

МНГОВОНОВНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB 181201A И ОБНАРУЖЕНИЕ СВЯЗАННОЙ С НИМ СВЕРХНОВОЙ

© 2020 г. С. О. Белкин^{1,2*}, А. С. Позаненко^{1,2}, Е. Д. Мазаева¹, А. А. Вольнова¹,
П. Ю. Минаев¹, Н. Томинага^{3,4}, С. А. Гребенев¹, И. В. Человеков¹, Д. Бакли⁵,
С. И. Блинников^{1,6,7}, А. Е. Вольвач⁸, Л. Н. Вольвач⁸, Р. Я. Инасаридзе⁹,
Е. В. Клунко¹⁰, И. Е. Молотов¹¹, И. В. Рева¹², В. В. Румянцев⁸, Д. Н. Честнов¹¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

³Университет Конан, Кобе, Япония

⁴Токийский университет, Кашива, Япония

⁵Южноафриканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, Южная Африка

⁶Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

⁷Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова, Москва, Россия

⁸Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, Россия

⁹Абастуманская астрофизическая обсерватория Государственного университета им. Ильи Чавчавадзе, Тбилиси, Грузия

¹⁰Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

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

¹²Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

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

Представлены многоцветные фотометрические наблюдения в оптическом диапазоне, а также комплексное исследование в рентгеновском, гамма- и радиодиапазонах гамма-всплеска GRB 181201A и его послесвечения. Наблюдения в оптическом диапазоне начались через ~0.5 дня после всплеска и продолжались почти непрерывно ~24 дня. Они были возобновлены спустя 8 месяцев, что позволило определить вклад родительской галактики в измеренные потоки и оценить связанное с ней поглощение. Столь полное покрытие кривой блеска стало возможным благодаря скоординированной работе сети из девяти телескопов, расположенных по всему миру. В конце первого цикла наблюдений были получены убедительные доказательства разгорающейся вспышки сверхновой на месте источника всплеска. Таким образом, всплеск GRB 181201A стал еще одним событием, подтвердившим связь гамма-всплесков со сверхновыми. До него было известно 30 таких событий, основанных на фотометрических наблюдениях послесвечений всплесков. Сравнение вызванного сверхновой избытка излучения в кривой блеска послесвечения GRB 181201A с другими событиями позволило определить некоторые параметры сверхновой.

Ключевые слова: гамма-всплески, прекурсор, послесвечение, сверхновая, фотометрия, многоцветные наблюдения

DOI: 10.31857/S0320010820120013

ВВЕДЕНИЕ

За последние ~20 лет интенсивных наблюдений и всесторонних исследований гамма-всплесков

(GRBs) и их оптических послесвечений была установлена тесная связь так называемых “длинных” ($T_{90} \gtrsim 2$ с, см. Кувелиоту и др., 1993; Кошут и др., 1996) GRBs со сверхновыми (SN) типа Ic, вызванными коллапсом почти голого ядра массивных звезд на конечной стадии их эволюции. Пер-

* Электронный адрес: astroboy96@mail.ru

вое достоверное свидетельство такой связи было найдено у всплеска GRB 980425 и сверхновой SN 1998bw (типа Ic). События совпали как по времени и положению на небе, так и по красному смещению $z = 0.0085$, т.е. они произошли на одном и том же расстоянии ~ 40 Мпк от Земли, что, конечно, не могло быть случайностью (Галама и др., 1998; Ивамото и др., 1998; Кулкарни и др., 1998). Одним из следующих ярких подтверждений связи гамма-всплесков со сверхновыми стало очень интенсивное событие GRB 030329, ассоциированное с SN 2003dh (Хьорт и др., 2003; Станек и др., 2003; Мэтисон и др., 2003). Эта сверхновая также была отнесена к типу Ic. Кинетическая энергия разлета сброшенных звездных оболочек в обоих событиях превышала 10^{52} эрг и была более чем на порядок величины больше энергии взрыва в обычных сверхновых. Их стали называть гиперновыми (Пачинский, 1998).

Изучение гамма-всплесков испытало заметный подъем после запуска орбитальной обсерватории Swift (Джерельс и др., 2004), обладающей способностью определять координаты произошедших GRBs с точностью $\lesssim 5''$ в мягком рентгеновском диапазоне и оперативно оповещать о них обсерватории по всему миру. Это сделало возможным быстрое реагирование наземных телескопов и более раннее наблюдение оптического послесвечения GRBs. Также это позволило получать более детальные многоцветные кривые блеска и спектроскопические данные, необходимые для измерения космологического красного смещения. Тем не менее из тысяч зарегистрированных GRBs лишь несколько десятков были ассоциированы со сверхновыми. Связь SN/GRB путем фотометрических наблюдений была подтверждена у 30 GRBs, у 23 GRBs, частично перекрывающихся с фотометрическими случаями, она была подтверждена в результате спектроскопических наблюдений (Кано и др., 2011а,б, 2015, 2017б; Кани и др., 2019). Все это достаточно близкие ($z < 0.5$) события, у более далеких SNe зарегистрировать сложно. Самый далекий всплеск, у которого была обнаружена сверхновая (GRB 000911), находится на $z = 1.06$ (Мазетти и др., 2005). Из всех таких GRBs лишь несколько имеют статистически обеспеченную кривую блеска сверхновой. Каждый новый всплеск, демонстрирующий связь со сверхновой, заметно обогащает выборку подобных событий и вносит свой весомый вклад в распознавание природы “длинных” GRBs.

Всю кривую блеска “длинного” GRB в оптическом диапазоне можно разделить на четыре последовательно сменяющие друг друга фазы. Сначала идет активная фаза, во время которой центральная машина всплеска все еще продолжает генерировать энергию. Данную компоненту крайне

редко удается пронаблюдать в оптическом диапазоне из-за необходимости этапа уточнения локализации всплеска рентгеновскими телескопами и относительно медленного реагирования наземных оптических инструментов на сообщения о его регистрации. Рентгеновские наблюдения необходимы, поскольку локализация всплеска в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах обычно бывает недостаточно точной для наведения оптических телескопов. Соответственно, когда телескопы начинают наблюдения источника всплеска, активная фаза уже заканчивается.

После активной фазы следует стадия послесвечения. Она, как правило, самая долгая, во время нее падение потока описывается степенным законом, либо же степенным законом с изломом. Излом связан с геометрическим эффектом коллимации джета всплеска (“jet break”). На стадии послесвечения могут проявляться неоднородности, представляющие из себя локальные отклонения от степенного закона в виде всплесков и провалов (Мазаева и др., 2018в).

Далее, в интервале 7–30 дней после всплеска в кривой блеска может проявиться избыток излучения, связанный с разгоранием сверхновой (расширением ее фотосферы с соответствующим усилением светимости). Это — фаза сверхновой. На кривой блеска появление сверхновой на фоне степенного закона падения светимости послесвечения выглядит как протяженная вспышка специфического профиля. Излучение сверхновой проявляется тогда, когда работа центральной машины всплеска уже давно окончилась, дополнительному мощному источнику энергии взяться неоткуда. Сам профиль вспышки сверхновой может зависеть от количества радиоактивного ^{56}Ni , синтезированного при взрыве (например, Кано и др., 2017а,б), и от активности, образовавшегося звездного остатка, хотя обычно его излучение слишком слабо, чтобы быть зарегистрированным на космологических расстояниях. Спектры, измеренные во время фазы сверхновой, как правило, характеризуются широкими линиями и отсутствием линий водорода и гелия, что является одним из отличительных признаков сверхновых типа Ic.

Наконец, источник затухает, поток послесвечения всплеска и излучения сверхновой падает ниже уровня светимости родительской галактики. Это последняя фаза оптической кривой блеска. Появляется возможность исследовать свойства галактики, поглощение в ней и оценить вклад ее излучения в измеренную общую светимость. Определить поглощение в родительской галактике можно, например, путем моделирования распределения спектральной плотности ее излучения по частоте и ее сравнения с моделями хорошо изученных галактик.

Из сказанного следует, что поток излучения, наблюдаемый от источника гамма-всплеска со сверхновой на позднем этапе (вне активной фазы), состоит из трех компонент: вклад послесвечения, вклад самой сверхновой и постоянный вклад от родительской галактики. Аккуратное вычитание вклада послесвечения и родительской галактики из общего потока, регистрируемого от источника, равно как и учет поглощения в нашей (Шлафлай, Финкбайнер, 2011) и в родительской галактиках, позволяет построить корректную кривую блеска сверхновой, связанной с гамма-всплеском, и далее — оценить ее параметры. Каждая указанная компонента может быть включена в процедуру аппроксимации в виде дополнительного параметра или набора параметров (Фен и др., 2011; Соллерман и др., 2007; Грайнер и др., 2015). Подобный феноменологический подход во многом основан на стандартной теории GRBs, утверждающей, что свет, подпитывающий оптическое послесвечение, имеет синхротронное происхождение и подчиняется степенному закону как по времени, так и по частоте (Сари и др., 1998).

ОТКРЫТИЕ GRB 181201A И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первое сообщение о регистрации мощного длинного (~ 180 с) всплеска GRB 181201A было распространено системой IBAS (Мерегетти и др., 2003) международной астрофизической обсерватории гамма-лучей INTEGRAL (Винклер и др., 2003). Всплеск был зарегистрирован 1 декабря 2018 г., в 02:38:00 UT в поле зрения гамма-телескопа IBIS/ISGRI (Мерегетти и др., 2018a). Это время будет использоваться в дальнейшем как момент начала отсчета T_0 . Интегральный поток излучения от всплеска в диапазоне 20–200 кэВ превысил 10 ± 4 эрг см^{-2} . Телескоп IBIS/ISGRI оснащен кодирующей апертурой и способен получать изображения неба с угловым разрешением $\simeq 12'$ (FWHM), поэтому GRB 181201A был сразу достаточно хорошо ($\lesssim 2'$) локализован (см. рис. 1).

Регистрация всплеска была подтверждена орбитальными обсерваториями Insight-HXMT/HE (Цай и др., 2018), Konus-WIND (Свинкин и др., 2018) и AstroSat/CZTI (Ханам и др., 2018), причем Konus-WIND видел излучение всплеска вплоть до ~ 15 МэВ. Еще более жесткое излучение ($\gtrsim 100$ МэВ) было зарегистрировано от всплеска телескопом LAT обсерватории Fermi (Аримото и др., 2018), и это несмотря на то, что обсерватория смогла начать его наблюдения лишь через ~ 2000 с после регистрации. Рентгеновский монитор Fermi/GBM к этому моменту уже не

смог увидеть жесткое рентгеновское излучение всплеска.

Отметим, что во всех трех указанных выше жестких рентгеновских экспериментах всплеск был зарегистрирован на ~ 2 мин позже времени T_0 его регистрации телескопом IBIS/ISGRI: AstroSat/CZTI в 02:39:58 UT, Insight-HXMT/HE в 39:53 и Konus-WIND в 39:52.36. Как мы увидим далее, такое различие связано с двухпиковой структурой всплеска. Первый пик (прекурсор) был заметно мягче второго — основного, поэтому он значительно проявился лишь в данных телескопа IBIS/ISGRI, чувствительного в более мягком диапазоне энергий (20–200 кэВ) по сравнению с остальными приборами.

Телескоп Swift/XRT был наведен в направлении GRB 181201A спустя 4 часа после его регистрации обсерваторией INTEGRAL и провел получасовое наблюдение с 6:33 до 7:06 UT. Внутри круга ошибок локализации всплеска телескопом IBIS/ISGRI был обнаружен затухающий рентгеновский источник со степенным спектром, объясненный послесвечением (Мерегетти и др., 2018b; Пинторе и др., 2018). Последующие наблюдения, продолжавшиеся до 9:58, довели экспозицию до полутора часов и позволили Пэйджу и др. (2018) локализовать источник всплеска с точностью лучшей $2''$: R. A. = 319°29666, Decl. = $-12^{\circ}63082$ (эпоха J2000). Ранее (через 18 с после времени T_0) в этом направлении телескопом MASTER-OAFA был обнаружен оптический транзит ярче 16.2 звездной величины (Подеста и др., 2018). Наблюдения, выполненные Конгом (2018) на 0.5-м телескопе T31 проекта iTelescope через 8.3 часа после момента T_0 , показали, что источник быстро затухает ($R = 16.6 \pm 0.03$), что подтвердило правильность оптического отождествления гамма-всплеска. Спектроскопия оптического источника, выполненная с помощью телескопа VLT Европейской южной обсерватории, позволила по положению линии Mg I и дублета линий Mg II определить его красное смещение $z = 0.45$ (Иzzo и др., 2018).

После сообщения о регистрации всплеска GRB 181201A нами были организованы регулярные наблюдения его положения на небе в оптическом и радиодиапазонах с целью обнаружения и исследования послесвечения и возможной сверхновой, с ним связанной. Наблюдения проводились на протяжении последующих трех недель на девяти телескопах разных наземных обсерваторий, расположенных в Грузии, Казахстане (на Тянь-Шане), России (в Крыму и Саянах), США (на Гавайях), Чили и ЮАР. Большинство из них входят в сеть телескопов IKI GRB Follow-up Network (IKI GRB-FuN, Вольнова и др., 2020). Несколько наблюдений всплеска были выполнены по нашему

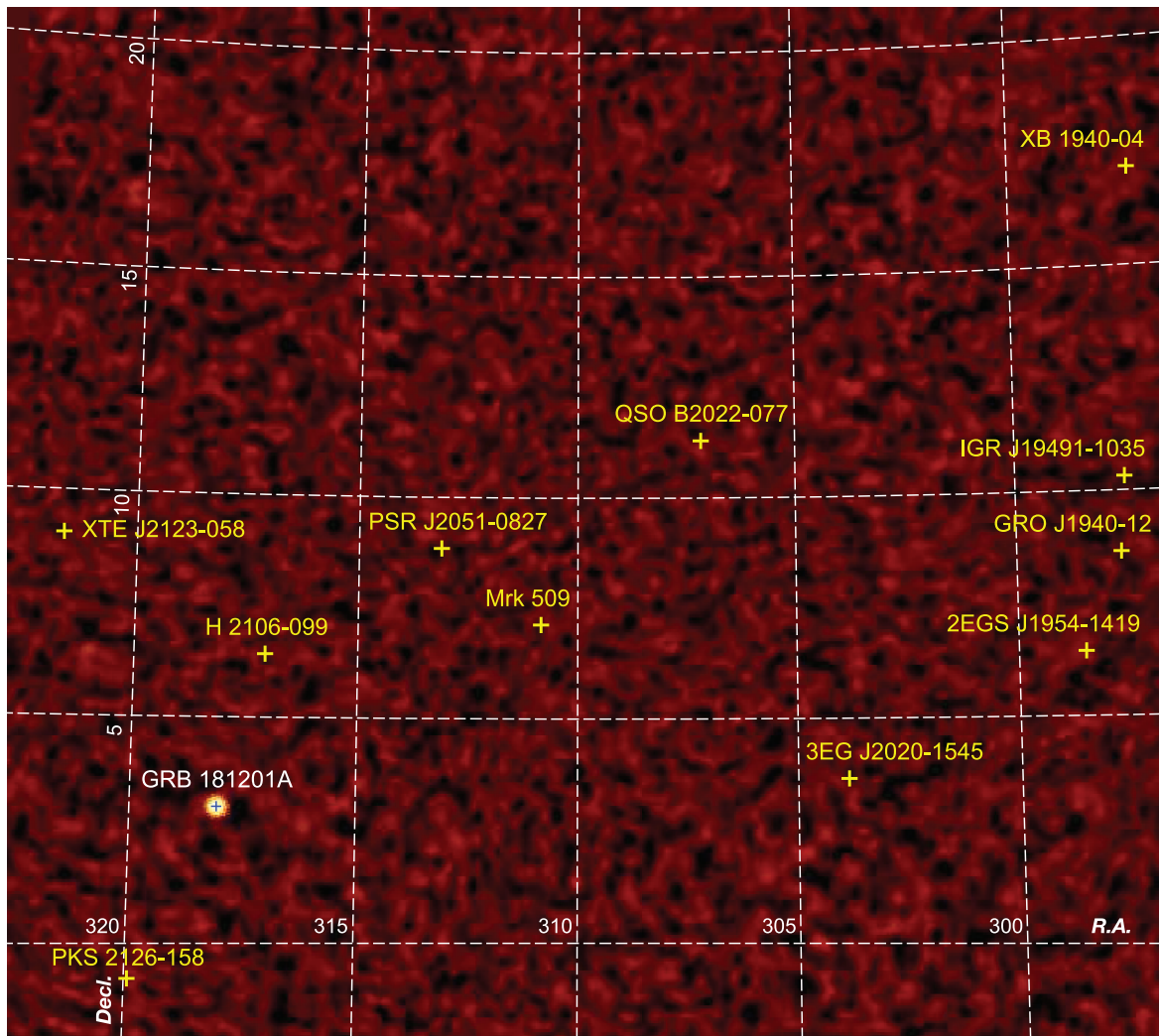


Рис. 1. Локализация GRB 181201A телескопом IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. Показана карта отношения сигнала к шуму S/N для участка неба в поле зрения телескопа, полученная за время всплеска (~ 180 с). Размер участка $25^\circ \times 25^\circ$, диапазон энергий 20–100 кэВ, шкала логарифмическая, значение S/N для всплеска $\sim 85\sigma$. Желтым цветом показаны положения известных (в основном внегалактических) источников.

запросу обсерваторией Gemini. Предварительные результаты проведенных наблюдений были опубликованы в циркулярах GCN Белкин и др. (2018а,б), Мазаева и др. (2018а,б), Рева и др. (2018), Вольнова и др. (2018а,б). В радиодиапазоне всплеск наблюдался на телескопе RT-22 Крымской астрофизической обсерватории (Симеиз, Россия).

