и 70–200 кэВ – по данным детекторов NaI_06 – NaI_09, NaI_11. По горизонтальной оси отложено время относительно триггера *Fermi*/GBM в секундах, по вертикальной – количество отсчетов в бине. Границы энергетических каналов указаны на легенде. Штриховой линией показан уровень фона.

200415A, также, по-видимому, гигантской вспышки магнитара (Минаев, Позаненко, 20206). На первый взгляд полученные результаты противоречат поведению кривых блеска на рис. 7, из которого явно следует эволюция энергетического спектра со временем – профиль импульса на кривой блеска в мягком диапазоне 10–70 кэВ заметно уже и заканчивается раньше импульсов в среднем (70–200 кэВ) и жестком (200–850 кэВ) диапазонах, что подразумевает отрицательную спектральную задержку. Однако кросс-корреляционный анализ выявляет главным образом смещение кривых блеска в области их максимума, которое в данном случае отсутствует.

Отсутствие значимой спектральной задержки вероятно связано со сложной структурой кривой блеска и эффектом суперпозиции (Минаев и др., 2014).

Мы также исследовали эволюцию жесткости излучения всплеска от времени по данным *Fermi*/GBM, определив жесткость излучения как отношение потоков, выраженных в инструментальных отсчетах за вычетом фона, в энергетических каналах 200–850 кэВ и 30–200 кэВ. На рис. 8 показана соответствующая зависимость спектральной жесткости от времени. Зависимость в целом повторяет профиль кривой блеска всплеска – быстро нарастает, какое-то время в течение основного яркого эпизода остается высокой, и затем падает. Рисунок подтверждает эволюцию жесткости спектра, найденную по данным телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL (рис. 2, отметим, что при расчете жесткости здесь использовались немного отличные энергетические каналы). Подобное поведение иногда наблюдается у гамма-всплесков со сложной структурой кривой блеска (Гупта и др., 2021), поэтому исходя из вида этой зависимости однозначно классифицировать данное событие как гигантскую вспышку магнитара нельзя.

Спектр излучения

Для восстановления и аппроксимации спектров излучения в данной работе использовался программный пакет RMfit v4.3.2, специально разработанный для анализа данных монитора GBM обсерватории *Fermi* (fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/rmfit/). Методика спектрального анализа аналогична предложенной Грубером и др. (2014). Энергетические спектры анализировались по данным детекторов NaI_06, NaI_07, NaI_11 и BGO_01 эксперимента *Fermi*/GBM.

Мы исследовали энергетический спектр νF_ν GRB 231115A в трех временных интервалах: интервал (–0.02 с, 0.05 с) соответствует интегральному спектру, (–0.02 с, 0.00 с) – главному эпизоду излучения, (0.00 с, 0.05 с) – второстепенному. Энергетический спектр во всех исследованных временных интервалах неудовлетворительно описывается тепловой моделью чернотельного излучения *bbody* (BB), оптимальная модель – степенная с экспоненциальным завалом *cutoffpl* (CPL, см. уравнение (1)).

Хотя чуть лучшее согласие с данными дает комбинация двух тепловых моделей (2 BB), наблюдаемая разница в значении статистического функционала CSTAT не позволяет отвергнуть модель CPL, имеющую на одну степень свободы меньше. Результаты спектрального анализа с использованием моделей BB, CPL, 2 BB представлены в табл. 2.

Энергетический спектр излучения νF_ν во всех случаях имеет значение фотонного индекса $\alpha \simeq -0.3$ с энергией спектрального пика

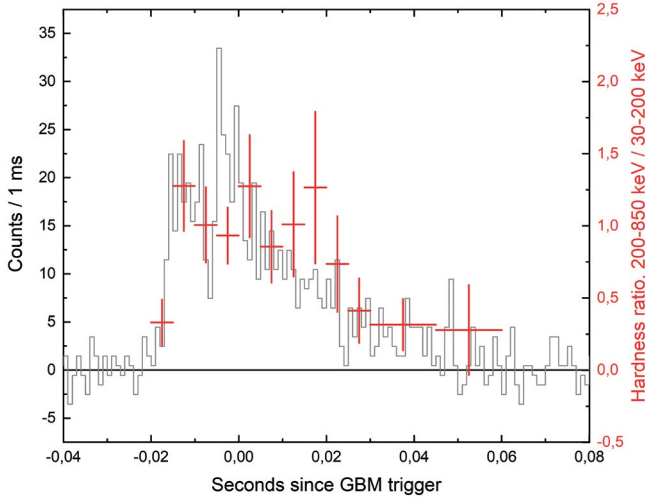


Рис 8. Эволюция жесткости излучения GRB 231115A по данным *Fermi*/GBM со временем (красные точки). Жесткость определяется как отношение числа отсчетов, зарегистрированных в диапазоне 200–850 кэВ, к отсчетам в диапазоне 30–200 кэВ. Для сравнения черной линией показана кривая блеска GRB 231115A с временным разрешением 1 мс в диапазоне 30–850 кэВ (по данным детекторов NaI_06 – NaI_09, NaI_11, BGO_01 *Fermi*/GBM). По горизонтальной оси – время относительно триггера GBM/*Fermi* в секундах, по вертикальной левой оси – количество отсчетов в бине кривой блеска, по вертикальной правой оси – значение спектральной жесткости.

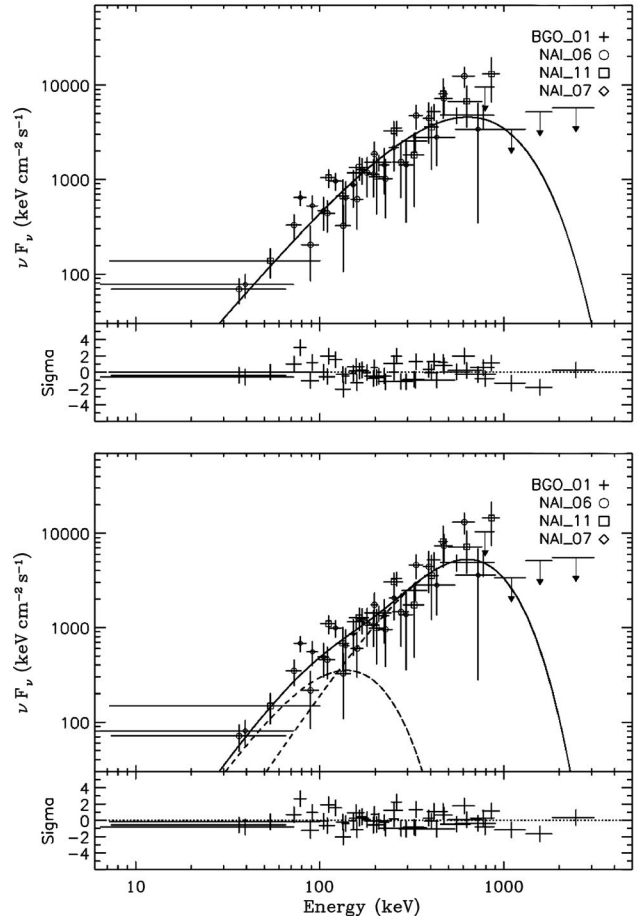


Рис 9. Спектр излучения νF_ν всплеска GRB 231115A по данным *Fermi*/GBM во временном интервале (–0.02 с, 0.05 с) относительно времени триггера: сверху – аппроксимированный степенной моделью с экспоненциальным завалом (CPL), внизу – аппроксимированный суммой двух моделей чернотельного излучения (2 BB). На верхних панелях – спектр, полученный по данным детекторов NaI_06, NaI_07, NaI_11, BGO_01 эксперимента *Fermi*/GBM. На нижних панелях – отклонение спектральной модели от экспериментальных данных, выраженное в единицах стандартных отклонений.

