

## ПРОДЛЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОМ SPI-ACS/INTEGRAL

© 2021 г. Г. Ю. Мозгунов<sup>1,2\*</sup>, П. Ю. Минаев<sup>1,2</sup>, А. С. Позаненко<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

Поступила в редакцию 20.09.2020 г.

После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Проведен систематический анализ кривых блеска гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS обсерватории INTEGRAL с целью поиска продленного излучения. Продленным излучением называется излучение, иногда регистрируемое после быстропеременной активной фазы гамма-всплеска в виде более длительного, чем активная фаза, и существенно менее интенсивного излучения. Из 739 наиболее ярких гамма-всплесков, зарегистрированных с 2002 по 2017 г., продленное излучение обнаружено в ~20% индивидуальных кривых блеска, его максимальная длительность достигает 10 000 с. Выявлены два различных типа продленного излучения. Один из них является дополнительной компонентой кривой блеска, которая описывается степенным законом с показателем степени  $\alpha \sim -1$ , близким к показателю степени послесвечения в оптическом и рентгеновском диапазонах. Второй тип связан с более крутым степенным падением кривой блеска, характерным для активной фазы всплеска. Продленное излучение также найдено в суммарной кривой блеска длинных гамма-всплесков, в индивидуальных кривых блеска которых продленное излучение обнаружено не было. Показатель степени продленного излучения в суммарной кривой блеска составляет  $\alpha \sim -2.4$ . Оно, наиболее вероятно, связано с суперпозицией кривых блеска активной фазы; его общая длительность — 800 с.

*Ключевые слова:* космические гамма-всплески, кривая блеска, активная фаза, продленное излучение, послесвечение.

DOI: 10.31857/S0320010821030049

### ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески были открыты как мощные вспышки гамма-излучения в 1967 г. (Клебесадел и др., 1973). С тех пор природа явления остается одной из интересных загадок астрофизики. В экспериментах *Konus* (Мазец и др., 1981) была впервые обнаружена бимодальность распределения длительностей гамма-всплесков, которая была подтверждена Кувелиоту и др. (1993) на большом статистическом материале по данным эксперимента *BATSE*, а в дальнейшем — в данных многих других экспериментов (см., например, Минаев и др., 2010а,б, 2012, 2014; Минаев, Позаненко, 2017, 2020). Это свидетельствовало о существовании двух классов всплесков: короткие/жесткие (длительность — менее 2 с), ассоциируемые со слияниями двух нейтронных звезд (Пачинский, 1986; Эббот и др., 2017), и длинные/мягкие (длительность — более 2 с), связанные с коллапсом массивных звезд (Вузли, 1993). Выделяют две

фазы процесса излучения. Активная фаза характеризуется работой центральной машины, во время которой происходит активное энерговыделение и формируется струйный выброс (джет). Во время активной фазы формируется быстропеременное гамма-излучение (собственно сам гамма-всплеск). После прекращения работы центральной машины наблюдается пассивная фаза — распространение джета в межзвездном пространстве, сопровождающееся адиабатическим охлаждением и излучением в рентгеновском, оптическом и радиодиапазонах (см., например, Межарос, Рис, 1992), называемое послесвечением.

Продленным излучением называется излучение, иногда регистрируемое после быстропеременной активной фазы гамма-всплеска в виде более длительного, чем активная фаза, и существенно менее интенсивного излучения. Такое излучение было, например, обнаружено в данных эксперимента *SIGMA/Гранат* в индивидуальных и суммарных кривых блеска (Буренин и др., 1999, 2000; Ткаченко и др., 2000; Буренин, 2000). Статистическое

\*Электронный адрес: georgiy99@bk.ru

исследование усредненных кривых блеска гамма-всплесков по данным эксперимента BATSE показало наличие продленного излучения с длительностью до 100 с у коротких всплесков и 1000 с у длинных (Лаззати и др., 2001; Коннатон, 2002). По данным *Konus/Wind* (Фредерикс и др., 2004) в усредненной кривой блеска коротких гамма-всплесков было найдено продленное излучение в диапазоне 10–100 кэВ длительностью 100 с. Продленное излучение коротких гамма-всплесков было также найдено в некоторых индивидуальных кривых блеска в экспериментах *BAT/Swift* (Канеко и др., 2015; Норрис и др., 2011), *GBM/Fermi* (Канеко и др., 2015), *Konus/Wind* (Мазец и др., 2002), причем оно было спектрально мягче основного эпизода. В более жестком энергетическом диапазоне  $> 80$  кэВ в эксперименте *SPI-ACS/INTEGRAL* (Минаев и др., 2010а) у коротких всплесков также было обнаружено продленное излучение как в суммарной кривой блеска длительностью 125 с, так и в индивидуальных кривых блеска нескольких всплесков.