Послесвечение всплеска наблюдалось также другими научными группами на разных телескопах. Некоторые опубликованные в литературе результаты будут использованы в данном исследовании. Большой объем данных независимых оптических наблюдений послесвечения GRB 181201A представлен Ласкаром и др. (2019), использовавшими их для моделирования обратной ударной волны, возникающей в джете при его столкновении с окружающей средой. Излучение обратной ударной

волны проявилось на кривой блеска в радио- и миллиметровом диапазонах длин волн через 3–4 дня после основного события. Оптические наблюдения позволили оценить параметры волны.

Ниже в статье будут подробно описаны: активная фаза всплеска (по данным его рентгеновских и гамма-наблюдений приборами обсерватории INTEGRAL), его послесвечение (по данным проведенных нами оптических и радионаблюдений, а также мягких рентгеновских наблюдений) и фаза проявления сверхновой (в оптической кривой блеска). Сравнив скорость нарастания блеска сверхновой с кривыми блеска ранее известных сверхновых типа Ic, связанных с гамма-всплесками, мы оценили основные параметры сверхновой во всплеске GRB 181201A.

АКТИВНАЯ ФАЗА ВСПЛЕСКА

Начальная фаза всплеска наблюдалась лишь в рентгеновском и гамма-диапазонах и, вероятно, наиболее полно — орбитальной обсерваторией INTEGRAL. Всплеск был значимо зарегистрирован сразу четырьмя приборами обсерватории: детекторами ISGRI и PICsIT гамма-телескопа IBIS, германиевым детектором гамма-спектрометра SPI и антисовпадательной защитой этого спектрометра ACS.

Используемые жесткие рентгеновские и гамма-телескопы и анализ их данных

Гамма-телескоп IBIS обсерватории (Убертини и др., 2003) предназначен для картографирования неба и исследования обнаруженных источников в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах с энергетическим разрешением $E/\Delta E \sim 13$ на 100 кэВ. Получение изображений основано на принципе кодирующей апертуры. Телескоп имеет поле зрения (FWZR) размером $30^\circ \times 30^\circ$ (область полного кодирования $9^\circ \times 9^\circ$) и угловое разрешение $12'$ (FWHM). Внутри такого широкого поля телескоп в год регистрирует 6–8 всплесков, а его разрешение позволяет определять их положение с точностью $\lesssim 2'$. Телескоп имеет два детекторных слоя: ISGRI (Лебран и др., 2003) с максимумом чувствительности в диапазоне 18–200 кэВ и PICsIT (Лабанти и др., 2003), чувствительный в диапазоне 0.2–10 МэВ. Площадь каждого детектора равна $\sim 2600 \text{ см}^2$, эффективная площадь для событий в центре поля зрения $\sim 1100 \text{ см}^2$ (половина детекторов затеняется непрозрачными элементами маски).

Гамма-спектрометр SPI обсерватории (Ведренн и др., 2003; Рок и др., 2003) предназначен для тонкой ($E/\Delta E \sim 550$ в линии 1.7 МэВ) спектроскопии космического гамма-излучения. Телескоп имеет максимум чувствительности в диапазоне 0.05–8 МэВ. Также как телескоп IBIS, он обладает способностью строить изображение неба внутри своего поля зрения (гексагонального, диаметром 32° , FWZR), но имеет низкое угловое разрешение $2:5$ (FWHM). Геометрическая площадь 19 германиевых детекторов спектрометра SPI равна 500 см^2 , эффективная — в два раза меньше геометрической.

Значительно большую площадь имеет антисовпадательная защита (ACS) этого спектрометра (Пау и др., 2004, 2005). Защита SPI-ACS состоит из 91 сцинтилляционного кристалла $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) общей массой 512 кг (фон Кинлин и др., 2003а,б; Райд и др., 2003). Их суммарная эффективная площадь для регистрации гамма-всплесков

достигает $\sim 0.7 \text{ м}^2$. На Землю передается общая скорость счета с разрешением 50 мс, никакой пространственной или спектральной информации в телеметрию не поступает. Максимум чувствительности приходится на диапазон от $\sim 80 \text{ кэВ}$ до $\gtrsim 10 \text{ МэВ}$. В силу особенностей геометрии конструкции спектрометра SPI его защита, почти все-направленная, слабо чувствительна к всплескам, приходящим под малыми углами к оси телескопа. Всплеск GRB 181201A наблюдался в поле зрения спектрометра, но под достаточно большим углом к оси $\simeq 11^\circ 7'$.

Анализ данных этих приборов был проведен с помощью стандартного пакета программ обработки данных обсерватории INTEGRAL — OSA (Курвазье и др., 2003). При обработке данных телескопа IBIS/ISGRI использовался также комплекс программ, разработанных в ИКИ РАН (Ревнивцев и др., 2004).

Временные профили гамма-всплеска

Кривые блеска всплеска GRB 181201A, полученные детекторами IBIS/ISGRI, SPI и SPI-ACS, представлены на рис. 2. В случае IBIS/ISGRI использовались данные в диапазоне 20–100 кэВ, в случае SPI — в диапазоне 50–100 кэВ. Кривая блеска, зарегистрированная детектором IBIS/PICsIT в более жестком диапазоне, не показана, поскольку она мало чем отличается от кривой, полученной SPI-ACS, разве что худшей статистикой. При восстановлении кривой блеска IBIS/ISGRI учитывалась неравномерность засветки элементов детектора потоком от источника из-за кодирующей апертуры. Для всех кривых блеска проведено вычитание фона, аппроксимированного полиномиальной моделью третьей степени.

Видно, что гамма-всплеск состоит из двух эпизодов излучения, разделенных интервалом $\sim 80 \text{ с}$. В кривой блеска по данным IBIS/ISGRI, в которой оба эпизода излучения особенно хорошо видны, к сожалению, присутствуют провалы, связанные с недостаточным объемом памяти для записи всех фотонов столь мощного события. На рис. 3 показаны карты отношения сигнала к шуму S/N , полученные по данным телескопа IBIS/ISGRI раздельно для этих эпизодов излучения, в интервалах времени 0–60 и 114–183 с после момента T_0 . Рисунок показывает достоверность локализации GRB 181201A и подтверждает, что это были действительно два эпизода одного события, а не случайное наложение не связанных между собой гамма-всплесков.

По данным всех трех приборов по стандартной методике (Кошут и др., 1996) проведены расчеты параметров длительности всплеска T_{50} и T_{90} , а

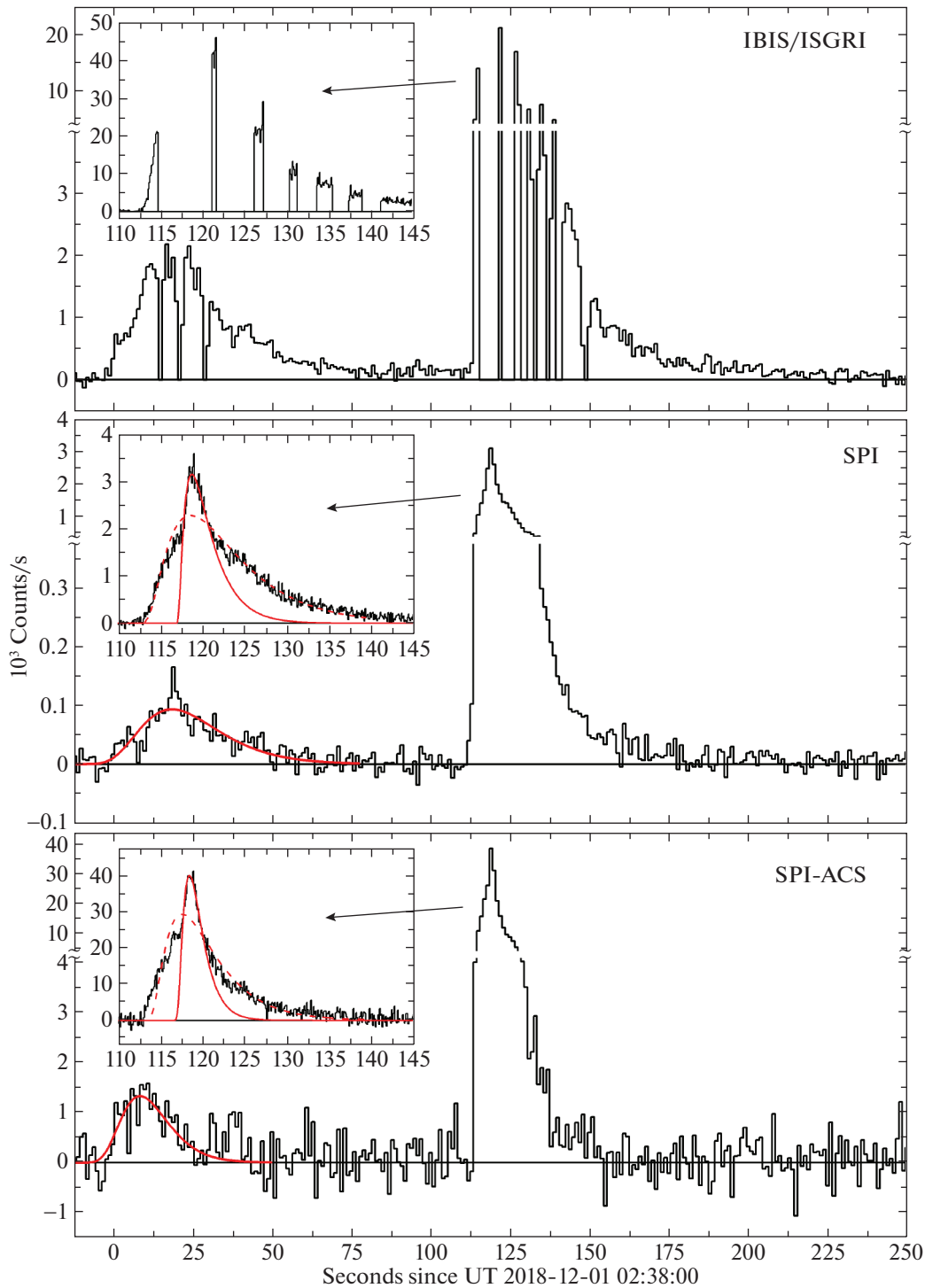


Рис. 2. Кривая блеска всплеска GRB 181201A во время активной фазы с временным разрешением 1 с по данным приборов обсерватории INTEGRAL: детектора ISGRI гамма-телескопа IBIS (диапазон 20–100 кэВ, *вверху*), гамма-спектрометра SPI (50–100 кэВ, *в середине*) и антисовпадательной защиты ACS спектрометра SPI (80 кэВ–10 МэВ, *внизу*). На врезке — кривые блеска основного (второго) эпизода активности с временным разрешением 0.1 с. Красные кривые — аппроксимация данных экспоненциальной моделью.

также сделана оценка полной длительности T_{100} как для временного интервала, охватывающего весь всплеск, так и для двух отдельных эпизодов

излучения. Результаты представлены в табл. 1. Для

двух эпизодов излучения по данным приборов SPI и SPI-ACS указана также их ширина на полувысоте (FWHM).

Параметры длительности T_{50} и T_{90} всплеска и

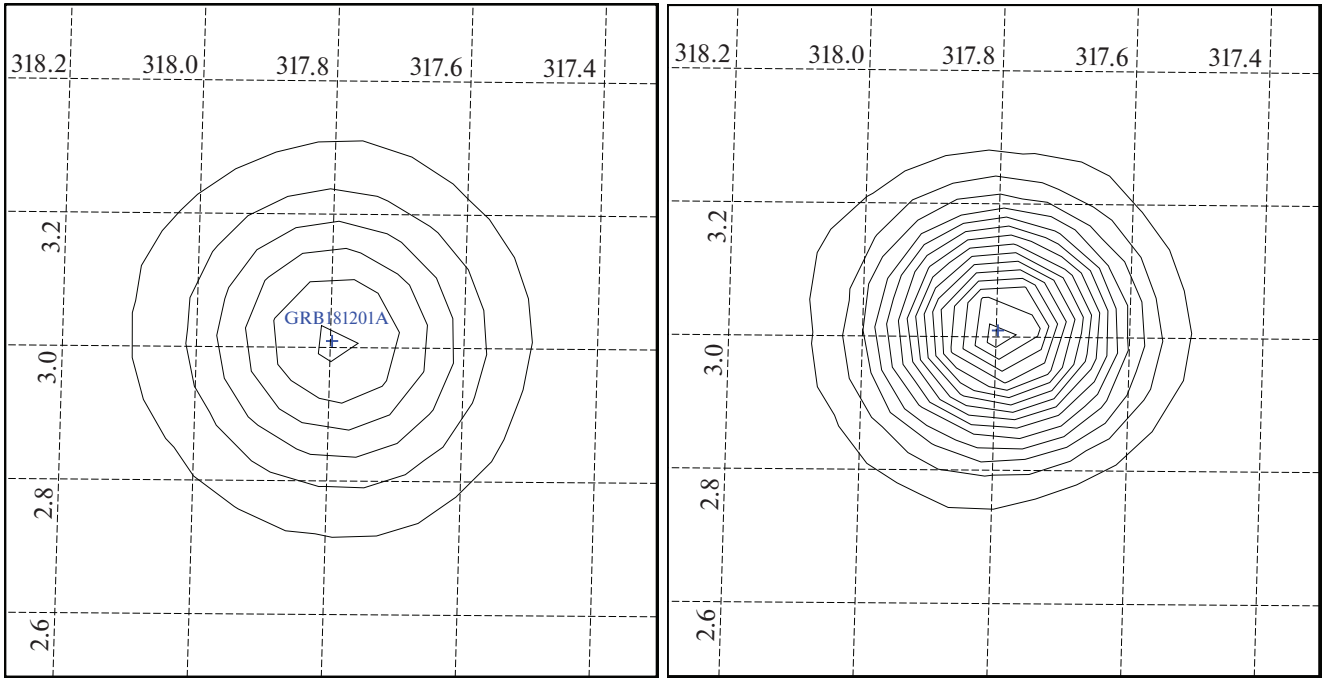


Рис. 3. Локализация всплеска GRB 181201A телескопом IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL во время первого и второго эпизодов активности (в интервалах времени 0–60 и 114–183 с после момента T_0). Показаны уровни отношения сигнала к шуму $S/N = 3, 8, 13, \dots \sigma$ в диапазоне энергий 20–100 кэВ на картах размером $1^\circ \times 1^\circ$. Значения S/N на месте всплеска, достигнутые в этих эпизодах, равны соответственно $\simeq 47$ и 76σ .

его отдельных эпизодов оказались самыми большими в измерениях телескопом IBIS/ISGRI и наименьшими — в измерениях детектором SPI-ACS. Это может быть связано с несколькими факторами. Во-первых, длительность гамма-всплесков зависит от энергетического диапазона — она уменьшается на более высоких энергиях (см., например, Фенимор, 1995; Минаев и др., 2010; Человеков и др., 2019). Во-вторых, наличие провалов в телеметрии при передаче данных IBIS/ISGRI на Землю в моменты максимального наблюдаемого потока от источника искажает форму кривой блеска. Отметим, что лишь в данных детектора IBIS/ISGRI интервал T_{50} , определенный по всему всплеску, захватывает оба эпизода излучения. В данных других приборов временной интервал T_{50} охватывает лишь второй, основной эпизод. Вследствие этого значение параметра T_{50} по данным IBIS/ISGRI отличается от значений, полученных по данным детекторов SPI и SPI-ACS более чем на порядок (табл. 1). Интервал T_{90} у всех приборов охватывает оба эпизода излучения.

Временные профили отдельных импульсов GRBs хорошо описываются моделью FRED (“быстрый подъем — экспоненциальный спад”, см., например, Норрис и др., 2005; Хаккила и др., 2011; Минаев и др., 2014). По данным детекторов SPI и SPI-ACS, в телеметрии которых отсутствуют провалы, была проведена аппроксимация кривых

блеска первого и второго эпизода данной моделью. Модельные кривые блеска каждого импульса (записи скорости счета) задавались при $t > t_s$ формулой (1):

$$C(t) = A\lambda \exp\left(-\frac{\tau_1}{t-t_s} - \frac{t-t_s}{\tau_2}\right). \quad (1)$$

Здесь

$$\lambda = \exp\left[2\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{1/2}\right],$$

t_s — условное время начала импульса, τ_1 и τ_2 — характерные масштабы времени нарастания и спада скорости счета. Согласно формуле (1) максимальная скорость счета в импульсе $C_p = A$ достигается при

$$t_p = t_s + (\tau_1\tau_2)^{1/2}. \quad (2)$$

Результаты аппроксимации представлены в табл. 2 и показаны красными сплошными кривыми на рис. 2. Там же указано время достижения пиковой скорости счета t_p .

Второй эпизод всплеска описывается экспоненциальной моделью не вполне удовлетворительно. Видно, что он состоит из двух или большего числа сильно перекрывающихся импульсов. Указанные особенности кривой блеска позволяют надежно

Таблица 1. Параметры длительности гамма-всплеска GRB 181201A

Эпизод	Детектор	$T_{50},^a$ с	$T_{90},^a$ с	$T_{100},^a$ с	FWHM, ^b с
1 + 2	IBIS/ISGRI	91.3 ± 0.2	172.7 ± 1.5	435	—
	SPI	8.8 ± 0.1	122.1 ± 1.5	264	—
	SPI-ACS	5.8 ± 0.1	120.2 ± 1.5	162	—
1	IBIS/ISGRI	28.4 ± 0.4	82.3 ± 3.2	$> 113^6$	—
	SPI	19.1 ± 0.4	49.7 ± 1.7	78	12
	SPI-ACS	22.6 ± 1.3	41.6 ± 18.5	63	20
2	IBIS/ISGRI	23.1 ± 0.1	84.5 ± 1.8	320	—
	SPI	8.7 ± 0.1	32.3 ± 1.5	152	5.8
	SPI-ACS	5.5 ± 0.1	19.5 ± 0.5	48	4.5

^a Длительность по методу Кошута и др. (1996).