$E_p \simeq 630$ кэВ (табл. 2). Данное значение α нетипично для коротких гамма-всплесков, которые в среднем характеризуются более быстро спадающим спектром со значением $\alpha \simeq 0.7$ (см., например, Берджес и др., 2019). Подобное значение спектрального индекса наблюдалось ранее и у других гигантских вспышек SGR (Минаев, Позаненко, 2020б). На рис. 9 в качестве примера представлен интегральный спектр излучения всплеска во временном интервале (–0.02 с, 0.05 с), аппроксимированный с помощью моделей CPL и 2 BB.

Спектральный анализ двух эпизодов GRB 231115A, выделенных при анализе кривых блеска, не выявил существенных различий в параметрах спектральных моделей. В рамках CPL модели фотонный индекс α второстепенного эпизода незначительно больше при неизменном положении экспоненциального завала ($E_p \simeq 630$ кэВ), что может объяснять относительный недостаток мягкого излучения во второстепенном эпизоде.

Мы оценили изотропный эквивалент полной энергии E_{iso} в предположении ассоциации источника с галактикой M82 ($D_L = 3.5$ Мпк) в энергетическом диапазоне 1–10 000 кэВ, проводя экстраполяцию модельного спектра CPL,

полученного в диапазоне 7–3000 кэВ. Он составляет $E_{iso} = (1.28 \pm 0.14) \times 10^{45}$ эрг. Аналогичным образом вычисленная пиковая светимость во временном интервале (–0.02 с, 0.0 с) составляет $L_{iso} = (3.09 \pm 0.44) \times 10^{46}$ эрг с^{–1}.

Для тепловой модели чернотельного излучения (BB) можно оценить радиус излучающей области, используя значение пиковой светимости $L_{iso} = 3.09 \times 10^{46}$ эрг с^{–1} и закон Стефана–Больцмана для излучения с температурой $kT_{bb} = 132$ кэВ. Полученный радиус $R_{bb} \simeq 27$ км по порядку величины соответствует размерам магнитосферы нейтронной звезды.

Таблица 2. Результаты спектрального анализа излучения GRB 231115A по данным *Fermi*/GBM

ΔT , ^a мс	Модель	CSTAT/dof	A, см ⁻² с ⁻¹ кэВ ⁻¹	α ^b	E_p , kT_{bb} ^b кэВ	Поток, ^г 10 ⁻⁷ эрг см ⁻²
(-20, 50)	BB	485/412	$(3.33^{+0.67}_{-0.58}) \times 10^{-6}$	—	135 ± 8	7.50 ± 0.50
	CPL	471/411	$(6.27^{+0.72}_{-0.65}) \times 10^{-2}$	-0.34 ± 0.20	637^{+71}_{-58}	7.25 ± 0.46
	2BB	466/410	$(4.6^{+3.9}_{-2.1}) \times 10^{-5}$	—	36^{+10}_{-7}	7.55 ± 0.50
(-20, 0)			$(1.62^{+0.55}_{-0.46}) \times 10^{-6}$	—	162^{+16}_{-13}	
	BB	435/412	$(6.3^{+1.7}_{-1.3}) \times 10^{-6}$	—	132 ± 10	3.71 ± 0.32
	CPL	423/411	$(1.18^{+0.17}_{-0.15}) \times 10^{-1}$	-0.20 ± 0.23	631^{+92}_{-72}	3.50 ± 0.30
	2BB	419/410	$(1.56^{+1.80}_{-0.83}) \times 10^{-4}$	—	29^{+10}_{-7}	3.72 ± 0.32
			$(3.2^{+1.3}_{-1.0}) \times 10^{-4}$	—	156^{+18}_{-15}	
(0, 50)	BB	438/412	$(2.22^{+0.71}_{-0.55}) \times 10^{-4}$	—	137 ± 13	3.82 ± 0.38
	CPL	433/411	$(4.17^{+0.78}_{-0.67}) \times 10^{-2}$	-0.47 ± 0.31	635^{+114}_{-84}	3.74 ± 0.35
	2BB	432/410	$(1.7^{+2.7}_{-1.1}) \times 10^{-5}$	—	44^{+22}_{-14}	3.85 ± 0.38
			$(9.9^{+5.9}_{-4.9}) \times 10^{-7}$	—	168^{+32}_{-22}	

^a — Временной интервал относительно триггера *Fermi*/GBM.^b — Фотонный индекс жесткой степенной компоненты.^b — Энергия спектрального пика $E_p = E_c (2 - \alpha)$, где E_c — энергия экспоненциального завала из уравнения (1) или kT_{bb} для моделей BB и 2BB.^г — Интегральный по времени поток излучения в диапазоне 10–1000 кэВ.

ПОПУЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВСПЛЕСКА

Интересно сравнить полученные значения длительности и энергетики всплеска GRB 231115A с параметрами других транзиентных гамма-явлений.

Корреляция $E_{p,i} - E_{iso}$

В работе (Минаев, Позаненко, 2020а) было показано, что корреляция между изотропным эквивалентом полной энергии, излученной в гамма-диапазоне, E_{iso} и положением экстремума в энергетическом спектре νF_ν в системе источника всплеска, $E_{p,i}$ (формула (2), Голенецкий и др., 1983; Амати и др., 2002), 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. В дальнейшем, в работе (Минаев, Позаненко, 2020б) были дополнительно рассмотрены известные гигантские вспышки источников SGR,

и оказалось, что они также подчиняются аналогичной корреляции с показателем степени $a \simeq 0.3$ и занимают изолированное положение на диаграмме $E_{p,i} - E_{iso}$. Это дало возможность включить их в систему классификации, предложенную Минаевым, Позаненко (2020а).

$$\lg\left(\frac{E_{p,i}}{100 \text{ кэВ}}\right) = a \lg\left(\frac{E_{iso}}{10^{51} \text{ эрг}}\right) + b. \quad (2)$$

Для исследования положения GRB 231115A на диаграмме $E_{p,i} - E_{iso}$ использовалась выборка из 316 гамма-всплесков и 7 гигантских вспышек магнитаров, а также результаты анализа корреляции $E_{p,i} - E_{iso}$ для этой выборки, опубликованные в работах (Минаев, Позаненко, 2020а, б, 2021). Соответствующая диаграмма $E_{p,i} - E_{iso}$ представлена на рис. 10. Очевидно, что положение GRB 231115A на диаграмме позволяет однозначно классифицировать его как гигантскую вспышку магнитара. На рисунке также показана траектория источника на диаграмме в зависимости от его красного смещения. Событие может быть классифицировано как короткий гамма-всплеск, начиная с красного смещения $z = 0.12$ (точка пересечения траектории с границей области корреляции коротких гамма-всплесков).

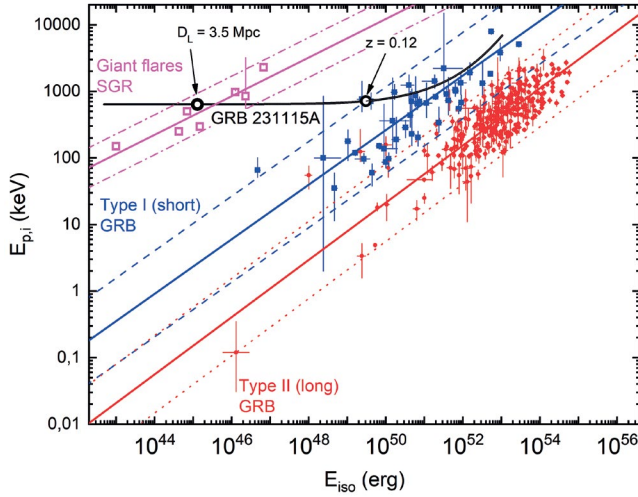


Рис. 10. Корреляция $E_{p,i} - E_{iso}$ для гамма-всплесков типа I (синие квадраты), типа II (красные кружки) и гигантских вспышек SGR (розовые незаполненные квадраты) с соответствующими результатами аппроксимации, в том числе $2\sigma_{cor}$ областями корреляции, показанных соответствующими цветами. Черной кривой показана траектория GRB 231115A в зависимости от красного смещения, положение для $D_L = 3.5$ Мпк и $z = 0.12$ отмечено незаполненными черными кружками.

