

ХРОМАТИЧЕСКОЕ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB 200829A

© 2023 г. Н. С. Панков^{1,2*}, А. С. Позаненко^{2,1}, П. Ю. Минаев^{2,3},
С. О. Белкин^{1,2}, А. А. Вольнова², И. В. Рева⁴, А. В. Серебрянский⁴,
М. А. Кругов⁴, С. А. Нароенков⁵, А. О. Новичонок⁶, А. А. Жорниченко⁶,
В. В. Румянцев⁷, К. А. Антонюк⁷, Ш. А. Эгамбердиев⁸, О. А. Бурхонов⁸,
Е. В. Клунко⁹, А. С. Москвитин¹⁰, И. Е. Молотов¹¹, Р. Я. Инасаридзе¹²

¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

⁴Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

⁵Институт астрономии РАН, Москва, Россия

⁶Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

⁷Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

⁸Астрономический институт им. Улугбека, Ташкент, Узбекистан

⁹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

¹⁰Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

¹¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

¹²Грузинская национальная астрофизическая обсерватория им. Евгения Харадзе,
Абастумани, Грузия

Поступила в редакцию 23.11.2022 г.

После доработки 20.03.2023 г.; принята к публикации 21.03.2023 г.

Представлены результаты анализа многоволновых наблюдений длинного космического гамма-всплеска GRB 200829A. Красное смещение всплеска $z \approx 1.29 \pm 0.04$ определено фотометрическим методом на стадии послесвечения. В гамма-диапазоне событие является одним из самых ярких (в изотропном эквиваленте) $E_{\text{iso}} \gtrsim 10^{54}$ эрг. Многоцветная кривая блеска послесвечения GRB 200829A характеризуется хроматизмом и наличием плато, плавно переходящего в степенное падение потока, которое можно также интерпретировать как квазисинхронную неоднородность (вспышку). Мы предполагаем, что наличие хроматической неоднородности в послесвечении не противоречит теории структурированного джета.

Ключевые слова: гамма-всплески, послесвечение, фотометрические наблюдения, оптические транзисты.

DOI: 10.31857/S0320010823030051, **EDN:** CRQNJF

ВВЕДЕНИЕ

Космологическая природа гамма-всплесков, предложенная в начале их исследований (Прилуцкий, Усов, 1975; Пачинский, 1986), подтверждена измерением красного смещения. Медианное значение красного смещения для длинных всплесков составляет $z_{\text{med}} = 1.67$ (см., например, Дайгн и др.,

2006; Цветкова и др., 2017, 2021). При этом доля событий с непосредственно измеренным красным смещением, методом оптических спектральных наблюдений составляет $\sim 5\%$ от общего числа событий (Канеко и др., 2006; Бутлер и др., 2007; Лин и др., 2016; фон Кинлин и др., 2020). Известны другие методы оценки z , например, моделирование фотометрических значений послесвечения (Шади и др., 2010), спектральный или фотометрический метод моделирования широкополосных спектров

*Электронный адрес: npankov@hse.ru

родительской галактики (см., например, Вольнова и др., 2014).

Длинные гамма-всплески ассоциируют с коллапсом ядра массивных звезд (Колгейт, 1968; Бисноватый-Коган и др., 1975; Вусли, 1993; Пачинский, 1998) и у $\sim 10\%$ событий, как правило, обнаруживают сверхновую (СН), например, SN 1998bw, SN 2003dh, SN 2013dx и GRB 181201A (Ванг и др., 1998; Вусли и др., 1999; Маццали и др., 2003; Вольнова и др., 2017; Белкин и др., 2020). Однако обнаружить сверхновую у гамма-всплесков на $z \gtrsim 1$ сложно, так как она становится слишком тусклой. Самая далекая сверхновая от гамма-всплесков зарегистрирована у GRB 000911 на $z = 1.06$ (Лаццати и др., 2003; Мазетти и др. 2005).

Хроматизм кривых блеска послесвечения в оптическом и рентгеновском диапазонах, обнаруженный, например, для GRB 050525A (Оатес и др., 2011; Ресми и др., 2012), GRB 130831A (де Паскуаль и др., 2016), не объясняется стандартной моделью послесвечения (Сари и др., 1999; Пиран, 2004; Кумар, Жанг, 2015). Кривая блеска послесвечения в стандартной модели монотонно (степенным образом с показателем, близким к единице) и синхронно падает в оптическом и рентгеновском диапазонах. Хроматизм объясняют, например, с помощью модели структурированного джета, в которой излучение в оптическом и рентгеновском диапазонах одновременно наблюдается из разных областей джета с различным лоренц-фактором (Бениамини и др., 2020; Ламб и др., 2021; Дюке и др., 2022). Возможность существования структурированного джета была показана в численных расчетах (см., например, Комиссаров и др., 2009).

При этом вспышка в рентгеновском диапазоне может повторять вспышку в активной фазе всплеска, но с меньшей амплитудой и энергией (Дюке и др., 2022). Наличие плато на кривой блеска также связывают с небольшим начальным лоренц-фактором джета ($\langle \Gamma_0 \rangle \sim 51$, см. Дерели и др., 2022) или формированием магнитара с магнитным полем $B \sim 10^{15} - 10^{16}$ Г (де Паскуаль и др., 2007; Мещер и др., 2011; Роулинсон и др., 2011). Корреляция между длительностью рентгеновского плато и светимостью всплесков в рентгеновском диапазоне найдена в работах (Дайнутти и др., 2008, 2021, 2022).

Эволюцию представлений о гамма-всплесках и актуальные обзоры можно найти, например, в работах (Розенталь и др., 1983; Лучков и др., 1996; Постнов, 1999; Леван и др., 2018; Позаненко и др., 2021; Ю и др., 2022).

Начало массовому исследованию гамма-всплесков в гамма-, рентгеновском и оптическом диапазонах положила обсерватория Swift (Хилл и др., 2006). GRB 200829A — один из

ярких гамма-всплесков, зарегистрированных этой обсерваторией. Многоволновая кривая блеска раннего послесвечения данного всплеска имеет две неоднородности: плато и хроматическую вспышку. Плато может быть связано с образованием неустойчивого магнитара с сильным магнитным полем. Хроматизм вспышки, вероятно, возникает при наблюдении разных зон джета в рентгеновском и оптическом диапазонах, ближе и дальше от оси джета соответственно.

Статья организована следующим образом. Сначала приведены результаты наблюдений космических обсерваторий, в которых был обнаружен гамма-всплеск, а также первых наземных наблюдений его оптического послесвечения. Далее представлены результаты обработки данных, полученных космическими гамма-телескопами в активной фазе всплеска. GRB 200829A — один из самых мощных в предположении изотропного излучения гамма-всплесков в диапазоне 1 кэВ–10 МэВ. В следующем разделе исследованы данные наблюдений послесвечения в оптическом и рентгеновском диапазонах, и построены кривые блеска. Их совместный анализ показал наличие плато и хроматической неоднородности в раннем послесвечении. Затем приведены процедура и оценка красного смещения, полученная с помощью моделирования многоцветных данных раннего послесвечения в оптическом и рентгеновском диапазонах. Оценка красного смещения GRB 200829A составила $z = 1.29 \pm 0.04$. Далее следуют результаты обнаружения и анализа наблюдений родительской галактики. Получены оценки параметров поглощения, темпа звездообразования и массы родительской галактики GRB 200829A, не противоречащие параметрам других родительских галактик длинных гамма-всплесков. В следующем разделе приведены результаты анализа хроматической неоднородности и плато на кривой блеска. Оценки физических параметров не противоречат теории структурированного джета (Бениамини и др., 2020; Ламб и др., 2021; Дюке и др., 2022) как причины хроматизма. Момент окончания плато и изотропная энергия в диапазоне 0.3–10 кэВ находятся в согласии с корреляцией, представленной Дайнутти и др. (2008, 2021, 2022). В заключительном разделе систематизированы результаты наблюдений и их анализа.

Фотометрическое расстояние D_L в данной работе вычислено с использованием Λ CDM модели Вселенной со следующими космологическими параметрами: $H_0 = 69.6 \pm 0.7$ км с⁻¹ Мпк⁻¹, $\Omega_m = 0.286 \pm 0.008$, $\Omega_\Lambda = 0.714 \pm 0.008$ (Беннетт и др., 2014). Статистические ошибки приведены на уровне значимости 1σ (66.7%), если не сказано иное.

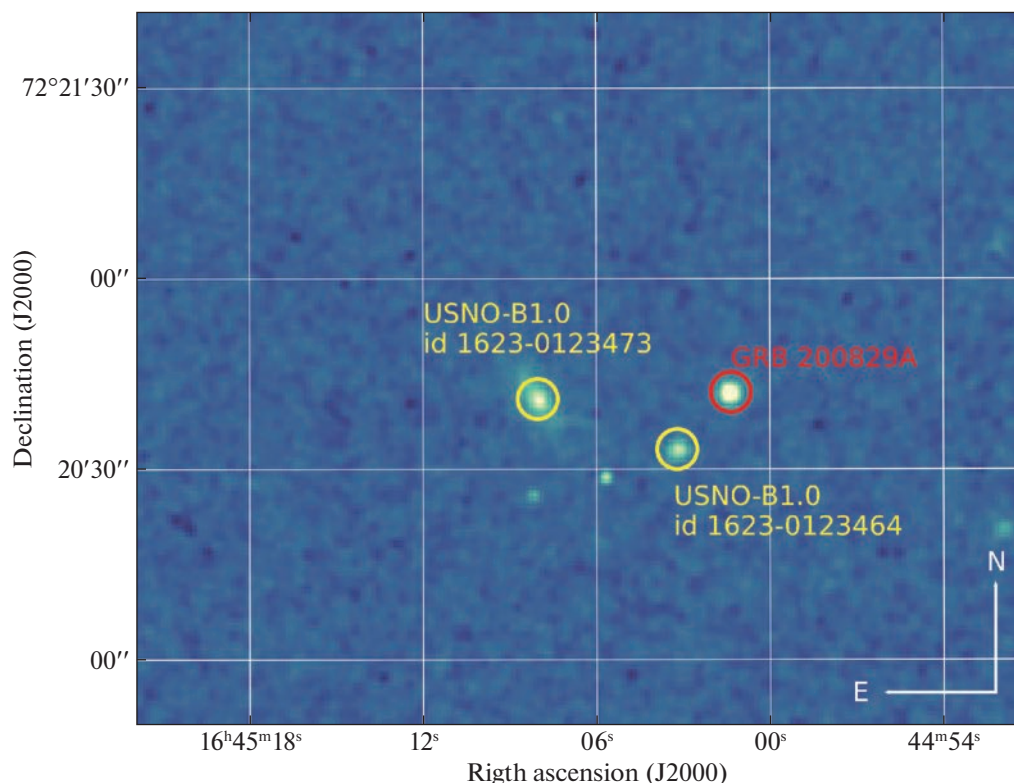


Рис. 1. Изображение поля GRB 200829A (выделен красным кружком), полученное ТШАО Цейсс-1000 29 августа 2020 г. в 14:49:05 UT. Каталогизированные объекты USNO-B1.0 обозначены желтыми кружками и подписаны на рисунке. На изображении север вверху, восток — слева.

НАБЛЮДЕНИЯ

Регистрация и первые наблюдения

GRB 200829A зарегистрирован как яркий гамма-всплеск длительностью ~ 30 с инструментом BAT на борту космической обсерватории Swift, сообщение о регистрации было разослано через систему автоматического оповещения GCN/TAN (Сигель и др., 2020).

Обсерваторией Swift был обнаружен и рентгеновский компонент GRB 200829A с помощью телескопа XRT (0.3–10 кэВ). Рентгеновский источник был найден 29 августа 2020 г. в 14:01:43.1 UT, т.е. через 128.7 с после триггера BAT в $27'$ от центра области локализации гамма-компонента (Сигель и др., 2020, Гоад и др., 2020).

Практически сразу после XRT поле GRB 200829A начал наблюдать ультрафиолетовый/оптический телескоп UVOT/Swift. Он обнаружил яркое оптическое послесвечение с блеском $white = 14.28 \pm 0.14$ (Сигель и др., 2020) в координатах (J2000) R.A. = 16:44:49.14, Dec. = $+72:19:45.63$ со статистической ошибкой $\pm 0.35''$ (на уровне 90%, Куин и др., 2020). В последующих

наблюдениях UVOT источник продолжил затухать (Куин и др., 2020).

Наземные наблюдения

Наземные оптические наблюдения затухающего послесвечения GRB 200829A начались через ~ 1 ч после триггера BAT (Позаненко и др., 2020) на 1-м телескопе Цейсс-1000 Тянь-Шаньской астрономической обсерватории (ТШАО), входящей в сеть GRB-IKI-FuN (Вольнова и др., 2021). Через час после триггера блеск источника составил $R = 16.8 \pm 0.1$ на единичном изображении (рис. 1) с экспозицией 60 с.

Наблюдения в течение 2.83 ч, начиная с 2022-09-28 14:49:05 UT, на телескопе Цейсс-1000 в ТШАО позволили построить детальную кривую блеска с временным разрешением около 60 с в фильтре R . Дополнительно использованы другие инструменты сети GRB-IKI-FuN для наблюдения затухающего послесвечения. Так, наблюдения телескопом RC-36 обсерватории Китаб проводились без фильтра квазисинхронно с ТШАО. Начиная с 2020-08-29 17:25 UT, к наблюдениям присоединились телескопы на Крымском полуострове: Цейсс-1000 в обсерватории на г. Кошка в фильтрах R и

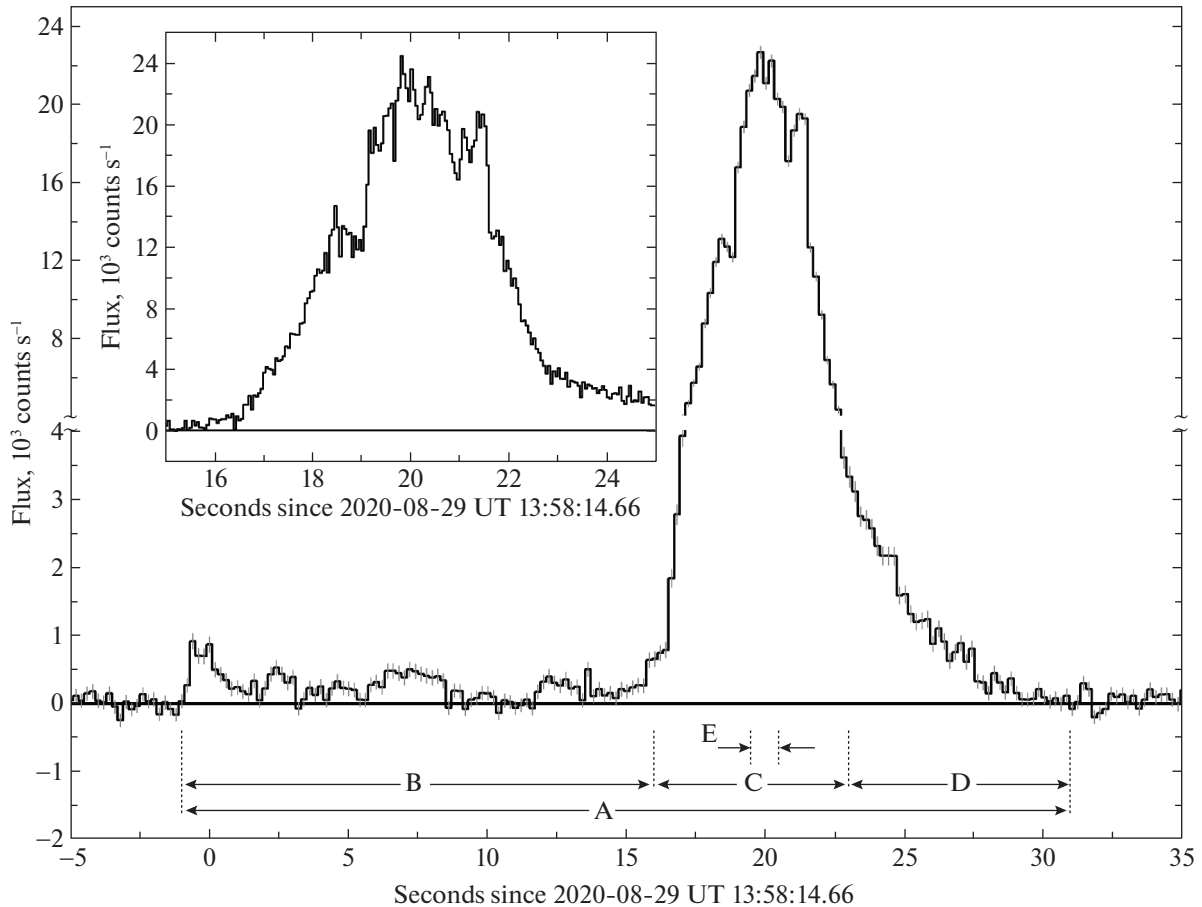


Рис. 2. Кривая блеска GRB 200829A в энергетическом диапазоне 7–850 кэВ с временным разрешением 0.5 с (по данным GBM/Fermi). По вертикальной оси — наблюдаемый поток, выраженный в количестве отсчетов за 1 с за вычетом модели фона, по горизонтальной оси — время относительно срабатывания триггера GBM/Fermi, выраженное в секундах. Ошибки значений потока показаны на уровне 1σ . Вертикальные пунктирные линии отражают границы интервалов, использованных в спектральном анализе (см. табл. 1). На врезке — кривая блеска основного эпизода с временным разрешением 0.05 с.

I, АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории (КраО) в фильтре *R*. Благодаря скоординированной работе нескольких телескопов построена подробная кривая блеска за 12 ч наблюдений. Через сутки после триггера оптический транзистент наблюдался телескопом AS-32 Абастуманской астрофизической обсерватории (АбАО) в фильтре *R* и телескопами Цейсс-1000 (г. Кошка и САО РАН в фильтрах *R*, *I*). А также получены верхние пределы на третьи и пятые сутки в наблюдениях телескопом АЗТ-ЗЗИК обсерватории ИСЗФ СО РАН (пос. Монды) в фильтре *R*. Когда послесвечение уже не могло наблюдаться другими телескопами вследствие падения блеска источника $R \gtrsim 22.5$, использован АЗТ-22 Майданакской астрономической обсерватории (МАО). МАО расположена в уникальном климатическом регионе, благодаря чему качество изображения (угловое разрешение)

здесь достигает $0''.7$. Всего было получено четыре глубоких верхних предела в фильтре *R*: три в период с 13 до 45 сут после всплеска.