У коротких гамма-всплесков, вероятно, существует два типа продленного излучения. Это подтверждается тем, что в некоторых случаях продленное излучение продолжает основную фазу монотонным падением (см., например, Свинкин и др., 2016; Минаев и др., 2017), а в других имеет сложную структуру, состоящую из ряда импульсов (например, в случае GRB 060614 из Герельс и др., 2006). У длинных всплесков продленное излучение было найдено в индивидуальных кривых блеска (Гиблин и др., 2000; Рончи и др., 2019), где оно описывалось степенной моделью, а спектр был характерен для синхротронного излучения от выброса, распространяющегося в межзвездном пространстве, т.е. послесвечения. Систематическое исследование продленного излучения длинных всплесков с 2002 г. не проводилось.

Для объяснения природы продленного излучения были предложены различные модели. Оно может быть жесткой частью послесвечения (Буренин, 2000; Лаззати и др., 2001). В модели, предложенной, например, Мецгер и др. (2008), продленное излучение поддерживается энергией вращения магнетара. В двухджетовой модели продленное излучение и излучение активной фазы поддерживаются различными механизмами (Барков, Позаненко, 2011). Продленное излучение в гамма-диапазоне также может быть связано с процессами ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны (Варрен и др., 2018). В качестве механизма продленного излучения можно рассматривать взаимодействие джета и прожигаемой им оболочки — излучение кокона (Готлиб и др., 2018; Позаненко и др., 2018).

У всплесков с продленным излучением параметр длительности  $T_{90}$  может достигать тысяч секунд. Иногда такие всплески можно спутать со сверхдлинными — гамма-всплесками с длительностью активной фазы 1000 с и более (Джендр и др., 2013). Но кривая блеска последних чаще всего состоит из нескольких эпизодов излучения, разделенных периодами молчания, что свойственно для активной фазы, а не для продленного излучения.

Природа продленного излучения остается невыясненной. До сих пор не проводилось систематического исследования феноменологии явления для длинных всплесков, на основе которого можно было бы выбрать оптимальную модель продленного излучения. В работе мы проводим систематическое исследование продленного излучения гамма-всплесков, используя данные антисовпадательной защиты (ACS) спектрометра SPI обсерватории INTEGRAL в энергетическом диапазоне ( $>80$  кэВ).

## ОТБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ *SPI-ACS INTEGRAL*

*SPI-ACS* является антисовпадательной защитой германиевого детектора SPI, расположенного на космической обсерватории (КО) INTEGRAL. В качестве детекторов используется 91 ВГО (германий висмута) сцинтилляторов, окружающих телескоп SPI. С каждым кристаллом ВГО сопряжено два фотоумножителя (ФЭУ), и отсчеты со всех ФЭУ регистрируются в едином энергетическом канале. Нижний порог канала составляет  $\sim 80$  кэВ; верхний порог  $\sim 10$  МэВ. Эксперимент *SPI-ACS* может регистрировать фотоны со всех направлений, но наименее чувствительным является направление, совпадающее с полем зрения телескопа SPI, составляющее  $16^\circ$ . Временное разрешение детектора составляет 50 мс (фон Киенлин и др., 2003). Данные, используемые в работе, являются общедоступными<sup>1</sup>.

КО INTEGRAL находится на высокоэллиптической орбите с начальным периодом обращения 72 ч и апогеем  $\sim 153$  тыс. км. Такая орбита обеспечивает стабильность фона на больших временных интервалах по сравнению с околоземными аппаратами. Анализ фона на околоземном космическом аппарате *Fermi* можно найти, например, в Бильцингер и др. (2020). Фон в эксперименте *GBM/Fermi* может меняться в несколько раз на масштабах всего лишь сотен секунд. Все это затрудняет исследование длительного и слабого сигнала, такого как продленное излучение. В работах

<sup>1</sup> <https://www.isdc.unige.ch/savchenk/spiacs-online/spiacs-ipncl.pl>

(Минаев и др., 2010а; Бисноватый-Коган и др., 2011) было показано, что на интервалах до тысячи секунд уровень фона SPI-ACS меняется не более, чем на 0.3%. Несмотря на ограничения эксперимента SPI-ACS, а именно, регистрация фотонов в едином энергетическом канале с временным разрешением 50 мс, именно стабильный фон на больших временных интервалах делает его эффективным инструментом для исследования продленного излучения.