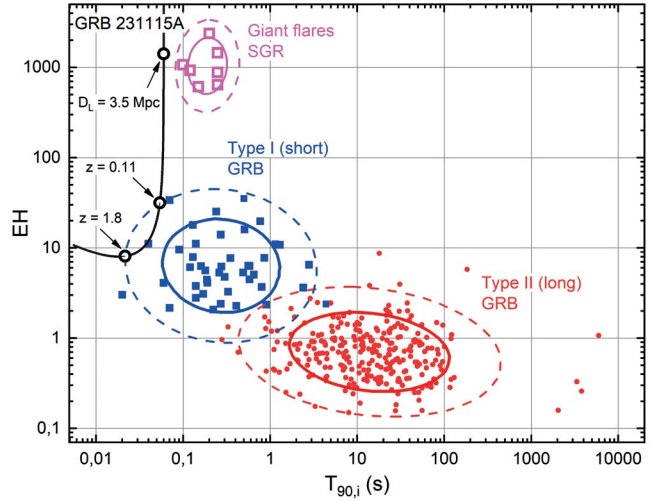


Рис. 11. Диаграмма $T_{90,i} - EH$ для гамма-всплесков типа I (синие квадраты), типа II (красные кружки) и гигантских вспышек SGR (розовые незаполненные квадраты) с соответствующими результатами кластерного анализа, $1\sigma_{cor}$ и $2\sigma_{cor}$ области кластера показаны жирными сплошными и тонкими штриховыми кривыми соответствующих цветов. Черной кривой показана траектория GRB 231115A в зависимости от красного смещения. Положение для $D_L = 3.5$ Мпк, а также положения на траектории для ассоциации источника с короткими гамма-всплесками $z = 0.11$ и $z = 1.8$ отмечены незаполненными черными кружками.

Диаграмма $T_{90,i} - EH$

Для решения задачи классификации гамма-всплесков в работе (Минаев, Позаненко, 2020a) 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 (3)), характеризующий положение гамма-всплеска на диаграмме $E_{p,i} - E_{iso}$:

$$EH = \frac{(E_{p,i} / 100 \text{ кэВ})}{(E_{iso} / 10^{51} \text{ эрг})^{0.4}}. \quad (3)$$

На рис. 11 представлена диаграмма $T_{90,i} - EH$ для 316 гамма-всплесков и 7 гигантских вспышек магнитаров из работ (Минаев, Позаненко, 2020a, б, 2021). 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 большом значении

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. Всплеск GRB 231115A однозначно классифицируется как гигантская вспышка SGR, находясь в непосредственной близости от соответствующего кластера событий (параметр $EH = 1450$). На рисунке также показана траектория на диаграмме в зависимости от красного смещения источника. Событие может быть классифицировано как короткий гамма-всплеск в интервале красных смещений от $z = 0.11$ до $z = 1.8$ (точки пересечения траектории с границами области кластера коротких гамма-всплесков).

НАБЛЮДЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Среди оптических наблюдательных сетей, первым на оповещение о регистрации GRB 231115A от *Fermi*/GBM (Далесси и др., 2023) откликнулся обзорный телескоп GROWTH-India, который начал наблюдения области локализации с 2023-11-15 16^h47^m58^s140 UT. Кумар и др. (2023a) сообщили об обнаружении кандидата AT 2023xvj в оптическое послесвечение GRB 231115A в крыле галактики

Таблица 3. Телескопы GRB-IKI-FuN, использованные в наблюдениях GRB 231115A

Обсерватория	Телескоп	D, м ^a	FoV, ^b	Местонахождение
АбАО/ GENAO	AS-32	0.7	44.'4 × 44.'4	Абастумани, Грузия
МСОТ- Китаб	RC-36	0.36	43.'7 × 43.'7	Китаб, Узбекистан

^a — Диаметр зеркала телескопа.^b — Поле зрения телескопа.

М82 через 1.19 часа после триггера *Fermi*/GMB. На момент обнаружения источник имел координаты R.A. = 09^h56^m00^s.2 ± 0.''6, Decl. = 69°40'29.''2 ± 0.''6 (эпоха J2000) и блеском ~19.2 mag в фотометрической полосе *r'*. Независимо от GROWTH-India, оптические наблюдения с целью поиска оптического компонента GRB 231115A проводились и многими другими инструментами (см. раздел Наблюдения). Однако, источник, объявленный в циркуляре Кумара и др. (2023a), так и не был найден. Позднее Кумар и др. (2023b) сообщили об ошибке, допущенной в их предыдущем циркуляре (Кумар и др. 2023a). Ошибка возникла при вычитании изображения-шаблона родительской галактики, полученной обзором PanSTARRS DR1 (Чамберс и др., 2016), на котором присутствуют артефакты.

Две группы исследователей обнаружили несколько кандидатов в транзиентные источники в области локализации всплеска системой IBAS обсерватории INTEGRAL. Так, Перли и др. (2023) обнаружили красный источник с координатами R.A. = 09^h55^m30^s.7, Decl. = +69°40'23.''28, а Ху и др. (2023) — еще один красный источник W231115b с координатами R.A. = 09^h55^m88^s.1, Decl. = 69°41'28.''5, который имел видимый блеск $r = 21.26 \pm 0.08$. Ху и др. (2023) обнаружили также источник, в последствии найденный Перли и др. (2023), который был обозначен как W231115a. Видимая звездная величина данного источника составила $r = 20.54 \pm \pm 0.04$. По-видимому это источники в диске галактики М82, но не связанные с GRB 231115A. Можно указать несколько причин, почему эти источники не были обнаружены ранее: значительный градиент фонового излучения галактики М82, большая плотность источников в диске галактики, значительное поглощение оптического излучения пылью, а также недостаточная предельная звездная величина инструментов наблюдения.

В свою очередь, мы также провели наблюдения, используя сеть телескопов GRB-IKI-FuN (IKI Gamma-Ray Burst Follow-up Network, Вольнова и др., 2021) с целью поиска возможного оптического компонента GRB 231115A. Список

используемых телескопов и их основные параметры представлены в табл. 3.

Наблюдения телескопом AS-32/АбАО производились в фотометрической полосе R, в то время как наблюдения на RC-36/МСОТ-Китаб выполнены в чистом свете (без фильтров)². Журнал оптических наблюдений представлен в табл. 4.

Данные наблюдений (изображения) обработаны однородным образом с помощью элементов конвейера по поиску оптических транзиентов APEX v2023.11 (Панков и др., 2022). Согласно методике, описанной Панковым и др. (2022), изображения прошли первичный контроль, калибровку, сложение, астрометрию и дифференциальную фотометрию. Поиск переменных источников осуществлен при помощи вычитания изображения-шаблона родительской галактики М82, снятой на том же инструменте, но в более позднюю эпоху. С этой целью был разработан специальный элемент конвейера APEX `apex_subtract`. Из-за больших угловых размеров М82 на астрономических изображениях (порядка 4×4 угл. мин), вычитание шаблона было необходимой процедурой, чтобы убрать значительный градиент фона галактики М82.

После вычитания мы не обнаружили достоверных кандидатов в оптическое послесвечение GRB 231115A в области локализации, полученной в эксперименте IBIS/ISGRI INTEGRAL (рис. 12). Также не были обнаружены источники из циркуляров GCN Перли и др. (2023) и Ху и др. (2023) — из-за недостаточной проникающей способности, достигнутой в наших наблюдениях.