АКТИВНАЯ ФАЗА (ГАММА-ДИАПАЗОН)

Анализ данных GBM/Fermi

В анализе GRB 200829A мы использовали общедоступные данные эксперимента Fermi GBM¹.

Кривая блеска. Кривая блеска в энергетическом диапазоне 7–850 кэВ, построенная по данным наиболее освещенных источником GRB 200829A детекторов NaI₀₄ и NaI₀₈ эксперимента GBM/Fermi, представлена на рис. 2. Кривую блеска можно условно разделить на два эпизода

¹<http://legacy.gsfc.nasa.gov/fermi/data/>

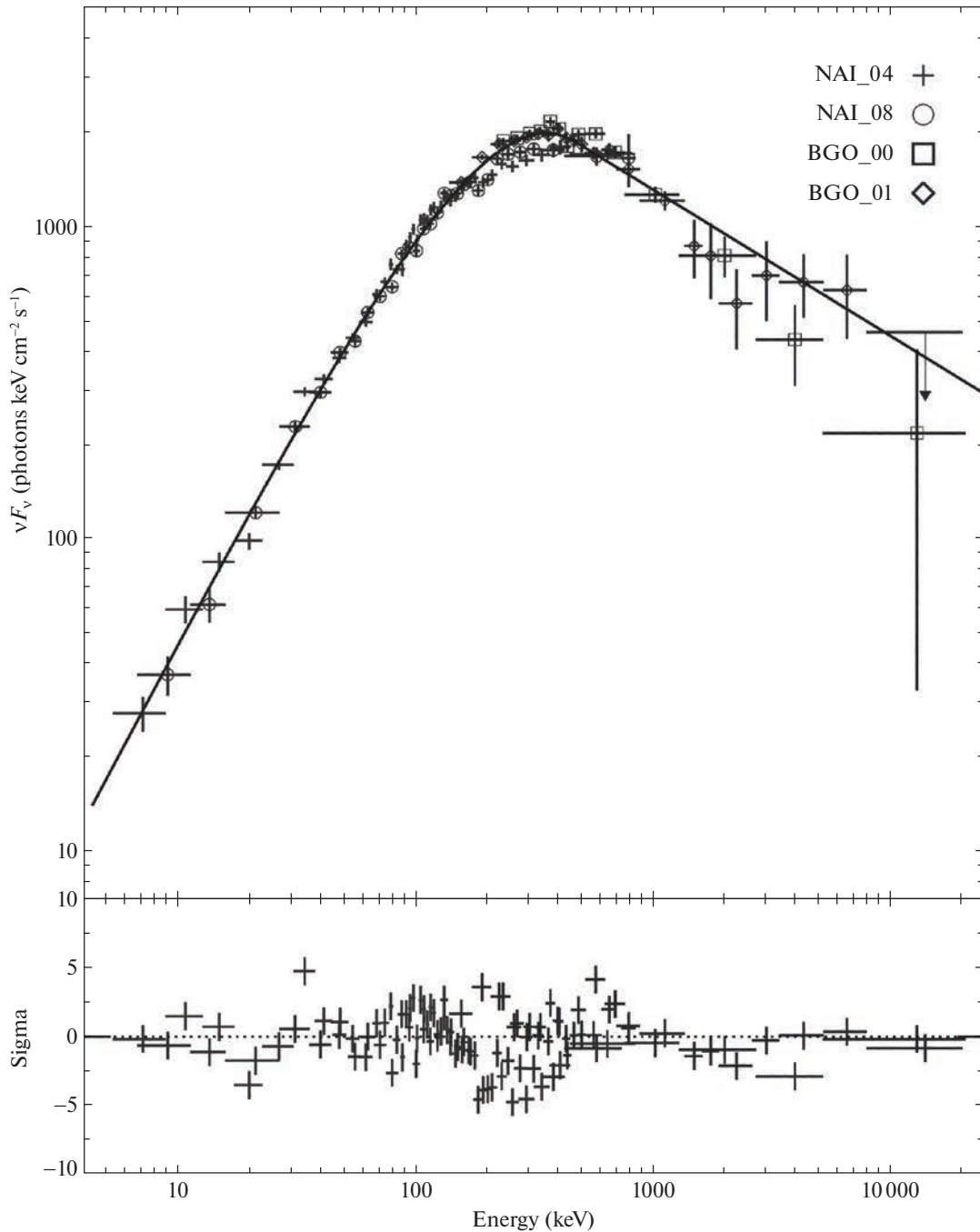


Рис. 3. Энергетический спектр νF_ν гамма-всплеска GRB 200829A, построенный по данным детекторов NaI₀₄, NaI₀₈, BGO₀₀, BGO₀₁ эксперимента GBM/Fermi во временном интервале $A = (-1, 31)$ с относительно триггера, охватывающий активную фазу гамма-всплеска (верхняя часть рисунка). Гладкой кривой показана аппроксимация спектра степенной моделью с изломом (Бэнд и др., 1993). В нижней части — отклонение спектральной модели от экспериментальных данных, выраженное в единицах стандартных отклонений.

активности примерно равной длительности — тусклый начальный и основной яркий. Общая длительность гамма-излучения GRB 200829A в эксперименте GBM/Fermi составляет более 30 с, при этом формальные параметры длительности $T_{90} = 8.4 \pm 0.1$ с и $T_{50} = 2.5 \pm 0.1$ с (Кошут и др., 1996) охватывают лишь наиболее яркую

часть основного эпизода. Полученные значения характеризуют GRB 200829A как длинный всплеск (тип II, коллапсар) (см., например, Коувелитоу и др., 1993; Минаев и др., 2010б; Минаев, Позаненко, 2017).

Как видно на рис. 2, и начальный, и основной эпизоды всплеска имеют сложную структуру, состоящую из большого числа перекрываю-

Таблица 1. Результаты спектрального анализа GRB 200829A в гамма-диапазоне по данным GBM/Fermi

Интервал (с) ^a	Спектр. модель ^b	α	β	E_p^c , кэВ	Fluence ^d , 10 ⁻⁵ эрг см ⁻²	E_{iso}^e , 10 ⁵³ эрг	EH^f
A = (-1, 31)	Band	-0.552 ± 0.014	-2.468 ± 0.026	357 ± 5	22.17 ± 0.08	13.02 ± 0.13	0.45
B = (-1, 16)	CPL	-1.23 ± 0.10	—	249 ± 37	0.68 ± 0.04	0.323 ± 0.025	1.42
C = (16, 23)	Band	-0.392 ± 0.013	-2.477 ± 0.016	363 ± 4	20.55 ± 0.06	12.16 ± 0.08	0.47
D = (23, 31)	Band	-0.89 ± 0.10	-2.30 ± 0.09	136 ± 13	1.189 ± 0.026	0.66 ± 0.04	0.57
E = (19.5, 20.5)	Band	-0.333 ± 0.023	-2.288 ± 0.020	393 ± 8	6.011 ± 0.033	3.88 ± 0.04	0.79

^a Временной интервал относительно времени срабатывания триггера GBM/Fermi.

^b CPL — степенная модель с экспоненциальным завалом, Band — степенная модель с изломом (Бэнд и др., 1993).

^d Энергетический поток в диапазоне (10, 1000) кэВ в системе наблюдателя.

^e Изотропный эквивалент полной энергии в диапазоне (1, 10 000) кэВ в системе источника ($z = 1.29 \pm 0.04$, см. далее).

^f Классификационный параметр EH (формула (2)).

щихся импульсов, параметры которых в связи с этим восстановить не представляется возможным. Вследствие эффекта суперпозиции импульсов анализ спектральной эволюции методом кросс-корреляционного анализа для этого всплеска лишен смысла (см., например, Минаев и др., 2014).

Спектральный анализ. Для построения и аппроксимации энергетических спектров использовался программный пакет RMfit v4.3.2, специально разработанный для анализа данных GBM обсерватории Fermi². Методика спектрального анализа, в том числе выбор оптимальной спектральной модели, аналогична использованной в работе (Грубер и др., 2014). Энергетические спектры анализировались по данным наиболее освещенных детекторов NaI₀₄, NaI₀₈, BGO₀₀, BGO₀₁.

Мы проанализировали энергетический спектр GRB 200829A в пяти различных временных интервалах (рис. 2). Интервал A соответствует интегральному спектру события, интервал B — начальному тусклому эпизоду, C — основной части основного эпизода, D — стадии затухания основного эпизода, E — области максимума в кривой блеска (пиковый поток на масштабе 1 с).

Энергетический спектр всех исследованных компонентов GRB 200829A неудовлетворительно описывается как простой степенной моделью, так и тепловой моделью, оптимальная модель — степенная с экспоненциальным завалом (CPL) или степенная с изломом (Бэнд и др., 1993). Результаты спектрального анализа (параметры оптимальных спектральных моделей) представлены в табл. 1.

На рис. 3 в качестве примера показан интегральный энергетический спектр, аппроксимированный степенной моделью с изломом (Бэнд и др., 1993) и параметром $E_p = 357 \pm 5$ кэВ, характеризующим положение максимума в энергетическом спектре νF_ν . Полученные значения параметров энергетического спектра для всех исследованных компонентов кривой блеска являются типичными для гамма-всплесков (см., например, Грубер и др., 2014). На рис. 3 видно, что разброс точек относительно модели является достаточно большим. Это, по-видимому, связано со систематическими эффектами (например, неточные матрицы отклика и кросс-калибровка детекторов), возникающими при восстановлении фотонного спектра программным пакетом RMfit v4.3.2.

Корреляция $E_{p,i} - E_{\text{iso}}$. Гамма-всплески характеризуются множеством корреляций между различными наблюдаемыми параметрами. Одна из наиболее известных связывает изотропный эквивалент полной энергии, выделившейся в энергетическом диапазоне 1 кэВ–10 МэВ, E_{iso} , с положением экстремума (максимума) в энергетическом спектре νF_ν в системе источника всплеска, $E_{p,i}$ (Амати и др., 2002). Природа корреляции до сих пор является предметом обсуждения. Одно из возможных объяснений подразумевает эффекты угла зрения: чем меньше угол между линией источник-наблюдатель и осью джета, тем более ярким и спектрально жестким будет гамма-всплеск (Эйхлер, Левинсон, 2004; Левинсон, Эйхлер, 2005; Позаненко и др., 2018).

Параметр E_{iso} вычисляется по формуле (1), где F — флюенс (интегральный по времени поток)

²<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/rmfit/>

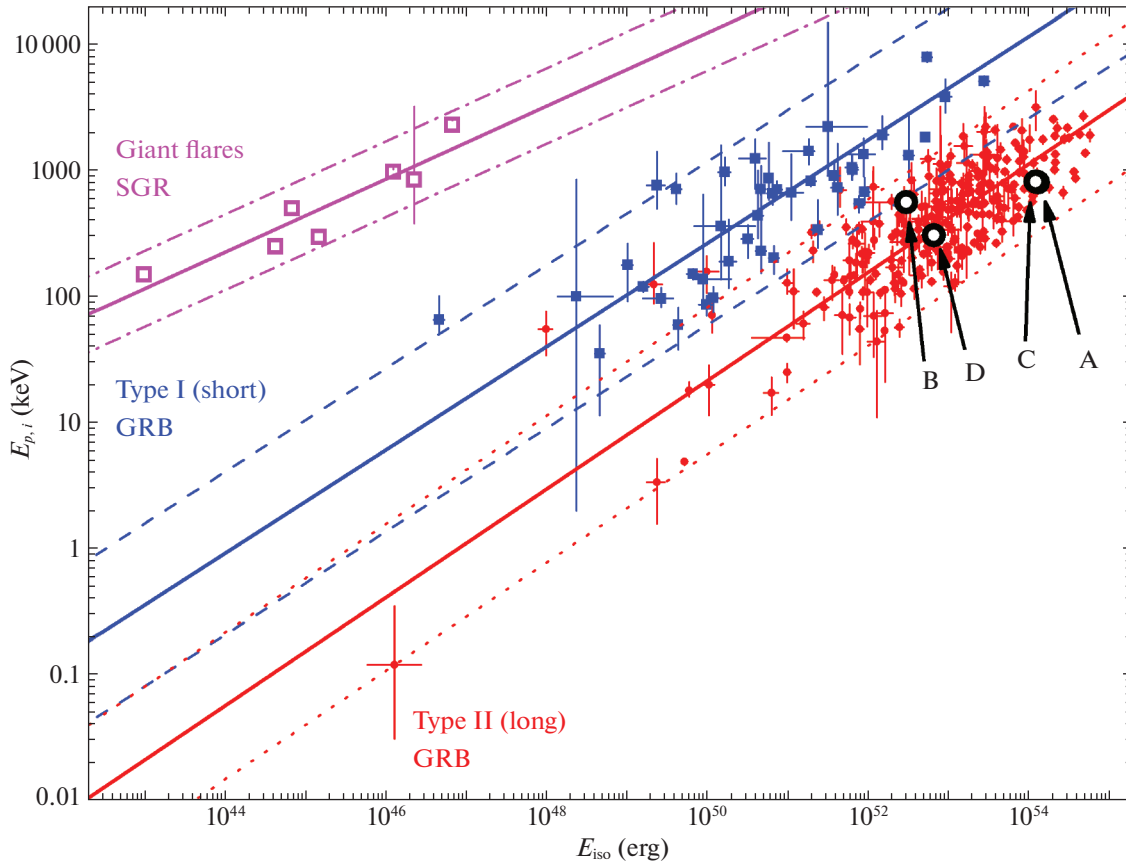


Рис. 4. Диаграмма $E_{p,i}-E_{iso}$ для гамма-всплесков типа I (синие квадраты), типа II (красные кружки), а также гигантских вспышек источников SGR (розовые незаполненные квадраты) с соответствующими результатами аппроксимации (сплошные линии), а также 2σ областями корреляции (штриховые линии). Черными незаполненными кружками показано положение GRB 200829A и его отдельных эпизодов (см. табл. 1).

в диапазоне 1 кэВ–10 МэВ в системе источника всплеска, D_L —фотометрическое расстояние до источника, z —его красное смещение. Соответствующие значения параметра E_{iso} для гамма-всплеска GRB 200829A были вычислены с использованием значения красного смещения $z = 1.29 \pm 0.04$ и указаны в табл. 1. Для оценки флюенса в диапазоне 1 кэВ–10 МэВ использовалась экстраполяция спектральной модели в области низких энергий (ниже 6 кэВ в системе наблюдателя)

$$E_{iso} = \frac{4\pi D_L^2 F}{1+z}. \quad (1)$$

На рис. 4 представлена диаграмма $E_{p,i}-E_{iso}$ для одной из наиболее полных выборок из 317 гамма-всплесков с известным красным смещением и определенным параметром $E_{p,i}$, опубликованной в работах (Минаев, Позаненко, 2020б, 2021), а также для 7 гигантских вспышек источников мягкого повторяющегося гамма-излучения (SGR), корреляция $E_{p,i}-E_{iso}$ для которых была

впервые обнаружена в работе (Минаев, Позаненко, 2020а).

Гамма-всплеск GRB 200829A занимает на диаграмме $E_{p,i}-E_{iso}$ типичное для длинных (тип II) гамма-всплесков положение, будучи при этом одним из наиболее ярких всплесков с $E_{iso} > 10^{54}$ эрг. Отдельные эпизоды всплеска также расположены в области корреляции длинных всплесков.

Диаграмма $T_{90,i}-EH$. Корреляция $E_{p,i}-E_{iso}$ может быть также использована для классификации гамма-всплесков, поскольку область корреляции гамма-всплесков типа I (коротких) находится выше области корреляции всплесков типа II (длинных), при этом корреляция для обоих типов гамма-всплесков описывается степенным законом с единым показателем степени $\alpha = -0.4$ (Минаев, Позаненко, 2020а,б). Для этой цели в работе (Минаев, Позаненко, 2020б) введен параметр EH (формула (2)), характеризующий положение гамма-всплеска на диаграмме $E_{p,i}-E_{iso}$. Гамма-всплески типа I по сравнению с гамма-всплесками

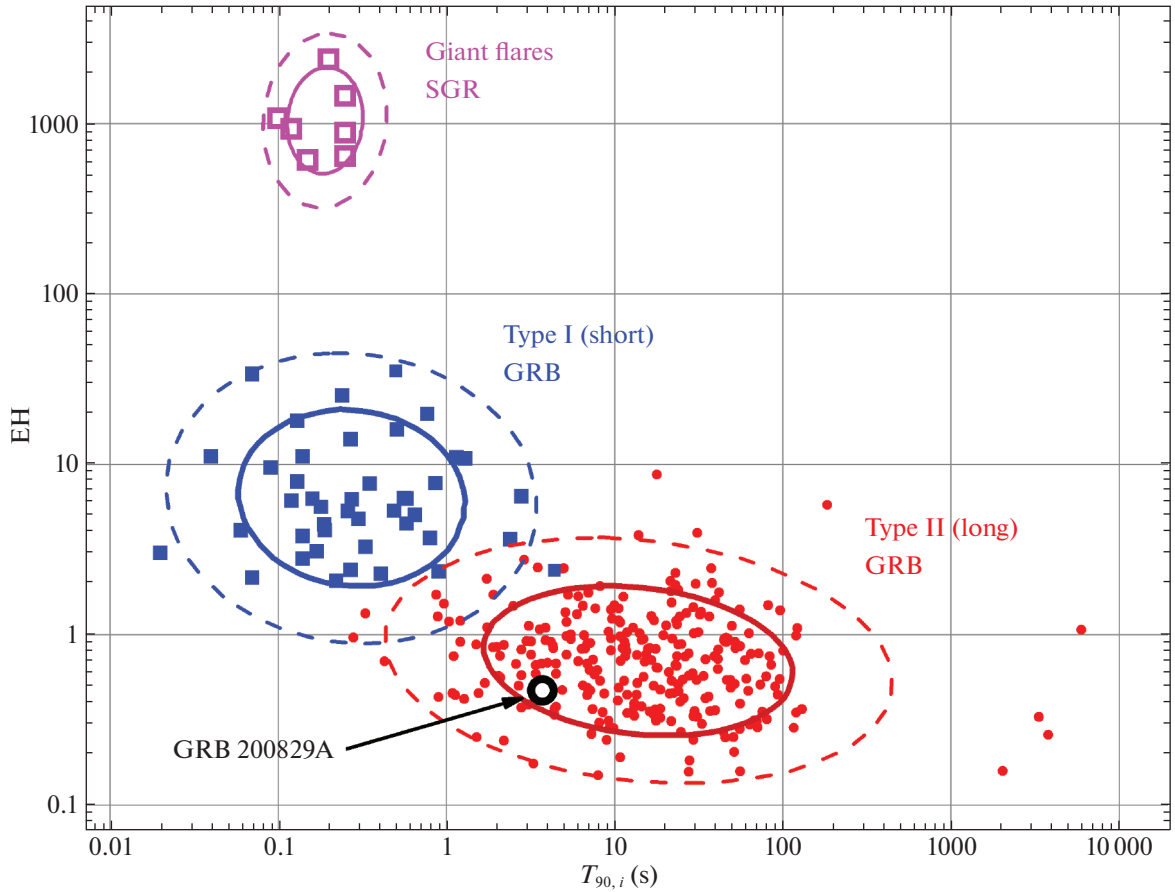


Рис. 5. Диаграмма $T_{90,i}$ – EH для гамма-всплесков типа I (синие квадраты), типа II (красные кружки) и гигантских вспышек SGR (розовые незаполненные квадраты) с соответствующими результатами кластерного анализа (1σ и 2σ области кластеров показаны жирными сплошными и тонкими штриховыми кривыми). Черным незаполненным кружком показано положение GRB 200829A.