### Обработка данных

Для формирования выборки гамма-всплесков был использован “мастерлист” Орли (2008)<sup>2</sup>. Он является компиляцией данных большого количества космических экспериментов, регистрирующих гамма-всплески, в том числе и SPI-ACS, собираемых К. Орли, и поддерживаемый с 1990 г. по настоящее время. По данным “мастерлиста” в период с ноября 2002 по ноябрь 2017 г. было зарегистрировано 4720 гамма-всплесков. Из них была сформирована выборка по следующим критериям, примененным к данным SPI-ACS: 1) значимость регистрации всплеска — более  $25\sigma$  на шкале 1 с, что эквивалентно максимальному потоку  $\sim 10^4$  отсчетов в секунду; 2) отсутствие “провалов” телеметрии в интервале (0, 100) с относительно времени срабатывания триггера. Из ранних исследований (Коннатон, 2002) известно, что длительность продленного излучения составляет  $\sim 10^2 - 10^3$  с, поэтому выбранный интервал позволяет выделить неисключенное продленное излучение или по крайней мере его начало. 786 событий удовлетворяли этим критериям.

Для поиска продленного излучения используются данные на временном интервале  $[-L; R]$  относительно  $T_0$ , где  $L, R = 15\ 000$  с. Исходное временное разрешение (длительность одного бина) составляет 0.05 с. Отрезки времени для аппроксимации фона выбираются следующим образом: левый —  $[-L; -0.1 \times L]$ , правый —  $[0.4 \times R; R]$ . Отрезки не симметричны, левый конец правого интервала отстоит от  $T_0$  дальше, чем правый конец левого. Такой выбор интервалов может обеспечить более точное выделение продленного излучения, которое ожидается после самого гамма-всплеска. Затем фоновый сигнал аппроксимируется двумя моделями: полиномами первой и третьей степени. Наилучшая модель фона определяется по приведенному значению функционала  $\chi^2/d.o.f$ . Если значение функционала  $\chi^2/d.o.f \gg 1$  в обоих случаях, то значения  $L$  и  $R$  уменьшаются, и процесс повторяется. После определения наилучшей модели

на максимально возможном фоновом интервале происходит вычитание модели фона из исходной кривой блеска.

Длительность фоновых интервалов  $R + L$  варьируется от  $10^2$  до  $10^4$  с. Чаще всего используются значения  $L, R \sim 10^3$  с. Оказалось, что оптимальной моделью фона для большинства всплесков является полином 3-й степени (51% из всех исследованных), в 336 случаях (43%) фон описывается линейной моделью, и в 47 случаях (6%) фон имеет более сложный вид и не может удовлетворительно быть описан этими моделями.

Для каждого всплеска на интервалах аппроксимации фона вычисляются выборочное среднее ( $M$ ) и выборочная дисперсия ( $D$ ). Обнаружено отклонение от распределения Пуассона, дисперсия систематически выше среднего значения, что подтверждает результат, полученный в Пау и др. (2005), Райд и др. (2003), Минаев и др. (2010а). Показано, что отношение этих величин  $k = D/M$  меняется в диапазоне  $1.18 < k < 1.76$ . Уровень  $1\sigma$  значимости сигнала над фоном  $B$  определяется по формуле  $\sqrt{k \times B}$ .