⁶ Длительность ограничена началом второго эпизода.

^b Ширина импульса на полувысоте.

Таблица 2. Параметры импульсов во временном профиле GRB 181201A, измеренном детекторами SPI и SPI-ACS, согласно модели FRED (формулы (1)–(2))

Эпизод	Детектор	$A\lambda$, отсч./с	t_s , с	τ_1 , с	τ_2 , с	t_p , с	χ_N^2 ^a
1	SPI	93.2 ± 4.9	-18.9 ± 11.7	165 ± 162	8.4 ± 2.6	18.5 ± 1.2	1.47
	SPI-ACS	66.0 ± 6.1	-9.1 ± 8.1	41 ± 67	6.9 ± 4.0	7.8 ± 1.4	0.78
2-полный	SPI	2306 ± 51	112.9 ± 0.4	4.9 ± 1.1	6.0 ± 0.2	118.4 ± 0.2	1.45
	SPI-ACS	1518 ± 76	113.1 ± 0.9	6.2 ± 3.4	3.4 ± 0.3	117.7 ± 0.2	7.3
2-главный пик	SPI	3117 ± 121	116.9 ± 0.2	1.4 ± 0.5	2.7 ± 0.2	118.8 ± 0.1	0.58
	SPI-ACS	2042 ± 131	116.7 ± 0.2	2.1 ± 0.4	1.5 ± 0.2	118.4 ± 0.1	3.9

^a Значение χ^2 , нормированное на степень свободы.

аппроксимировать лишь область максимума второго эпизода излучения (временной интервал 117–121 с). Далее будем называть его главным импульсом или пиком этого эпизода. Первый эпизод, возможно, также состоит из нескольких перекрывающихся импульсов, однако отвергнуть простую экспоненциальную модель по данным SPI и SPI-ACS нельзя.

Гамма-всплески характеризуются заметной эволюцией спектра излучения, одним из проявлений которой является относительное смещение (задержка) кривых блеска в разных диапазонах энергии (см., например, Минаев и др., 2012, 2014). Задержка считается положительной, если кривая блеска в более жестком диапазоне “опережает” кривую блеска в мягком диапазоне. Для гамма-всплеска GRB 181201A спектральную задержку между диапазонами энергий 0.08–10 МэВ и 20–100 кэВ можно оценить, используя полученное по данным SPI-ACS и SPI положение максимума скорости счета в импульсе (см. формулу (2)), приведенное в табл. 2. Первый эпизод всплеска GRB 181201A демонстрирует значительную

положительную спектральную задержку, $\text{lag} = 10.7 \pm 1.8$ с. Запаздывание излучения в данных IBIS/ISGRI и SPI по сравнению с более жестким излучением в данных SPI-ACS для этого эпизода ясно видно на рис. 2. Столь существенная задержка может быть связана с эффектами суперпозиции — косвенное подтверждение того, что первый эпизод действительно состоит из большого числа перекрывающихся импульсов (см., например, Минаев и др., 2014). Второй эпизод, наоборот, не отличается сколько-нибудь значимой задержкой: $\text{lag} = 0.7 \pm 0.3$ с для полного эпизода и $\text{lag} = 0.40 \pm 0.14$ с для главного пика. Отсутствие значимой спектральной задержки также может быть связано с эффектами суперпозиции импульсов, формирующих кривую блеска.

В данных приборов IBIS/ISGRI и SPI продолженное медленно спадающее излучение видно вплоть до 435 и 264 с после начала всплеска соответственно (см. рис. 2). Также на верхней панели рисунка (кривая блеска по данным детектора IBIS/ISGRI) видно, что уровень сигнала от гамма-всплеска между двумя эпизодами излучения не

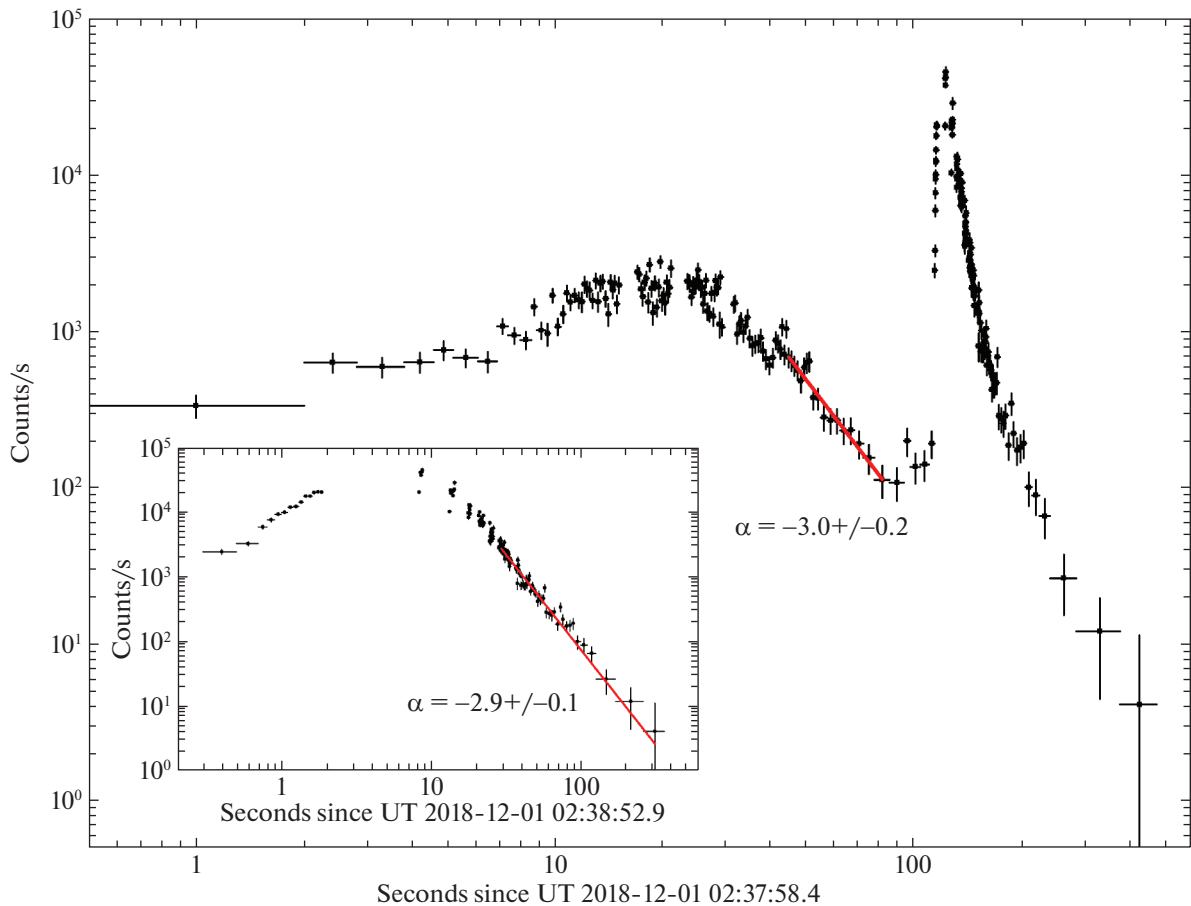


Рис. 4. Кривая блеска всплеска GRB 181201A во время активной фазы по данным детектора IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL (диапазон 20–100 кэВ). Оси логарифмические. На врезке — кривая блеска второго эпизода относительно момента его начала. Красные прямые линии показывают аппроксимацию данных степенным законом падения с указанными около них показателями степени.

успевают упасть до фонового значения. Вследствие этого, в частности, полную длительность первого эпизода определить сложно — можно лишь дать ее нижний предел (по времени начала второго эпизода).

На рис. 4 представлена кривая блеска GRB 181201A во время активной фазы по данным телескопа IBIS/ISGRI. Кривая приведена в логарифмической шкале и иллюстрирует упомянутые выше особенности наилучшим образом. Интересно, что на стадии затухания потока кривые блеска обоих эпизодов подчиняются не экспоненциальному, а степенному закону падения со сходными показателями степени $\alpha \sim -3$ (при рассмотрении относительно момента начала эпизодов: $T_1 = 02:37:58.4$ UT для первого эпизода и $T_2 = 02:38:52.9$ UT для второго). Это может быть следствием наложения (суперпозиции) большого числа перекрывающихся импульсов, каждый из которых имеет экспоненциальный характер падения кривой блеска.

Интегральный поток гамма-излучения

Полное число отсчетов, зарегистрированных детектором SPI-ACS во время активной фазы всплеска GRB 181201A, равно $C = (3.00 \pm 0.05) \times 10^5$ отсч. Фонные отсчеты детектора из этого числа вычтены. Используя калибровочную зависимость

$$F = 2.19 \times 10^{-6} (C/10^4 \text{ отсч.})^{1.10 \pm 0.06} \text{ эрг см}^{-2},$$

полученную Позаненко и др. (2019) путем сравнения данных одновременной регистрации GRBs в экспериментах SPI-ACS и Fermi/GBM, можно оценить интегральный поток излучения всплеска в диапазоне 10–1000 кэВ: $F = (9.2 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ эрг см}^{-2}$. Ошибка чисто статистическая, область 2σ неопределенности потока с учетом систематических ошибок составляет $F = (1.8 - 52) \times 10^{-5} \text{ эрг см}^{-2}$.

Аналогичные оценки только уже для основного (второго) эпизода всплеска, для которого $C = (2.65 \pm 0.03) \times 10^5$ отсч., дают поток излуче-

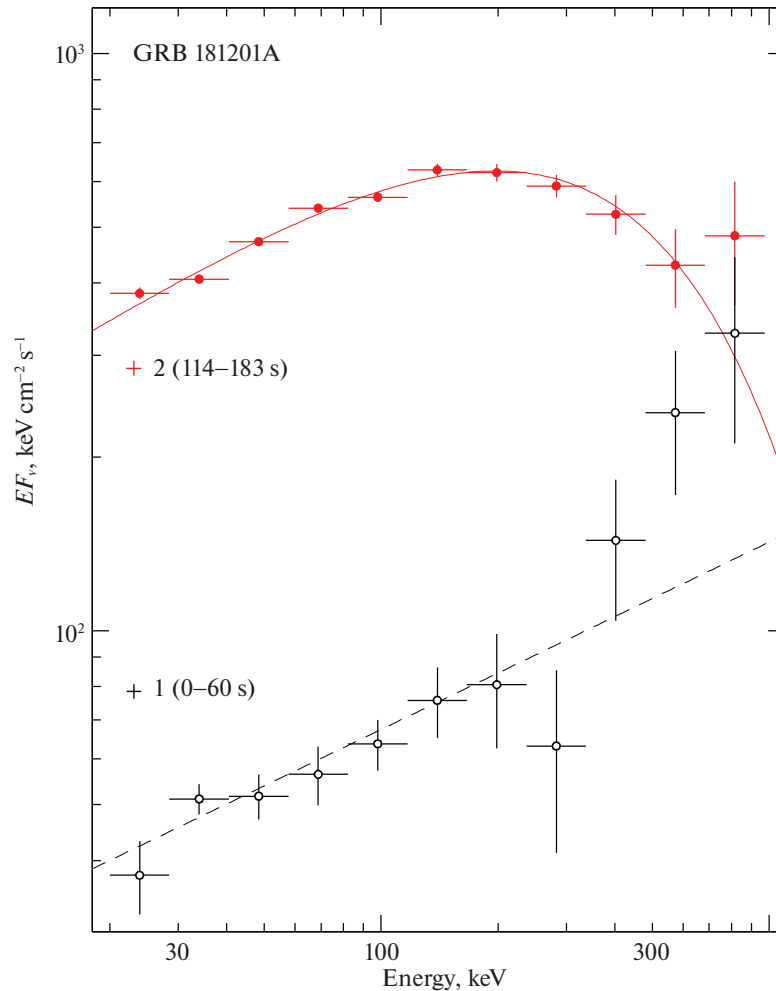


Рис. 5. Спектр жесткого рентгеновского и мягкого гамма-излучения GRB 181201A в двух эпизодах (0–60 и 114–183 с после момента T_0) активной фазы всплеска по данным спектрометра SPI обсерватории INTEGRAL.

ния $F = (8.1 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ эрг см^{-2} , при этом 2σ область неопределенности с учетом систематических ошибок составляет $F = (1.6 - 46) \times 10^{-5}$ эрг см^{-2} .

Следует отметить, что использованная калибровочная кривая была построена Позаненко и др. (2019) для достаточно коротких гамма-всплесков с длительностью $T_{90} < 6$ с, имеющих в среднем более жесткий энергетический спектр, чем длинные всплески (см., например, Минаев, Позаненко, 2020). Учитывая высокий нижний порог диапазона чувствительности детектора SPI-ACS ($E \gtrsim 80$ кэВ), можно предположить, что полученные оценки потока излучения, экстраполируемые в диапазон монитора Fermi/GBM (10–1000 кэВ), являются несколько заниженными. К тому же всплеск GRB 181201A был зарегистрирован в неоптимальных для детектора SPI-ACS условиях (внутри поля зрения SPI, при угле падения к оси телескопа $\simeq 11^\circ$), что также может вести к смещению по-

лученной оценки потока в область более низких значений.

В этой связи отметим, что интегральный поток излучения в диапазоне 20 кэВ–10 МэВ во время второго эпизода всплеска по данным эксперимента Kopus-WIND (Свинкин и др., 2018) составил $F \simeq (1.99 \pm 0.06) \times 10^{-4}$ эрг см^{-2} , что вдвое больше оценки потока, сделанной по данным SPI-ACS, однако находится внутри 1σ области систематических ошибок этой оценки.

Спектры рентгеновского и гамма-излучения

На рис. 5 показаны спектры рентгеновского и гамма-излучения GRB 181201A, измеренные телескопом SPI обсерватории INTEGRAL во время активной фазы всплеска (двух эпизодов излучения в интервалах времени 0–60 и 114–183 с после момента T_0). Показан также результат наилучшей аппроксимации этих спектров. Аппроксимация проводилась с помощью простых (стандартных) аналитических моделей: степенного закона (PL), степенного закона с экспоненциальным завалом на

Таблица 3. Результаты аппроксимации спектра излучения, измеренного телескопом SPI обсерватории INTEGRAL на разных этапах развития всплеска GRB 181201A

Эпизод	Модель	E_0/kT , кэВ	α^a	$F,^b 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$	$\chi^2(N)^b$
1	PL		1.68 ± 0.06	0.51 ± 0.11	1.30(9)
2	PL		1.80 ± 0.01	3.67 ± 0.15	14.5(9)
	CPL	458 ± 51	1.57 ± 0.03	3.11 ± 0.28	1.84(8)
	BM	427 ± 53	1.56 ± 0.03	3.15 ± 0.12	1.62(8)

^a Фотонный индекс.^b Интегральный поток излучения в диапазоне 20–1000 кэВ.^b Значение χ^2 наилучшей аппроксимации, нормированное на N (N — число степеней свободы).**Таблица 4.** Телескопы, использованные нами в наблюдениях всплеска GRB 181201A

Обсерватория	Местоположение	Телескоп	Диаметр ^a	Поле зрения
AbAO	Абастумани, Грузия	AS-32	0.7	44.4 × 44.4
Chilescope	Атакама, Чили	RC-1000	1.0	18.6 × 18.6
CrAO	Научный/Крым, Россия	ZTSh	2.6	14.4 × 14.4
Gemini	Мауна-Киа, Гавайи	Gemini North	8.1	5.0 × 5.0
INASAN	Симеиз/Крым, Россия	Zeiss-1000(I)	1.0	9.9 × 9.9
Mondy	Саяны, Россия	AZT-33IK	1.6	6.7 × 7.9
SAAO	Сазерлэнд, ЮАР	SALT	11	9.7 × 9.5
TSHAO	Тянь-Шань, Казахстан	40in	1.0	8.0 × 8.0
		Zeiss-1000(T)	1.0	19.2 × 19.2

^a Диаметр (размер) главного зеркала, м.

высоких энергиях (CPL) и так называемой модели Бэнда (BM), представляющей собой комбинацию двух плавно переходящих друг в друга степенных законов и хорошо описывающей типичные спектры гамма-всплесков (Бэнд и др., 1993).

Параметры наилучшей аппроксимации спектра GRB 181201A этими моделями приведены в табл. 3. Видно, что первый эпизод излучения характеризовался степенным спектром (на рисунке показан штриховой линией) без признаков завала на высоких энергиях, наоборот, на энергиях $\gtrsim 300$ кэВ спектр поднимается вверх более круто, чем предсказывается степенным законом. Спектр второго эпизода успешно аппроксимируется ускоренно спадающими на высоких энергиях моделями CPL и BM (сплошной линией на рисунке показана модель CPL). Это указывает на физически разное происхождение излучения всплеска в этих двух эпизодах.

ПОСЛЕСВЕЧЕНИЕ ВСПЛЕСКА

Послесвечение всплеска GRB 181201A исследовалось нами в оптическом, мягком рентгеновском и радиодиапазонах.