типа II обладают большей жесткостью спектра $E_{p,i}$ при меньшем значении полной энергии E_{iso} , и, как следствие, большим значением параметра EH :

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

Наиболее эффективный метод классификации гамма-всплесков предполагает совместный анализ параметра EH и параметра длительности $T_{90,i}$, измеренного в системе отсчета источника (Минаев, Позаненко, 2020а,б, 2021). На рис. 5 представлена диаграмма $T_{90,i}$ – EH для 317 гамма-всплесков и 7 гигантских вспышек SGR из работ (Минаев, Позаненко, 2020а,б, 2021), которая обеспечивает наилучшее разделение на кластеры соответствующих типов транзиентов (наименьшую область пересечения) среди известных систем классификации.

Исследуемый гамма-всплеск GRB 200829A находится внутри 1σ области кластера вспышек типа II (длинных), хотя и имеет относительно небольшое значение параметра длительности $T_{90,i} = 3.7$ с,

соответствующего области пересечения распределений по длительности для классов длинных и коротких вспышек, подчеркивая устойчивость системы классификации методом диаграммы $T_{90,i}$ – EH . Значение параметра EH для GRB 200829A и его отдельных эпизодов указано в табл. 1.

Анализ данных BAT/Swift

Как было показано выше, GRB 200829A характеризуется достаточно жестким энергетическим спектром со значением параметра $E_p > 350$ кэВ, находящимся за пределами эффективного диапазона чувствительности телескопа BAT/Swift, составляющего (15, 150) кэВ. Поэтому в данном разделе, посвященном анализу вспышки по данным BAT/Swift, мы ограничились исследованием лишь его кривой блеска.

В качестве источника данных использован об-

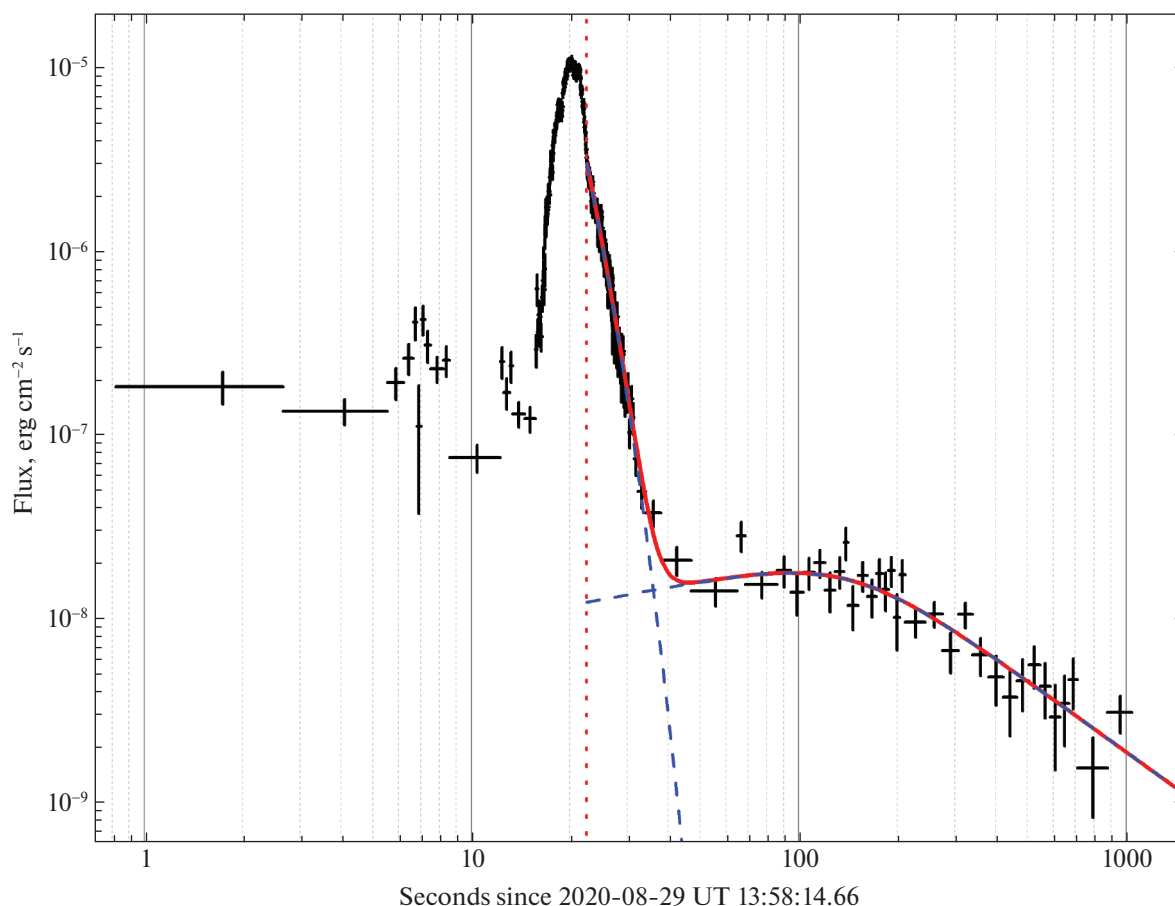


Рис. 6. Кривая блеска GRB 200829A в энергетическом диапазоне 15–50 кэВ (по данным BAT/Swift). По вертикальной оси — энергетический поток, выраженный в эрг см^{−2} с^{−1}, по горизонтальной оси — время относительно срабатывания триггера GBM/Fermi, выраженное в секундах. Ошибки значений потока показаны на уровне 1σ . Кривая блеска аппроксимирована суммой экспоненциальной модели и степенной модели с изломом (синие штриховые линии). Красная сплошная кривая представляет собой их сумму, вертикальная красная пунктирная прямая — начало временного интервала, в котором произведена аппроксимация.

щедоступный сервис³. Хотя момент срабатывания триггера в эксперименте BAT/Swift отличается на 79.74 с от срабатывания в GBM/Fermi, в качестве времени триггера T_0 мы будем использовать момент срабатывания последнего, поскольку он лучше соответствует моменту начала активной фазы всплеска (рис. 2).

Кривая блеска, построенная в энергетическом диапазоне 15–50 кэВ, представлена на рис. 6. После бинирования кривой блеска по методу накопления сигнала до достижения определенного уровня статистической значимости мы обнаружили слабое, но статистически достоверное продленное излучение длительностью около 1000 с, представляющее собой отдельный компонент кривой блеска.

Кривые блеска отдельных импульсов активной фазы гамма-всплесков обычно характеризуются так называемой FRED-формой (от англ. Fast Rise — Exponential Decay, см., например, Норрис и др., 2005; Хаккила, Прис, 2011; Минаев и др., 2014). Кривая блеска GRB 200829A имеет сложную форму и представляет собой суперпозицию нескольких значительно перекрывающихся FRED-импульсов, что затрудняет аппроксимацию кривой блеска всей активной фазы. Поэтому при совместной аппроксимации компоненту активной фазы и продленного излучения мы использовали лишь стадию затухания последнего импульса активной фазы, для описания которой воспользовались экспоненциальной моделью.

Кривая блеска продленного излучения характеризуется начальной стадией квазиплато с дальнейшим степенным падением потока. Для описания

³https://www.swift.ac.uk/burst_analyser/

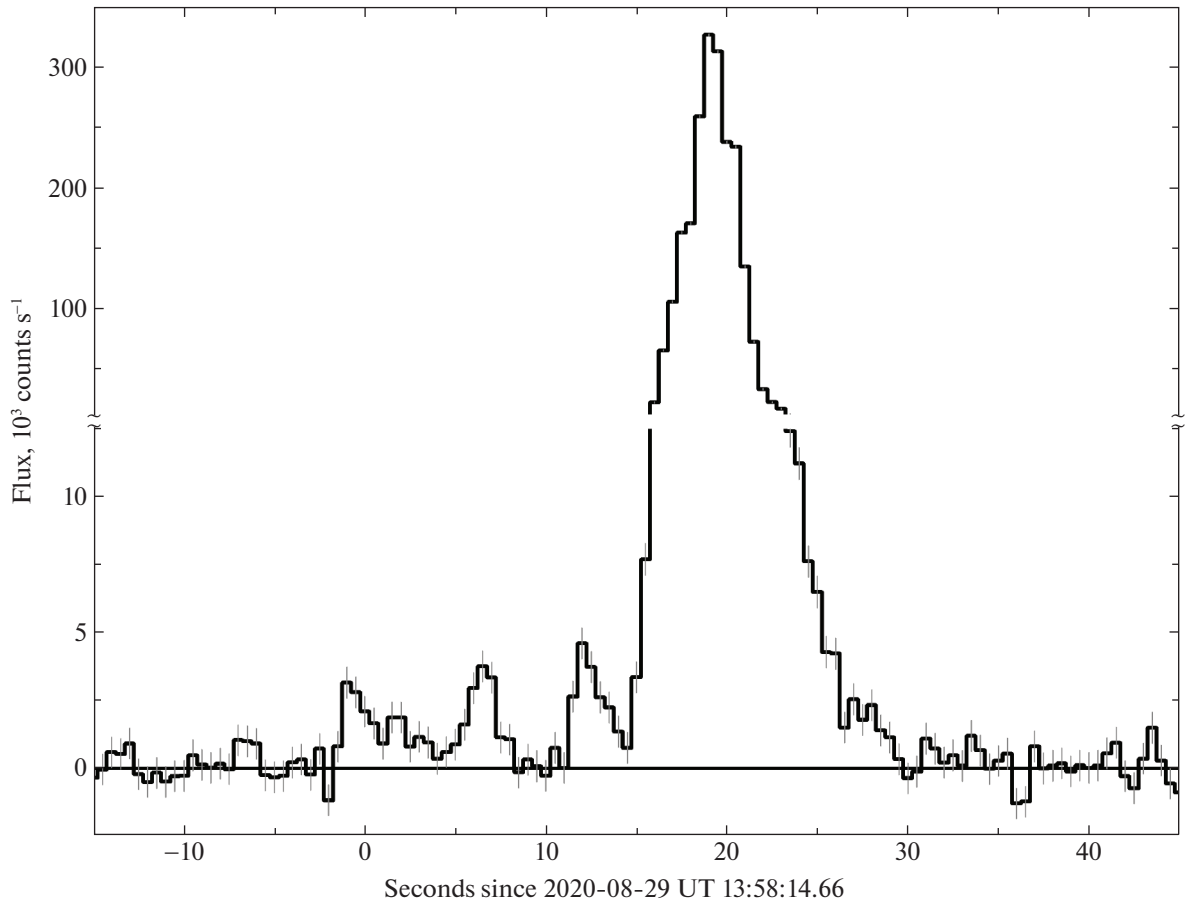


Рис. 7. Кривая блеска GRB 200829A в энергетическом диапазоне выше 80 кэВ с временным разрешением 0.5 с (по данным SPI-ACS/INTEGRAL). По вертикальной оси — наблюдаемый поток, выраженный в количестве отсчетов за 1 с за вычетом модели фона, по горизонтальной оси — время относительно срабатывания триггера GBM/Fermi, выраженное в секундах. Ошибки значений потока показаны на уровне 1σ .

этой компоненты кривой блеска мы использовали степенную модель с изломом (Бауэрман и др., 1999).

Результаты совместной аппроксимации стадии затухания активной фазы и компоненты продленного излучения указанными моделями представлены на рис. 6. На начальном этапе показатель степени кривой блеска продленного излучения составляет $\alpha = 0.34 \pm 0.27$, что не исключает стадию плато ($\alpha = 0$), излом в кривой блеска наблюдается в момент $t_{br} = 143 \pm 38$ с, а показатель степени после излома — $\beta = -1.28 \pm 0.18$. Показатель степени после излома близок к типичному для послесвечения значению ($\beta \simeq -1$), что указывает на связь компоненты продленного излучения с послесвечением, что характерно для ярких гамма-всплесков (см., например, Мозгунов и др., 2021). В дальнейшем анализе рентгеновских и оптических данных эта интерпретация будет подтверждена.

Анализ данных SPI-ACS/INTEGRAL

Гамма-всплеск GRB 200829A был также зарегистрирован антисовпадательной защитой ACS гамма-спектрометра SPI на борту обсерватории INTEGRAL (фон Кинлин и др., 2003).

Кривая блеска GRB 200829A в энергетическом диапазоне выше 80 кэВ, с временным разрешением 0.5 с, построенная по данным SPI-ACS/INTEGRAL⁴, представлена на рис. 7. Несмотря на спокойную фоновую обстановку во временном интервале -5000 – 5000 с вокруг гамма-всплеска, характерную для детектора SPI-ACS (Минаев и др., 2010а; Мозгунов и др., 2021), продленное излучение на SPI-ACS/INTEGRAL обнаружено не было, хотя зарегистрировано экспериментом BAT/Swift с большой достоверностью. Это, вероятно, связано с относительно

⁴<http://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacs-ipn1c.pl>

мягким энергетическим спектром (малой долей высокоэнергетического излучения) этой компоненты и высоким нижним порогом чувствительности детектора ACS (80 кэВ). Возможный предвсплеск (Минаев, Позаненко, 2017) также не был обнаружен.

Хотя несколько тусклых эпизодов общей длительностью около 15 с, с которых начинается активная фаза всплеска, и зарегистрированы в эксперименте SPI-ACS (рис. 7), параметры длительности T_{90} и T_{50} охватывают лишь главный яркий эпизод и составляют $T_{90} = 5.5 \pm 0.1$ с и $T_{50} = 2.1 \pm 0.1$ с, подтверждая классификацию этого всплеска как тип II — длинный.

Проинтегрированный по времени поток от GRB 200829A по данным SPI-ACS/INTEGRAL составил $F = (115.3 \pm 0.3) \times 10^4$ отсч. Используя кросс-калибровку экспериментов SPI-ACS и GBM, полученную для гамма-всплесков в работе (Позаненко и др., 2020а), получим оценку энергетического потока в диапазоне 10–1000 кэВ, $F \simeq 2.9 \times 10^{-4}$ эрг см⁻².

С учетом систематической ошибки калибровки на отклик SPI-ACS к разным по форме энергетическим спектрам гамма-всплесков, оцениваемое значение флюенса может варьироваться в пределах 8.4×10^{-5} – 9.8×10^{-4} эрг см⁻² (на уровне значимости 2σ). Полученная оценка энергетического потока хорошо согласуется со значением, полученным с помощью спектрального анализа данных GBM/Fermi (табл. 1).

ПОСЛЕСВЕЧЕНИЕ

В анализе использованы публичные данные Swift Burst Analyzer⁵ (Эванс и др., 2007, 2009) экспериментов BAT, XRT и UVOT на борту Swift для построения кривых блеска в гамма, рентгеновском и оптическом диапазонах соответственно. Также использованы публичные данные, доступные через сервис GCN/TAN⁶, а именно: наблюдений роботического телескопа RC80 в обсерватории Конкоя (Винко и др., 2020) в фильтрах r' и i' , наблюдений телескопа Цейсс-1000 CAO РАН в фильтрах Rc и Ic , наблюдений телескопа NEXT (Жу и др., 2020а,б) в фильтрах g' , r' , i' и z' и наблюдений ливерпульского телескопа (Иццо и др., 2020) в фильтрах g' , r' , i' и z' . Публично доступные изображения с Северного оптического телескопа (NOT) в фильтре r' были получены через

сервис The NOT FITS Header Archive⁷. Аппроксимация кривых блеска выполнена с помощью пакета lmfit⁸ (Ньювилль и др., 2021) для python.

Анализ оптических наблюдений

Послесвечение GRB 200829A наблюдалось в течение первых ~ 3 сут в рентгеновском и оптическом диапазонах. Для построения оптической кривой блеска послесвечения GRB 200829A проведена обработка данных наблюдений IKI-GRB-FuN, а также общедоступных данных Северного Оптического Телескопа (NOT) с помощью разрабатываемого программного конвейера (Панков и др., 2022) на основе пакета APEX (Куприянов, 2012; Девяткин и др., 2010). Стандартная процедура обработки включает в себя калибровку и входной контроль исходных изображений, их выравнивание и суммирование (если требуется), выделение объектов на изображениях, астрометрию и фотометрию, а также построение локального каталога, поиск и идентификацию транзиентных объектов в нем. Также наряду с программным конвейером (Панков и др., 2022) использовался набор программ PyRAF (Отделение научного программного обеспечения при Институте исследований космоса с помощью космического телескопа, 2012) в индивидуальных случаях, например, когда оптический транзиент имел низкое значение отношения сигнала к шуму $S/N < 5$. Астрометрия изображений выполнена на основе опорного каталога USNO-B1.0 (Монет и др., 2003). Фотометрические калибровочные звезды выбраны путем кросс-отождествления звезд из USNO-B1.0 с каталогом PanSTARRS-PS1 (Чамберс и др., 2016). Это позволило калибровать звездные величины источника на изображениях, снятых как в фильтрах R и I , так и r с помощью одних и тех же звезд. Фотометрия изображений без фильтра выполнена относительно звездной величины в фильтре R . При этом звездные величины, полученные без фильтра UVOT/Swift, обозначены “white”, а наземными телескопами — “clear”. Разделение связано с более широким диапазоном длин волн, доступным внеатмосферному телескопу UVOT/Swift. Журнал оптических наблюдений приведен в приложении А. На рис. 8 представлена многоцветная оптическая кривая блеска, для наглядности звездные величины во всех фильтрах, кроме R , были разнесены относительно своих начальных значений.