Следующим шагом после вычитания фона является вычисление параметра длительности  $T_{90}$  (время, за которое регистрируется 90% отсчетов в событии). Алгоритм вычисления подробно описан в работе (Кошут и др., 1996). На рис. 1 представлена схема вычисления  $T_{90}$  для GRB 021206. Здесь мы кратко опишем этот алгоритм. Для определения параметра времени  $T_{90}$  необходимо построить интегральную кривую блеска. Затем определить уровни, соответствующие количеству отсчетов в интегральной кривой в 5 и 95% от полного числа отсчетов в событии. После этого определяются соответствующие времена  $T_{5\%}$  и  $T_{95\%}$ . Разность этих времен является параметром длительности  $T_{90}$ . Аналогичным образом можно вычислить и параметр длительности  $T_{50}$ . В табл. 1 приведены значения  $T_{90}$ , вычисленные в нашей работе, а также там, где возможно, мы приводим значения  $T_{90}$ , полученные в других экспериментах (GBM/Fermi, BAT/Swift, RHESSI, Konus-Wind, HETE-2). В большинстве случаев значимых различий  $T_{90}$  нет. Однако параметр длительности  $T_{90}$ , вычисленный в нашей работе для всплесков с продленным излучением, значительно превышает параметр  $T_{90}$ , приведенный в других экспериментах, включая каталог SPI-ACS (Пау и др., 2005). Эти расхождения объясняются вероятно выбором интервалов для аппроксимации фона. При выборе интервала, близкого к основной фазе всплеска, часть интервала с продленным излучением будет использована для определения фона, следовательно, часть продленного излучения не будет участвовать

<sup>2</sup> <http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/masterli.txt>

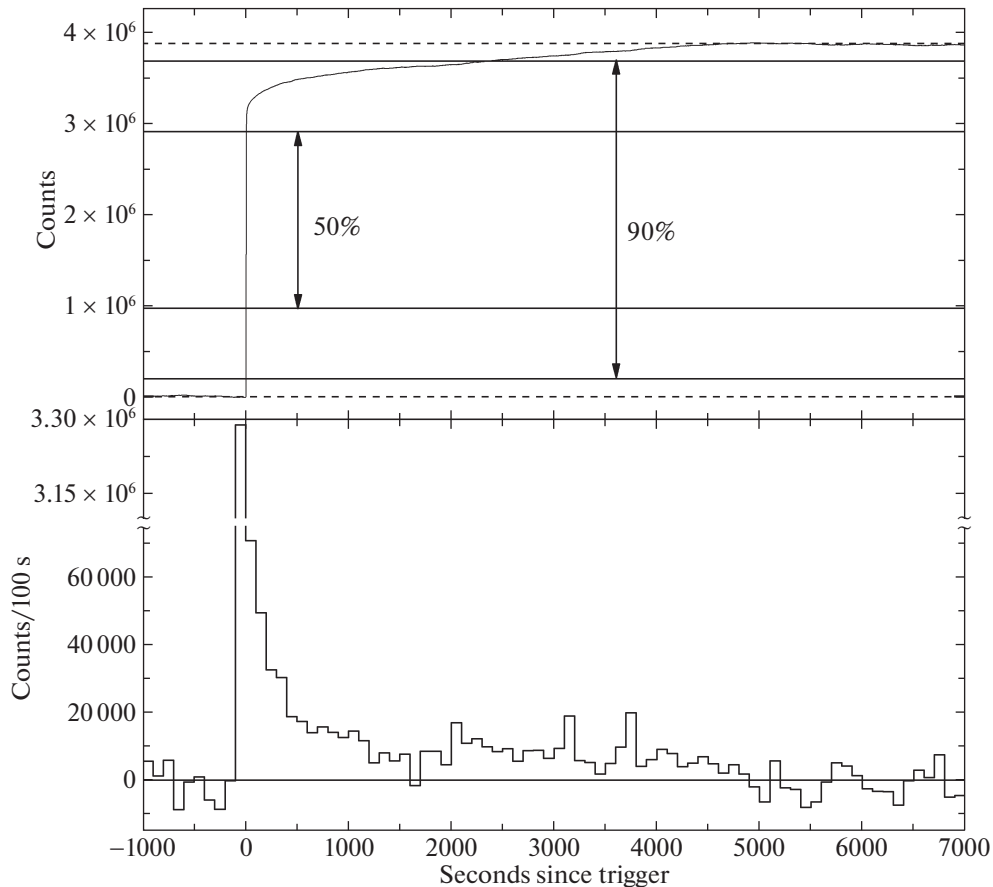
Таблица 1. Сравнение длительностей  $T_{90}$ 