Оптические телескопы и анализ их данных

Телескопы, использовавшиеся для наблюдения всплеска в оптическом диапазоне, перечислены в табл. 4. Там же указаны их основные характеристики. Ряд наблюдений всплеска был выполнен по нашему запросу телескопом Gemini North, расположенным на Гавайях. Это позволило исследовать GRB 181201A в эпоху, когда его кульминация уже ушла в дневную часть суток, что затрудняло наблюдение на небольших телескопах из табл. 4, находящихся к тому же на более высоких широтах, а потому смотрящих на источник сквозь большую толщу атмосферы. Журнал проведенных наблюдений представлен в табл. 5.

Полученные в ходе оптических наблюдений данные были подвергнуты стандартной первичной обработке, включающую отбраковку дефектных кадров, восстановление кадров с помощью матрицы смещения, темного кадра, плоского поля, устранение фринжей, при необходимости. Обработка проводилась с помощью программного пакета IRAF¹. Первичная обработка осуществля-

¹ IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) — среда для обработки и анализа изображений, разработана и поддер-

Таблица 5. Журнал и результаты оптических наблюдений послесвечения GRB 181201A

Дата	Время ^a	Фильтр	Зв. величина	Поток	Телескоп
yy-mm-dd	hh:mm:ss		mag	мЯн	
2018-12-01	16:55:28	R^b	17.17 ± 0.05	0.3850	Zeiss-1000 (I)
2018-12-01	18:34:35	g'^B	17.86 ± 0.02	0.2606	40in
2018-12-01	18:52:05	R	17.38 ± 0.02	0.3173	40in
2018-12-01	19:02:35	i'^B	17.32 ± 0.02	0.4286	40in
2018-12-01	19:48:03	r'^B	17.63 ± 0.03	0.3221	40in
2018-12-02	01:11:25	r'	18.00 ± 0.05	0.2291	RC-1000
2018-12-02	14:47:57	R	18.39 ± 0.02	0.1252	AS-32
2018-12-02	19:09:26	r'	18.69 ± 0.02	0.1213	40in
2018-12-02	19:30:07	i'	18.54 ± 0.07	0.1393	40in
2018-12-02	19:50:44	g'	19.07 ± 0.04	0.0855	40in
2018-12-03	01:32:26	r'	18.92 ± 0.04	0.0982	RC-1000
2018-12-03	11:24:39	R	18.91 ± 0.03	0.0775	AZT-33IK
2018-12-04	12:19:26	R	19.67 ± 0.07	0.0385	Zeiss-1000 (T)
2018-12-05	01:04:38	r'	19.74 ± 0.05	0.0461	RC-1000
2018-12-05	11:26:24	R	20.03 ± 0.09	0.0276	AZT-33IK
2018-12-05	12:17:22	R	19.82 ± 0.07	0.0335	Zeiss-1000 (T)
2018-12-05	18:33:39	r'	20.02 ± 0.04	0.0356	40in
2018-12-06	01:04:09	r'	20.19 ± 0.15	0.0305	RC-1000
2018-12-07	10:57:13	R	20.23 ± 0.05	0.0230	AZT-33IK
2018-12-08	18:34:01	r'	20.48 ± 0.12	0.0233	40in
2018-12-09	14:37:52	R	20.85 ± 0.31	0.0130	AS-32
2018-12-09	16:12:27	R	20.74 ± 0.07	0.0144	ZTSh
2018-12-09	18:23:04	r'	21.14 ± 0.08	0.0127	40in
2018-12-10	00:59:23	r'	21.10 ± 0.10	0.0132	RC-1000
2018-12-10	10:51:34	R	20.73 ± 0.07	0.0145	AZT-33IK
2018-12-10	18:23:56	r'	21.00 ± 0.09	0.0144	40in
2018-12-13	11:07:51	R	$\geq 21.15^\Gamma$	$\leq 0.0099^\Gamma$	AZT-33IK
2018-12-14	12:24:21	R	≥ 20.48	≤ 0.0183	Zeiss-1000 (T)
2018-12-14	15:27:53	R	21.06 ± 0.39	0.0107	Zeiss-1000 (I)

Таблица 5. Окончание

Дата	Время ^a	Фильтр	Зв. величина	Поток	Телескоп
yy-mm-dd	hh:mm:ss		mag	мЯн	
2018-12-15	01:13:07	r'	≥ 20.87	≤ 0.0163	RC-1000
2018-12-15	10:55:27	R	≥ 20.27	≤ 0.0222	AZT-33IK
2018-12-16	14:45:24	R	≥ 18.00	≤ 0.1793	AS-32
2018-12-17	01:16:45	r'	≥ 20.63	≤ 0.0203	RC-1000
2018-12-19	11:27:54	R	≥ 20.87	≤ 0.0128	AZT-33IK
2018-12-21	12:17:28	R	≥ 20.37	≤ 0.0202	Zeiss-1000 (T)
2018-12-22	04:30:06	g'	22.50 ± 0.15	0.0036	Gemini-North
2018-12-22	04:51:49	r'	21.75 ± 0.04	0.0072	Gemini-North
2018-12-22	05:05:15	i'	21.49 ± 0.02	0.0092	Gemini-North
2018-12-22	05:18:44	z'^B	20.90 ± 0.02	0.0151	Gemini-North
2018-12-24	04:39:13	r'	21.82 ± 0.04	0.0068	Gemini-North
2018-12-24	05:02:53	i'	21.42 ± 0.02	0.0098	Gemini-North

^a Время середины экспозиции (UT).

^b Наблюдения в фильтре фотометрической системы Vega без коррекции на поглощение в Галактике.

^B Наблюдения в фильтре фотометрической системы AB без коррекции на поглощение в Галактике.

^r Нижние (верхние) пределы на величину (поток) на уровне достоверности 1σ .

лась программой *ccdproc* пакета *ccdred*, затем индивидуальные изображения в соответствующих фильтрах суммировались программой *imcombine* с целью обеспечения наилучшего отношения сигнала к шуму. Апертурная фотометрия была выполнена с помощью программы *apphot* пакета *daophot*.

Полученные инструментальные звездные величины были откалиброваны относительно фотометрического каталога SDSS-DR12. Опорные звезды выбирались согласно алгоритму, описанному в работе Скворцова и др. (2016), их характеристики приведены в табл. 6. Звездные величины опорных звезд пересчитывались из фильтра r' в фильтр R с помощью преобразования Люптона² с использованием значений в фильтрах u' , g' и i' .

Наблюдения проводились в Слоановских фильтрах и фильтрах системы Джонсона–Кузинса. Для получения единой кривой блеска все наблюдения были пересчитаны в AB систему, т.е. в фильтры g' , r' , i' , z' . Значения в фильтре R пересчитывались в фильтр r' путем нахождения разности амплитуд двух степенных функций, описывающих послесвечение в фильтре R и r' . Подобная процедура вносит

неопределенность в звездные величины источника, которая складывается из инструментальной ошибки измерения звездной величины источника; ошибки определения звездной величины опорных звезд, приведенной в каталоге; ошибки, вносимой разбросом звездных величин опорных звезд; ошибки, получаемой в результате фитирования степенного закона, не всегда однозначного.

Оптические кривые блеска послесвечения

Полученные результаты (измеренные звездные величины и потоки излучения) практически непрерывных на протяжении трех недель наблюдений послесвечения всплеска приведены в табл. 5. Значения в фильтрах g' , r' , i' , z' определены в фотометрической системе звездных величин AB, значения в фильтрах V , R , I — в системе Vega. Для наблюдений, в которых источник не был обнаружен (либо из-за того, что стал слишком тусклым, либо из-за плохой погоды), приведены верхние пределы на поток на уровне трех стандартных отклонений от фона.

По результатам измерений построена многоцветная кривая блеска всплеска GRB 181201A, представленная на рис. 6 (ранняя версия этого рисунка была опубликована Мазаевой и др., 2018a).

² classic.sdss.org/dr4/algorithms/sdssUBVRITransform.html#Lupton2005

Таблица 6. Используемые в наблюдениях опорные звезды

SDSS-DR12 id	Дата наблюдения ^a	u'	g'	r'	i'	z'
J211709.28-123919.6	2008.7315	19.869 ± 0.046	18.750 ± 0.009	18.348 ± 0.008	18.151 ± 0.010	18.107 ± 0.027
J211710.81-123706.3	2008.7315	18.841 ± 0.023	17.191 ± 0.005	16.517 ± 0.004	16.257 ± 0.004	16.117 ± 0.008
J211712.10-123707.2	2008.7315	22.807 ± 0.466	19.838 ± 0.018	18.385 ± 0.008	17.539 ± 0.007	17.082 ± 0.013
J211730.94-123325.9	2008.7315	18.558 ± 0.020	17.502 ± 0.005	17.168 ± 0.005	17.027 ± 0.006	16.967 ± 0.012

^a Дата наблюдения (UT) в долях года.

Таблица 7. Результаты оптических наблюдений послесвечения GRB 181201A другими группами, использованные в работе

Цикуляр GCN	Фильтр	$t - T_0$, ^a дней	Звездная величин	Поток, мЯн	Телескоп	Обсерватория	Ссылка ^b
23475	R	0.346	16.68 ± 0.03	0.6046	T31	iTelescope	[1]
23478	r'	0.742	17.50 ± 0.10	0.3631	NOT	Roque de los Muchachos	[2]
23486	g'	0.907	18.14 ± 0.03	0.2014	GROND	ESO La Silla	[3]
23486	r'	0.907	17.97 ± 0.03	0.2355	GROND	ESO La Silla	[3]
23486	i'	0.907	17.80 ± 0.03	0.2754	GROND	ESO La Silla	[3]
23486	z'	0.907	17.64 ± 0.03	0.3133	GROND	ESO La Silla	[3]
23503	g'	0.705	17.74 ± 0.10	0.2911	GOTO	Roque de los Muchachos	[4]
23503	g'	2.711	19.48 ± 0.15	0.0586	GOTO	Roque de los Muchachos	[4]
23510	g'	3.451	19.97 ± 0.13	0.0373	GROWTH-India	Indian Astronomical Observatory	[5]

^a Время середины экспозиции, отсчитываемое с момента T_0 (UT).

^b [1] Конг (2018); [2] Хайнтц и др. (2018); [3] Болмер, Шади (2018); [4] Рамзи и др. (2018); [5] Шривастава и др. (2018).

Разным цветом показаны звездные величины, измеренные в фильтрах g' , r' , i' и z' . Показаны также некоторые опубликованные ранее в литературе результаты наблюдений послесвечения этого всплеска другими телескопами. Эти результаты и их источники (телеграммы GCN) приведены в табл. 7. Полыми треугольниками на рисунке показаны 3σ пределы измеренной звездной величины. Горизонтальными штриховыми линиями отмечен уровень потока излучения родительской галактики в фильтре соответствующего цвета (см. ниже). Отметим, что результаты фотометрии на рисунке приведены без учета поглощения в Галактике и родительской галактике источника всплеска.

Из рис. 6 следует, что во всех фильтрах поток излучения в направлении источника в течение первых ~ 10 дней после всплеска (а в фильтре g' — в течение всего периода наблюдений) синхронно падал степенным образом. Степенное падение потока является характерным признаком послесвечения всплеска. В фильтре r' , начиная с 8–10 дня после всплеска, появились указания на присутствие избыточного излучения по сравнению со степенным законом падения. Далее будет показано, что

наблюдаемое избыточное излучение было вызвано сверхновой, вспыхнувшей в момент всплеска и постепенно разгорающейся из-за расширения ее оболочки. Отметим, что послесвечение всплеска, несмотря на степенное падение потока излучения, к концу наших наблюдений все еще было заметно ярче излучения родительской галактики.

Пересчитав звездные величины из табл. 5 в плотности потока излучения (в мЯн), можно реконструировать оптические кривые блеска послесвечения (рис. 7), чтобы в дальнейшем сравнить их с кривыми блеска в других диапазонах. Рисунок подтверждает, что стадия послесвечения GRB 181201A во всех оптических фильтрах описывается единым степенным законом падения потока с показателем степени $\alpha \simeq -1.2$. Кривые блеска в оптическом диапазоне не имеют характерной особенности типа “джет-брейк” в первые ~ 13 дней с момента регистрации всплеска, что согласуется с результатами Ласкара и др. (2019).

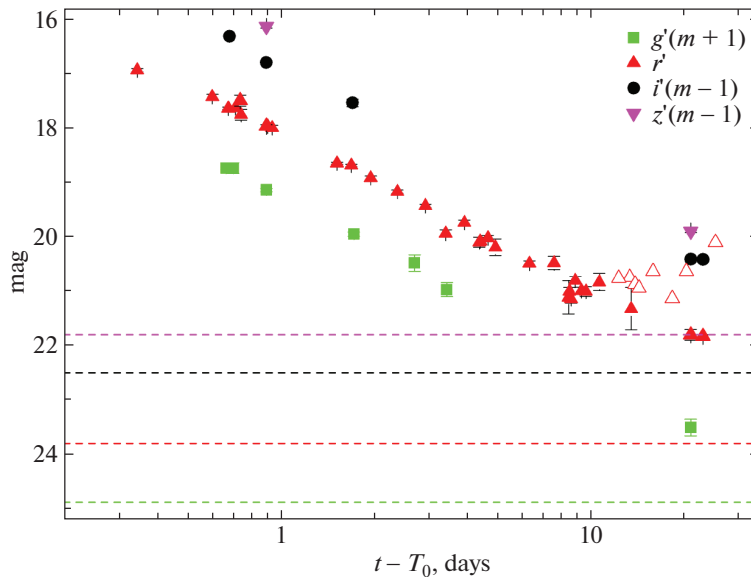


Рис. 6. Многоцветная кривая блеска послесвечения GRB 181201A. По оси X отложено время от начала всплеска до середины экспозиции каждого наблюдения. Зеленые квадратики, красные треугольники, черные кружки, фиолетовые треугольники показывают результаты наблюдений в фильтрах g' , r' , i' и z' ; полые треугольники обозначают верхние пределы. Точки в фильтрах z' и i' были подняты, а точки в фильтре g' — опущены на 1 звездную величину для ясности. Пунктирные линии показывают уровень родительской галактики в фильтрах соответствующего цвета.

Наблюдения послесвечения в рентгеновском диапазоне

В рентгеновском диапазоне наблюдения всплеска GRB 181201A начались спустя 4 часа после его регистрации обсерваторией INTEGRAL. Послесвечение всплеска было зарегистрировано телескопом XRT орбитальной обсерватории Swift им. Нейла Джерелса в диапазоне 0.3–10 кэВ (Мерегети др., 2018б). В течение последующих 20 дней телескоп более или менее регулярно отслеживал падение потока излучения послесвечения, он также провел еще одно заключительное наблюдение весной 2019 г., подтвердив продолжающееся падение потока.

Телескоп XRT представляет собой CCD-детектор с 600×602 пикселями, охлажденный до -110°C , над которым на высоте 3.5 м установлена зеркальная система с оптикой косоугольного падения типа Вольтера I, обеспечивающая телескопу угловое разрешение $\sim 20''$ в поле зрения размером $23'6 \times 23'7$. Эффективная площадь телескопа составляет 110 см^2 на 1.5 кэВ.

Результаты наблюдений рентгеновского послесвечения GRB 181201A этим телескопом (потоки в мЯн в диапазоне энергий 0.3–10 кэВ в зависимости от времени) были получены через сайт www.swift.ac.uk/xrt_curves/00020848. Подробное описание используемой процедуры обработки данных можно найти в работах Эванса и др. (2007, 2009). Потоки даны после вычитания фона и с коррекцией на засветку (pile-up эффект).

Полученные кривые блеска послесвечения представлены на рис. 7 синими звездочками. Видно, что падение потока в рентгеновском диапазоне происходило согласованно с падением оптического потока — по степенному закону $F_X \sim (T - T_0)^{-1.2}$.

Наблюдения послесвечения в радиодиапазоне

Наблюдения на частоте 36.8 ГГц проводились с помощью 22-м радиотелескопа RT-22 у подножия горы Кошка (п. Симеиз, Крым). Размер диаграммы направленности антенны на уровне половинной мощности составляет $100''$. Радиотелескоп наводился на источник поочередно одним и другим лепестками диаграммы направленности, формирующимися при диаграммной модуляции и имеющими взаимно-ортогональные поляризации.

Антенная температура от источника определялась как разность между усредненными в течение 30 с откликами радиометра в двух разных положениях антенны. Проводились серии из 200–250 измерений, после чего рассчитывалось среднее значение сигнала и оценивалась его среднеквадратичная ошибка. Измеренные антенные температуры, исправленные с учетом поглощения излучения в атмосфере Земли, пересчитывались в плотности потоков излучения путем сравнения с результатами наблюдений калибровочных источников (Нестеров и др., 2000). Полученные по итогам данных наблюдений результаты приведены в табл. 8 и показаны на рис. 7. Видно, что радиоданные, по крайней мере, не противоречат степенному падению потока,

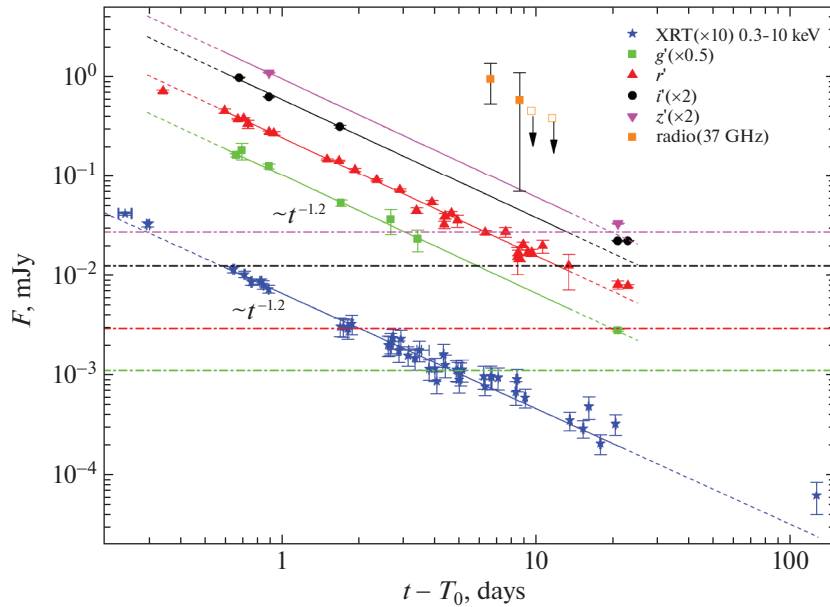


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но с потоками излучения, выраженными в мЯн. Добавлены результаты рентгеновских (телескопом Swift/XRT, синие звездочки) и радио- (телескопом RT-22, желтые квадратики) наблюдений. Сплошными линиями показана аппроксимация измеренных потоков степенным законом, штрих-пунктирными линиями — уровень родительской галактики в соответствующих оптических фильтрах.