⁵https://www.swift.ac.uk/burst_analyser/00993768/

⁶<https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/200829A.gcn3>

⁷<http://www.not.iac.es/observing/forms/fitsarchive/>

⁸<https://github.com/lmfit/lmfit-py/>

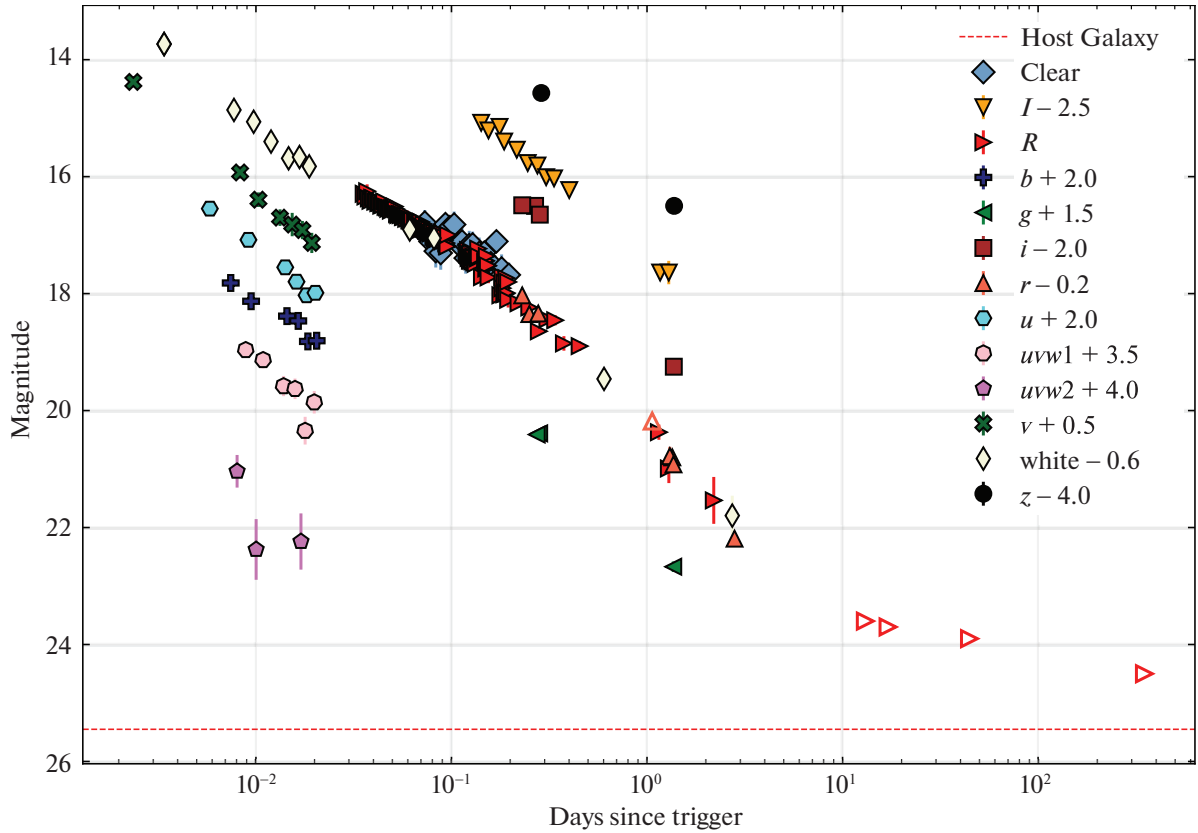


Рис. 8. Многоцветная оптическая кривая блеска GRB 200829A. По горизонтальной оси отложено время после триггера GBM (сут), а по вертикальной оси — видимая звездная величина. Символами обозначены фотометрические значения, полученные в различных фильтрах. Штриховой линией показан уровень яркости родительской галактики GRB 200829A. Незакрашенными символами обозначены верхние пределы (на уровне значимости 3σ).

На рис. 8 прослеживается излом в фильтре R , который может быть связан с геометрическим эффектом угла зрения, характерным для релятивистских джетов (Сари и др., 1999; Пиран, 2004). Звездные величины в кривой блеска не поправлены за межзвездное поглощение света в Галактике, характеризующееся избытком цвета $E(B - V) = 0.0364$ (Шлегель и др., 1998) в направлении на GRB 200829A. В связи с невозможностью установить спектральную эволюцию на всей стадии оптического послесвечения из-за недостаточного квазисинхронного покрытия в разных фильтрах мы предполагаем ее отсутствие. В данном предположении кривые блеска в фильтрах g , r , i , z , I , u , b , v , $uvw1$, $uvw2$ и чистом свете (“clear” и “white”) приведены к кривой в фильтре R (данные представлены преимущественно в этом фильтре), домножением потока на соответствующий числовой коэффициент, при котором достигается наилучшее согласие в данных, с точки зрения критерия χ^2 . В последующем анализе послесвечения будет рас-

смотрена монохроматическая оптическая кривая блеска.

Анализ рентгеновских наблюдений

Квазисинхронно с оптическим наблюдалось и рентгеновское послесвечение инструментом XRT/Swift (Бурроус и др., 2005a). XRT представляет собой телескоп системы Wolter I с фокусным расстоянием 3500 мм и полем зрения $23.6' \times 23.6'$. В фокусе установлен E2V CCD-приемник излучения с 600×600 пикселями, охлаждаемый до -100°C . В результате достигается угловое разрешение $\sim 3''$. Телескоп работает в диапазоне энергий 0.3–10 кэВ в нескольких режимах, среди которых можно выделить Windowed Timing (WT) и Photon Counting (PC). В режиме WT достигается хорошее временное разрешение (~ 1.8 мс), но при этом ухудшается угловое и спектральное разрешение. В режиме PC уменьшена скорость считывания сигнала с CCD до ~ 2.5 с, но другие характеристики не меняются. Режим WT используется при потоках

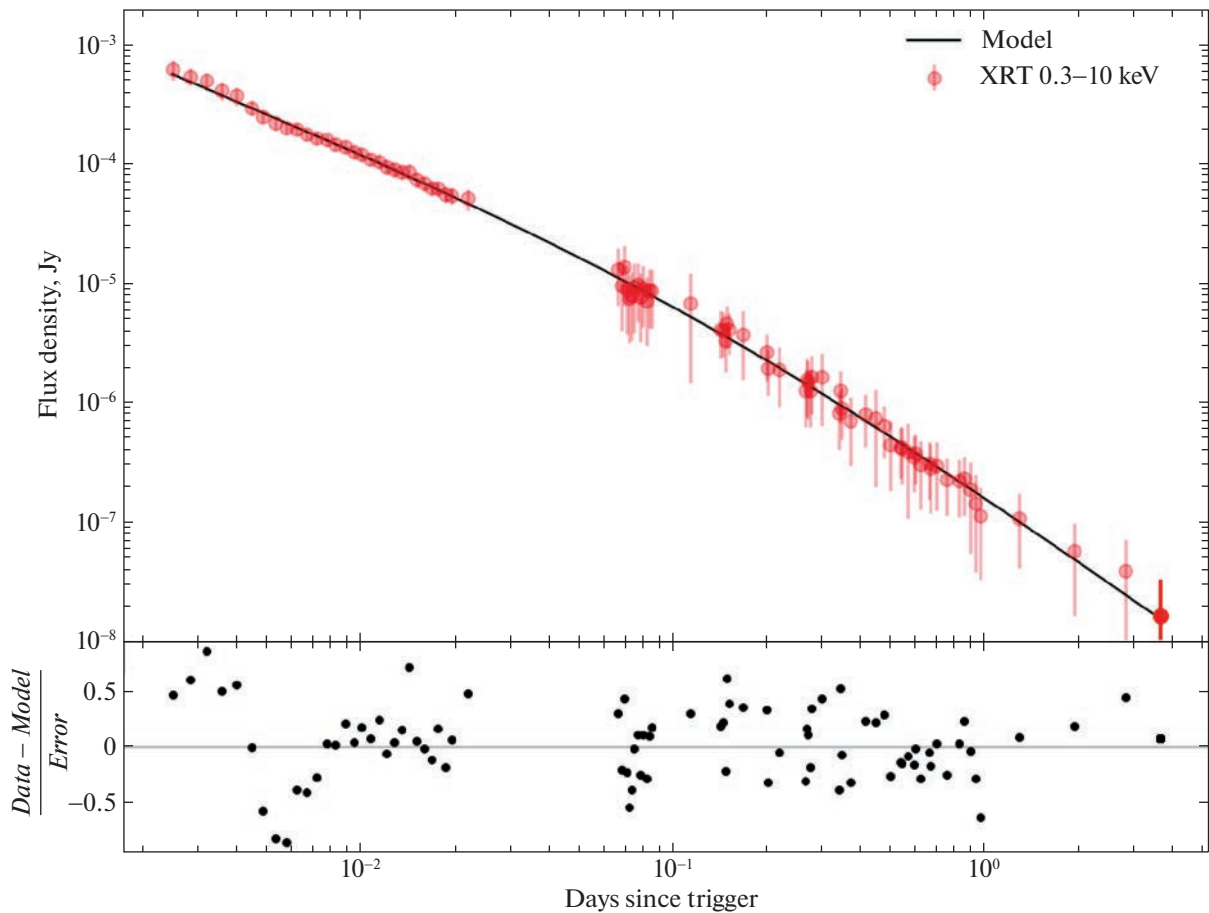


Рис. 9. Верхняя панель — рентгеновская кривая блеска GRB 200829A. По горизонтальной оси отложено время после триггера GBM в днях, а по вертикальной оси — наблюдаемая плотность потока, выраженная в Ян. Кругами обозначены сами значения, а жирной сплошной линией показана аппроксимация степенной моделью с изломом. Нижняя панель — отклонение экспериментальных значений плотности потока от аппроксимации в единицах стандартных отклонений σ .

$F_X = 1\text{--}600$ мКраб, а РС при $F_X < 1$ мКраб (Бурроус и др., 2005a).

Рентгеновская кривая блеска GRB 200829A построена на основе данных, доступных через сервис **Swift Burst Analyzer**⁹. Данные содержат результаты наблюдений (время и поток) в режимах WT и РС и охватывают период ~ 2 сут. Рентгеновский наблюдаемый поток был сгруппирован в бины, длительность которых увеличивается в логарифмической шкале, начиная с 60 с. При этом межзвездное поглощение в Галактике не учитывалось. Тем самым кривая блеска была сглажена, а значимость индивидуальных измерений улучшена. На рис. 9 приведена рентгеновская кривая блеска послесвечения GRB 200829A.

Согласно рис. 9 на рентгеновской кривой блеска прослеживается излом, как и в оптической кривой.

Аппроксимация кривой блеска функцией Бауэрмана (Бауэрман и др., 1999) позволила определить наклон кривой блеска и положение излома на временной шкале. Так, наклон до излома составляет $\alpha_1 = 1.06 \pm 0.03$, а после излома $\alpha_2 = 1.88 \pm 0.06$. Заметим, что наклон рентгеновского послесвечения $\alpha_1 = 1.06 \pm 0.03$ до излома хорошо согласуется с наклоном продленного излучения в мягком гамма-диапазоне 15–50 кэВ $\beta = 1.28 \pm 0.18$, найденном ранее. Отсюда можно предположить взаимосвязь наблюдаемого продленного излучения и послесвечения. В рамках этой гипотезы, кривая блеска в гамма-диапазоне приведена к рентгеновской кривой блеска в интервале времени 100–1000 с относительно T_0 (в котором получены данные с обоих телескопов) в предположении ахроматизма послесвечения в рентгеновском и мягком гамма-диапазонах. Коэффициент приведения $k = F_{XRT}/F_{BAT} = 4.54$ согласно критерию χ^2 . Таким образом, построена наиболее полная кривая

⁹https://www.swift.ac.uk/burst_analyser/00993768/

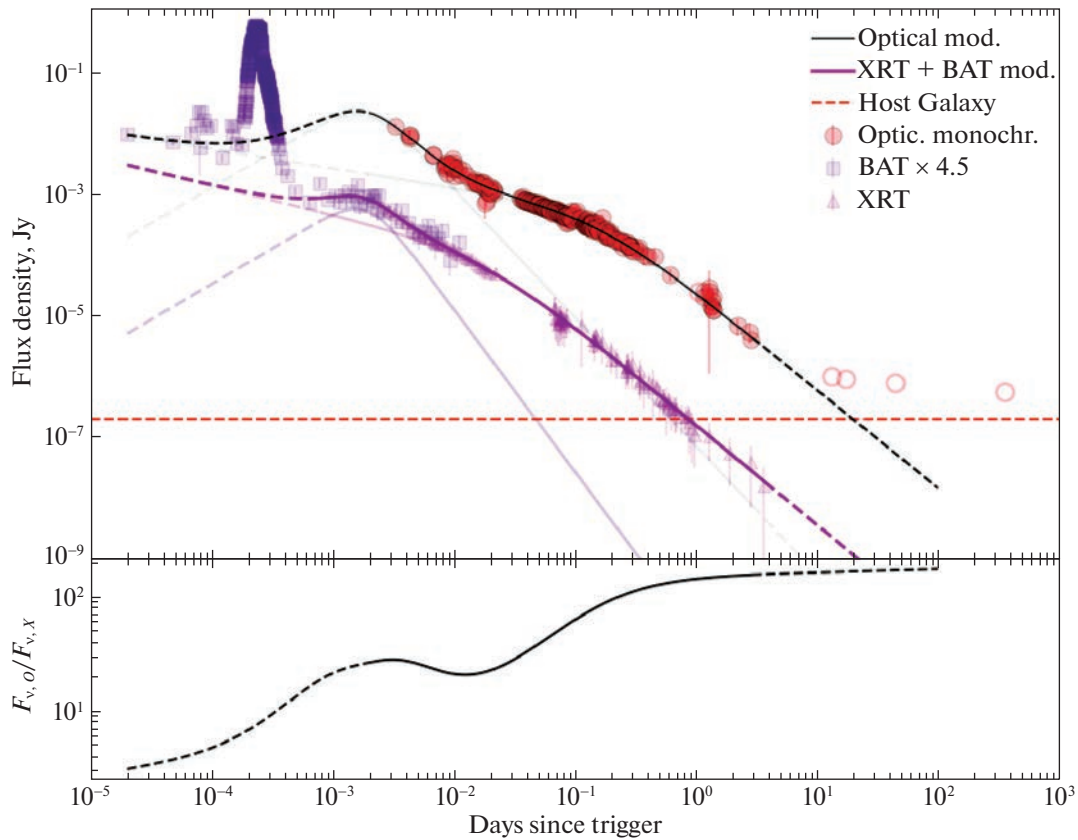


Рис. 10. На верхней панели изображена кривая блеска GRB 200829A. По горизонтальной оси отложено время после триггера GBM $t - T_0$ (сут), а по вертикальной оси — спектральная плотность потока (Ян). Фотометрические значения в оптических фильтрах (закрашенные красные кружки) объединены в одну монохроматическую кривую. Рентгеновская кривая блеска (фиолетовые закрашенные треугольники) объединена с кривой в гамма-диапазоне (темно-синие закрашенные квадраты) в предположении соответствия продленного излучения рентгеновскому послесвечению. Незакрашенными символами обозначены верхние пределы. Модельные кривые отмечены сплошными линиями. На нижней панели изображен график эволюции отношения между оптическим и рентгеновским потоками.

блеска рентгеновского послесвечения, которая и будет использоваться в дальнейшем анализе.

Многоволновая кривая блеска

Рассмотрим ранее полученные кривые блеска в рентгеновском и оптическом диапазонах (приведены вместе на рис. 10) и произведем их аппроксимацию и интерпретацию.

На рис. 10 кривые блеска как в рентгеновском, так и оптическом диапазонах состоят из трех эпизодов (не считая активной фазы всплеска): вспышка, плавно переходящая в степенное падение потока, и затем излом, после которого поток спадает по более крутому закону. При этом передний фронт вспышки на фоне степенного падения выглядит довольно полого. Так как в оптической кривой момент максимума определить невозможно из-за нехватки наблюдательных данных, предполагаем,

что он совпадает с таковым для рентгеновского диапазона.

Для аппроксимации кривых блеска выбрана функция, составленная в виде суммы двух степенных законов с гладким изломом (Бауэрманн и др., 1999), которая определяется формулой (3):

$$F(t) = (F_1^{-n} + F_2^{-n})^{-1/n} + (F_3^{-n} + F_4^{-n})^{-1/n}, \quad (3)$$

где $F_i = \left(\frac{t - T_0}{t_{b_j}}\right)^{\alpha_i}$, t — время относительно триггера в сутках, t_{b_i} — моменты излома (сут), α_i — показатели степеней до и после излома, n — параметр сглаживания ($n > 0$), $i = 1, 2, 3, 4$, $j = 1$ при $i = 1, 2$ и $j = 2$ при $i = 3, 4$. Результаты аппроксимации приведены в табл. 2, значения, отмеченные *, были фиксированы. Аппроксимация двухкомпонентной моделью выполнена на интерва-

Таблица 2. Результаты аппроксимации послесвечения

Энерг. диапазон	F_1 , мЯн	α_1	α_2	t_{b1} , $\times 10^{-3}$ сут	F_2 , мЯн	α_3	α_4	t_{b1} , сут	n	$\chi^2/d.f$
Рентген.	0.52 ± 0.10	-1.2 ± 1.0	2.7 ± 0.5	1.9 ± 0.4	0.06 ± 0.03	0.5 ± 0.2	1.6 ± 0.1	0.02 ± 0.01	1*	0.34
Оптич.	10 ± 3	-1.2^*	1.9 ± 0.2	1.9^*	0.27 ± 0.04	0.3 ± 0.1	1.64 ± 0.08	0.15 ± 0.03	1*	1.1

Таблица 3. Результаты аппроксимации многоволнового спектра раннего послесвечения

Модель кривой поглощения	$E(B - V)$	$R(V)$	$A(V)$	z	N_H , 10^{22} см $^{-2}$	β	$\chi^2/d.f.$
MW	0.36 ± 0.02	3.08*	1.11 ± 0.02	1.29 ± 0.04	0.26 ± 0.03	1.72 ± 0.02	248/236
LMC	0.31 ± 0.21	3.16*	0.98 ± 0.21	0.40 ± 0.75	0.42 ± 0.59	1.56 ± 0.01	329/236
SMC	0.19 ± 0.04	2.93*	0.56 ± 0.04	1.36 ± 0.33	0.17 ± 0.06	1.60 ± 0.02	316/236

Примечание. Значения $E(B - V)$, $R(V)$, $A(V)$ и N_H приведены для родительской галактики, а соответствующие значения для Галактики фиксированы: $E(B - V) = 0.0364$, $R(V) = 3.08$, $A(V) = 0.20$ и $N_H = 0.039 \times 10^{-22}$ см $^{-2}$. Символом “*” обозначены фиксированные параметры.