GRB	$T_0$ , UT	$T_{90}^a$ , с	$\sigma_{T_{90}}^-$	$\sigma_{T_{90}}^+$	$T_{90}^b$ , с
021102	15:58:32	9.75	1.55	2.75	10.8 [3]
021116	08:06:34	45.90	10.65	12.50	—
021125	05:59:01	19.90	1.88	3.36	—
021125	17:58:27	31.80	6.14	15.74	67.5 [3]
021201	05:30:04	0.25	0.05	0.05	0.34 [3]
021206	22:49:11	2283.50	139.25	134.90	4.92 [3]
021226	14:53:40	0.75	0.20	2.40	0.35 [3]
021228	14:56:41	41.80	18.40	5.22	—
030102	15:47:50	25.65	10.32	19.34	—
030102	23:18:58	24.65	6.26	20.72	13.2 [3]
030105	14:34:14	14.40	5.95	3.85	1.23 [3]
030115	06:25:12	151.25	74.72	71.32	79.5 [3]
030117	17:36:14	0.20	0.10	—	—
030127	12:32:32	64.00	14.37	37.01	38 [3]
030204	12:45:34	43.15	5.86	7.92	56 [3]
030215	11:16:22	35.80	0.36	0.32	—
030217	23:31:42	0.35	0.10	0.30	—
030218	11:42:38	183.00	2.61	3.16	—
030220	16:12:44	98.20	5.20	4.95	—
030223	09:45:06	38.60	11.76	5.69	20.5 [3]
030225	15:02:47	73.10	6.61	5.01	20 [3]
030307	14:31:58	3.50	0.35	0.41	3.8 [3]
030325	14:15:10	2.05	0.35	0.61	—
030326	10:43:41	9.80	2.10	2.41	12.6 [3]
030329	11:37:15	23.80	1.40	1.66	17.4 [3], 21.808 [4]
030331	05:38:15	128.90	74.62	11.28	23.8 [3]
030406	22:42:03	116.65	14.60	32.05	70.2 [3]
030413	07:34:44	74.25	11.55	11.30	20.4 [3]
030414	13:48:27	24.75	3.65	1.81	28.5 [3]
030419	01:12:06	38.20	0.40	0.71	37.8 [3]
030501	01:17:17	18.50	3.04	7.07	7.4 [3]

Примечание. <sup>a</sup>  $T_{90}$ , полученное по данным SPI-ACS в данной работе.

<sup>b</sup>  $T_{90}$ , полученное по данным других экспериментов.

[1]  $T_{90}$  из каталога GBM Fermi (50–300 кэВ) (Бхат и др., 2016). [2]  $T_{90}$  из электронной таблицы Swift (15–150 кэВ) (Swift GRB table). [3]  $T_{90}$  из электронной таблицы RHESSI (25 кэВ–1.5 МэВ) (Рипа и др., 2009). [4]  $T_{90}$  из каталога Konus-Wind (~80–1200 кэВ) (Цветкова и др., 2017). [5]  $T_{90}$  из каталога HETE (30–400 кэВ) (HETE GRB table). Полная версия таблицы доступна в электронном виде <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>



**Рис. 1.** Интегральная кривая (вверху) и кривая блеска GRB 021206 (внизу); длительность бина — 100 с. По горизонтальной оси — время относительно триггера. На интегральной кривой пунктирными линиями обозначены уровни в 0 и 100% отсчетов. Сплошными линиями указаны уровни накопленных отсчетов в 5, 25, 75, 95% от максимального уровня.

в вычислении  $T_{90}$  и значение параметра окажется заниженным. Для примера снова рассмотрим GRB 021206 (рис. 1), у которого  $\frac{T_{90, SPI-ACS}}{T_{90, RHESSI}} \sim 450$ . При детальном исследовании кривой блеска выясняется, что у всплеска присутствует значимое продленное излучение, представляющее кривую блеска со степенным законом падения и длительностью  $\sim 10^4$  с. Помимо продленного излучения, естественно, присутствует быстропеременная основная фаза (активная фаза) всплеска, длительностью всего лишь  $\sim 10$  с. Если включить продленное излучение в фоновый интервал, то после вычитания фона останется только быстропеременная фаза всплеска, с длительностью, близкой к значению  $T_{90}$  из каталога RHESSI.