обнаруженному нами ранее в оптическом и мягком рентгеновском диапазонах.

Широкополосное спектральное распределение энергии послесвечения

На рис. 8 представлена реконструкция широкополосного спектра послесвечения GRB 181201A по данным измерений, выполненных на ~ 6.7 день после всплеска. Оптические измерения в этот день были выполнены лишь в фильтре r' , в остальных фильтрах показаны результаты степенной аппроксимации послесвечения более ранних наблюдений. Хотя имеющихся данных явно недостаточно для точного воспроизведения формы спектрального распределения энергии, изменение наклона спектра при переходе от радио- к оптическому (спектральный индекс $\alpha \sim -0.4$) и далее — к рентгеновскому ($\alpha \sim -0.8$) диапазонам позволяет пред-

положить, что характерная частота излома синхротронного излучения (Сари и др., 1998) лежит в оптическом диапазоне или чуть левее него (тогда спектр левее излома должен быть еще более пологим). Это утверждение согласуется с результатами более тщательного моделирования, выполненного Ласкаром и др. (2019).

РОДИТЕЛЬСКАЯ ГАЛАКТИКА ВСПЛЕСКА

Исследование послесвечения GRB 181201A проводилось до момента ухода кульминации источника в дневную часть суток. Наблюдения вновь стали возможны лишь спустя 8 месяцев. К этому времени сам источник (послесвечение и сверхновая) уже погас, но выполненные наблюдения позволили детально исследовать родительскую галактику всплеска и оценить ее вклад в оптический поток, регистрировавшийся в то время, когда послесвечение еще было ярким.

Наблюдения были выполнены на 2.6-м телескопе ЗТШ (ZTSh в табл. 4) в КрАО (п. Научный) и 8-м телескопе SALT в SAAO, ЮАР. Дневник наблюдений и их результаты представлены в табл. 9. Дополнительные измерения звездной величины родительской галактики GRB 181201A в фильтрах g' , r' и z' удалось осуществить, используя данные наблюдений этой области камерой DECam (The Dark Energy Camera) в 2016–2017 гг., в рамках обзора Legacy Surveys (Data Release 8,

Таблица 8. Журнал и результаты радионаблюдений послесвечения GRB 181201A

Дата	Время ^a	Частота	Поток
yy-mm-dd	hh:mm:ss	ГГц	мЯн
2018-12-07	17:23:00	37	0.94 ± 0.41
2018-12-09	17:43:00	37	0.58 ± 0.51
2018-12-10	17:11:00	37	$\lesssim 0.45$
2018-12-12	17:14:00	37	$\lesssim 0.38$

^a Время середины экспозиции (UT).

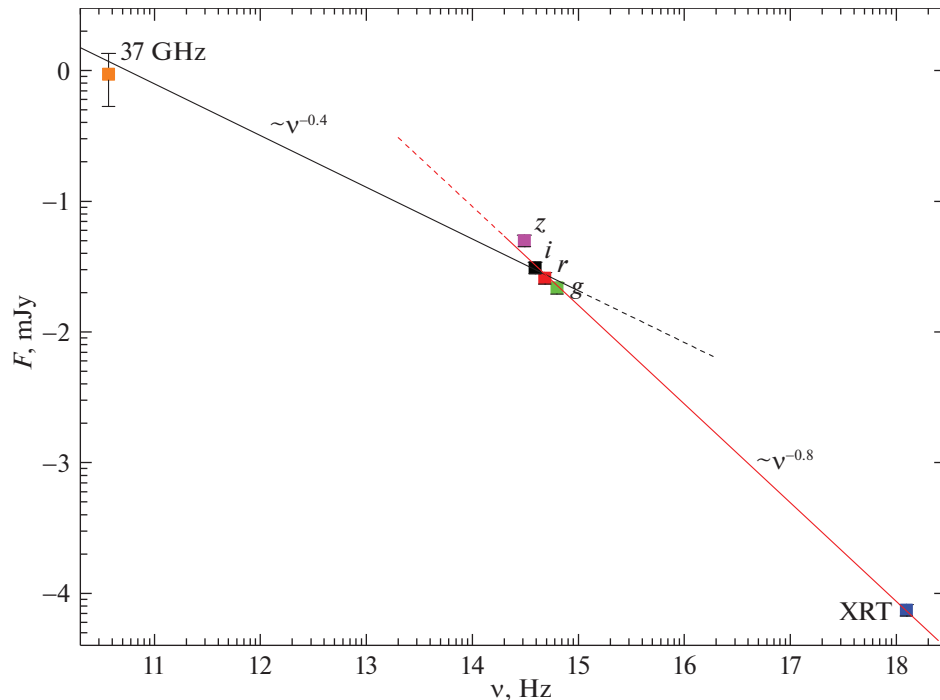


Рис. 8. Наблюдаемое спектральное распределение энергии GRB 181201A на стадии послесвечения (на ~ 6.7 день после регистрации всплеска) в диапазоне от радиочастот до рентгеновских энергий. Спектр аппроксимирован двумя степенными законами с изломом в оптическом диапазоне. Оптические точки скорректированы на поглощение в Галактике.

Дей и др., 2019). Камера была смонтирована на 4-м телескопе Випсо Межамериканской обсерватории Сьерро-Тололо (СТЮ). С исходными данными этих наблюдений (см. www.legacysurvey.org) была проведена стандартная процедура суммирования индивидуальных экспозиций и фотометрии с использованием звезд сравнения. Их результаты также представлены в табл. 9.

Отметим, что вклад излучения родительской галактики в фильтре r' на ~ 21 день после регистрации всплеска, когда в кривых блеска на фоне степенного спада начал проявляться избыток излучения, не превышал 12% от общего потока от источника. Поэтому излучение галактики не могло быть причиной замедления падения кривой блеска, как было предположено Ласкаром и др. (2019). На рис. 6 и 7 вклад родительской галактики в измеренный поток излучения в разных фильтрах показан горизонтальными штриховыми линиями.

Приведенные в табл. 9 результаты измерений звездной величины родительской галактики GRB 181201A можно использовать для независимой оценки величины ее красного смещения. Для этого рассмотрим зависимость блеска родительских галактик большой выборки гамма-всплесков от их красного смещения (например, Позаненко и др., 2008). Для уровня блеска родительской галактики GRB 181201A красное смещение z попадает в интервал от 0.3 до 1.1, что согласуется

со значением $z = 0.45$, измеренным в ходе спектроскопических наблюдений всплеска (Иzzo и др., 2018).

По результатам наблюдений родительской галактики GRB 181201A было проведено моделирование ее излучения с помощью программного кода *Le Phare* (Арнотс и др., 1999; Илберт и др., 2006), разработанного для аппроксимации распределения спектральной плотности энергии излучения галактик и получения их физических параметров. Результаты моделирования при фиксированном красном смещении $z = 0.45$ дают для разных типов галактик примерно одинаковые значения средней скорости звездообразования (SFR) и поглощения $E(B-V) \simeq 0.2$ в галактике, а также их возраста и звездной массы. Тем не менее, наилучшая модель предполагает, что родительская галактика GRB 181201A была неправильной (тип Irr). Модельный спектр излучения такой родительской галактики показан на рис. 9 в сравнении с результатами измерений.

Основные свойства галактики, наилучшим образом согласующейся с наблюдениями, представлены в табл. 10. Это молодая карликовая галактика, ее возраст и масса на порядок величины меньше возраста и массы галактики Большое Магелланово Облако (карликового спутника нашей Галактики). В таблице приведены значения абсолютной звездной величины этой галактики в четырех фильтрах,

Таблица 9. Журнал и результаты оптических наблюдений родительской галактики GRB 181201A

Дата	Время ^a	Фильтр	Зв. величина	Поток	Телескоп
yy-mm-dd	hh:mm:ss		mag	мкЯн	
2016-07-24	08:33:41	z'	23.08 ± 0.45	2.089	Blanco 4m
2016-08-03	04:02:39	g'	24.32 ± 0.29	0.522	Blanco 4m
2017-07-19	04:14:36	r'	23.82 ± 0.43	0.900	Blanco 4m
2019-08-30	21:24:06	I^b	23.18 ± 0.27	1.201	ZTSh
2019-10-30	19:10:45	g'	23.87 ± 0.33	0.924	SALT
2019-10-30	19:11:42	r'	23.84 ± 0.39	0.923	SALT
2019-10-30	19:21:09	i'	≥ 23.50	≤ 1.150	SALT
2019-10-30	19:17:56	z'	≥ 22.80	≤ 2.704	SALT
2020-07-18	22:23:09	V^b	23.93 ± 0.36	1.028	ZTSh
2020-08-18	21:56:21	B^b	24.02 ± 0.20	1.052	ZTSh
2020-09-22	19:30:52	R^b	23.65 ± 0.19	0.985	ZTSh

^a Время середины экспозиции (UT).

^b Наблюдения в фильтрах фотометрической системы Vega.

полученные на основе измерений видимой величины телескопом ZTSh (табл. 9). Значения звездной величины были скорректированы на поглощение в Галактике.

ПРОЯВЛЕНИЕ СВЕРХНОВОЙ

Выше отмечалось, что начиная с 21 дня после регистрации GRB 181201A кривая блеска его

Таблица 10. Свойства родительской галактики всплеска GRB 181201A

Параметр	Значение
Тип	Irr
Покраснение $E(B - V)$	0.2
Поглощение A_V	0.6 ^a
Возраст	$\sim 1.7 \times 10^9$ лет
Масса M	$\sim 1.2 \times 10^9 M_\odot$
SFR ^b \dot{M}	$\sim 1.0 M_\odot \text{ год}^{-1}$
M_I^B	-19.0 ± 0.3
M_R^B	-18.5 ± 0.2
M_V^B	-18.3 ± 0.4
M_B^B	-18.2 ± 0.2

^a Принят закон поглощения, характерный для галактик с активным звездообразованием (Калцетти и др., 2000).

^b Темп звездообразования.

^B Абсолютная звездная величина с учетом поглощения в Галактике.

послесвечения, до этого спадающая по степенному закону с показателем степени $\alpha \simeq -1.2$, начала отклоняться сразу в нескольких фильтрах, демонстрируя избыток излучения. Белкиным и др. (2019a, 2019b) было высказано предположение о том, что наблюдаемый избыток связан с началом проявления сверхновой, вспышка которой была причиной гамма-всплеска.

Кривая блеска сверхновой

Для выделения кривой блеска избытка излучения нужно из полного потока, регистрируемого от источника всплеска, вычесть поток послесвечения всплеска и поток излучения родительской галактики.

Поток послесвечения GRB 181201A характеризовался степенным законом падения с показателем степени $\alpha \simeq -1.2$, как хорошо видно на рис. 7. Нормировка закона и точное значение степени, необходимые для аккуратного вычитания этой компоненты, были определены по участку кривой блеска в интервале между 1 и 4 днями после регистрации всплеска, затем этот закон был экстраполирован во временной промежуток предполагаемого проявления сверхновой. Вклад родительской галактики во время наших наблюдений GRB 181201A, очевидно, оставался постоянным; соответствующие ему значения звездной величины и плотности потока излучения в разных фильтрах приведены в табл. 9 и показаны на рис. 6 и 7 штрихпунктирными линиями.

Результат вычитания этих компонент излучения представлен на рис. 10. Было учтено поглощение

в Галактике и в родительской галактике. Видно, что в интервале 21–24 дня после регистрации всплеска по крайней мере в трех фильтрах r' , i' и z' в измерениях действительно присутствует значимый избыток излучения, растущий со временем. Достоверность избытка излучения подтверждается рис. 11, на котором представлены отношения сигнала к шуму для каждой из точек кривой блеска (после вычитания спадающего степенным образом послесвечения).

На этом рисунке, помимо оптических точек, показаны также рентгеновские (отклонения измерений потока от степенного закона). Превышение рентгеновского потока над степенным законом на ранней (≤ 0.3 дня) стадии кривой блеска GRB 181201A связано с продолжением его вспышечной активности (продленным излучением). Сильное, но менее значимое отклонение от степенного закона потока послесвечения было зарегистрировано телескопом XRT и на 127 день после всплеска (рис. 7 и 11). Попытки объяснить это отклонение были предприняты Ласкаром и др. (2019).

Избыток, обнаруженный на 21–24 дни после всплеска, действительно может быть интерпретирован как проявление сверхновой, явившейся причиной GRB 181201A. Рост потока излучения сверхновой на масштабе десятков дней происходит в результате расширения непрозрачной оболочки (сброшенных в момент взрыва верхних слоев предсверхновой) и мощного энерговыделения в ее центре из-за распада радиоактивного ^{56}Co , образовавшегося из короткоживущего радиоактивного изотопа ^{56}Ni , синтезированного при взрыве. Для подтверждения возможности такой интерпретации избытка и определения наблюдательных параметров сверхновой нами была проведена подгонка представленных на рис. 10 данных в фильтрах i' и r' модельной кривой блеска известной сверхновой SN 2013dx, ассоциированной с гамма-всплеском GRB 130702A (Вольнова и др., 2017). Кривые блеска сверхновой SN 2013dx в этих фильтрах получены в результате гидродинамического моделирования кодом STELLA (Блинников и др., 1998, 2006; Блинников, Бартунов, 2011) процесса разлета ее оболочки и сравнения теоретических кривых блеска с данными фотометрических наблюдений.

Аппроксимацию кривой блеска сверхновой можно было бы провести, используя одну из уместных аналитических функций (например, Базин и др., 2011; см. подробнее Приложение). К сожалению, число выполненных фотометрических измерений кривой блеска GRB 181201A во время фазы сверхновой было недостаточным для проведения такой процедуры. Выполнить

дополнительные наблюдения тоже было нельзя из-за ухода кульминации источника в дневную часть суток. Кривые блеска сверхновых SN 2013dx и SN/GRB 181201A, конечно, совсем не обязаны совпадать сколько-нибудь точно, но их сопоставление даже при имеющемся скудном наборе данных кажется осуществимым.

Для подгонки представленных на рис. 10 фотометрических данных, относящихся к сверхновой SN/GRB 181201A, модельная кривая блеска SN 2013dx была приведена к системе отсчета наблюдателя для SN/GRB 181201A, а затем сдвинута относительно момента регистрации всплеска. Параметр сдвига (время, на которое потребовалось сдвинуть максимум кривой) был найден путем минимизации отклонения модельных кривых блеска от измеренных фотометрических значений. Сдвиг составил 14 ± 5.6 и 15 ± 2.1 дней для фильтров r' и i' соответственно. Результат подгонки приведен на рис. 10 сплошными линиями. Значения сдвига совпадают в пределах ошибок. Вообще говоря, такую подгонку необходимо проводить, используя сразу все полученные кодом STELLA многоцветные кривые блеска. Но в нашем случае кривые были измерены лишь в двух фильтрах, причем в фильтре r' не слишком точно. Ошибки фотометрии в этом фильтре ведут к большой неопределенности в определении положения максимума соответствующей кривой. Поэтому, для определения параметров сверхновой лучше использовать лишь результаты подгонки данных измерений в фильтре i' .

Центр полосы пропускания фильтра i' , в котором проводились наблюдения, примерно соответствует центру полосы пропускания фильтра V в системе отсчета источника, что позволяет оценить абсолютную звездную величину сверхновой M_V . В свою очередь это дает возможность уточнить некоторые параметры кривой блеска сверхновой SN/GRB 181201A:

- Время от начала всплеска до максимума кривой блеска сверхновой в фильтре i' в системе отсчета наблюдателя: $T_{\max} - T_0 = 28.9 \pm 2.1$ дней;
- Абсолютную звездную величину в фильтре V в максимуме блеска сверхновой с учетом поглощения в Галактике и родительской галактике: $M_{V,\max} = -19.82(-0.14, +0.27)$.

Интересно сравнить полученные для SN/GRB 181201A параметры $T_{\max} - T_0$ и $M_{V,\max}$ с подобными параметрами других сверхновых, ассоциированных с GRBs. Используя результаты Кано (2012), Кано и др. (2014, 2017а,б), Оливареса и др. (2015), Бекерра и др. (2017), Иззо и др.