ле ~ 50 с — 3.66 сут в рентгеновском диапазоне и на интервале 283 с — 2.80 сут в оптическом диапазоне (относительно триггера GBM/Fermi). На рис. 10 (снизу) продемонстрирована цветовая эволюция между рентгеновским и оптическим диапазонами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ

В определении красного смещения использована методика совместной аппроксимации спектрального распределения энергии в оптическом и рентгеновском диапазонах в условиях поглощения (Шади и др., 2010). Квазисинхронный рентгеновский спектр (time-sliced spectrum) XRT и оптические изображения UVOT получены через сервис Swift Burst Analyser. Спектры охватывают временной интервал 1554–1638 с относительно T_0 , где не наблюдается значительной цветовой эволюции. Обработка данных осуществлена с помощью набора программ HEASOFT (Блэкбёрн, 1995)¹⁰.

На рис. 11 представлен многоволновый спектр послесвечения GRB 200829A, аппроксимированный модельной кривой (см. далее).

В качестве спектральной модели использованы степенной закон и степенной закон с изломом. Модель учитывает поглощение оптического излучения на частицах межзвездной пыли, а также фотоэлектрическую абсорбцию рентгеновского излучения

и в терминах XSPEC (HEASOFT) представлено формулой (4), где компоненты **zdust** отвечают за поглощение оптического излучения. Данные компоненты основаны на эмпирической кривой поглощения оптического излучения на частичках пыли (Пей, 1992). В XSPEC доступны три закона поглощения: Млечный Путь (MW), Большое Магелланово Облако (LMC) и Малое Магелланово Облако (SMC). Модель поглощения характеризуется избытком цвета $E(B - V)$, селективностью поглощения $R(V) = A(V)/E(B - V)$, где $A(V)$ — экстинкция красным смещением z . Компоненты **phabs** и **zphabs** позволяют учесть поглощение на водороде в Галактике и родительской галактике всплеска. Обе компоненты определяются колонковой плотностью N_H в 10^{-22} см $^{-2}$, а **zphabs** в том числе и красным смещением z . Компонента **powerlaw** отвечает за степенной спектр излучения и задается спектральным индексом β и нормировкой K (фот $^{-1}$ кэВ $^{-1}$ см $^{-2}$ при 1 кэВ). В ходе аппроксимации значения параметров поглощения излучения в Галактике фиксировались: $E(B - V) = 0.0364$ (Шлегель и др., 1998), $R(V) = 3.08$ (Пей, 1992), $A(V) = R(V)E(B - V) = 0.20$, $N_H = 0.039 \times 10^{-22}$ см $^{-2}$ (Коллаборация H14PI и др., 2016). Красное смещение Галактики также фиксировано ($z = 0$). Установлено, что спектральные данные плохо подчиняются степенному закону с изломом, поэтому данная

¹⁰<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/fertools/>

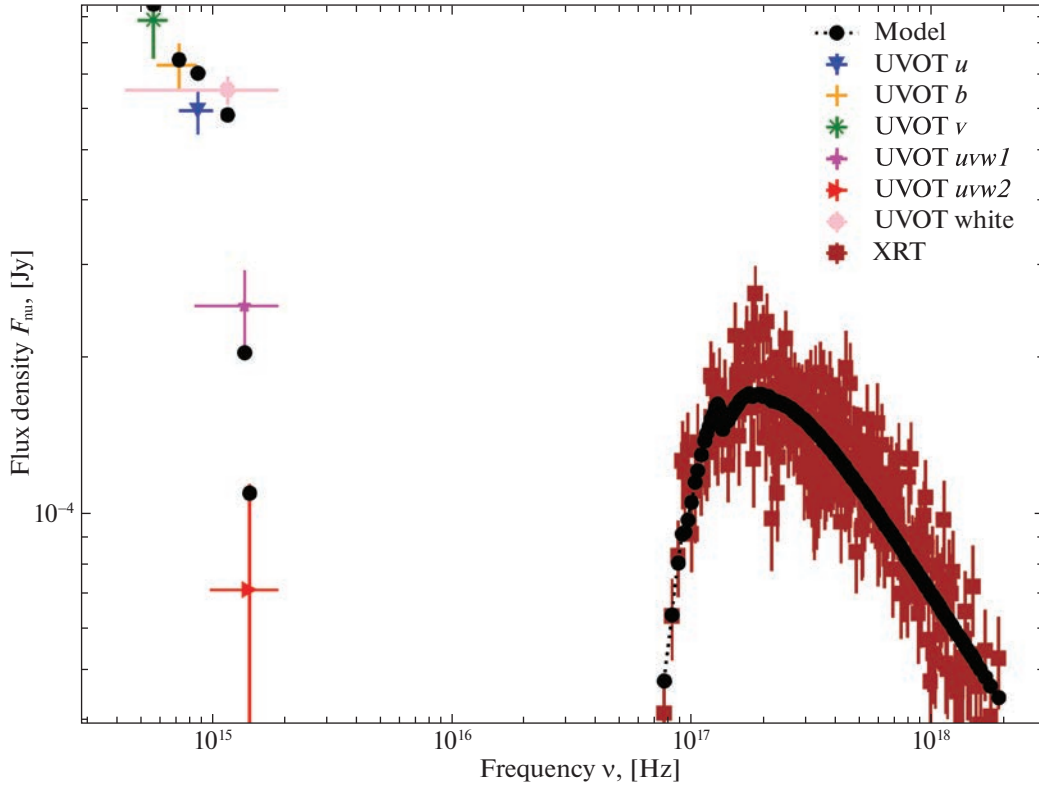


Рис. 11. Спектр GRB 200829A в интервале 1554–1638 с относительно T_0 . По горизонтальной оси отложена частота излучения (Гц), а по вертикальной оси — спектральная плотность потока потока (Ян). Модель обозначена черными кружками, а остальными символами отмечены данные.

модель не рассмотрена. В табл. 3 приведены результаты аппроксимации спектральных данных раннего послесвечения GRB 200829A моделью, определенной формулой (4):

$$F = z_{\text{dust}} \times z_{\text{dust}} \times \text{phabs} \times z_{\text{phabs}} \times \text{powerlaw}. \quad (4)$$

Наилучшая аппроксимация спектра с точки зрения критерия $\chi^2/d.o.f.$ достигается при выборе закона поглощения MW для родительской галактики источника гамма-всплеска (см. табл. 3). Ей соответствует оценка фотометрического красного смещения $z = 1.29 \pm 0.04$, которая не противоречит независимой оценке $z = 1.25 \pm 0.02$, ранее полученной Оатес и др. (2020) тем же самым методом. Однако в отличие от Оатес и др. (2020) мы также приводим оценки параметров поглощения в родительской галактике всплеска. Отметим, что в обоих случаях полученная ошибка является статистической. Будем в дальнейшем считать $z = 1.29 \pm 0.04$ красным смещением GRB 200829A.

РОДИТЕЛЬСКАЯ ГАЛАКТИКА

Обнаружение родительской галактики GRB 200829A и вычисление ее вклада в оптическую кривую блеска сделаны с помощью наблюдения на Большом Телескопе Азимутальным

(БТА) CAO РАН через ~ 2 года после гамма-всплеска. Наблюдение на БТА проведено 31 июля 2022 г. в 18:30 UT на SCORPIO-1 (с матрицей E2V CCD42-40) в фильтре R . На изображении с суммарной экспозицией 2910 с найден кандидат в родительскую галактику, чьи координаты совпадают с координатами GRB 200829A в пределах ошибки $\pm 0.1''$, а блеск составил $R = 25.5^{+0.4}_{-0.3}$ без учета межзвездного поглощения в Галактике. На рис. 12 представлен фрагмент изображения, на котором отмечен кандидат в родительскую галактику.

Видимый блеск после учета межзвездного поглощения в Галактике $A_R = 0.083$ (Шлафли, Финкбайнер, 2011) составляет $R = 25.4^{+0.4}_{-0.3}$. Звездная величина не противоречит блеску выборки родительских галактик для $z = 1.29$ (см., например, Позаненко и др., 2008). Абсолютная звездная величина родительской галактики составляет $M_R \sim -19.44$ для $z = 1.29$. Оценим темп звездообразования (SFR) и массу M_{host} из соотношения $\log SFR M_{\odot} \text{ год}^{-1} = -0.381 M_r - 8.029 \pm \pm 0.486$, где M_r — абсолютная звездная величина спиральной галактики в фильтре r (см., например, Махаджан и др., 2018). Абсолютная звездная величина родительской галактики GRB 200829A

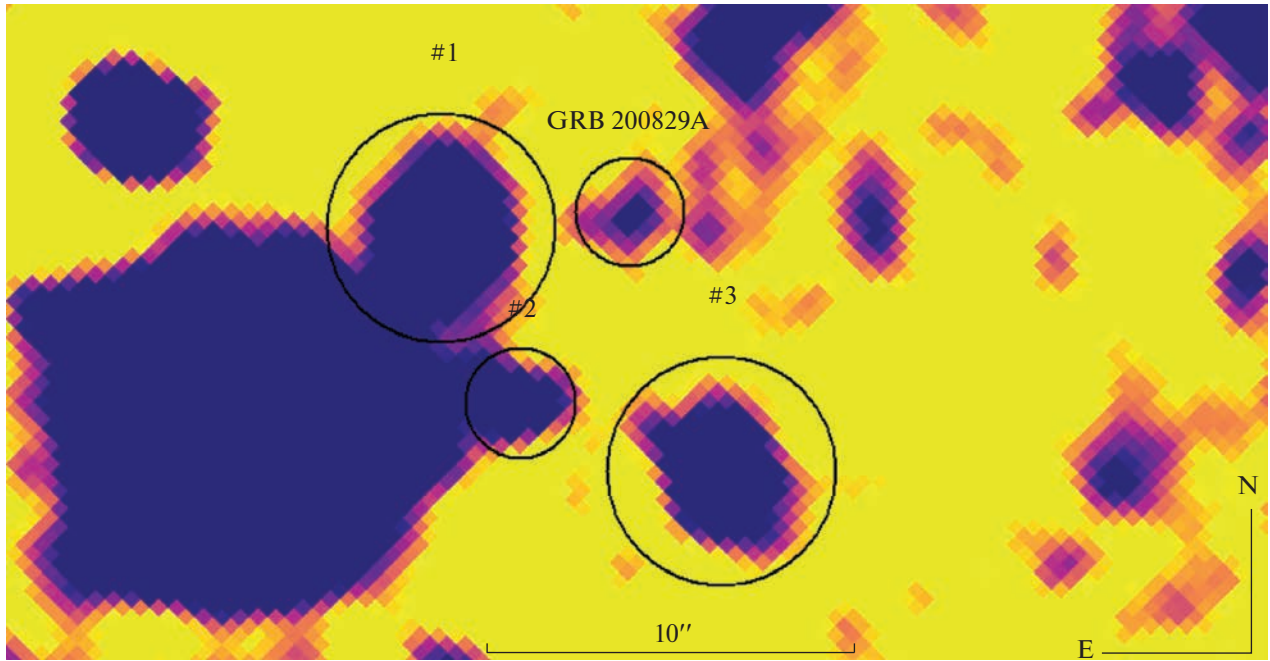


Рис. 12. Фрагмент изображения в фильтре R поля GRB 200829A, полученное телескопом БТА в САО РАН. На месте транзиента виден диффузный объект — родительская галактика. Номерами 1, 2 и 3 обозначены соседние объекты поля.

составит $M_r = -19.20$ с учетом приведения видимой звездной величины из фильтра R к фильтру r ($r = R + 0.21$) и учета межзвездного поглощения за Галактику $A_r = 0.088$ (Шлафли, Финкбайнер, 2011). Тогда оценка темпа звездообразования составит $\log SFR \approx -0.715 \pm 0.486 M_\odot \text{ год}^{-1}$, откуда можно оценить массу родительской галактики, как $SFR \times T_{\text{age}}$, где T_{age} — возраст родительской галактики. Получаем оценку массы $M_{\text{host}} \sim 8.5 \times 10^9 M_\odot$. Для сравнения, абсолютная звездная величина родительской галактики GRB 181201A $M_R = -18.5 \pm 0.2$, а масса составляет $\sim 1.2 \times 10^9 M_\odot$ (см. Белкин и др., 2020, по результатам моделирования спектра галактики).

Полученные ранее результаты аппроксимации спектра (см. табл. 3) позволяют также определить отношение $N_H/A(V)$, по которому можно судить о схожести свойств пыли в различных галактиках. Если свойства пыли одинаковы во Вселенной, то отношение $N_H/A(V)$ должно линейно возрастать с расстоянием до галактики. Так, для родительской галактики GRB 200829A $N_H/A(V) \approx \approx 2.4 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Отношение плотности на луче зрения к поглощению у родительской галактики GRB 200829A согласуется с большинством родительских галактик других гамма-всплесков, представленных в выборке (Ковино и др., 2013), у которых $N_H/A(V) \gtrsim 1.6 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, что наглядно изображено на рис. 13.

Возможная сверхновая

Длинный гамма-всплеск GRB 200829A мог сопровождаться сверхновой. Кампания по поиску сверхновой была предпринята на телескопе АЗТ-22 МАО в период 10–46 сут после регистрации гамма-всплеска. Этот период соответствует типичному максимуму сверхновой (8–40 сут) в системе отсчета источника (см., например, Белкин, Позаненко, 2020). В ходе наблюдений верхний предел составил $R = 24.0$ (3σ), однако, сверхновой обнаружено не было. Верхняя оценка абсолютной звездной величины возможной сверхновой на $z = 1.29$ составляет $M_R > -23.0$. Здесь мы учли межзвездное поглощение в Галактике $A_{R,MW} = 0.083$ и родительской галактике гамма-всплеска $A_\lambda = 2.14 \pm 0.04$, где $\lambda = 0.641 \times (1 + z)$ мкм эффективная длина волны фильтра R , отнесенного на красное смещение z . A_λ вычислена из следующей формулы:

$$A_V \simeq \frac{E(B - R)}{\xi \left(\frac{\lambda_B}{1 + z} \right) \xi \left(\frac{\lambda_R}{1 + z} \right)}, \quad (5)$$

где $E(B - R)$ — показатель цвета между фильтрами B и R , ξ — закон поглощения, а λ_B и λ_R — соответственно эффективные длины волн фильтров B и R .

Полученная оценка не противоречит распределению абсолютных звездных величин СН от гамма-всплесков (Белкин, Позаненко, 2020).

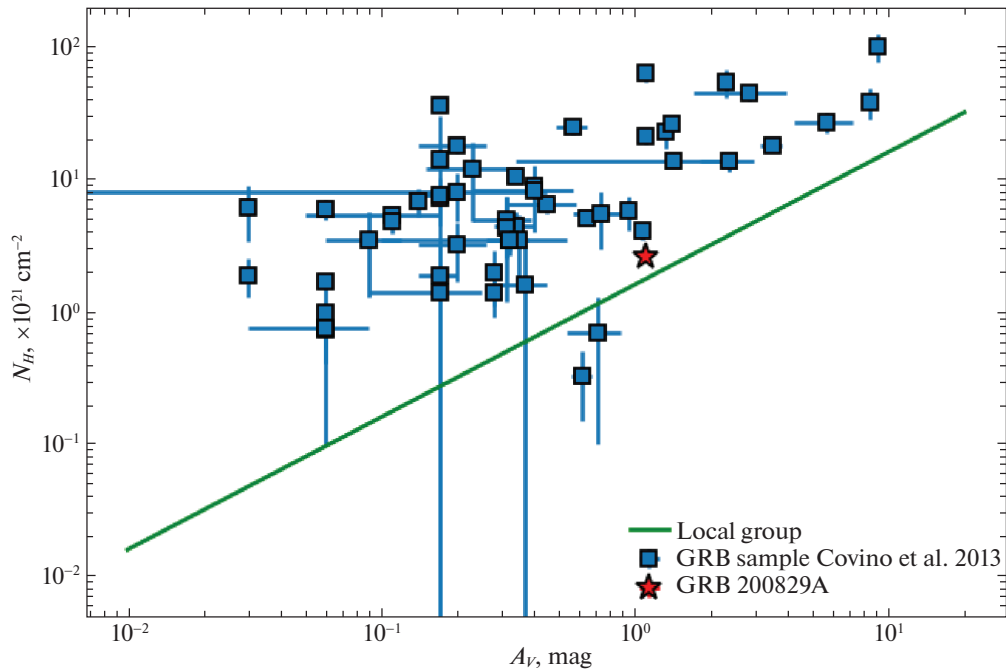


Рис. 13. График зависимости N_H – A_V . Синими квадратами отмечены значения из родительских галактик гамма-всплесков (Ковино и др., 2013), а зеленой линией отмечен линейный закон $\log(y) = 1.6 \log(x)$, которому подчиняется подавляющее число представленных в выборке галактик. Красной звездой обозначено значение $N_H(A_V)$ родительской галактики GRB 200829A.