Во время основной фазы большой поток отсчетов сконцентрирован в короткий (по сравнению с длительностью продленного излучения) промежуток времени. Такое поведение на интегральной кривой представлено практически вертикальным участком. Продленное излучение представлено медленным ростом после основной фазы всплеска

(рис. 1, интегральная кривая, интервал времени от  $\sim 200$  с до  $\sim 4000$  с). Уровни 25 и 75%, необходимые для вычисления  $T_{50}$ , пересекают только вертикальный участок кривой, поэтому  $T_{50}$  характеризует длительность только активной фазы. Уровень 95% потока пересекает пологую часть кривой, значит, длительность  $T_{90}$  действительно включает в себя часть интервала продленного излучения. Влияние продленного излучения на параметры длительности гамма-всплесков также исследовались в Буренин (2000) и Буренин и др. (2000).

#### Поиск продленного излучения

В исходном временном разрешении (50 мс) продленное излучение имеет низкую значимость над фоном  $\lesssim 1\sigma$ . С целью увеличения статистической значимости полезного сигнала используется следующий алгоритм обработки кривой блеска.

Первым шагом является определение момента времени начала гамма-всплеска. Схема вычисления представлена на рис. 2. В качестве нулевого приближения используется первый по времени

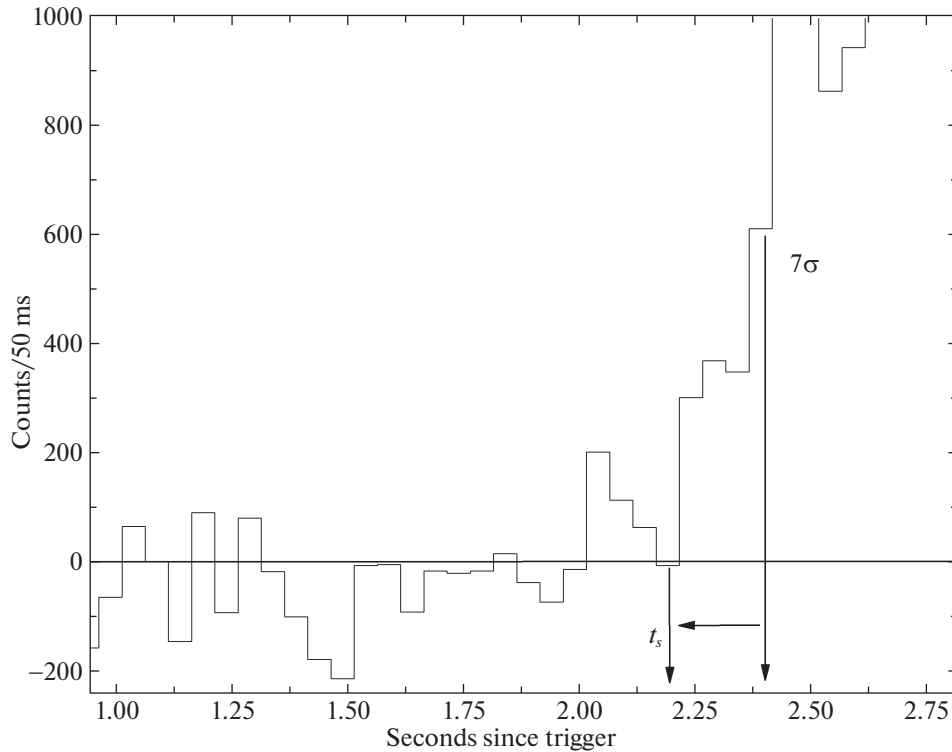


Рис. 2. Кривая блеска GRB 021206 после вычитания фона на интервале [1.00; 2.75] с.