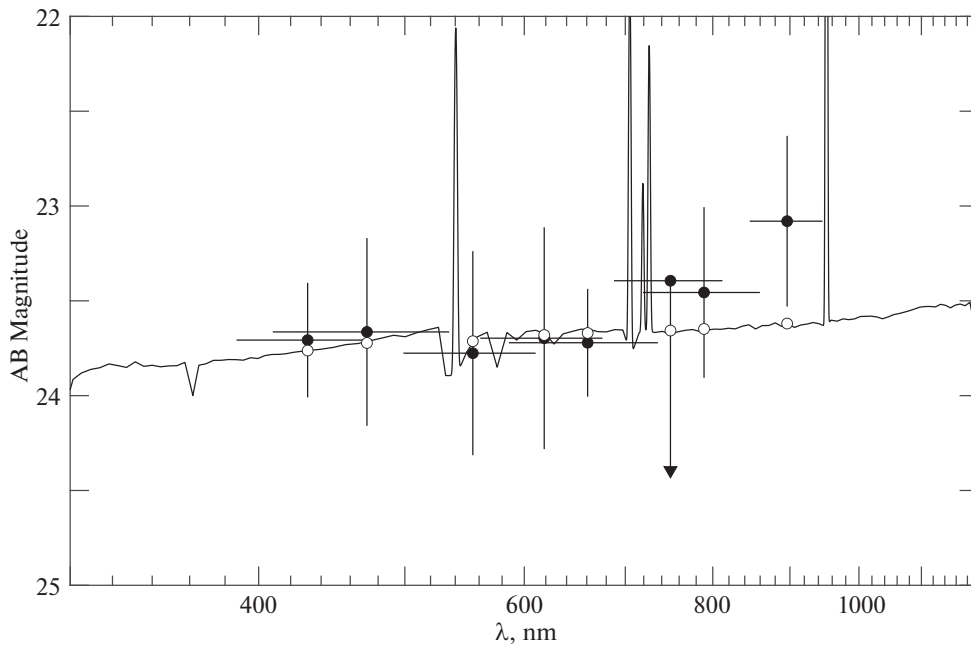


Рис. 9. Сравнение наблюдаемого спектра родительской галактики GRB 181201A (заштрихованные кружки) с наилучшим модельным спектром, соответствующим типу галактики Igg, возрасту 1.7×10^9 лет и звездной массе $M = 1.2 \times 10^9 M_{\odot}$ (сплошная линия и полые кружки).

(2019), можно построить распределение выборки известных сверхновых SN/GRB по этим параметрам (рис. 12).³ Видно, что время достижения максимума блеска сверхновых от момента регистрации гамма-всплеска в системе отсчета источника меняется в широком диапазоне от 8 до 22 дней. Этот диапазон отражает различие физических параметров сверхновых. Положение сверхновой SN/GRB 181201A на рисунке (красная звездочка) хорошо согласуется с распределением по этим параметрам других SN/GRB, свидетельствуя в то же время, что это одна из самых ярких и долгих (с самым длительным временем достижения максимума блеска) сверхновых из выборки. Отметим, что использованная нами для сравнения кривых блеска SN 2013dx, ассоциированная с гамма-всплеском GRB 130702A, находится в самом центре распределения SN/GRBs на этом рисунке (красный квадратик), т.е. это наиболее характерная сверхновая этой выборки.

Попадание SN/GRB 181201A в область концентрации других SN/GRB на рисунке подтверждает, что объяснение избытка излучения в поздней (>21 дня с момента всплеска) кривой блеска GRB 181201A проявлением сверхновой было верным. Данный всплеск стал еще одним случаем фотометрического подтверждения сверхновой, ассоциированной с GRB, и 22 случаем, в котором

у сверхновой удалось определить момент достижения максимума блеска и соответствующую ему абсолютную звездную величину.

Спектр излучения сверхновой

Используя квазиодновременные наблюдения в фильтрах g' , r' , i' , z' , выполненные на ~ 22 день после регистрации GRB 181201A, можно попытаться построить широкополосный оптический спектр сверхновой. В системе отсчета источника всплеска наблюдения были выполнены за ~ 5.1 дней до достижения максимума кривой блеска модельной сверхновой. Напомним, что модель основывалась на статистически обеспеченных многоцветных кривых блеска сверхновой SN 2013dx (Вольнова и др., 2017). Спектр SN 2013dx был измерен примерно в то же время, что и спектр сверхновой, связанной с GRB 181201A, т.е. за ~ 5.1 дней до максимума блеска в системе отсчета сверхновой (ее красное смещение $z = 0.145$). Соответственно у нас есть возможность сравнить спектры излучения этих сверхновых (см. рис. 13).

Рисунок показывает, что спектр излучения сверхновой, связанной с GRB 181201A, хотя и являлся более мягким, чем спектр SN 2013dx, в целом имел похожую форму, характерную для спектров непрерывного (почти чернотельного) излучения сверхновых до момента просветления их оболочки. Различие в эффективных температурах, характеризующих спектры сверхновых, может быть связано с различиями в их параметрах

³ Аналогичное распределение, но с меньшим числом сверхновых было получено в работе Лю и др. (2018).

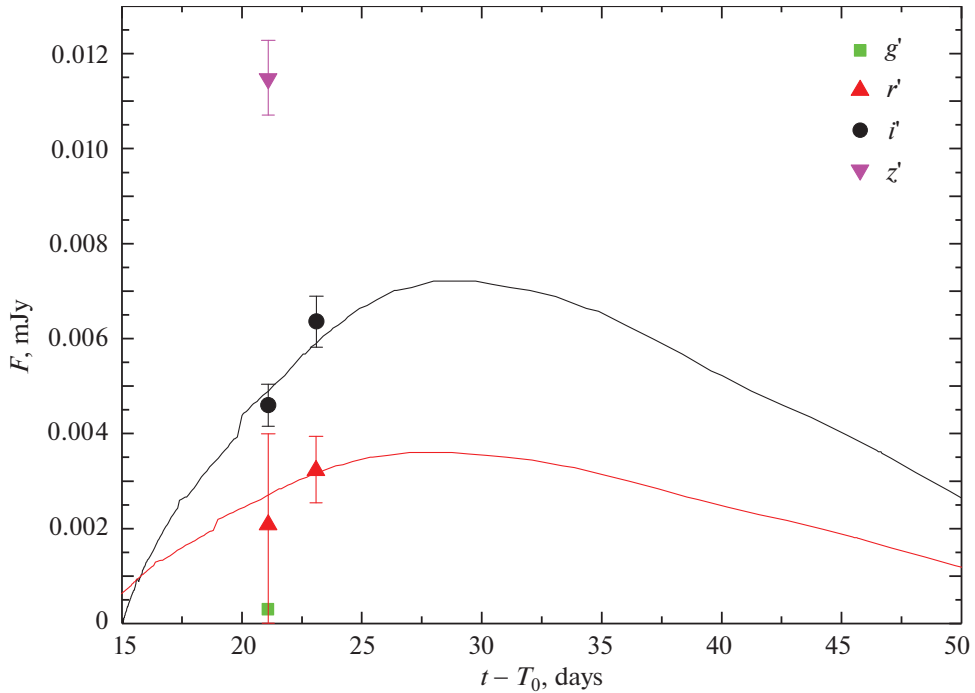


Рис. 10. Кривая блеска сверхновой, связанной с GRB 181201A (поток в мЯн в разных фильтрах). По горизонтальной оси отложено время от момента регистрации всплеска до середины экспозиции наблюдения. Розовым, черным, красным и зелеными цветами обозначены значения потока в фильтрах z' , i' , r' и g' . В фильтре g' излучение сверхновой над уровнем послесвечения почти не проявилось, поэтому приведен 3σ -верхний предел на поток. Все данные были скорректированы на поглощение в Галактике и родительской галактике. Сплошными линиями показаны модельные (рассчитанные программой STELLA) кривые блеска сверхновой SN 2013dx в фильтрах i' и r' , подогнанные к значениям потока, измеренным для данной сверхновой.

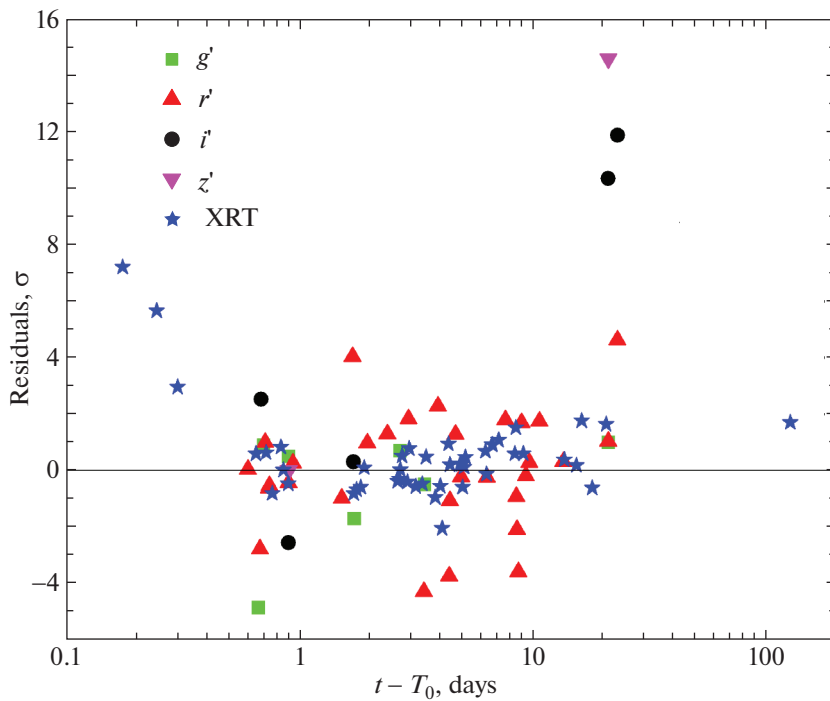


Рис. 11. Отклонение результатов измерений потока излучения в направлении GRB 181201A от степенного закона, описывающего стадию послесвечения всплеска, выраженное в стандартных отклонениях (σ). Розовый, черный, красный и зеленый цвета соответствуют измерениям в фильтрах z' , i' , r' и g' , синие звездочки — в мягком рентгеновском диапазоне.

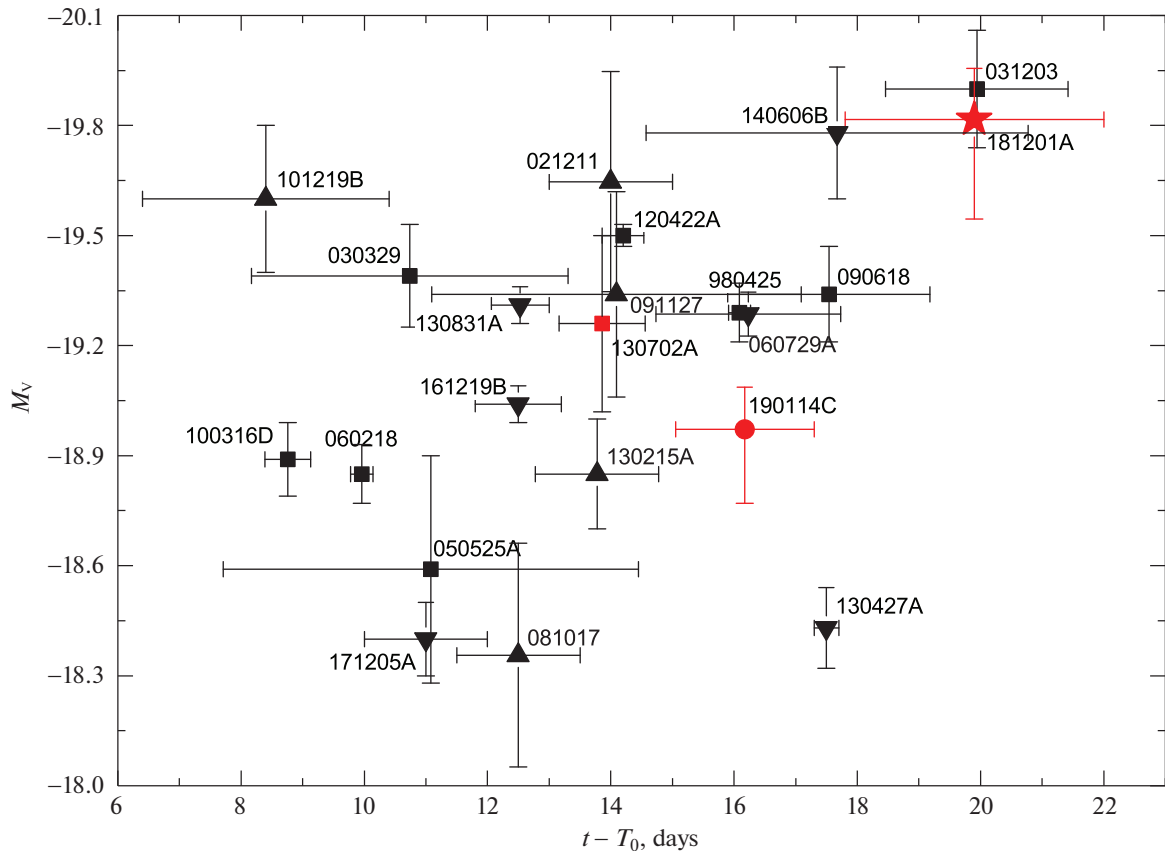


Рис. 12. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по времени достижения максимума блеска (от момента регистрации всплеска T_0) и максимальной достигнутой абсолютной звездной величине в фильтре V в системе отсчета источника. Квадратиками обозначено положение сверхновых из работы (Кано и др., 2017а), треугольниками — из работ Кано и др. (2014, 2017б), Оливареса и др. (2015), Бекерра и др. (2017), Иззо и др. (2019). Красным цветом отмечены SN/GRB, исследовавшиеся группой IKI GRB-FuN.

(энергии взрыва, радиусе предсверхновой, массе сброшенной оболочки) или в ошибке (на ~ 2 дня), допущенной при определении времени достижения максимума блеска. Отметим, что, согласно нашим оценкам, в SN/GRB 181201A максимум блеска должен был наблюдаться на ~ 15 дней позже максимума блеска SN 2013dx, что может быть признаком более плотной (массивной) оболочки этой сверхновой. Мягкость спектра ее излучения в этом случае кажется естественной.

Интересно сравнить спектр излучения GRB 181201A, полученный на этапе роста потока от сверхновой (рис. 13), со спектром всплеска, полученным на этапе послесвечения (рис. 14). Отметим, что последний спектр — прямо измеренный, т.е. он дан в системе отсчета наблюдателя, тогда как первый — в системе отсчета источника. Несмотря на некоторое, связанное с этим, отличие в представлении спектров (амплитуде потока и диапазоне его изменения), видно, что спектры сильно отличаются по своей форме: спектр сверхновой — тепловой (чернотельный), заваливающийся на высоких энергиях, тогда как

спектр послесвечения — жесткий, степенной во всем диапазоне энергий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время у $\sim 70\%$ “длинных” ($T_{90} \gtrsim 2$ с) GRBs с красным смещением $z \lesssim 0.5$ обнаруживаются сверхновая. Отсутствие видимых SNe у оставшихся GRBs объясняют слабостью потока их излучения, а также мощным послесвечением, препятствующим выделению их вклада из общей кривой блеска. За год регистрируется 3–6 близких всплесков с такими z . Шансов обнаружить SN у более далекого всплеска почти нет.

Понятно, почему выборка известных GRBs, связанных с SNe, пока невелика (фотометрически подтверждены сверхновые у 30 GRBs, кроме того, известны 23 GRBs, у которых SNe выявлены спектроскопически; частично эти две группы перекрываются). Лишь для немногих из таких SNe удалось получить достаточно детальную кривую блеска, еще реже — кривую в нескольких фильтрах. Тем не менее открытие у всплеска SN и ее изучение

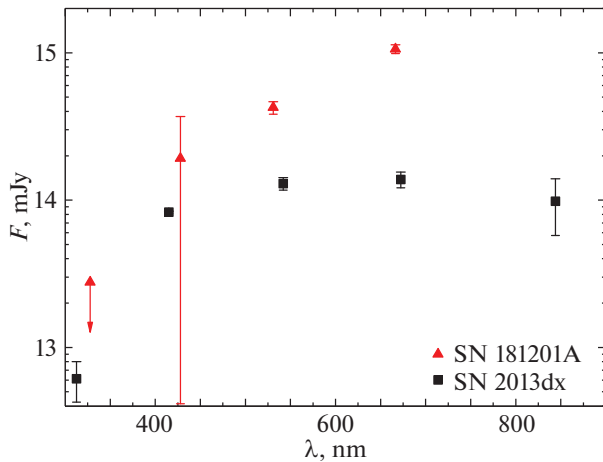


Рис. 13. Сравнение спектров излучения сверхновых SN/GRB 181201A (красные треугольники) и SN 2013dx (черные квадраты). В обоих случаях спектры измерялись на стадии роста яркости сверхновой за ~ 5.1 дней до достижения максимума блеска. Спектры приведены в системах отчета сверхновых в предположении, что наблюдатель находится на расстоянии 10 пк.

способны заметно обогатить и продвинуть вперед исследования феномена GRBs. Именно поэтому для каждого зарегистрированного близкого GRB необходимо организовывать последующие интенсивные наблюдения с целью поиска связанной с ним сверхновой и возможного увеличения их выборки.

Нам в результате проведенной кампании по организации всесторонних наблюдений достаточно близкого GRB 181201A ($z = 0.45$) во время его активной фазы и в течение ~ 24 дней после всплеска удалось обнаружить и добавить в эту выборку еще одну связанную с всплеском сверхновую. Таким образом, теперь в выборку входит 31 ассоциированная с GRBs фотометрически определенная сверхновая.