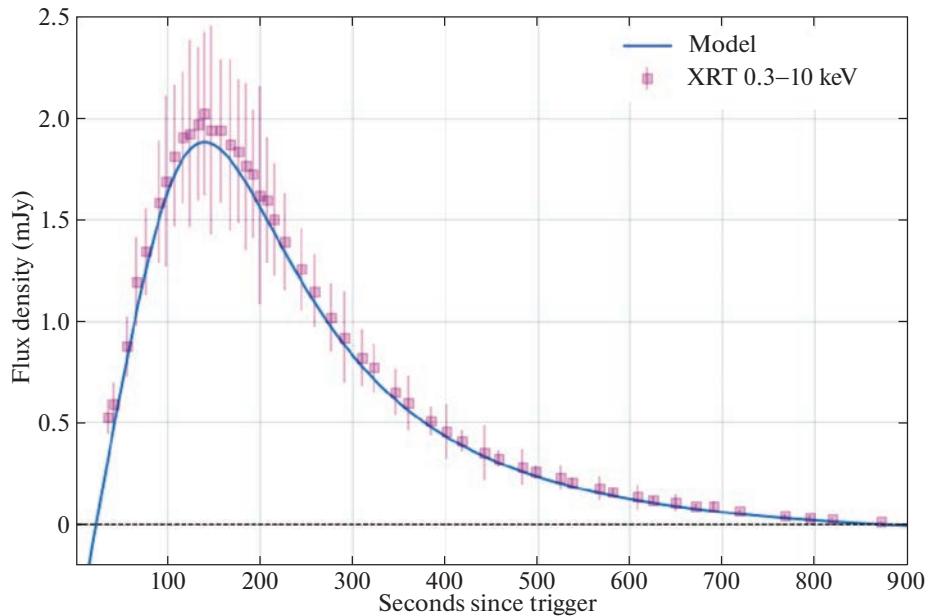


Рис. 14. Профиль вспышки на рентгеновской кривой блеска GRB 200829A после вычитания модели послесвечения. По вертикальной оси — спектральная плотность потока в мЯн, а по горизонтальной — время относительно T_0 в секундах. Модель обозначена синей сплошной кривой, а наблюдаемые данные — фиолетовыми квадратами. Данные, соответствующие мощному импульсу в активной фазе вспышки, не показаны.

ОБСУЖДЕНИЕ

Хроматизм кривой блеска

Многоволновая кривая блеска (рис. 10) GRB 200829A имеет несинхронное (хроматическое) поведение в раннем послесвечении, которое охватывает неоднородность (вспышку) и продолжается

вплоть до излома в оптической кривой блеска. Интерпретировать хроматизм во время вспышки можно с точки зрения модели структурированного джета (см., например, Дюке и др., 2022). Согласно данной модели, более жесткое излучение наблюдается ближе к оси джета, из-за чего излучение в

рентгеновском диапазоне соответствует той части джета, которая характеризуется большим гамма-фактором. Оценим гамма-фактор джета из следующей формулы (см., например, Хан и др., 2022):

$$\Gamma_0 = 2 \left[\frac{3E_\gamma(1+z)^3}{32\pi n m_p c^5 \eta t_p^3} \right]^{1/8}, \quad (6)$$

где m_p — масса протона, c — скорость света, $E_\gamma = 2\pi(1 - \cos \theta_j)E_{\text{iso}}$ — энергия джета в гамма-диапазоне, скорректированная на его угол раствора θ_j , $\eta = E_\gamma/\xi E_{\text{iso}}$, $t_p = t_b(-\alpha_1/\alpha_2)^{1/(\omega(\alpha_2-\alpha_1))}$, t_b — момент излома относительно T_0 (сут), α_1 , α_2 — показатели степенного наклона кривой блеска до и после излома соответственно, а $\omega = 1$. Обратим внимание, что на кривой блеска в явном виде нельзя однозначно выделить джет-брейк, поэтому выберем t_b из табл. 2 таким образом, чтобы угол раствора не являлся экстремальным. Так:

(а) $t_b = T_0 + 1.9 \times 10^{-3}$ сут соответствует максимуму вспышки в раннем послесвечении,

(б) $t_b = T_0 + 0.02$ сут — излому второй компоненты в рентгеновском диапазоне,

(с) $t_b = T_0 + 0.15$ сут — излому второй компоненты в оптическом диапазоне.

Угол раствора конуса джета можно определить по приведенной ниже формуле (Сари и др., 1999; Жанг и др., 2007)

$$\theta_j \sim 0.161 \left(\frac{t_b}{1+z} \right)^{3/8} \left(\frac{\xi E_{52}}{n} \right)^{-1/8}, \quad (7)$$

где t_b — момент излома относительно T_0 (сут), z — красное смещение, E_{52} — изотропная энергия E_{iso} в единицах 10^{52} эрг, $n = 1 \text{ см}^{-3}$ — плотность межзвездной среды (ISM), а коэффициент преобразования кинетической энергии в излучение $\xi = 0.1$ (см., например, Жанг и др., 2007). Тогда угол раствора конуса составит: $\theta_j(a) \approx 0.474_{-0.039}^{+0.035^\circ}$, $\theta_j(b) \approx 1.13_{-0.27}^{+0.20^\circ}$ или $\theta_j(c) \approx 2.44_{-0.20}^{+0.18^\circ}$. Известно, что характерный угол θ_j , определенный для всплесков с джет-брейком (см., например, Ванг и др., 2018), составляет $\theta_j \approx 2.5 \pm 1.0^\circ$. Таким образом, вероятно, неоднородность (вспышка) на кривой блеска послесвечения не связана с джет-брейком, так как угол раствора $\theta_j(a) \sim 0.5^\circ$ был бы аномально малым. В случае (б) и (с) значения получаются адекватными. При этом угол раствора, полученный по рентгеновским данным, меньше, чем по оптическим. В случаях (б), (с) оценим заключенную внутри джета энергию по формуле $E_\gamma = 2\pi(1 - \cos \theta_j)E_{\text{iso}}$. Получим, $E_{\gamma,O} = 7.22_{-1.20}^{+1.18} \times 10^{51}$ эрг по оценке из оптической кривой блеска и $E_{\gamma,X} = 1.59_{-0.66}^{+0.60} \times 10^{51}$ эрг по оценке из рентгеновской кривой блеска. Тогда гамма-факторы, определенные по рентгеновской $\Gamma_X = 197_{-99}^{+170}$ и оптической $\Gamma_O = 122_{-23}^{+77}$ кривым блеска, формально совпадают в пределах ошибок.

Причина неоднородности в раннем послесвечении

Предыдущий анализ показал, что кривая блеска послесвечения GRB 200829A на раннем этапе содержит неоднородность по типу вспышки. Вспышки на кривых блеска гамма-всплесков рассмотрены, например, в следующих работах: Пиро и др. (2005), Перна и др. (2006), Свенсон и др. (2013), Йи и др. (2017), Мазаева и др. (2018). Так, Свенсон и др. (2013) исследовали зависимость длительности от времени, соответствующему максимуму потока вспышек $\Delta t/t_{\text{peak}}$, на основе выборки всплесков из второго каталога UVOT/Swift. В ходе анализа установлено, что у более 80% всплесков из выборки $\Delta t/t_{\text{peak}} < 0.5$. В работах Йи и др. (2017), Мазаева и др. (2018) также установлено,

Таблица 4. Параметры GRB 200829A

Параметр	Значение
R.A.	16:44:49.14 $\pm$ 0.36''
Dec	+72:19:45.63 $\pm$ 0.36''
z	1.29 $\pm$ 0.04
$E_{\text{iso}}, 10^{54}$ эрг	1.30 $\pm$ 0.01
$\theta_{j,O}, ^\circ$	2.44 $_{-0.20}^{+0.18}$
$\theta_{j,X}, ^\circ$	1.13 $_{-0.27}^{+0.20}$
Γ_O	122 $_{-23}^{+77}$
Γ_X	199 $_{-49}^{+157}$
$E_{\gamma,O}, 10^{51}$ эрг	7.22 $_{-1.20}^{+1.18}$
$E_{\gamma,X}, 10^{51}$ эрг	1.59 $_{-0.66}^{+0.60}$

Таблица 5. Параметры родительской галактики

Параметр	Значение
$M_{R,Host}, \text{mag}$	−19.44
$\log SFR, M_\odot \text{ год}^{-1}$	−0.715 $\pm$ 0.486
$M_{Host}, M_\odot$	$\sim 8.5 \times 10^9$
$A(V), \text{mag}$	1.11 $\pm$ 0.02
$N_H, \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$	2.6 $\pm$ 0.3

что вспышки подчиняются и линейной корреляции $FWHM-t_{\text{peak}}$. На рис. 14 представлен профиль вспышки на рентгеновской кривой блеска GRB 200829A, полученный путем вычитания модели послесвечения.

Вспышка, исследуемая в данной работе, имеет $FWHM \approx 146$ с и $t_{\text{peak}} \approx 132$ с. Полученные значения не противоречат корреляции $FWHM-t_{\text{peak}}$ (Йи и др., 2017; Мазаева и др., 2018) и, вероятно, являются еще одним свидетельством в пользу единой физической природы вспышек в кривых блеска гамма-всплесков. Возможно, вспышки возникают на ударной волне, подпитываемой центральной машиной всплеска (Бурроус и др., 2005б; де Паскуаль и др., 2007; Барков и др., 2021), одновременного наблюдения разных зон структурированного джета (Бениамини и др., 2020; Дюке и др., 2022) или переменного темпа аккреции $\dot{M}$ (Перна и др., 2006).

Рентгеновское плато

Анализ первых ~ 250 с рентгеновской кривой блеска GRB 200829A (рис. 10) также не отвергает гипотезу о плато. Считается, что, благодаря сильному магнитному полю, новообразовавшийся магнитар обеспечивает накачку энергии и поддерживает светимость примерно на постоянном уровне в течение некоторого времени, равному длительности плато (де Паскуаль и др., 2007; Мещер и др., 2011; Роулинсон и др., 2013). Определим энерговыделение плато на рентгеновской кривой блеска GRB 200829A. Сначала определим интегральный по времени поток в диапазоне 0.3–10 кэВ ($\Delta\nu = 7.3 \times 10^{16} - 2.4 \times 10^{18}$ Гц) плато по формуле (8):

$$F_{\text{plat}} = \int_{t_1}^{t_2} f_{\nu}(t) dt \Delta\nu, \quad (8)$$

где моменты времени $t_1 = 51.8$ с и $t_2 = 86.4$ с задают участок кривой блеска с показателем степенного закона ~ 0 , соответствующий плато, а $f_{\nu}(t)$ — спектральная плотность потока. Подставив все необходимые значения, получаем флюенс плато $F_{\text{plat}} = 1.3 \times 10^{-10}$ эрг см $^{-2}$. Тогда энергия плато в диапазоне 0.3–10 кэВ, вычисленная по формуле (1), составит $E_{\text{plateu}} = 5.8 \times 10^{47}$ эрг. Заметим, что такие значения не противоречат корреляции $L_X - T_a$, где L_x — светимость плато в диапазоне 0.3–10 кэВ, а $T_a = t_2/(1+z)$ — момент времени, приходящийся на завершение стадии плато в системе отсчета источника (Дайнутти и др., 2008, 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметры GRB 200829A и его родительской галактики, определенные в работе, приведены в табл. 4 и 5.

Обратим внимание на некоторые особенности GRB 200829A. В частности, кривая блеска в гамма-диапазоне демонстрирует сложную структуру, представляющую собой суперпозицию импульсов с разной спектральной жесткостью. В связи с этим корректное определение спектральной задержки оказалось невозможным. Анализ данных с гамма-инструментов BAT/Swift, GBM/Fermi и SPI-ACS/INTEGRAL показал, что событие относится к классу длинных гамма-всплесков (Минаев, Позаненко, 2021). GRB 200829A находится среди других ~ 15 наиболее мощных событий по энергии, выделенной в изотропном эквиваленте ($E_{\text{iso}} \gtrsim 10^{54}$ эрг). На кривой блеска BAT/Swift прослеживается плато, плавно переходящее в продленное излучение, длительностью ~ 800 с, а поток при этом спадает по степенному закону с показателем степени $\alpha \sim -1$, характерным для послесвечения (Мозгунов и др., 2021).

По результатам наблюдений UVOT/Swift и XRT/Swift проведена независимая оценка фотометрического красного смещения GRB 200829A $z = 1.29 \pm 0.04$.

В ходе оптических наблюдений в период 10–40 сут после T_0 не обнаружено признака СН от GRB 200829A. Верхний предел на абсолютную звездную величину СН в максимуме $M_R > -23$ не противоречит известному распределению абсолютных звездных величин СН, ассоциированных с гамма-всплесками (Белкин, Позаненко, 2022).

С помощью телескопа БТА САО РАН найдена родительская галактика GRB 200829A. Ее абсолютная звездная величина $M_R \sim -19.44$ для $z = 1.29$ с учетом поглощения за Галактику, темп звездообразования $\log SFR \sim -0.7 M_{\odot}$ в год, а масса $\sim 8 \times 10^9 M_{\odot}$. Поглощение излучения на луче зрения не противоречит линейной корреляции $N_H \gtrsim 1.6A(V)$, наблюдаемой у родительских галактик гамма-всплесков (Ковино и др., 2013).

Совместный анализ оптических и рентгеновских наблюдений послесвечения GRB 200829A показал хроматическое поведение раннего послесвечения до момента излома кривой блеска в оптическом диапазоне (около 0.15 сут после триггера GBM/Fermi). Наличие хроматической особенности не противоречит модели структурированного джета.

Таблица 6. Журнал результатов оптических наблюдений. Звездные величины в фильтрах UVOT Swift u , b , v , $uvw1$, $uvw2$, $white$, $clear$, R и I приведены в фотометрической системе Vega, в фильтрах g , r , i и z в фотометрической системе AB. Значения приведены без учета межзвездного поглощения за Галактику и родительскую галактику GRB 200829A

$t - T_0$, сут	Зв. величина, mag	Поток, мЯн	Телескоп	Фильтр	GCN №
0.002361	13.88 ± 0.08	$10.213^{+0.777}_{-0.777}$	Swift/UVOT	v	—
0.003391	14.33 ± 0.07	$3.566^{+0.689}_{-0.689}$	Swift/UVOT	$white$	—
0.003391	14.33 ± 0.07	$3.566^{+0.689}_{-0.689}$	Swift/UVOT	$white$	—
0.005810	14.55 ± 0.05	$2.189^{+0.104}_{-0.104}$	Swift/UVOT	u	—
0.007431	15.82 ± 0.08	$1.906^{+0.134}_{-0.134}$	Swift/UVOT	b	—
0.007720	15.46 ± 0.08	$1.263^{+0.248}_{-0.248}$	Swift/UVOT	$white$	—
0.008009	17.04 ± 0.28	$0.113^{+0.029}_{-0.029}$	Swift/UVOT	$uvw2$	—
0.008299	15.43 ± 0.10	$2.454^{+0.230}_{-0.230}$	Swift/UVOT	v	—
0.008866	15.46 ± 0.14	$0.582^{+0.074}_{-0.074}$	Swift/UVOT	$uvw1$	—
0.009155	15.08 ± 0.09	$1.339^{+0.103}_{-0.103}$	Swift/UVOT	u	—
0.009444	16.13 ± 0.09	$1.430^{+0.112}_{-0.112}$	Swift/UVOT	b	—
0.009734	15.66 ± 0.08	$1.049^{+0.206}_{-0.206}$	Swift/UVOT	$white$	—
0.010023	18.37 ± 0.52	$0.033^{+0.016}_{-0.016}$	Swift/UVOT	$uvw2$	—
0.010301	15.89 ± 0.12	$1.599^{+0.182}_{-0.182}$	Swift/UVOT	v	—
0.010880	15.63 ± 0.14	$0.497^{+0.067}_{-0.067}$	Swift/UVOT	$uvw1$	—
0.011944	16.00 ± 0.07	$0.768^{+0.148}_{-0.148}$	Swift/UVOT	$white$	—
0.013275	16.20 ± 0.14	$1.205^{+0.157}_{-0.157}$	Swift/UVOT	v	—
0.013843	16.08 ± 0.17	$0.330^{+0.053}_{-0.053}$	Swift/UVOT	$uvw1$	—
0.014120	15.55 ± 0.10	$0.869^{+0.077}_{-0.077}$	Swift/UVOT	u	—
0.014410	16.39 ± 0.10	$1.131^{+0.097}_{-0.097}$	Swift/UVOT	b	—
0.014688	16.29 ± 0.09	$0.590^{+0.117}_{-0.117}$	Swift/UVOT	$white$	—
0.015324	16.32 ± 0.20	$1.081^{+0.198}_{-0.198}$	Swift/UVOT	v	—
0.015845	16.13 ± 0.18	$0.316^{+0.051}_{-0.051}$	Swift/UVOT	$uvw1$	—
0.016123	15.80 ± 0.11	$0.693^{+0.066}_{-0.066}$	Swift/UVOT	u	—
0.016458	16.47 ± 0.12	$1.049^{+0.117}_{-0.117}$	Swift/UVOT	b	—
0.016701	16.26 ± 0.09	$0.602^{+0.119}_{-0.119}$	Swift/UVOT	$white$	—
0.016991	18.24 ± 0.48	$0.037^{+0.017}_{-0.017}$	Swift/UVOT	$uvw2$	—
0.017280	16.41 ± 0.16	$0.991^{+0.141}_{-0.141}$	Swift/UVOT	v	—
0.017847	16.84 ± 0.24	$0.163^{+0.036}_{-0.036}$	Swift/UVOT	$uvw1$	—
0.018148	16.03 ± 0.11	$0.559^{+0.058}_{-0.058}$	Swift/UVOT	u	—
0.018438	16.82 ± 0.11	$0.759^{+0.077}_{-0.077}$	Swift/UVOT	b	—