На рис. 13 красными треугольниками показаны верхние пределы на возможный оптический компонент GRB 231115A, полученные как в наших наблюдениях (отмечены стрелками), так и другими научными группами (табл. 4). Кроме того, на рис. 13 представлены результаты оптических наблюдений других коротких гамма-всплесков с известным красным смещением по данным Фонга и др. (2015) и кривая блеска килоновой GRB 170817A по данным Виллара и др. (2017), приведенные к фотометрическому расстоянию $D_L = 3.5$ Мпк.

Наиболее глубокие верхние пределы на оптическое послесвечение GRB 231115A получены через 10 часов после триггера (22 зв.вел. в фильтре *r*). Оптические послесвечения других коротких гамма-всплесков (в том числе от килоновой GRB 170817A), наблюдаемые с расстояния $D_L = 3.5$ Мпк,

² Добавлено в корректуру: После сдачи статьи в печать, 8 и 9 декабря 2023 г. (спустя ~21.5 сут после всплеска) были выполнены наблюдения галактики М 82 в спокойном состоянии (когда возможный оптический компонент уже должен был затухнуть) на телескопах в АбАО и Китабе соответственно. Это позволило более точно вычесть вклад галактики М 82 из изображений, полученных нами сразу после всплеска (см. ниже).

Таблица 4. Журнал оптических наблюдений гамма-всплеска GRB 231115A

$t - T_0^a$, сут	ΔT^b , с	Предел зв. вел. ^в	f_ν мкЯн ^г	Фильтр	Обсерватория	Телескоп	GCN
–1.155810	—	20.47	23.6	r	ZTF	Palomar 1.2m	35048
–0.452917	12 × 60	20.1	27.9	L ^д	ORM/SSO	GOTO	35050
0.054688	180	18.8	92.5	clear ^е	МАСТЕР-Тунка	0.4m	35046
0.075023	600	19.5	48.6	Rc	MITSuME	Akeno 0.5m	35057
0.087118	1200	19.8	36.8	Rc	MITSuME	Akeno 0.5m	35057
0.111250	2400	20.2	25.5	Rc	MITSuME	Akeno 0.5m	35057
0.144980	7380	19.9	33.6	Rc	MITSuME	Okayama 0.5m	35057
0.149271	19 × 30 + 123 × 60	18.6 ^ж	111	clear ^е	ISON-Kitab	RC-36	Эта работа
0.418507	7200	22.0	5.75	r	WO	Fraunhofer 2m	35092
0.500000	—	22.0	5.75	r	ORM	TNG	35077
0.447095	89 × 60	19.3 ^ж	58.4	R	AbAO	AS-32	Эта работа
0.500000	2 × 195	21.6	8.32	r	ORM	Liverpool 2m	35067

^а – Время начала экспозиции относительно триггера *Fermi*/GBM.^б – Длительность экспозиции.^в – Верхний предел на уровне 3 стандартных отклонения.^г – Верхний предел на спектральную плотность потока на уровне 3 стандартных отклонений.^д – GOTO широкополосный L фильтр (4000–7000 Å).^е – Чистый свет (без фильтра)^ж – Не исправлено на поглощение в Галактике $E(B - V) = 0.1326$ (Шлафли, Финкбайнер, 2011).

были бы ярче в этот момент времени не менее, чем в 2500 раз (их блеск был бы на уровне 13.5 зв. вел.). Таким образом, полученные верхние пределы на оптический компонент надежно исключают интерпретацию события GRB 231115A как короткого гамма-всплеска. С другой стороны, оптическое излучение могло бы испытать очень сильное поглощение на луче зрения, если источник всплеска находится в дальней от наблюдателя части диска родительской галактики. К сожалению, точности локализации источника недостаточно, чтобы исключить этот вариант.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен детальный анализ спектрально-временных свойств короткого всплеска GRB 231115A в жестком рентгеновском и гамма-диапазоне по данным космических обсерваторий INTEGRAL и *Fermi* с целью установления природы всплеска. Проведены также ранние наблюдения в оптическом диапазоне телескопами сети GRB-IKI-FuN в попытке найти послесвечение всплеска или ассоциированный с всплеском оптический источник.

В частности, получены следующие результаты:

1. Подтверждена и уточнена ранняя (выполненная в рамках Quick Look анализа автоматической

системой IBAS) локализация всплеска (R.A. = 09^h55^m59^s.28, Decl. = +69°41'40" эпоха 2000.0, неопределенность лучше 1'), также как и его ассоциация с близкой галактикой Сигара (M 82), расположенной на расстоянии $D_L = 3.5$ Мпк. Это позволяет рассматривать как в высшей степени вероятную версию магнитарного происхождения всплеска, т.е. того, что 15 ноября 2023 г. в этой галактике произошла гигантская вспышка ранее неизвестного источника мягких повторных всплесков (SGR). Если версия подтвердится, то это будет первая хорошо локализованная и надежно отождествленная с известной галактикой гигантская вспышка внегалактического SGR.

2. Жесткие рентгеновские и гамма-кривые блеска GRB 231115A имеют традиционный профиль FRED (быстрый подъем — экспоненциальный спад) во всех приборах и во всех диапазонах, за исключением самого мягкого (25–80 кэВ) диапазона телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL, в котором профиль всплеска имел широкую вершину с $\Delta T \sim 60$ мс. Длительное (десятки секунд) продленное излучение, характерное для гигантских вспышек магнетаров, у GRB 231115A обнаружено не было. В то же время полученный верхний предел на интегральный по времени поток продленного излучения не исключает ассоциации всплеска с гигантской вспышкой магнитара.



Рис. 12. То же изображение области локализации всплеска GRB 231115A, что на рис. 5, но после вычитания вклада галактики М 82 в спокойном состоянии (измеренного на телескопе в AS-32 8 декабря 2023 г., когда возможный оптический компонент всплеска уже должен был затухнуть). Как и ранее, зеленые ромбы показывают контуры локализации всплеска в рентгеновском диапазоне третий контур от центра соответствует уровню достоверности 90% (неопределенность $1'.5$). Белые кружки — два предложенных оптических кандидата (Ху и др., 2023, см. текст). Белыми тонкими контурами обозначен профиль галактики М 81. Голубыми контурами — то, что осталось на месте галактики после вычитания (добавлено в корректуре).

3. Кросс-корреляционный анализ кривых блеска в разных энергетических диапазонах по данным монитора *Fermi*/GBM не выявил значимой спектральной задержки. Такое поведение встречается как у коротких гамма-всплесков, так и у гигантских вспышек магнитаров. В то же время, обнаружена заметная эволюция жесткости излучения

(и по данным *Fermi*/GBM, и по данным телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL). Жесткость была в 2–3 раза выше (и даже росла согласно IBIS/ISGRI) в течение первых ~ 40 мс всплеска, а затем быстро уменьшилась и далее оставалась на примерно одном уровне в течение последующих ~ 80 –100 мс.

4. Спектр излучения всплеска содержал две компоненты: жесткую, которая успешно описывалась характерной для гамма-всплесков и магнитаров степенной моделью с экспоненциальным завалом на высоких энергиях (CPL), и мягкую, которую мы аппроксимировали спектром чернотельной фотосферы с температурой $kT_{bb} \sim 15$ кэВ. На рис. 14 показан широкополосный (3–1500 кэВ) спектр излучения GRB 231115A, реконструированный на основе данных наблюдений телескопов IBIS/ISGRI и JEM–X обсерватории INTEGRAL и монитора гамма-всплесков GBM (его детекторы BGO\01 и NaI\06) обсерватории *Fermi*. В табл. 5 приведены результаты его аппроксимации спектральными моделями 2 BBL и BBL+CPL (последняя модель показана на рисунке сплошной кривой, а ее компоненты – штриховой и пунктирной линией). Из рисунка следует, что модель успешно описывает измеренный спектр излучения всплеска.