В работе подробно описаны проведенные в ходе этой кампании наблюдения и анализ полученных в них данных. В частности, были проведены (проанализированы):

- 1) рентгеновские и мягкие гамма-наблюдения всплеска телескопами IBIS/ISGRI, SPI и SPI-ACS орбитальной обсерватории гамма-лучей INTEGRAL во время его активной фазы;
- 2) оптические наблюдения послесвечения всплеска восемью наземными телескопами сети IKI GRB-FuN в разных фильтрах;
- 3) рентгеновские наблюдения послесвечения в диапазоне 0.3–10 кэВ телескопом XRT ор-

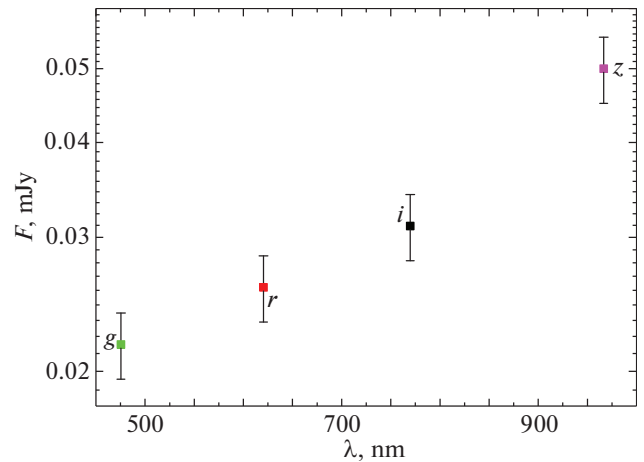


Рис. 14. Широкополосный спектр оптического излучения GRB 181201A во время стадии послесвечения. Спектр приведен в системе отчета наблюдателя на ~ 6.7 день после регистрации всплеска.

битальной обсерватории Swift им. Нейла Джерелса⁴;

- 4) радионаблюдения послесвечения всплеска на частоте 37 ГГц телескопом РТ-22 (КрАО, Симеиз)⁵;
- 5) оптические наблюдения телескопом Gemini North в разных фильтрах послесвечения всплеска в поздней фазе его кривой блеска (21–24 дни), позволившие обнаружить появление сверхновой;
- 6) оптические наблюдения родительской галактики всплеска спустя $\gtrsim 8$ месяцев после момента его регистрации, когда послесвечение и сверхновая уже погасли, а также анализ архивных данных наблюдений области галактики в 2016–2017 гг. камерой DECam 4-м телескопа Blanco (СТЮ, Чили).

По данным этих наблюдений и инициированного ими теоретического рассмотрения и моделирования сделаны следующие выводы:

1. Временной профиль всплеска во время его активной фазы состоял из двух отдельных эпизодов жесткого рентгеновского и гамма-излучения: слабого первого и яркого второго, каждый эпизод сопровождался продолжительным излучением. Лишь обсерватория

⁴ Впервые проведен анализ всей совокупности данных наблюдений послесвечения GRB 181201A этим телескопом.

⁵ Наблюдения на этой частоте (37 ГГц) дополняют результаты радионаблюдений, представленные Ласкаром и др. (2019).

- INTEGRAL смогла зарегистрировать первый эпизод. Его длительность на полувысоте амплитуды максимального потока $T_{50} \simeq 19$ с была вдвое дольше длительности второго эпизода $T_{50} \simeq 9$ с (по данным телескопа SPI, см. табл. 1). В действительности второй эпизод представлял собой наложение двух импульсов излучения: узкого высокого и широкого низкого, поэтому длительность, измеренная у его основания, $T_{100} \simeq 152$ с даже превышала соответствующую длительность первого эпизода $T_{100} \simeq 78$ с.
- Поток продленного жесткого рентгеновского и гамма-излучения падал степенным образом, причем скорость падения (показатель степени α) была в обоих эпизодах одинакова ($\alpha \simeq -3$) и близка к скорости падения потока продленного излучения, найденного при статистическом анализе большой выборки “длинных” гамма-всплесков (Мозгунов и др., 2021).
 - Форма спектров жесткого излучения в двух эпизодах активности значительно различалась: в первом эпизоде спектр в диапазоне 20–100 кэВ был жестким степенным (и не имел ничего общего со спектром теплового излучения, типа спектра, наблюдавшегося в первом эпизоде излучения яркого GRB 160625B, Жанг и др., 2018), во втором эпизоде спектр был более мягким, с ясно выраженным квазиэкспоненциальным завалом на высоких энергиях; он мог быть успешно аппроксимирован законом Бэнда и др. (1993), широко использующимся для описания спектров GRBs. Первый эпизод можно рассматривать как прекурсор гамма-всплеска GRB 181201A.
 - Послесвечение всплеска в период с ~ 0.5 до ~ 20 дней после момента его регистрации во всех оптических фильтрах, а также мягком рентгеновском и радиодиапазонах подчинялось единому степенному закону падения потока излучения с показателем степени $\simeq -1.2$.
 - Благодаря квазиодновременным наблюдениям послесвечения всплеска в рентгеновском, оптическом и радиодиапазонах через ~ 6.7 дней после его регистрации, реконструирован широкополосный спектр послесвечения, подтвержден его степенной характер, но также наличие в нем излома. Положение излома (параметр ν_m синхротронной модели послесвечения, Сари и др., 1998) попадало в область частот $\lesssim 3 \times 10^{14}$ Гц.
 - Обнаружена родительская галактика всплеска. По данным ее многоцветной фотометрии, выполненной через 8 месяцев после всплеска, а также анализа архивных данных наблюдений этой области в 2016–2017 гг. камерой DECam телескопа Blanco получен широкополосный оптический спектр галактики, проведено его моделирование, определены тип галактики и ее основные свойства, в частности, межзвездное поглощение в ней на луче зрения к источнику всплеска. Величина поглощения в родительской галактике и потоки ее излучения в разных фильтрах были затем использованы при восстановлении широкополосного спектра сверхновой и при оценке величины потока излучения в максимуме кривой ее блеска.
 - Поздние (в интервале $T - T_0 \sim 21-24$ дня) наблюдения источника всплеска, выполненные телескопом Gemini North, выявили статистически достоверное превышение потока излучения над затухающим послесвечением (его степенной экстраполяцией в эту эпоху). Вклад излучения родительской галактики был вычтен из полного потока (на 21 день он составлял менее 12% от всего потока в фильтре r'). Кривая блеска избытка излучения, скорректированная на поглощение в родительской и нашей галактиках, была сопоставлена с модельной кривой блеска сверхновой SN 2013dx, ассоциированной с GRB 130702A, и продемонстрировала хорошее согласие с ней. Таким образом, было показано, что наблюдаемый избыток излучения с большой вероятностью был связан с проявлением сверхновой, являвшейся причиной гамма-всплеска GRB 181201A.
 - Уход кульминации источника всплеска в дневную часть суток не позволил построить детальную кривую блеска обнаруженной сверхновой, однако, в результате выполненного сравнения с кривой блеска SN 2013dx были определены два важных параметра сверхновой SN/GRB 181201A: положение максимума ее блеска в фильтре V относительно момента регистрации всплеска (в системе отсчета источника) и соответствующая максимальная абсолютная звездная величина сверхновой $M_{V,\max}$. Положение SN/GRB 181201A на распределении по таким параметрам всех других известных SNe, связанных с GRBs, показало их хорошее согласие. Это подтверждает открытие нами сверхновой, ассоциированной с данным гамма-всплеском. Возможно, сверхновая

Таблица 11. Точность аппроксимации кривой блеска сверхновой аналитическими функциями

Функция	T_{\max} , ^a дни	Время до T_{\max} , ^b дни	Время после T_{\max} , ^b дни	$\chi^2/\text{d.o.f.}$
(1)	0.09	от начала наблюдений	до конца наблюдений	<1.1
(2)	-0.29	от начала наблюдений	57.0	<1.1
(3)	-0.39	6.5	5.6	<1.1
(4)	-0.26	6.7	7.7	<1.1

^a Отличие реального от модельного (полученного в результате аппроксимации аналитической функцией) значения времени максимума кривой блеска.

^b Временной интервал корректности аппроксимации перед максимумом.

^b Временной интервал корректности аппроксимации после максимума.

SN/GRB 181201A является одной из самых длительных (по времени достижения максимума блеска) и самых ярких сверхновых этой выборки.

9. Реконструированный по данным многоцветной фотометрии на ~ 22 день после регистрации всплеска широкополосный спектр излучения SN/GRB 181201A оказался тепловым и, хотя и более мягким, в целом похожим на спектр SN 2013dx, измеренный на той же стадии роста кривой блеска (~ 5.1 день до достижения максимума в системе отсчета источника). Он разительно отличается от жесткого степенного спектра послесвечения GRB 181201A, что подтверждает интерпретацию зарегистрированного избытка излучения в направлении источника GRB 181201A, как начала проявления вызвавшей всплеск сверхновой.

Наряду с реализованным в данной работе прямым сравнением кривой блеска обнаруженной SN с кривыми блеска ранее изученных SNe для ее аппроксимации можно использовать аналитические функции (например, Базин и др., 2011). Приведенный в Приложении анализ использования четырех таких функций для аппроксимации кривой блеска сверхновой SN 2013dx показал, что простые двухпараметрические функции позволяют аппроксимировать кривую блеска сверхновой лишь в окрестности ее максимума. Если число фотометрических измерений потока сверхновой мало и измерения сделаны лишь на стадии роста кривой блеска, использование таких функций нецелесообразно.

Работа основана на данных наблюдений международной астрофизической обсерватории гамма-лучей INTEGRAL (полученных через ее Российский и Европейский центры научных данных) и обсерватории Swift им. Нейла Джерелса (полученных через ее Центр научных данных в Университете

Лейкестера, Великобритания). Использованы данные наблюдений камеры DECam телескопа Blanco обсерватории CTIO (DECaLS; проект NSF OIR Lab 2014B-0404; рук.: Д. Шлегель и А. Дей).

С.О. Белкин, А.С. Позаненко, Е.Д. Мазаева, А.А. Вольнова и П.Ю. Минаев благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований (проект 17-52-80139) за частичную финансовую поддержку анализа данных оптических наблюдений послесвечения всплеска, С.А. Гребенев и И.В. Человеков — Российскому научному фонду (проект 18-12-00522) за частичную финансовую поддержку анализа данных рентгеновских и гамма-наблюдений всплеска, С.И. Блинников — этому же проекту за поддержку его исследования кривой блеска сверхновой, обнаруженной на месте всплеска. И.В. Рева благодарит за поддержку Программу целевого финансирования BR 05336383 Аэрокосмического комитета Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан, Н.Я. Инасаридзе — грант RF-18-1193 Научного фонда им. Шота Руставели. Авторы благодарны Центру коллективного пользования “Терскольская обсерватория” Института астрономии РАН (ИНАСАН) за проведение наблюдений на телескопе Zeiss-1000 (I) на горе Кошка Симеизской обсерватории ИНАСАН. Анализ данных наблюдений радиотелескопа RT-22 поддержан грантом РФФИ 19-29-11027.

ПРИЛОЖЕНИЕ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КРИВОЙ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ

В работе оценка параметров сверхновой, связанной с GRB 181201A, (положение максимума кривой блеска и его амплитуда), осуществлялась путем подгонки к данным фотометрических измерений модельной кривой блеска ранее хорошо

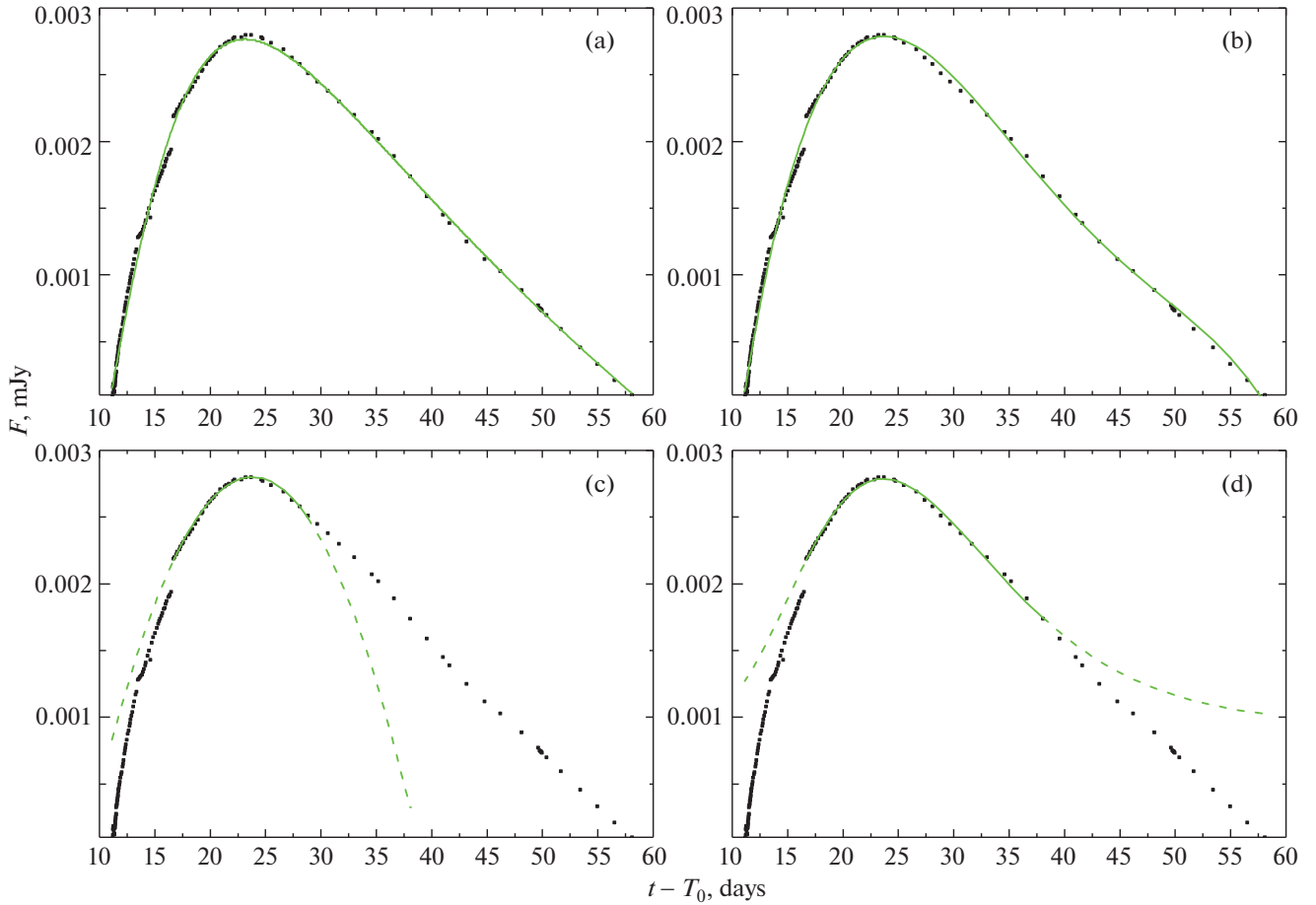


Рис. 15. Аппроксимация (зеленые кривые) болометрической кривой блеска сверхновой SN 2013dx (черные точки, см. Вольнова и др., 2017) разными аналитическими функциями: (а) функцией Базина (Базин и др., 2011), (б) полиномом четвертой степени, (с) параболой (Бьянко и др., 2014) и (д) логнормальным распределением. Выбранная модельная функция показана сплошной линией во временном интервале, где она хорошо описывает кривую блеска (значение нормированного на число степеней свободы $\chi^2 \lesssim 1.1$), штриховой линией — в интервалах, где она описывает кривую блеска неудовлетворительно.