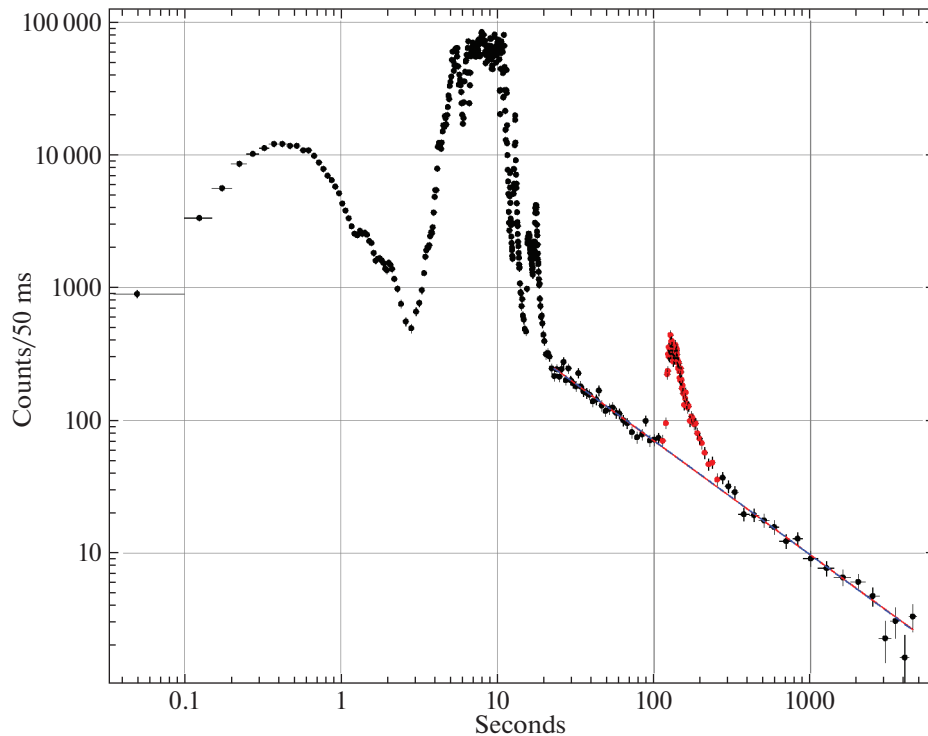
бин в исходном временном разрешении, в котором значимость сигнала от гамма-всплеска над фоном достигает 7 стандартных отклонений. Затем определяется наиболее близкий, предшествующий данному бину, момент времени, в котором поток от гамма-всплеска обращается в нуль — это и есть искомое время начала всплеска  $t_s$ .

Следующий шаг — логарифмическое бинирование. Объединяются бины в исходном временном разрешении, начиная от  $t_s$ , до достижения определенного уровня статистической значимости  $\sigma_T$ . Значение  $\sigma_T$  зависит от накопленной длительности по закону  $\sigma_T = A - B \lg T$ , где  $T$  — суммарная длительность накопленных бинов, а  $A$  и  $B$  — параметры модели, подбираемые индивидуально для каждого всплеска. Характерными их значениями являются  $A \sim 8$ ,  $B \sim 1.4$ . В предположении степенного характера поведения кривой блеска продленного излучения, логарифмические бины позволяют использовать статистику  $\chi^2$  при аппроксимации, поскольку формируются бины с большим количеством отсчетов, необходимым для использования критерия. Пример кривой блеска с логарифмическим бинированием представлен на рис. 3.

После логарифмического бинирования выполняется аппроксимация продленного излучения. Для этого используется степенная функция (PL)  $C = A \cdot t^{-\alpha}$ . Однако в некоторых случаях форма кривой блеска не описывается функцией PL. Для

этих случаев анализируется также вторая модель с дополнительной степенью свободы — моментом начала продленного излучения  $t_{EE}$ :  $C = A \cdot (t - t_{EE})^{-\alpha}$  (biased PL). Для определения наилучшей модели применяется информационный критерий  $BIC = \chi^2 + k \ln(N)$  (Лиддл, 2007), где  $k$  — число параметров,  $N$  — количество точек использованных для аппроксимации,  $\chi^2$  — значение функционала. Если значение критерия для сложной модели меньше, чем соответствующее значение для простой, то сложная модель является предпочтительной. У некоторых всплесков в модели biased PL  $t_{EE}$  принимает отрицательное значение, а значит, продленное излучение начинается раньше  $t_s$ . Момент начала продленного излучения не известен. В данной работе мы считаем, что оно не может начинаться раньше момента начала всплеска  $t_s$ , поэтому  $t_{EE}$  не может принимать отрицательные значения и модель biased PL в таких случаях не может считаться предпочтительной.

В качестве правой границы интервала аппроксимации выбираем последний значимый бин. Для начала процедуры аппроксимации берем 3 последовательных бина, предыдущие последнему; используя эти 4 бина, включая последний (минимальное число точек для аппроксимации функцией с тремя параметрами), проводим аппроксимацию функциями PL и biased PL. После этого левая граница интервала аппроксимации смещается на



**Рис. 3.** Кривая блеска GRB 130427. По горизонтальной оси — время относительно начала всплеска  $t_s$ . По вертикальной — количество отсчетов за 50 мс. Бины в интервале [100; 250] с не участвуют в аппроксимации. Красной и синей кривой обозначены аппроксимации PL и biased PL соответственно.