Представление спектра всплеска в виде $\nu F_\nu(\nu)$ явно показывает, что основная энергия его излучения содержится в фотонах с $h\nu \sim 500$ –600 кэВ. Важно, что фотонный индекс жесткой компоненты излучения имел пекулярное значение $\alpha \simeq -1.08$, обеспечивающее быстрый рост спектральной плотности излучения $F_\nu \sim E^{2.08}$ с энергией фотонов. Именно благодаря такому почти релей-джинсовскому спектральному индексу жесткое излучение данного всплеска успешно описывалось чернотельным спектром. Столь жесткие степенные “хвосты” в спектрах излучения более характерны для гигантских вспышек магнитаров, чем для коротких гамма-всплесков.

5. Комбинация чернотельных спектров, которая позволяет успешно аппроксимировать спектр излучения GRB 231115A, может возникнуть в гипотетических моделях испарения первичных черных дыр (см., например, Феган и др., 1978) или падения первичной черной дыры ограниченной массы на сверхмассивную черную дыру (Барко и др., 2021). В этих моделях могут генерироваться очень короткие жесткие гамма-всплески, по-видимому, без послесвечения в рентгеновском и оптическом диапазонах. Однако, полная энергия, излученная в гамма-диапазоне, в этих моделях оказывается существенно меньшей энергии, измеренной от GRB 231115A, что не позволило бы наблюдать такую вспышку в галактике M82.

6. Полученные в работе верхние пределы на поток оптического послесвечения всплеска через 3.6 и 10.7 часов после этого события находятся на несколько порядков величины ниже уровня излучения, которого можно было бы ожидать от коротких гамма-всплесков, связанных со слиянием нейтронных звезд (Канн и др., 2011; Виллар и др., 2017; Пандей и др., 2019). Наши пределы согласуются с результатами оптических наблюдений на других

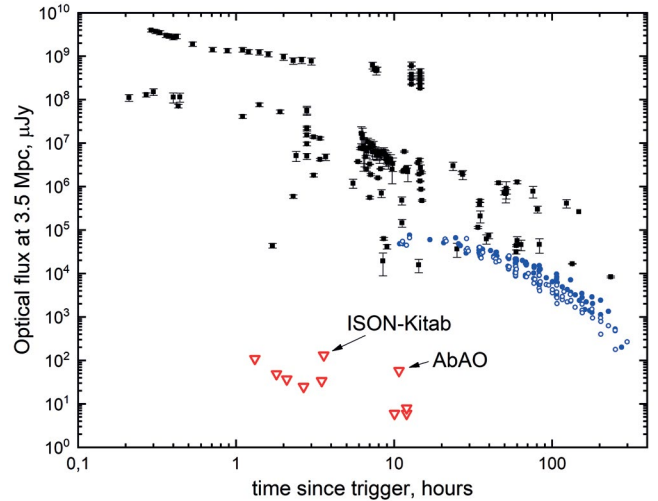


Рис. 13. Оптические наблюдения GRB 231115A в сравнении с кривыми блеска других коротких гамма-всплесков, приведенных к фотометрическому расстоянию $D_L = 3.5$ Мпк. По горизонтали отложено время в часах относительно гамма-триггера *Fermi*/GBM, по вертикали – наблюдаемый поток в мкЯн. Красные незаполненные треугольники – верхние пределы на оптический поток от GRB 231115A по данным табл. 4, черные квадраты – данные оптических наблюдений коротких гамма-всплесков с измеренным красным смещением из работы Фонг и др. (2015), синие заполненные и незаполненные кружки – кривая блеска GRB 170817A в фильтрах r и i , соответственно, по данным Виллара и др. (2017).

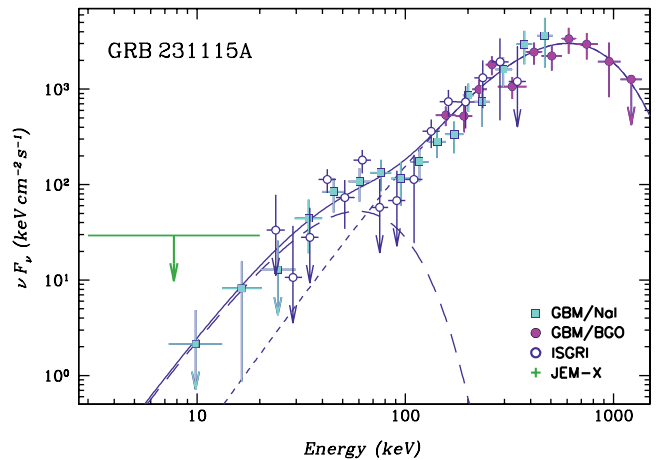


Рис. 14. Широкополосный рентгеновский и гамма-спектр излучения (νF_ν) всплеска GRB 231115A по данным трех приборов: IBIS/ISGRI и JEM–X обсерватории INTEGRAL и GBM (детекторы BGO\01 и NaI\06) обсерватории *Fermi* (диапазон 3–1500 кэВ). Предел JEM–X соответствует одному стандартному отклонению. Спектр накоплен в течение всего всплеска (120 мс). Сплошной линией представлен результат наилучшей аппроксимации спектра моделью BBR+CPL, штриховой и пунктирной линиями – отдельные компоненты модели.

Таблица 5. Результаты анализа широкополосного рентгеновского и гамма-спектра GRB 231115A в диапазоне 3–1500 кэВ по данным обсерваторий INTEGRAL и *Fermi*

Модель	χ^2/N^a	A	α^b	kT_{bb}, E_c^d кэВ	Поток ^e , 10^{-6} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$
BBR	112.4/140	13.0 ± 0.5^g	—	135 ± 4	4.68 ± 0.48
+					
BBR		152 ± 27^g	—	16.0 ± 1.5	0.13 ± 0.04
CPL	113.3/139	2.58 ± 0.67^h	-1.08 ± 0.02	196 ± 8	6.21 ± 0.50
+					
BBR		160 ± 29^g	—	15.1 ± 1.5	0.11 ± 0.04

^a — Минимальное значение χ^2 и число степеней свободы N .^b — Фотонный индекс степенной компоненты $I_{100} (E/100 \text{ кэВ})^{-\alpha}$.^h — Нормировка этой компоненты I_{100} на 100 кэВ [10^{-2} фот $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$].^g — Радиус излучающей поверхности R_{bb} [км] на расстоянии $d_L = 3.5$ Мпк.^d — Температура kT_{bb} или энергия экспоненциального завала E_c .^e — Коэффициент кросс-нормировки спектра GBM относительно спектра IBIS/ISGRI.

— Поток излучения в диапазоне 10–1000 кэВ.

телескопах, а также с отсутствием послесвечения в мягком рентгеновском диапазоне. Все это свидетельствует в пользу магнитарной версии происхождения всплеска GRB 231115A.

7. Положение GRB 231115A на диаграммах $E_{p,i} - E_{iso}$ и $T_{90,i} - EH$ подтверждает классификацию всплеска как гигантскую вспышку SGR. При типичных для гамма-всплесков типа I длительности ($T_{90,i} = 0.06$ с) и положении максимума в спектре ($E_{p,i} \sim 640$ кэВ), энергия, излученная во время всплеска в гамма-диапазоне $E_{iso} \sim 10^{45}$ эрг, характерна только для гигантских вспышек SGR.