Таблица 6. Продолжение

$t - T_0$, сут	Зв. величина, mag	Поток, мЯн	Телескоп	Фильтр	GCN №
0.018727	16.42 ± 0.09	$0.519^{+0.103}_{-0.103}$	Swift/UVOT	<i>white</i>	—
0.019306	16.63 ± 0.17	$0.809^{+0.128}_{-0.128}$	Swift/UVOT	<i>v</i>	—
0.019873	16.36 ± 0.19	$0.255^{+0.046}_{-0.046}$	Swift/UVOT	<i>uvw1</i>	—
0.020150	15.99 ± 0.11	$0.582^{+0.060}_{-0.060}$	Swift/UVOT	<i>u</i>	—
0.020440	16.81 ± 0.11	$0.768^{+0.077}_{-0.077}$	Swift/UVOT	<i>b</i>	—
0.035551	16.29 ± 0.13	$0.864^{+0.100}_{-0.113}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.036296	16.34 ± 0.08	$0.828^{+0.061}_{-0.066}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.037041	16.25 ± 0.12	$0.898^{+0.092}_{-0.103}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.037785	16.37 ± 0.11	$0.805^{+0.076}_{-0.084}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.038524	16.41 ± 0.10	$0.773^{+0.066}_{-0.072}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.039271	16.36 ± 0.08	$0.810^{+0.059}_{-0.064}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.040015	16.37 ± 0.07	$0.802^{+0.053}_{-0.057}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.040756	16.43 ± 0.07	$0.763^{+0.046}_{-0.049}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.041500	16.42 ± 0.05	$0.771^{+0.037}_{-0.039}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.042240	16.45 ± 0.05	$0.747^{+0.034}_{-0.035}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.042984	16.45 ± 0.06	$0.750^{+0.041}_{-0.043}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.043734	16.49 ± 0.08	$0.718^{+0.053}_{-0.057}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.044479	16.48 ± 0.07	$0.724^{+0.046}_{-0.050}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.045224	16.42 ± 0.07	$0.765^{+0.050}_{-0.054}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.045982	16.51 ± 0.06	$0.704^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.046728	16.52 ± 0.07	$0.699^{+0.045}_{-0.049}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.047472	16.55 ± 0.06	$0.682^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.048218	16.54 ± 0.08	$0.691^{+0.050}_{-0.054}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.048963	16.58 ± 0.06	$0.662^{+0.038}_{-0.040}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.049708	16.54 ± 0.07	$0.689^{+0.041}_{-0.044}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.050451	16.52 ± 0.05	$0.697^{+0.032}_{-0.034}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.051197	16.51 ± 0.07	$0.706^{+0.043}_{-0.046}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.051941	16.55 ± 0.08	$0.679^{+0.048}_{-0.052}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.052685	16.64 ± 0.08	$0.628^{+0.046}_{-0.050}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.053429	16.66 ± 0.07	$0.618^{+0.037}_{-0.040}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.054173	16.64 ± 0.08	$0.630^{+0.043}_{-0.046}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.054916	16.66 ± 0.08	$0.618^{+0.043}_{-0.047}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.055662	16.64 ± 0.08	$0.624^{+0.046}_{-0.050}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—

Таблица 6. Продолжение

$t - T_0$, сут	Зв. величина, mag	Поток, мЯн	Телескоп	Фильтр	GCN №
0.056408	16.69 ± 0.07	$0.599^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.057151	16.68 ± 0.06	$0.602^{+0.034}_{-0.036}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.057897	16.67 ± 0.07	$0.610^{+0.040}_{-0.042}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.058641	16.72 ± 0.06	$0.583^{+0.029}_{-0.030}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.059387	16.66 ± 0.08	$0.616^{+0.044}_{-0.048}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.060131	16.71 ± 0.07	$0.588^{+0.034}_{-0.036}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.060873	16.74 ± 0.08	$0.571^{+0.039}_{-0.042}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.061146	17.50 ± 0.08	$0.192^{+0.038}_{-0.038}$	Swift/UVOT	<i>white</i>	—
0.061617	16.75 ± 0.08	$0.566^{+0.039}_{-0.042}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.062361	16.73 ± 0.07	$0.575^{+0.035}_{-0.038}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.063109	16.75 ± 0.08	$0.569^{+0.040}_{-0.043}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.065139	16.76 ± 0.09	$0.560^{+0.046}_{-0.051}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.065887	16.77 ± 0.07	$0.555^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.066630	16.77 ± 0.07	$0.554^{+0.036}_{-0.038}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.067374	16.82 ± 0.06	$0.531^{+0.027}_{-0.028}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.068041	16.88 ± 0.19	$0.502^{+0.079}_{-0.093}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.068117	16.92 ± 0.08	$0.483^{+0.033}_{-0.035}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.068863	16.78 ± 0.07	$0.551^{+0.034}_{-0.036}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.069605	16.77 ± 0.09	$0.555^{+0.043}_{-0.046}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.070350	16.86 ± 0.07	$0.515^{+0.030}_{-0.032}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.071093	16.86 ± 0.08	$0.512^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.071839	16.81 ± 0.05	$0.536^{+0.024}_{-0.025}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.072582	16.89 ± 0.09	$0.499^{+0.041}_{-0.045}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.073053	16.79 ± 0.21	$0.548^{+0.098}_{-0.120}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.073328	16.89 ± 0.09	$0.498^{+0.039}_{-0.043}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.074074	16.92 ± 0.08	$0.485^{+0.036}_{-0.039}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.074818	16.87 ± 0.08	$0.508^{+0.036}_{-0.039}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.075561	16.88 ± 0.09	$0.503^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.076305	16.95 ± 0.09	$0.473^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.077049	16.90 ± 0.09	$0.493^{+0.041}_{-0.044}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.077791	16.96 ± 0.09	$0.465^{+0.039}_{-0.042}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.078076	17.11 ± 0.18	$0.407^{+0.061}_{-0.072}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.078532	16.97 ± 0.07	$0.463^{+0.031}_{-0.033}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—

Таблица 6. Продолжение

$t - T_0$, сут	Зв. величина, mag	Поток, мЯн	Телескоп	Фильтр	GCN №
0.079277	16.94 ± 0.07	$0.478^{+0.030}_{-0.032}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.080020	16.93 ± 0.07	$0.481^{+0.032}_{-0.034}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.080766	17.03 ± 0.09	$0.438^{+0.033}_{-0.036}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.081412	17.65 ± 0.08	$0.168^{+0.033}_{-0.033}$	Swift/UVOT	<i>white</i>	—
0.081512	16.95 ± 0.07	$0.470^{+0.031}_{-0.034}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.082256	17.05 ± 0.08	$0.428^{+0.032}_{-0.034}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.083000	17.01 ± 0.08	$0.446^{+0.033}_{-0.035}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.083099	17.27 ± 0.28	$0.350^{+0.079}_{-0.103}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.083745	17.02 ± 0.09	$0.441^{+0.035}_{-0.038}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.084490	17.00 ± 0.10	$0.452^{+0.040}_{-0.044}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.085234	17.06 ± 0.09	$0.425^{+0.033}_{-0.036}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.085977	17.03 ± 0.09	$0.438^{+0.034}_{-0.037}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.086720	16.99 ± 0.09	$0.456^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.087465	17.00 ± 0.06	$0.449^{+0.024}_{-0.026}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.088110	17.31 ± 0.29	$0.340^{+0.079}_{-0.102}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.088206	17.04 ± 0.07	$0.433^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.088952	16.97 ± 0.06	$0.463^{+0.025}_{-0.026}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.089692	17.08 ± 0.09	$0.418^{+0.034}_{-0.037}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.090437	17.09 ± 0.08	$0.413^{+0.028}_{-0.030}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.091182	17.05 ± 0.09	$0.431^{+0.033}_{-0.036}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.091927	17.09 ± 0.07	$0.413^{+0.027}_{-0.029}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.092672	17.04 ± 0.09	$0.435^{+0.036}_{-0.039}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.093134	16.81 ± 0.17	$0.535^{+0.076}_{-0.088}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.093926	17.14 ± 0.08	$0.397^{+0.029}_{-0.031}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.094673	17.19 ± 0.10	$0.379^{+0.032}_{-0.036}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.095420	17.19 ± 0.08	$0.377^{+0.028}_{-0.030}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.096163	17.00 ± 0.06	$0.452^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.098157	16.86 ± 0.17	$0.510^{+0.074}_{-0.087}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.103180	16.82 ± 0.22	$0.532^{+0.098}_{-0.121}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.108203	17.15 ± 0.22	$0.391^{+0.072}_{-0.088}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.113215	17.11 ± 0.23	$0.407^{+0.079}_{-0.097}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.118238	17.39 ± 0.27	$0.314^{+0.068}_{-0.087}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.119339	17.29 ± 0.08	$0.344^{+0.024}_{-0.026}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—

Таблица 6. Продолжение

$t - T_0$, сут	Зв. величина, mag	Поток, мЯн	Телескоп	Фильтр	GCN №
0.120315	17.33 ± 0.07	$0.333^{+0.022}_{-0.023}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.121292	17.26 ± 0.08	$0.356^{+0.025}_{-0.026}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.122265	17.39 ± 0.06	$0.314^{+0.018}_{-0.019}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.123244	17.33 ± 0.07	$0.334^{+0.020}_{-0.022}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.123261	17.17 ± 0.24	$0.385^{+0.077}_{-0.097}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.124219	17.43 ± 0.08	$0.302^{+0.021}_{-0.022}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.125192	17.30 ± 0.08	$0.341^{+0.026}_{-0.028}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.126167	17.44 ± 0.10	$0.301^{+0.026}_{-0.029}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.127143	17.39 ± 0.08	$0.314^{+0.021}_{-0.023}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.128123	17.45 ± 0.08	$0.299^{+0.022}_{-0.024}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.128284	17.16 ± 0.22	$0.389^{+0.071}_{-0.087}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.129104	17.37 ± 0.07	$0.321^{+0.019}_{-0.021}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.130078	17.38 ± 0.09	$0.318^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.131051	17.46 ± 0.10	$0.294^{+0.026}_{-0.028}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.132032	17.45 ± 0.10	$0.298^{+0.026}_{-0.029}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.133003	17.49 ± 0.09	$0.287^{+0.023}_{-0.025}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.133978	17.34 ± 0.08	$0.328^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.134954	17.36 ± 0.10	$0.322^{+0.027}_{-0.030}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.135935	17.40 ± 0.07	$0.312^{+0.019}_{-0.020}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.136912	17.23 ± 0.09	$0.364^{+0.029}_{-0.031}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.137886	17.36 ± 0.09	$0.323^{+0.025}_{-0.028}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.138562	17.31 ± 0.26	$0.340^{+0.073}_{-0.093}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.141863	17.58 ± 0.09	$0.224^{+0.018}_{-0.019}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—
0.143123	17.72 ± 0.09	$0.250^{+0.035}_{-0.036}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.147173	17.30 ± 0.19	$0.342^{+0.054}_{-0.064}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.148628	17.45 ± 0.10	$0.296^{+0.027}_{-0.029}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.149606	17.44 ± 0.14	$0.301^{+0.036}_{-0.040}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.150584	17.57 ± 0.12	$0.266^{+0.028}_{-0.031}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.151559	17.36 ± 0.11	$0.324^{+0.030}_{-0.033}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.152531	17.53 ± 0.10	$0.276^{+0.024}_{-0.026}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.153510	17.52 ± 0.11	$0.279^{+0.027}_{-0.029}$	ТШАО/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.154643	17.72 ± 0.10	$0.249^{+0.036}_{-0.037}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.154643	17.71 ± 0.13	$0.199^{+0.022}_{-0.025}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—

Таблица 6. Продолжение

$t - T_0$, сут	Зв. величина, mag	Поток, мЯн	Телескоп	Фильтр	GCN №
0.158932	17.48 ± 0.22	$0.289^{+0.053}_{-0.066}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.169696	17.11 ± 0.17	$0.408^{+0.060}_{-0.071}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.176090	17.65 ± 0.09	$0.210^{+0.017}_{-0.018}$	САО РАН/Цейсс-1000	<i>I</i>	28322
0.177833	18.03 ± 0.11	$0.211^{+0.047}_{-0.048}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.180448	17.57 ± 0.24	$0.266^{+0.053}_{-0.066}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>clear</i>	—
0.182092	17.71 ± 0.10	$0.233^{+0.021}_{-0.023}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.182093	17.91 ± 0.09	$0.231^{+0.047}_{-0.048}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.185933	17.90 ± 0.09	$0.167^{+0.013}_{-0.014}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—
0.186352	17.81 ± 0.10	$0.213^{+0.018}_{-0.020}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.186353	18.01 ± 0.12	$0.214^{+0.048}_{-0.049}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.190413	18.00 ± 0.08	$0.197^{+0.032}_{-0.033}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.190611	17.73 ± 0.10	$0.229^{+0.020}_{-0.022}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.190613	17.99 ± 0.11	$0.218^{+0.048}_{-0.049}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.194870	17.80 ± 0.10	$0.215^{+0.019}_{-0.021}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.194873	18.11 ± 0.13	$0.199^{+0.048}_{-0.049}$	КрАО/АЗТ-11	<i>R</i>	—
0.196467	17.68 ± 0.21	$0.241^{+0.042}_{-0.051}$	Китаб (ИСОН)/RC36	<i>Clear</i>	—
0.215673	18.04 ± 0.10	$0.147^{+0.013}_{-0.014}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	<i>I</i>	—
0.220163	18.16 ± 0.07	$0.171^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	<i>R</i>	—
0.230043	18.24 ± 0.09	$0.184^{+0.015}_{-0.016}$	Konkoly/RC80	<i>r</i>	—
0.230043	18.49 ± 0.11	$0.146^{+0.014}_{-0.016}$	Konkoly/RC80	<i>i</i>	—
0.245413	18.27 ± 0.09	$0.133^{+0.012}_{-0.013}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—
0.249893	18.24 ± 0.07	$0.162^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.250093	18.56 ± 0.04	$0.137^{+0.005}_{-0.005}$	Nanshan/NEXT	<i>r</i>	28324
0.267623	18.50 ± 0.05	$0.145^{+0.007}_{-0.007}$	Nanshan/NEXT	<i>i</i>	28324
0.272891	18.91 ± 0.05	$0.099^{+0.004}_{-0.005}$	Liverpool	<i>g</i>	28331
0.275143	18.31 ± 0.08	$0.115^{+0.008}_{-0.009}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—
0.277891	18.55 ± 0.04	$0.138^{+0.005}_{-0.005}$	Liverpool	<i>r</i>	28331
0.279623	18.64 ± 0.06	$0.150^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.280923	18.89 ± 0.04	$0.101^{+0.004}_{-0.004}$	Nanshan/NEXT	<i>g</i>	28324
0.282891	18.65 ± 0.04	$0.126^{+0.005}_{-0.005}$	Liverpool	<i>i</i>	28331
0.287891	18.57 ± 0.04	$0.136^{+0.005}_{-0.005}$	Liverpool	<i>z</i>	28331
0.304883	18.51 ± 0.11	$0.095^{+0.009}_{-0.010}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—
0.309373	18.44 ± 0.09	$0.137^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—

Таблица 6. Окончание

$t - T_0$, сут	Зв. величина, mag	Поток, мЯн	Телескоп	Фильтр	GCN №
0.334613	18.53 ± 0.09	$0.094^{+0.007}_{-0.008}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—
0.339103	18.46 ± 0.09	$0.135^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.375793	18.85 ± 0.12	$0.099^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.400093	18.73 ± 0.08	$0.078^{+0.006}_{-0.006}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	—
0.452193	18.90 ± 0.08	$0.096^{+0.030}_{-0.030}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	—
0.602836	20.06 ± 0.12	$0.018^{+0.004}_{-0.004}$	Swift/UVOT	<i>white</i>	—
1.062923	>20.4	>0.02535	Nanshan/NEXT	<i>r</i>	28330
1.150123	20.37 ± 0.13	$0.020^{+0.002}_{-0.003}$	САО РАН/Цейсс-1000	<i>R</i>	28322
1.167123	20.14 ± 0.10	$0.021^{+0.002}_{-0.002}$	САО РАН/Цейсс-1000	<i>I</i>	28322
1.291593	20.14 ± 0.20	$0.021^{+0.004}_{-0.004}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>I</i>	28333
1.293093	20.99 ± 0.25	$0.029^{+0.028}_{-0.028}$	Кошка (ИНАСАН)/Цейсс-1000	<i>R</i>	28333
1.307923	20.99 ± 0.16	$0.015^{+0.002}_{-0.002}$	Nanshan/NEXT	<i>r</i>	28330
1.346603	21.01 ± 0.05	$0.014^{+0.001}_{-0.001}$	NOT	<i>r</i>	—
1.361891	21.17 ± 0.09	$0.012^{+0.001}_{-0.001}$	Liverpool	<i>g</i>	28331
1.365891	21.13 ± 0.10	$0.013^{+0.001}_{-0.001}$	Liverpool	<i>r</i>	28331
1.370891	21.25 ± 0.09	$0.011^{+0.001}_{-0.001}$	Liverpool	<i>i</i>	28331
1.375891	20.50 ± 0.08	$0.023^{+0.002}_{-0.002}$	Liverpool	<i>z</i>	28331
2.194383	21.54 ± 0.40	$0.007^{+0.002}_{-0.003}$	АбАО/AS-32	<i>R</i>	—
2.728877	22.40 ± 0.34	$0.002^{+0.001}_{-0.001}$	Swift/UVOT	<i>white</i>	—
2.802903	22.40 ± 0.08	$0.004^{+0.0005}_{-0.0005}$	NOT	<i>r</i>	—
3.15717	>20.4	>0.021	Монды/АЗТ-ЗЗИК	<i>R</i>	—
5.20315	>21.5	>0.008	Монды/АЗТ-ЗЗИК	<i>R</i>	—
13.070211	>23.6	>0.00103	МАО/АЗТ-22	<i>R</i>	—
17.077277	>23.7	>0.00094	МАО/АЗТ-22	<i>R</i>	—
44.561496	>23.9	>0.00078	МАО/АЗТ-22	<i>R</i>	—
349.653193	>24.5	>0.00057	МАО/АЗТ-22	<i>R</i>	—
701.205657	25.46 ± 0.35	$0.00020^{+0.00015}_{-0.00028}$	САО РАН/БТА	<i>R</i>	—

Ссылки: GCN № 28308 — Позаненко и др., 2020; GCN № 28316 — Винко и др., 2020; GCN № 28324 — Москвитин и др., 2020а; GCN № 28324 — Жу и др., 2020а; GCN № 28328 — Москвитин и др., 2020б; GCN № 28330 — Жу и др., 2020б; GCN № 28331 — Иццо, 2020; GCN № 28333 — Вольнова и др., 2020.