изученной сверхновой SN 2013dx/GRB 130702A (Вольнова и др., 2017). В случае достаточного количества измерений (числа точек на кривой блеска) для определения параметров сверхновой могут быть использованы и аналитические функции. На рис. 15 показан результат аппроксимации болометрической кривой блеска SN 2013dx (Вольнова и др., 2017) разными функциями. Использовались следующие функции:

- функция Базина (Базин и др., 2011):

$$f_1(t) = A + B \frac{\exp[-(t - t_0)/\tau_{\text{fall}}]}{1 + \exp[-(t - t_0)\tau_{\text{rise}}]};$$

- полином четвертой степени:

$$f_2(t) = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + Et^4;$$

- полином второй степени (Бьянко и др., 2014):

$$f_3(t) = A + Bt + Ct^2;$$

- логнормальная функция:

$$f_4(t) = A + \frac{B}{\omega} \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{2 \log^2(t/t_0)}{\omega^2}\right].$$

Из рис. 15 можно понять, насколько хорошо приведенные функции способны аппроксимировать кривую блеска сверхновой. В табл. 11 дополнительно представлены параметры, характеризующие качество такой аппроксимации. Видно, в частности, что функция Базина, полученная эмпирическим путем для моделирования кривых блеска сверхновых, позволяет аппроксимировать кривую

блеска SN 2013dx наилучшим образом в течение всего периода ее активности. Неплохо можно описать долговременную кривую блеска сверхновой и с помощью полинома четвертой степени. Функции с меньшим числом параметров успешно описывают лишь ближайшую окрестность максимума кривой блеска в интервале ± 6.5 дней. Их можно использовать лишь для приближенного (~ 0.5 дня) определения времени достижения этого максимума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аримото и др. (M. Arimoto, M. Axelsson, and M. Ohno), *GCN Circ.* **23480**, 1 (2018).
2. Арнотс и др. (S. Arnouts, S. Cristiani, L. Moscardini, S. Matarrese, F. Lucchin, A. Fontana, and E. Giallongo), *MNRAS* **310**, 540 (1999).
3. Базин и др. (G. Bazin, V. Ruhlmann-Kleider, N. Palanque-Delabrouille, J. Rich, E. Aubourg, P. Astier, C. Balland, S. Basa, et al.), *Astron. Astrophys.* **534**, A43 (2011).
4. Бекерра и др. (R.L. Becerra, A.M. Watson, W.H. Lee, N. Fraija, N.R. Butler, J.S. Bloom, J.I. Capone, A. Cucchiara, et al.), *Astrophys. J.* **837**, 116 (2017).
5. Белкин и др. (S. Belkin, A. Pozanenko, E. Mazaeva, A. Volnova, and M. Krugov), *GCN Circ.* **23485**, 1 (2018a).
6. Белкин и др. (S. Belkin, I. Reva, A. Pozanenko, A. Volnova, E. Mazaeva, A. Kusakin, M. Krugov, and D. Buckley), *GCN Circ.* **23514**, 1 (2018b).
7. Белкин и др. (S. Belkin, E. Mazaeva, A. Pozanenko, P. Minaev, A. Volnova, N. Tominaga, S. Blinnikov, D. Chestnov, et al.), *GCN Circ.* **23601** (2019a).
8. Белкин и др. (S. Belkin, A. Pozanenko, E. Mazaeva, A. Volnova, P. Minaev, N. Tominaga, S. Blinnikov, D. Chestnov, et al.), *Proc. of the XXI International Conference DAMDID/RCDL-2019* (eds. A. Elizarov, V. Novikov, S. Stupnikov, Kazan, Russia, October 15–18, 2019), *CEUR-WS* **2523**, 244 (2019b).
9. Блинников, Бартунов (S.I. Blinnikov and O.S. Bartunov), *Astrophys. Source Code Lib.*, 1108.013. 1, 08013 (2011).
10. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, R. Eastman, O.S. Bartunov, V.A. Popolitovs, S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **496**, 454 (1998).
11. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, F.K. Röpke, E.I. Sorokina, M. Gieseler, M. Reinecke, C. Travaglio, W. Hillebrandt, M. Stritzinger), *Astron. Astrophys.* **453**, 229 (2006).
12. Болмер, Шади (J. Bolmer and P. Schady), *GCN Circ.* **23486**, 1 (2018).
13. Бьянко и др. (F.V. Bianco, M. Modjaz, M. Hicken, A. Friedman, R.P. Kirshner, J.S. Bloom, P. Challis, G.H. Marion, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **213**, 19 (2014).
14. Бэнд и др. (D. Band, J. Matteson, L. Ford, B. Schaefer, D. Palmer, B. Teegarden, T. Cline, M. Briggs, W. Paciesas, et al.), *Astrophys. J.* **413**, 281 (1993).
15. Ведренн и др. (G. Vedrenne, J.-P. Roques, V. Schönfelder, P. Mandrou, G.G. Lichti, A. von Kienlin, B. Cordier, S. Schanne, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L63 (2003).
16. Винклер и др. (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Gimenez, S. Grebenev, W. Hermsen, J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
17. Вольнова и др. (A.A. Volnova, M.V. Pruzhinskaya, A.S. Pozananko, S.I. Blinnikov, P.Yu. Minaev, O.A. Burkhnov, A.M. Chernenko, Sh.A. Ehgamberdiev, et al.), *MNRAS* **467**, 3500 (2017).
18. Вольнова и др. (A. Volnova, E. Mazaeva, D. Buckley, and A. Pozanenko), *GCN Circ.* **23477**, 1 (2018a).
19. Вольнова и др. (A. Volnova, E. Mazaeva, S. Belkin, D. Buckley, M. Krugov, and A. Pozanenko), *GCN Circ.* **23497**, 1 (2018b).
20. Вольнова и др. (A. Volnova, A. Pozanenko, E. Mazaeva, et al.), *Proc. of the XXII International Conference DAMDID/RCDL-2020* (eds. O.A. Kozaderov, V.N. Zakharov, Voronezh, Russia, October 13–16, 2020), *CCIS*, in press (2020).
21. Галама и др. (T.J. Galama, P.M. Vreeswijk, J. van Paradijs, C. Kouveliotou, T. Augusteijn, H. Bönhardt, J.P. Brewer, V. Doublier, et al.), *Nature* **395**, 670 (1998).
22. Грайнер и др. (J. Greiner, P.A. Mazzali, D.A. Kann, T. Krühler, E. Pian, S. Prentice, E.F. Olivares, A. Rossi, et al.), *Nature* **523**, 189 (2015).
23. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, J.R. Findlay, D. Finkbeiner, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
24. Джерельс и др. (N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi, K.O. Mason, J.A. Nousek, A.A. Wells, N.E. White, S.D. Barthelmy, et al.), *Astrophys. J.* **611**, 1005 (2004).
25. Жанг и др. (B.-B. Zhang, B. Zhang, A.J. Castro-Tirado, Z.G. Dai, P.-H. T. Tam, X.-Y. Wang, Y.-D. Hu, S. Karpov, et al.), *Nat. Astron.* **2**, 69 (2018).
26. Ивамото и др. (K. Iwamoto, P.A. Mazzali, K. Nomoto, H. Umeda, T. Nakamura, F. Patat, I.J. Danziger, T.R. Young, et al.), *Nature* **395**, 672 (1998).
27. Иззо и др. (L. Izzo, A. de Ugarte Postigo, D.A. Kann, D.B. Malesani, K.E. Heintz, N.R. Tanvir, V. D'Elia, K. Wiersema, et al.), *GCN Circ.* **23488**, 1 (2018).
28. Иззо и др. (L. Izzo, A. de Ugarte Postigo, K. Maeda, C.C. Thöne, D.A. Kann, M. Della Valle, A. Sagues Carracedo, M.J. Michalowski, et al.), *Nature* **565**, 324 (2019).
29. Илберт и др. (O. Ilbert, S. Arnouts, H.J. McCracken, M. Bolzonella, E. Bertin, O. Le Fèvre, Y. Mellier, G. Zamorani, et al.), *Astron. Astrophys.* **457**, 841 (2006).
30. Калцетти др. (D. Calzetti, L. Armus, R.C. Bohlin, A.L. Kinney, J. Koornneef, and T. Storchi-Bergmann), *Astrophys. J.* **533**, 682 (2000).
31. Канн др. (D.A. Kann, P. Schady, F.E. Olivares, S. Klose, A. Rossi, D.A. Perley, T. Krühler, J. Greiner, et al.), *Astron. Astrophys.* **624**, A143 (2019).

32. Кано (Z. Cano), PhD theses, Liverpool John Moores University, arxiv.org/pdf/1208.0307.pdf (2012).
33. Кано и др. (Z. Cano, D. Bersier, C. Guidorzi, S. Kobayashi, A.J. Levan, N.R. Tanvir, K. Wiersema, P. D'Avanzo, et al.), *Astrophys. J.* **740**, 41 (2011a).
34. Кано и др. (Z. Cano, D. Bersier, C. Guidorzi, R. Margutti, K.M. Svensson, S. Kobayashi, A. Melandri, K. Wiersema, A. Pozanenko, et al.), *MNRAS* **413**, 669 (2011b).
35. Кано и др. (Z. Cano, A. de Ugarte Postigo, A. Pozanenko, N. Butler, C.C. Thöne, C. Guidorzi, T. Krühler, J. Gorosabel, et al.), *Astron. Astrophys.* **568**, id. A19 (2014).
36. Кано и др. (Z. Cano, A. de Ugarte Postigo, D. Perley, T. Krühler, R. Margutti, M. Friis, D. Malesani, P. Jakobsson, et al.), *MNRAS* **452**, 1535 (2015).
37. Кано и др. (Z. Cano, L. Izzo, A. de Ugarte Postigo, et al.), *Astron. Astrophys.* **605**, id. A107 (2017a).
38. Кано и др. (Z. Cano, S.-Q. Wang, Z.-G. Dai, and X.-F. Wu), *Adv. Astron.* **2017**, id. 8929054 (2017b).
39. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, V. Beckmann, A. Rau, N. Arend, K. Bennett, B. McBreen, P. Connell, S. Deluit, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L299 (2003a).
40. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, N. Arend, G.G. Lichti, A.W. Strong, and P. Connell), *Proc. SPIE "X-ray and Gamma-Ray Telescopes and Instruments for Astronomy"* (Eds. J. E. Truemper and H. D. Tananbaum) **4851**, 1336 (2003b).
41. Конг (A.K.H. Kong), *GCN Circ.* **23475**, 1 (2018).
42. 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).
43. 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).
44. Кулкарни и др. (S.R. Kulkarni, D.A. Frail, M.H. Wieringa, R.D. Ekers, E.M. Sadler, R.M. Wark, J.L. Higdon, E.S. Phinney, and J.S. Bloom), *Nature* **395**, 663 (1998).
45. Курвазье и др. (T.J.-L. Courvoisier, R. Walter, V. Beckmann, A.J. Dean, P. Dubath, R. Hudec, P. Kretschmar, S. Mereghetti, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L53 (2003).
46. 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).
47. Ласкар и др. (T. Laskar, H. van Eerten, P. Schady, C.G. Mundell, K.D. Alexander, R.B. Duran, E. Berger, J. Bolmer, et al.), *Astrophys. J.* **884**, 121 (2019).
48. Лебран и др. (F. Lebrun, J.P. Leray, P. Lavocat, J. Crétolle, M. Arqués, C. Blondel, C. Bonnin, A. Bouère, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L141 (2003).
49. Лю и др. (H.-J. Lü, L. Lan, B. Zhang, E.-W. Liang, D.A. Kann, S.-S. Du, and J. Shen), *Astrophys. J.* **862**, 130 (2018).
50. Мазаева и др. (E. Mazaeva, A. Volnova, A. Pozanenko, I. Nikolenko, A. Novichonok, and I. Molotov), *GCN Circ.* **23479**, 1 (2018a).
51. Мазаева и др. (E. Mazaeva, E. Klunko, S. Belkin, A. Volnova, and A. Pozanenko), *GCN Circ.* **23522**, 1 (2018b).
52. Мазаева и др. (E. Mazaeva, A. Pozanenko, and P. Minaev), *Int. J. Mod. Phys. D* **27**, 1844012 (2018в).
53. 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).
54. Мерегетти и др. (S. Mereghetti, D. Götz, J. Borkowski, R. Walter and H. Pedersen), *Astron. Astrophys.* **411**, L291 (2003).
55. Мерегетти и др. (S. Mereghetti, D. Götz, C. Ferrigno, E. Bozzo, V. Savchenko, L. Ducci, and J. Borkowski), *GCN Circ.* **23469**, 1 (2018a).
56. Мерегетти и др. (S. Mereghetti, F. Pintore, D. Götz, C. Ferrigno, E. Bozzo, V. Savchenko, L. Ducci, and J. Borkowski), *GCN Circ.* **23471**, 1 (2018b).
57. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Лозников В.М., *Астрофиз. Бюл.* **65**, 343 (2010) [P.Yu. Minaev, et al. *Astrophys. Bull.* **65**, 326 (2010)].
58. 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.Yu. Minaev et al., *Astron. Lett.* **38**, 613 (2012)].
59. 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)].
60. Минаев, Позаненко (P.Yu. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2020).
61. Мозгунов Г.Ю., Минаев П.Ю., Позаненко А.С., *Письма в Астрон. журн.* **47**, в печати (2021) [G.Yu. Mozgunov et al., *Astron. Lett.* **47**, in press (2021)].
62. Мэтисон и др. (T. Matheson, P.M. Garnavich, K.Z. Stanek, D. Bersier, S.T. Holland, K. Krisciunas, N. Caldwell, P. Berlind, et al.), *Astrophys. J.* **599**, 394 (2003).
63. Нестеров Н.С., Вольвач А.Е., Стрелка И.Д., *Письма в Астрон. журн.* **26**, 249 (2000) [N.S. Nesterov et al., *Astron. Lett.* **26**, 204 (2000)].
64. 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).
65. Оливарес и др. (E.F. Olivares, J. Greiner, P. Schady, S. Klose, T. Krühler, A. Rau, S. Savaglio, D.A. Kann, et al.), *Astron. Astrophys.* **577**, A44 (2015).
66. Пачинский (B. Paczynski), *Astrophys. J.* **494**, L45 (1998).
67. Пинторе и др. (F. Pintore, S. Mereghetti, D. Gotz, C. Ferrigno, E. Bozzo, V. Savchenko, L. Ducci, and J. Borkowski), *GCN Circ.* **23472**, 1 (2018).
68. Подеста и др. (R. Podesta, C. Lopez and F. Podesta), *GCN Circ.* **23470**, 1 (2018).
69. Позаненко А.С., Румянцев В.В., Лозников В.М., Вольнова А.А., Шульга А.П., *Письма в Астрон. журн.* **34**, 163 (2008) [A.S. Pozanenko et al., *Astron. Lett.* **34**, 141 (2008)].

70. Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **45**, 768 (2019) [A.S. Pozanenko, et al., *Astron. Lett.* **45**, 710 (2019)].
71. Пэйдж и др. (K.L. Page, A.P. Beardmore, V. D'Elia, A. D'Ai, A. Melandri, S.J. LaPorte, J.A. Kennea, B. Sbarufatti, and P.A. Evans), *GCN Circ* **23474**, 1 (2018).
72. Райд и др. (F. Ryde, L. Borgonovo, S. Larsson, N. Lund, A. von Kienlin, and G. Lichti), *Astron. Astrophys.* **411**, L331 (2003).
73. Рамзи и др. (G. Ramsay, J. Lyman, K. Ulaczyk, D. Steeghs, K. Wiersema, M. Dyer, B. Gompertz, A. Levan, et al.), *GCN Circ.* **23503**, 1 (2018).
74. Рау и др. (A. Rau, A. von Kienlin, K. Hurley, and G.G. Lichti), *ESA-SP* **552**, 607 (2004).
75. Рау и др. (A. Rau, A. von Kienlin, K. Hurley, and G.G. Lichti), *Astron. Astrophys.* **438**, 1175 (2005).
76. Рева и др. (I. Reva, M. Krugov, A. Volnova, E. Mazaeva, S. Belkin, and A. Pozanenko), *GCN Circ.* **23507**, 1 (2018).
77. Ревнивцев М.Г., Сюняев Р.А., Варшалович Д.А., Железняков В.В., Черепашук А.М., Луговинов А.А., Чуразов Е.М., Гребенев С.А., Гильфанов М.Р., Письма в Астрон. журн. **30**, 430 (2004) [M.G. Revnivtsev, et al., *Astron. Lett.* **30**, 382 (2004)].
78. Рок и др. (J.P. Roques, S. Schanne, A. von Kienlin, J. Knödseder, R. Briet, L. Bouchet, Ph. Paul, S. Boggs, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L91 (2003).
79. Сари и др. (R. Sari, T. Piran, and R. Narayan), *Astrophys. J.* **497**, L17 (1998).
80. Свинкин и др. (D. Svinkin, S. Golenetskii, R. Aptekar, D. Frederiks, M. Ulanov, A. Tsvetkova, A. Lysenko, A. Kozlova, and T. Cline), *GCN Circ.* **23495**, 1 (2018).
81. Скворцов и др. (N.A. Skvortsov, E.A. Avvakumova, D.O. Bryukhov, A.E. Vovchenko, A.A. Vol'nova, O.B. Dluzhnevskaya, P.V. Kaigorodov, L.A. Kalinichenko, et al.), *Astrophys. Bull.* **71**, 114 (2016).
82. Соллерман и др. (J. Sollerman, J.P.U. Fynbo, J. Gorosabel, J.P. Halpern, J. Hjorth, P. Jakobsson, N. Mirabal, D. Watson, et al.), *Astron. Astrophys.* **466**, 839 (2007).
83. Станек и др. (K.Z. Stanek, T. Matheson, P.M. Garnavich, P. Martini, P. Berlind, N. Caldwell, P. Challis, W.R. Brown, et al.), *Astrophys. J.* **591**, L17 (2003).
84. Убертини и др. (P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, A. Bazzano, A.J. Bird, K. Broenstad, A. Goldwurm, G. La Rosa, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L131 (2003).
85. Фен и др. (C.C. Thöone, A. de Ugarte Postigo, C.L. Fryer, K.L. Page, J. Gorosabel, M.A. Aloy, D.A. Perley, C. Kouveliotou, et al.), *Nature* **480**, 72 (2011).
86. 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).
87. Хайнц и др. (K.E. Heintz, D.B. Malesani, and S. Moran-Kelly), *GCN Circ.* **23478**, 1 (2018).
88. Хаккила, Прис (J. Hakkila and R.D. Preece), *Astrophys. J.* **740**, 104 (2011).
89. Ханам и др. (T. Khanam, V. Sharma, A. Vibhute, V. Bhalerao, D. Bhattacharya, A.R. Rao, and S. Vadawale), *GCN Circ.* **23501**, 1 (2018).
90. Хьорт и др. (J. Hjorth, J. Sollerman, P. Moller, J.P.U. Fynbo, S.E. Woosley, C. Kouveliotou, N.R. Tanvir, J. Greiner, et al.), *Nature* **423**, 847 (2003).
91. Цай и др. (C. Cai, C.K. Li, X.B. Li, G. Li, J.Y. Liao, S.L. Xiong, C.Z. Liu, X.F. Li, et al.), *GCN Circ.* **23491**, 1 (2018).
92. Человеков И.В., Гребенев С.А., Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Письма в Астрон. журн. **45**, 683 (2019) [I.V. Chelovekov, et al., *Astron. Lett.* **45**, 635 (2019)].
93. Шлафлай, Финкбайнер (E.F. Schlafly and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
94. Шривастава и др. (S. Srivastava, H. Kumar, S. Otzer, K. De, V. Bhalerao, G.C. Anupama, and M. Kasliwal), *GCN Circ.* **23510**, 1 (2018).
95. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, L.G. Tyler, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, L. Vetere, et al.) *Astron. Astrophys.* **469**, 379 (2007).
96. 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).