8. Близость родительской галактики всплеска (М 82) предполагает уверенную регистрацию гравитационно-волнового сигнала от слияния нейтронных звезд (причины коротких гамма-всплесков), который, однако, детекторами LIGO/Virgo/KAGRA обнаружен не был. Это является наиболее сильным доводом в пользу магнитарного происхождения всплеска и против возможности его объяснения слиянием пары нейтронных звезд, произошедшим в этой галактике. Существует, правда, очень маленькая вероятность случайного совпадения положения короткого далекого гамма-всплеска с положением этой галактики. Эту вероятность можно оценить как отношение видимой площади $11'.2 \times 4'.3$ галактики М 82 к полной площади неба $p = 11' \times 4' / (4\pi) = 11' \times 4' (\pi/180/60')^2 (4/\pi) \simeq 3 \times 10^{-7}$ или 3 400 000 к 1 в пользу магнитарной версии всплеска. Более консервативная оценка вероятности в пользу магнитарной гипотезы была приведена Бернсом (2023) — он оценил, как 180 000 к 1.

Все вышесказанное, и особенно последние два пункта, позволяет с уверенностью утверждать, что всплеск GRB 231115A и в самом деле был не коротким гамма-всплеском, связанным со слиянием

нейтронных звезд, а гигантской вспышкой ранее неизвестного магнитара в галактике М 82.

ПОТОК ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ SPI-ACS

Детектор INTEGRAL/SPI-ACS записывает скорость счета фотонов только в одном широком энергетическом канале 0.085–10 МэВ с временным разрешением 50 мс. Поскольку исследуемый GRB 231115A имел длительность порядка 100 мс, на рис. 3 его кривая блеска по данным SPI-ACS состоит всего из двух последовательных бинов с общей значимостью около 10 стандартных отклонений. Она заметно проигрывает по информативности кривым блеска, измеренным другими приборами.

В то же время данные детектора SPI-ACS позволяют независимо оценить поток излучения GRB 231115A, используя результаты калибровки детектора SPI-ACS (исследования зависимости его эффективной площади от положения источника относительно ориентации спутника INTEGRAL и жесткости его энергетического спектра), основанной на результатах совместной регистрации большого числа гамма-всплесков в экспериментах INTEGRAL/SPI-ACS и *Fermi*/GBM (Минаев, Позаненко, 2023а).

GRB 231115A зарегистрирован в поле зрения апертурных телескопов INTEGRAL (угол между направлением на источник и центром поля зрения $z = 3.8^\circ$), в этом случае эффективная площадь SPI-ACS близка к минимальному значению. Согласно Минаеву, Позаненко (2023а) коэффициент пересчета инструментальных отсчетов SPI-ACS в энергетические единицы эрг см^{-2} в диапазоне 10–1000 кэВ для гамма-всплеска со спектральной жесткостью $E_p = 640$ кэВ, источник которого

в системе координат детектора имеет координаты $(a, z) = (-109.24, 3.8)$, составляет $k = 5.1 \times 10^{-10}$ эрг см $^{-2}$ отсч $^{-1}$. Интегральный поток от GRB 231115A по данным детектора SPI-ACS составляет $F = 1117 \pm 107$ отсч. или $S = kF = (5.7^{+1.7}_{-1.4}) \times 10^{-7}$ эрг см $^{-2}$ в диапазоне 10–1000 кэВ. В расчёте ошибки потока помимо статистической ошибки измерения также учтена систематическая ошибка метода калибровки (см. детали в работе Минаева, Позаненко, 2023а). Полученное значение в пределах ошибки согласуется с измерением потока излучения в рамках спектрального анализа данных монитора *Fermi*/GBM, $S = (7.25 \pm 0.46) \times 10^{-7}$ эрг см $^{-2}$ (см. соответствующий раздел данной работы).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа основана на данных обсерватории INTEGRAL, полученных через ее Российский и Европейский центры научных данных, и обсерватории *Fermi*, полученных через NASA/HEASARC. ПМ благодарен Комитету по распределению наблюдательного времени (ТАС) обсерватории INTEGRAL за поддержку его заявки в INTEGRAL AO-20 # 2040014, в результате которой получены данные наблюдений GRB 231115A.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы (АП, ИЧ, НП, ПМ и СГ) благодарны Российскому Научному Фонду за финансовую поддержку (грант 23-12-00220).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д’Авансо и др. (P.D’Avanzo, E. Palazzi, S. Campana, M.G. Bernardini, and D.B. Malesani), GRB Coordinates Network Rep. **35036**, 1 (2023a).
2. Д’Авансо и др. (P.D’Avanzo, A. Reguitti, L. Tomasella, E. Cappellaro, M.T. Botticella, F. Onori, L. Tartaglia, F. De Luise, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35077**, 1 (2023b).
3. Амати и др. (L. Amati, F. Frontera, M. Tavani, J.J.M. in’t Zand, A. Antonelli, E. Costa, M. Feroci, C. Guidorzi, et al.), *Astron. Astrophys.* **390**, 81 (2002).
4. Ан и др. (J. An, S.Q. Jiang, X. Liu, S.Y. Fu, Z.P. Zhu, T.H. Lu, D. Xu, and J.Z. Liu), GRB Coordinates Network Rep. **35091**, 1 (2023).
5. Арно и др. (K.A. Arnaud), *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* (Ed.G. Jacoby, J. Barnes), ASP Conf. Ser. **101**, 17 (1996).
6. Ахумада и др. (T. Ahumada, J. Wise, and M. Coughlin), GCN Coordinates Network Rep. **35046**, 1 (2023).
7. Балануца и др. (P. Balanutsa, N. Budnev, O. Gress, A. Sankovich, V. Lipunov, E. Gorbovskey, N. Tiurina, D. Vlasenko, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35046**, 1 (2023).
8. Барко (O. Barco), *MNRAS* **506**, 806, (2021).
9. Барков, Позаненко (M.V. Barkov and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **417**, 2161 (2011).
10. Белкин С.О., Позаненко А.С., Мазаева Е.Д., Вольнова А.А., Минаев П.Ю., Томинага Н., Гребенев С.А., Человеков И.В. и др.), Письма в Астрон. журн. **46**, 839 (2020) [S.O. Belkin, et al., *Astron. Lett.* **46**, 783 (2020)].
11. Белкин и др. (S. Belkin, A.S. Pozanenko, P.Y. Minaev, N.S. Pankov, A.A. Volnova, A. Rossi, G. Stratta, S. Benetti, et al.), *MNRAS* **527**, 11507 (2024).
12. Берджес и др. (J.M. Burgess, J. Greiner, D. Begue, and F. Berlato), *MNRAS* **490**, 927 (2019).
13. Бернс (E. Burns), GRB Coordinates Network Rep. **35038**, 1 (2023).
14. Блинников С.И., Новиков И.Д., Переводчикова Т.В., Полнарёв А.Г., Письма в Астрон. журн. **10**, 422 (1984) [S.I. Blinnikov, et al., *Sov. Astron. Lett.* **10**, 177 (1984)].
15. Ведренн и др. (G. Vedrenne, J.-P. Roques, V. Schönfelder, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L63 (2003).
16. Виллар и др. (V.A. Villar, J. Guillochon, E. Berger, B.D. Metzger, P.S. Cowperthwaite, M. Nicholl, K.D. Alexander, P.K. Blanchard, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **851**, L21 (2017).
17. Винклер и др. (C. Winkler, T.J.L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Giménez, S. Grebenev, W. Hermsen, J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
18. 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).
19. Вольнова и др. (A. Volnova, A. Pozanenko, E. Mazaeva, S. Belkin, I. Molotov, L. Elenin, N. Tungalag, D. Buckley), *Anais da Academia Brasileira de Ciencias. Physical Sciences* **93**, id. 1 (2021).
20. Вусли (S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **405**, 273 (1993).
21. 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).
22. 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).
23. Голенецкий С.В., Мазец Е.П., Ильинский В.Н., Гурьян Я.А., Письма в Астрон. журн. **5**, 636 (1979) [S.V. Golenetskij, et al., *Sov. Astron. Lett.* **5**, 340 (1979)].
24. Голенецкий и др. (S.V. Golenetskii, E.P. Mazets, R.L. Aptekar, V.N. Ilinskii), *Nature* **306**, 451 (1983).