Н.С. Панков, А.С. Позаненко, П.Ю. Минаев, С.О. Белкин, Е.В. Клунко и А.А. Вольнова благодарят Министерство Образования и Науки Российской Федерации за финансовую поддержку, грант 075-15-2022-1221 (2022-BRICS-8847-2335). Работа была выполнена с использованием данных, предоставляемых Британским центром научных данных Swift при Лестерском университете. В статье использованы данные наблюдений, проведенных с помощью Северного оптического телескопа, основанного в сотрудничестве с Университетом Турку и Орхусским университетом и управляемого совместно Орхусским университетом, Университетом Турку и Университетом Осло, представляющим Данию, Финляндию и Норвегию, Исландский университет и Стокгольмский университет в Обсерватории дель Роке-де-лос-Мучачос, Ла-Пальма, Испания, Канарского института астрофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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).
- Барков и др. (M.V. Barkov, L. Yonggang, and M. Lyutikov), *Astrophys. J.* **907**, 109 (2021).
- Бауэрман и др. (K. Beuermann, F.V. Hessman, K. Reinsch, H. Nicklas, P.M. Vreeswijk, T.J. Galama, E. Rol, J. van Paradijs, et al.), *Astron. Astrophys.* **352**, 26 (1999).
- Белкин О.А., Позаненко А.С., Мазаева Е.Д. и др., Письма в Астрон. журн. **76**, 783 (2020) [O.A. Belkin et al., *Astron. Lett.* **76**, 783 (2020)].
- Беннетт и др. (C.L. Bennett, D. Larson, J.L. Weiland, and G. Hinshaw), *Astrophys. J.* **794**, 135 (2014).
- Бениамини и др. (P. Beniamini, R. Duque, F. Daigne, and R. Mochkovitch), *MNRAS* **492**, 2847 (2020).
- Бисноватый-Коган и др. (G.S. Bisnovatyi-Kogan, V.S. Imshennik, D.K. Nadyozhin, and V.M. Chechetkin), *Astrophys. Space Sci.* **35**, 3 (1975).
- Блэкбёрн (J.K. Blackburn), *Proc. of the ASP Conf. Ser.* (ed. R.A. Shaw, H.E. Payne, and J.J.E. Hayes, San Francisco, 1995), *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV* **77** 367, (1995).
- Бутлер и др. (N.R. Butler, D. Kocevski, J.S. Bloom, and J.L. Curtis), *Astrophys. J.* **671**, 656 (2007).
- Бурроус и др. (D.N. Burrows, J.E. Hill, J.A. Nousek, J.A. Kennea, A. Wells, J.P. Osborne, A.F. Abbey, A. Beardmore, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 165 (2005a).
- Бурроус и др. (D.N. Burrows, P. Romano, A. Falcone, S. Kobayashi, B. Zhang, A. Moretti, P.T. O'Brien, M.R. Goad, et al.), *Science* **309**, 1833 (2005b).
- Бэнд и др. (D. Band, J. Matteson, L. Ford, B. Schaefer, D. Palmer, B. Teegarden, T. Cline, M. Briggs, et al.), *Astrophys. J.* **413**, 281 (1993).
- Банг, Вилер (L. Wang and J.C. Wheeler), *Astrophys. J.* **504**, 87 (1998).
- Банг и др. (X.-G. Wang, B. Zhang, E.-W. Liang, R.-J. Lu, D.-B. Lin, J. Li, and L. Li), *Astrophys. J.* **859**, 160 (2018).
- Дайнутти и др. (M.G. Dainotti, V.F. Cardone, and S. Capozziello), *MNRAS* **391**, 79 (2008).
- Винко и др. (J. Vinko, K. Vida, A. Pal, L. Kriskovics, R. Szakats, A. Ordasi, and K. Sarneczky), *GCN Circ.* **28316**, 1 (2020).
- Вольнова и др. (A.A. Volnova, A.S. Pozanenko, J. Gorosabel, D.A. Perley, D.D. Frederiks, D.A. Kann, V.V. Romyantsev, V.V. Biryukov, et al.), *MNRAS* **442**, 2586 (2014).
- Вольнова и др. (A.A. Volnova, M.V. Pruzhinskaya, A.S. Pozanenko, S.I. Blinnikov, and P.Yu. Minaev), *MNRAS* **467**, 3500 (2017).
- Вольнова и др. (A. Volnova, A. Pozanenko, E. Mazaeva, S. Belkin, and P. Minaev), *Proc. of the XXII Inter. Conf. DAMDID/RCDL-2020* (eds. A. Sychev, S. Makhortov, B. Thalheim, Voronezh, Russia, October 13-16, 2020), *CCIS* **1427**, 148 (2021).
- Вусли (S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **405**, 273 (1993).
- Вусли и др. (S.E. Woosley, R.G. Eastman, and B.P. Schmidt), *Astrophys. J.* **516**, 788 (1999).
- Гoad и др. (M.R. Goad, J.P. Osborne, A.P. Beardmore, P.A. Evans, and Swift-XRT team), *GCN Circ.* **28313**, 1 (2020).
- Грубер и др. (D. Gruber, A. Goldstein, V. Weller von Ahlefeld, P. Narayana Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, D. Byrne, W.H. Cleveland, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **211**, 12 (2014).
- Дайгн и др. (F. Daigne, E.M. Rossi, and R. Mochkovitch), *MNRAS* **372**, 3 (2006).
- Дайнутти и др. (M.G. Dainotti, L.A. Lenart, N. Fraija, S. Nagataki, D.C. Warren, B. De Simone, G. Srinivasaragavan, and A. Mata), *Publ. Astron. Soc. Japan* **73**, 970 (2021).
- Дайнутти и др. (M.G. Dainotti, S. Young, L. Li, D. Levine, K.K. Kalinowski, D.A. Kann, B. Tran, L. Zambrano-Tapia, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **261**, 25 (2022).
- Девяткин и др. (A.V. Devyatkin, D.L. Gorshanov, V.V. Kouprianov, and I.A. Verestchagina), *Space Sci. Rev.* **44**, 68 (2010).
- де Паскуаль и др. (M. de Pasquale, S.R. Oates, M.J. Page, D.N. Burrows, A.J. Blustin, S. Zane, K.O. Mason, and P.W.A. Roming), *MNRAS* **377**, 1638 (2007).
- де Паскуаль и др. (M. De Pasquale, S.R. Oates, J.L. Racusin, D.A. Kann, B. Zhang, A. Pozanenko, A.A. Volnova, and A. Trotter), *MNRAS* **455**, 1027 (2016).
- Дерели и др. (H. Dereli-Begue, A. Pe'er, F. Ryde, S.R. Oates, B. Zhang, and M.G. Dainotti), *Nature Communicat.* **13**, 5611 (2022).

31. Дюке и др. (R. Duque, P. Beniamini, F. Daigne, and R. Mochkovitch), *MNRAS* **513**, 951 (2022).
32. Жу и др. (Z.P. Zhu, Y. Fu, X. Liu, D. Xu, X. Gao, X. Zhang, and J.Z. Liu), *GCN Circ.* **28324**, 1 (2020a).
33. Жу и др. (Z.P. Zhu, Y. Fu, X. Liu, D. Xu, X. Gao, X. Zhang, and J.Z. Liu), *GCN Circ.* **28330**, 1 (2020b).
34. Иццо (L. Izzo), *GCN Circ.* **28331**, 1 (2020).
35. Ёи и др. (Sh.-X. Yi, H. Yu, F.Y. Wang, and Z.-G. Dai), *Astrophys. J.* **844**, 79 (2017).
36. Канеко и др. (Y. Kaneko, R.D. Preece, M.S. Briggs, W.S. Paciesas, C.A. Meegan, and D.L. Band), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **166**, 298 (2006).
37. Колгейт (S.A. Colgate), *Canadian J. Phys. Suppl.* **46**, 476 (1968).
38. Коллаборация HI4PI и др. (HI4PI Collaboration, N. Ben Bekhti, L. Floer, R. Keller, J. Kerp, D. Lenz, B. Winkel, J. Ballin, et al), *Astron. Astrophys.* **594**, 116 (2016).
39. Комиссаров и др. (S. Komissarov, V. Nektarios, A. Konigl, and M. Barkov), *MNRAS* **394**, 1182 (2009).
40. Коувелитоу 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**, 101 (1993).
41. Кошут и др. (T.M. Koshut, W.S. Paciesas, C. Kouveliotou, J. van Paradijs, G.N. Pendleton, G.J. Fishman, and C.A. Meegan), *Astrophys. J.* **463**, 570 (1996).
42. Куин и др., (N.P.M. Kuin, M.H. Siegel, Swift/UVOT Team), *GCN Circ.* **28311**, 1 (2020).
43. Кумар, Жанг (P. Kumar and B. Zhang), *Phys. Rep.* **561**, 1 (2015).
44. Куприянов (V. Kouprianov), 39th COSPAR Scientific Assembly (Mysore, India, July 14-22, 2012), *COSPAR* **39**, 974 (2012).
45. Ламб и др. (G.P. Lamb, D.A. Kann, J.J. Fernandez, I. Mandel, A.J. Levan, and N.R. Tanvir), *MNRAS* **506**, 4163 (2021).
46. Лаццати и др. (D. Lazzati, S. Covino, G. Ghisellini, D. Fugazza, S. Campana, P. Saracco, P.A. Price, and E. Berger), *Astron. Astrophys.* **378**, 996 (2001).
47. Леван А., *Gamma-Ray Bursts* (Inst. Phys. Publ., 2018), т. 1, с. 250.
48. Левинсон, Эйхлер (A. Levinson and D. Eichler), *Astrophys. J.* **629**, 13 (2005).
49. Лин и др. (A. Lien, T. Sakamoto, S.D. Barthelmy, W.H. Baumgartner, J.K. Cannizzo, K. Chen, N.R. Collins, and J.R. Cummings), *Astrophys. J.* **829**, 7 (2016).
50. Лучков и др. (B.I. Luchkov, I.G. Mitrofanov, and I.L. Rozental'), *Physics-Uspekhi* **39**, 695 (1996).
51. Мазетти и др. (N. Masetti, E. Palazzi, E. Pian, L. Hunt, J.P.U. Fynbo, J. Gorosabel, S. Klose, S. Benetti, et al.), *Astron. Astrophys.* **438**, 841 (2005).
52. Маццали и др. (P.A. Mazzali, J. Deng, N. Tominaga, K. Maeda, K. Nomoto, T. Matheson, K.S. Kawabata, K.Z. Stanek, and P.M. Garnavich), *Astrophys. J.* **599**, 95 (2003).
53. Махаджан и др. (S. Mahajan, M.J. Drinkwater, S. Driver, A.M. Hopkins, A.W. Graham, S. Brough, M.J.I. Brown, B.W. Holwerda, et al.), *MNRAS* **475**, 788 (2018).
54. Месарош, Рис (P. Meszaros and M.J. Rees), *arXiv e-prints*, 1401.3012 (2014).
55. Мецгер и др. (B.D. Metzger, D. Giannios, T.A. Thompson, N. Bucciantini, and E. Quataert), *MNRAS* **413**, 2031 (2011).
56. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Лозников В.М., Письма в Астрон. журн. **36**, 744 (2010a) [P.Yu. Minaev et al. *Astron. Lett.* **36**, 707 (2010a)].
57. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Лозников В.М., Астрофиз. Бюлл. **65**, 343 (2010b) [P.Yu. Minaev et al., *Astrophys. Bull.* **65**, 326 (2010b)].
58. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Мольков С.В., Гребенев С.А., Письма в Астрон. журн. **40**, 271 (2014) [P.Yu. Minaev et al., *Astron. Lett.* **40**, 235 (2014)].
59. Минаев П.Ю., А.С. Позаненко, Письма в Астрон. журн. **43**, 3 (2017) [P.Y. Minaev, A.S. Pozanenko, *Astron. Lett.* **43**, 1 (2017)].
60. Минаев, Позаненко (P.Y. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **46**, 573 (2020a).
61. Минаев, Позаненко (P.Y. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2020b).
62. Минаев, Позаненко (P.Y. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2021).
63. Мозгунов Г.Ю., Минаев П.Ю., А.С. Позаненко, Письма в Астрон. журн. **47**, 183 (2021) [G.Yu. Mozgunov et al., *Astron. Lett.* **47**, 150 (2021)].
64. Монет и др. (D.G. Monet, S.E. Levine, B. Canzian, H.D. Ables, A.R. Bird, C.C. Dahn, H.H. Guetter, H.C. Harris, et al.), *Astron. J.* **125**, 984 (2003).
65. 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).
66. Ньювилль и др. (M. Newville, R. Otten, A. Nelson, A. Ingargiola, T. Stensitzki, D. Allan, A. Fox, F. Carter, et al.), *Zenodo* (2021).
67. Оатес и др. (S.R. Oates, M.J. Page, P. Schady, M. de Pasquale, P.A. Evans, K.L. Page, M.M. Chester, and P.A. Curran), *MNRAS* **412**, 561 (2011).
68. Оатес и др. (S.R. Oates, N.P.M. Kuin, M. De Pasquale, S. Campana, A. Tohuvavohu, M.H. Siegel, Neil Gehrels Swift Observatory Team), *GCN Circ.* **28338**, 1 (2020).
69. Отделение научного программного обеспечения при Институте исследований космоса с помощью космического телескопа (Science Software Branch at STScI), *Astrophys. Source Code Lib.* **1207.011**, 1 (2012).

70. Панков и др. (N. Pankov, A. Pozanenko, V. Kouprianov, and S. Belkin), Proc. XXIII Inter. Conf. DAMDID/RCDL-2021 (Ed. A. Pozanenko, S. tupnikov, B. Thalheim, E. Mendez, N. Kiselyova, Moscow, Russia, October 26тAY29, 2021), CCIS **1620**, 104 (2022).
71. Пачинский (B. Paczynski), *Astrophys. J.* **308**, 43 (1986).
72. Пачинский (B. Paczynski), Proc. Fourth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium (Ed. C.A. Meegan, R.D. Preece, T.M. Koshut), AIP Conf. Proceed. **428**, 783 (1998).
73. Перна и др. (R. Perna, P.J. Armitage, and B. Zhang), *Astrophys. J.* **636**, 29 (2006).
74. Пей (Y.C. Pei), *Astrophys. J.* **395**, 130 (1992).
75. Пирани (T. Piran), *Rev. Modern Phys.* **76**, 1143 (2004).
76. Пиро и др. (L. Piro, M. De Pasquale, P. Soffitta, D. Lazzati, L. Amati, E. Costa, M. Feroci, F. Frontera, et al.), *Astrophys. J.* **623**, 314 (2005).
77. Позаненко А.С., Румянцев В.В., Лозников В.М. и др., Письма в Астрон. журн. **34**, 141 (2008) [A.S. Pozanenko et al., *Astron. Lett.* **34**, 141 (2008)].
78. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Yu. Minaev, A.A. Volnova, E.D. Mazaeva, A.S. Moskvitin, V.A. Samodurov, V.M. Loznikov, and M. Lyutikov), *Astrophys. J.* **852**, 30 (2018a).
79. Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **45**, 768 (2019) [A.S. Pozanenko, P.Yu. Minaev, S.A. Grebenev, I.V. Chelovekov, *Astron. Lett.* **45**, 710 (2019)].
80. Позаненко и др. (A. Pozanenko, N. Pankov, S. Belkin, A. Volnova, I. Reva, A. Zhornichenko, A. Novichonok, S. Naroenkov, A. Antoniuk, R.Ya. Inasaridze, et al.), *GCN Circ.* **28359**, 1 (2020).
81. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Yu. Minaev, and A.A. Volnova), Письма в Астрон. журн. **47**, 791 (2021).
82. Постнов (K.A. Postnov), *Phys. Usp.* **42**, 469 (1999).
83. Прилуцкий, Усов (O.F. Prilutskii and Usov V.V.), *Astrophys. Space Sci.* **34**, 395 (1975).
84. Ресми и др. (L. Resmi, K. Misra, G. Johannesson, A.J. Castro Tirado, J. Gorosabel, M. Jelinek, D. Bhattacharya, and P. Kubanek), *MNRAS* **427**, 288 (2012).
85. Розенталь и др. (I.L. Rozental, V.V. Usov, and I.V. Estulin), *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 97 (1983).
86. Роулинсон и др. (A. Rowlinson, P.T. O'Brien, B.D. Metzger, N.R. Tanvir, and A.J. Levan), *MNRAS* **430**, 2 (2013).
87. Сари и др. (R. Sari, T. Piran, and J.P. Halpern), *Astrophys. J.* **519**, 17 (1999).
88. Свенсон и др. (C.A. Swenson, P.W.A. Roming, M. De Pasquale, and S.R. Oates), *Astrophys. J.* **774**, 2 (2013).
89. Сигель и др. (M.H. Siegel, J.D. Gropp, J.A. Kennea, N.P.M. Kuin, S. Laha, B. Sbarufatti, Neil Gehrels Swift Observatory Team), *GCN Circ.* 28307, 1 (2020).
90. Усов (V.V. Usov), *Nature* **357**, 472 (1992).
91. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, V. Beckmann, A. Rau, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, 299 (2003).
92. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, C.A. Meegan, W.S. Paciesas, P.N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, E. Burns, and W.H. Cleveland), *Astrophys. J.* **893**, 46 (2020).
93. Хаккила, Прис (J. Hakkila and R.D. Preece), *Astrophys. J.* **740**, 104 (2011).
94. Хилл и др. (J.E. Hill, D.C. Morris, T. Sakamoto, G. Sato, D.N. Burrows, L. Angelini, P. Lorella, M. Claudio, et al.), *Astrophys. J.* **639**, 303 (2006).
95. Цветкова и др. (A. Tsvetkova, A. Frederiks, D. Golenetskii, et al.), *Astrophys. J.* **850**, 161 (2017).
96. Цветкова и др. (A. Tsvetkova, A. Frederiks, D. Svinkin, et al.), *Astrophys. J.* **908**, 83 (2021).
97. 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**, 1 (2016).
98. Шади и др. (P. Schady, M.J. Page, S.R. Oates, M. Still, M. de Pasquale, T. Dwelly, N.P.M. Kuin, S.T. Holland, et al.), *MNRAS* **401**, 4 (2010).
99. Шлафли, Финкбайнер (E.F. Schlafly and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
100. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkbeiner, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
101. Ю и др. (Y.-W. Yu, H. Gao, F.-Y. Wang, and B.-B. Zhang), *arXiv eprints*, 2204.04417 (2022).
102. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, L.G. Tyler, J.P. Osborne, M.R. Goad, P.T. O'Brien, L. Vetere, et al.), *Astron. Astrophys.* **469**, 379 (2007).
103. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, R.L.C. Starling, D.N. Burrows, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).
104. Эйхлер, Левинсон (D. Eichler and A. Levinson), *Astrophys. J.* **614**, 13 (2004).