25. Грегфенстетте, Брайтман (B. Grefenstette and M. Brightman), GRB Coordinates Network Rep. **35066**, 1 (2023).
26. 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.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **211**, 12 (2014).
27. Гупта и др. (R. Gupta, S.R. Oates, S.B. Pandey, A.J. Castro-Tirado, J.C. Joshi, Y.-D. Hu, A.F. Valeev, B.B. Zhang, et al.), *MNRAS* **505**, 4086 (2021).
28. Далесси и др. (S. Dalessi, O.J. Roberts, P. Veres, and C. Meegan), GRB Coordinates Network Rep. **35044**, 1 (2023).
29. Дезалай и др. (J.-P. Dezalay, J.-L. Atteia, C. Barat, M. Boer, F. Darracq, P. Goupil, M. Niel, R. Talon, et al.), *Astrophys. J.* **490**, L17 (1997).
30. Дункан, Томпсон (R.C. Duncan and C. Thompson), *Astrophys. J. Lett.* **392**, L9 (1992).
31. Жианг и др. (S.Q. Jiang, X. Liu, S.Y. Fu, J. An, Z.P. Zhu, T.H. Lu, D. Xu, L.F. Huo, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35056**, 1 (2023).
32. Израель 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 (2005).
33. Искандар и др. (A. Iskandar, F. Wang, J. Zhu, L. Wang, X. Zeng, C. Andrade, A. de Ugarte Postigo, D. Akl, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35051**, 1 (2023).
34. Канн и др. (D.A. Kann, S. Klose, B. Zhang, S. Covino, N.R. Butler, D. Malesani, E. Nakar, A.C. Wilson, et al.), *Astrophys. J.* **734**, 96, (2011).
35. Кано и др. (Z. Cano, S.-Q. Wang, Z.-G. Dai, and X.-F. Wu), *Adv. Astron. ID* 8929054 (2017).
36. Картин (A.P. Curtin), GRB Coordinates Network Rep. **35070**, 1 (2023).
37. Коллаборация IceCube (The IceCube Collaboration), GRB Coordinates Network Rep. **35053**, 1 (2023).
38. Коллаборация LIGO и др. (the LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, and the KAGRA Collaboration), GRB Coordinates Network Rep. **35049**, 1 (2023).
39. Коллаборация MAGIC (the MAGIC collaboration), GRB Coordinates Network Rep. **35068**, 1 (2023).
40. Коннатон (V. Connaughton), *Astrophys. J.* **567**, 1028 (2002).
41. 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).
42. Крайдер (A. Crider), arXiv: astro-ph/0601019 (2006).
43. Ксю и др. (W.C. Xue, S.L. Xiong, X.B. Li, and C.K. Li), GRB Coordinates Network Rep. **35060**, 1 (2023).
44. 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).
45. 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 (1999).
46. Кумар и др. (R. Kumar, A. Salgundi, V. Swain, Y. Wagh, V. Bhalerao, G.C. Anupama, S. Barway, R. Norboo, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35041**, 1 (2023a).
47. Кумар и др. (R. Kumar, V. Karambelkar, V. Swain, V. Bhalerao, A. Salgundi, Y. Wagh, G.C. Anupama, S. Barway, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35055**, 1 (2023b).
48. Куулкерс и др. (E. Kuulkers, C. Ferrigno, P. Kretschmar, J. Alfonso-Garzón, M. Baab, A. Bazzano, G. Bélanger, I. Benson, et al.), *New Astron. Rev.* **93**, 01629 (2021).
49. Лабанти и др. (C. Labanti, G. Di Cocco, G. Ferro, F. Gianotti, A. Mauri, E. Rossi, J.B. Stephen, A. Traci, and M. Trifoglio), *Astron. Astrophys.* **411**, L149 (2003).
50. Лебран и др. (F. Lebrun, J.P. Leray, P. Lavoocat, J. Crétolle, M. Arqués, C. Blondel, C. Bonnin, A. Boué, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L141 (2003).
51. Леван и др. (A. Levan, B.P. Gompertz, O.S. Salfia, M. Bulla, E. Burns, K. Hotokezaka, L. Izzo, G.P. Lamb, et al.), arXiv:2307.02098 (2023).
52. Липунов и др. (V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskoy, K. Zhirkov, N. Tyurina, P. Balanutsa, A. Kuznetsov, V. Senik, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35039**, 1 (2023a).
53. Липунов и др. (V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskoy, K. Zhirkov, N. Tyurina, P. Balanutsa, A. Kuznetsov, V. Senik, et al.), GRB Coordinates Network Rep. **35042**, 1 (2023b).
54. Лунд и др. (N. Lund, C. Budtz-Jørgensen, N.J. Westergaard, S. Brandt, I.L. Rasmussen, A. Hornstrup, C.A. Oxborrow, J. Chenevez, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L231 (2003).
55. Мазец Е.П., Голенецкий С.В., Гурьян Я.А., Письма в Астрон. журн. **5**, 641 (1979a) [E.P. Mazets, et al., *Sov. Astron. Lett.* **5**, 343 (1979a)].
56. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golentskii, V.N. Il’inskii, R.L. Aptekar, and Iu.A. Guryan), *Nature* **282**, 587 (1979b).
57. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golenetskii, V.N. Il’inskii, 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).
58. Мазец Е.П., Клайн Т.Л., Аптекар Р.Л. и др., Письма в Астрон. журн. **25**, 727 (1999) [E.P. Mazets, T.L. Cline, R.L. Aptekar, P. Butterworth, S.V. Golenetskii, V.N. Il’inskii, V.D. Pal’shin, and D.D. Frederiks, *Astron. Lett.* **25**, 635 (1999)].

59. Мазец и др. (E.P. Mazets, T.L. Cline, R.L. Aptekar, D.D. Frederiks, S.V. Golenetskii, et al.), arXiv: astro-ph/0502541, (2005).
60. 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).
61. Межарос, Рис (P. Meszaros and M.J. Rees), *Astrophys. J.* **397**, 570 (1992).
62. Межарос (P. Meszaros), *Rep. Progress Phys.* **69**, 2259 (2006).
63. Мерегетти и др. (S. Mereghetti, D. Gotz, C. Ferrigno, E. Bozzo, V. Savchenko, L. Ducci, and J. Borkowski), *GRB Coordinates Network Rep.* **35037**, 1 (2023).
64. Метцгер и др. (B.D. Metzger, E. Quataert, and T.A. Thompson), *MNRAS* **385**, 1455 (2008).
65. Миган и др. (C. Meegan, G. Lichti, P.N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, V. Connaughton, R. Diehl, G. Fishman, et al.), *Astrophys. J.* **702**, 791 (2009).
66. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Лозников В.М., Письма в Астроном. журн. **36**, 744 (2010a) [P. Minaev, A. Pozanenko, and V. Loznikov, *Astron. Lett.* **36**, 707 (2010a)].
67. Минаев и др. (P. Minaev, A. Pozanenko, and V. Loznikov), *Astrophys. Bull.* **65**, 343 (2010b).
68. Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Позаненко А.С., Мольков С.В., Фредерикс Д.Д., Голенецкий С.В., Письма в Астрон. журн. **38**, 687 (2012) [P.Y. Minaev, et al., *Astron. Lett.* **38**, 613 (2012)].
69. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Мольков С.В., Гребенев С.А., Письма в Астрон. журн. **40**, 271 (2014) [P. Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, S.V. Molkov, and S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **40**, 235 (2014)].
70. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Письма в Астрон. журн. **43**, 3 (2017) [P. Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, *Astron. Lett.* **43**, 1 (2017)].
71. Минаев, Позаненко (P. Minaev and A. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2020a).
72. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Письма в Астроном. журн. **46**, 611 (2020b) [P. Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, *Astron. Lett.* **46**, 573 (2020b)].
73. Минаев, Позаненко (P. Minaev and A. Pozanenko), *MNRAS* **504**, 926 (2021).
74. Минаев, Позаненко (P. Minaev and A. Pozanenko), *MNRAS* **525**, 2411 (2023a).
75. Минаев, Позаненко (P. Minaev and A. Pozanenko), *GRB Coordinates Network Rep.* **35059**, 1 (2023b).
76. Митрофанов И.Г., Аттея Ж.Л., Бара К., Ведренн А.Г., Вильчинская А.С., Долидзе В.С., Дьячков А.В., Жордан Е. и др., Письма в Астрон. журн. **16**, 302 (1990) [I.G. Mitrofanov, et al., *Sov. Astron. Lett.* **16**, 129 (1990)].
77. Накар и др. (E. Nakar, A. Gal-Yam, T. Piran, et al.), *astro-ph/05002148* (2005).
78. 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).
79. Норрис и др. (J.P. Norris, N. Gehrels, and J.D. Scargle), *Astrophys. J.* **717**, 411 (2010).
80. Орли и др. (K. Hurley, S.E. Boggs, D.M. Smith, et al.), *Nature* **434**, 1098 (2005).
81. Осборн и др. (J.P. Osborne, B. Sbarufatti, A. D'Ai, A. Melandri, J.D. Gropp, S. Dichiaro, J.A. Kennea, K.L. Page, et al.), *GRB Coordinates Network Rep.* **35064**, 1 (2023).
82. Палмер и др. (D.M. Palmer, S. Barthelmy, N. Gehrels, R.M. Kippen, T. Cayton, et al.), *Nature* **434**, 1107 (2005).
83. Пандей и др. (S.B. Pandey, Y. Hu, A.J. Castro-Tirado, A.S. Pozanenko, R. Sanchez-Ramirez, J. Gorosabel, S. Guziy, M. Jelinek, et al.), *MNRAS* **485**, 5294, (2019).
84. Панков и др. (N. Pankov, A. Pozanenko, V. Kouprianov, and S. Belkin), *Proc. of the XXIII Inter. Conf. DAMDID/RCDL-2021* (Ed.A. Pozanenko, S. Stupnikov, B. Thalheim, E. Mendez, N. Kiselyova, Moscow, Russia, October 26–29, 2021), *CCIS* **1620**, 104 (2022).
85. Пацейсас и др. (W.S. Paciesas, C.A. Meegan, A. von Kienlin, P.N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, J.M. Burgess, V. Chaplin, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, 18 (2012).
86. Пачинский (2005) (B. Paczynski), *Astrophys. J.* **308**, L43 (1986).
87. Пачинский (B. Paczynski), *Astrophys. J. Lett.* **494**, L45 (1998).
88. Перли и др. (D.A. Perley, K.-R. Hinds, J. Wise, V. Karambelkar, T.F. Ahumada, and M.M. Kasliwal), *GRB Coordinates Network Rep.* **35067**, 1 (2023).
89. Позаненко и др. (A. Pozanenko, V. Loznikov, and R. Preece), *Proceedings of the XLth Rencontres de Moriond* (Ed.J. Dumarchez, J.T. Thanh), 253 (2005).
90. 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).
91. Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астроном. журн. **45**, 768 (2019) [A.S. Pozanenko, et al., *Astron. Lett.* **45**, 710 (2019)].
92. Рау и др. (A. Rau, A. von Kienlin, K. Hurley, and G.G. Lichti), *Astron. Astrophys.* **438**, 1175 (2005).
93. Рончини и др. (S. Ronchini, A. Tohuvavohu, J. De-Launay, G. Raman, T. Parsotan, and J.A. Kennea), *GRB Coordinates Network Rep.* **35065**, 1 (2023).
94. Россвог (S. Rosswog), *MNRAS* **376**, L48 (2007).
95. Росси и др., (A. Rossi, B. Rothberg, E. Palazzi, D.A. Kann, P. D'Avanzo, L. Amati, S. Klose, A. Perigo, et al.), *Astrophys. J.* **932**, 1 (2022).

96. Тарнопольский (M. Tarnopolski), *Astrophys. J.* **870**, 105 (2019).
97. Томпсон, Дункан (C. Thompson and R.C. Duncan), *MNRAS* **275**, 255 (1995).
98. Томпсон, Дункан (C. Thompson and R.C. Duncan), *Astrophys. J.* **561**, 980 (2001).
99. Турпин и др. (D. Turpin, W. Thuillot, D. Souami, C. Adami, E. Le Floch, D. Gotz, F. Schussler, A. de Ugarte Postigo, et al.), *GRB Coordinates Network Rep.* **35078**, 1 (2023).
100. Феган и др. (D. Fegan, B. McBreen, D. O'Brien, and C. O'Sullivan), *Nature* **271**, 731 (1978).
101. Фенимор и др. (E.E. Fenimore, J.J.M. in't Zand, J.P. Norris, J.T. Bonnell, and R.J. Nemiroff), *Astrophys. J.* **448**, L101 (1995).
102. Ферочи и др. (M. Feroci, F. Frontera, E. Costa, L. Amati, M. Tavani, M. Rapisarda, and M. Orlandini), *Astrophys. J. Lett.* **515**, L9 (1999).
103. Фонг и др. (W. Fong, E. Berger, R. Margutti, and B.A. Zauderer), *Astrophys. J.* **815**, 2 (2015).
104. Фредерикс Д.Д., Голенецкий С.В., Пальшин В.Д., и др., Письма в Астрон. журн. **33**, 3 (2007a) [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)].
105. Фредерикс Д.Д., Голенецкий С.В., Пальшин В.Д., и др., Письма в Астрон. журн. **33**, 22 (2007a) [D.D. Frederiks, V.D. Palshin, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, T.L. Cline, and E.P. Mazets, *Astron. Lett.* **33**, 19 (2007b)].
106. Фредерикс и др. (D. Frederiks, D. Svinkin, A. Lysenko, A. Ridnaia, Yu. Temiraev, A. Tsvetkova, M. Ulanov, and T. Cline), *GRB Coordinates Network Rep.* **35062**, 1 (2023).
107. Хаккила, Прис (J. Hakkila and R. Preece), *Astrophys. J.* **740**, id. 104 (2011).
108. Хаяцу и др. (S. Hayatsu, N. Higuchi, I. Takahashi, M. Sasada, K.L. Murata, M. Niwano, S. Sato, H. Seki, et al.), *GRB Coordinates Network Rep.* **35057**, 1 (2023).
109. Ху и др. (L. Hu, M. Busmann, D. Gruen, A. Palmese, B. O'Connor, A. Riffeser, A. Shankar, and R. Zoeller), *GRB Coordinates Network Rep.* **35092**, 1 (2023).
110. Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, L. Denneau, P.W. Draper, et al.), *arXiv*, **1612.05560** (2016).
111. Чен и др. (T.-W. Chen, C.-S. Lin, A.J. Levan, S. Schulze, M. Fraser, P. D'Avanzo, J. Lyman (Warwick), Y.-C. Cheng, et al.), *GRB Coordinates Network Rep.* **35052**, 1 (2023).
112. Чеунг и др. (C.C. Cheung, M. Kerr, J.E. Grove, R. Woolf, A. Goldstein, C.A. Wilson-Hodge, and M.S. Briggs), *GRB Coordinates Network Rep.* **35045**, 1 (2023).
113. Шлафли, Финкбайнер (E.F. Schlafly, D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
114. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R.X. Adhikari, V.B. Adya, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L12 (2017a).
115. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R.X. Adhikari, V.B. Adya, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L13 (2017b).