1 бин к началу всплеска и аппроксимация повторяется. Процесс продолжается до тех пор, пока отклонение значения отсчетов в последнем добавленном бине от полученной после аппроксимации модели не начнет превышать  $3\sigma$ . Это предполагает, что наблюдаемое значение отсчетов в последнем добавленном бине уже не описывается моделью с единым степенным законом.

В процессе выбора интервала аппроксимации возможны варианты. Первый вариант: невозможно определить момент конца доминирования активной фазы. В таких случаях степенная модель описывает всплеск от максимума потока до последнего значимого бина (рис. 4). Значит кривая блеска активной фазы описывается степенным законом; такие всплески относятся ко II типу продленного излучения. Второй вариант: продленное излучение не аппроксимируется единой степенной моделью. В таких случаях при перемещении левого края интервала аппроксимации от правого последние бины перестают описываться моделью. Это означает, что модель уже начинает описывать часть активной фазы, а продленное излучение является дополнительной компонентой (тип I продленного излучения). Если количество бинов продленного излучения (менее четырех) недостаточно для проведения аппроксимации степенной функцией,

то вычисляем только статистическую значимость продленного излучения.

Рассмотрим кривую блеска GRB 130427 на рис. 3. Последний значимый бин находится на  $\sim 5000$  с, он же является концом интервала аппроксимации. Левый край интервала находится на  $\sim 20$  с, в этот момент начинает доминировать вторая компонента сигнала — продленное излучение, и на кривой блеска присутствует излом. Всплески с такой особенностью кривой блеска относятся к I типу продленного излучения. Также на интервале времени 100–250 с наблюдается рост потока, отклоняющийся от степенной зависимости. Данный рост, возможно, не относится к продленному излучению и поэтому не участвует в аппроксимации. Всплески с данными особенностями на кривой блеска дополнительно помечены индексом “b”, и в ином случае индексом “a”.

Результаты поиска продленного излучения приведены в табл. 2. В ней содержится 151 гамма-всплеск со значимым ( $>3\sigma$ ) продленным излучением, а также приведена наилучшая модель для его описания и ее параметры  $A$ ,  $\alpha$  и, в случае biased PL, параметр  $t_{EE}$ . Для 40 всплесков представлена только значимость продленного излучения.

**Таблица 2.** Гамма-всплески со значимым продленным излучением

GRB	Best Model <sup>a</sup>	A <sup>b</sup>	$\alpha^b$	$t_{EE}^r$	$\sigma^d$	$\frac{T_{90}}{T_{50}}$	Type
021116	PL	4559 ± 2445	1.53 ± 0.17	—	8.8	3.6	IIa
021206	biased PL	1280 ± 104	0.76 ± 0.01	8.15 ± 0.3	27.3	692.0	Ia
021228	PL	1001 ± 211	1.38 ± 0.11	—	6.5	5.3	IIa
030105	—	—	—	—	6.4	28.8	Ia
030218	PL	776 ± 228	1.03 ± 0.09	—	4.1	8.9	Ib
030225	PL	7947 ± 2045	1.46 ± 0.08	—	16.3	3.1	IIa
030326	PL	3108 ± 403	1.92 ± 0.10	—	4.2	3.8	IIa
030331	—	—	—	—	3.4	24.8	Ia
030413	PL	73 ± 88	0.49 ± 0.30	—	6.1	7.6	Ia
030414	PL	19296 ± 2522	1.90 ± 0.06	—	38.4	4.9	IIa
030506	—	—	—	—	6.3	4.4	Ia
030717	PL	49 ± 9	0.76 ± 0.16	—	4.0	5.7	Ia
030726	PL	16337 ± 20641	1.47 ± 0.28	—	11.6	4.4	Ia
030801	PL	23080 ± 8173	1.86 ± 0.11	—	6.8	10.1	IIa
030814	PL	1105 ± 476	1.08 ± 0.13	—	11.1	9.8	Ia
030827	—	—	—	—	4.1	39.7	Ia
031107	biased PL	1077 ± 816	1.10 ± 0.20	10.18 ± 2.19	11.8	7.9	IIa
031111	PL	74460 ± 87521	2.80 ± 0.50	—	6.7	5.5	IIa
031127	PL	39901 ± 14440	1.67 ± 0.09	—	14.3	5.3	IIa
031202	PL	102 ± 54	0.50 ± 0.13	—	9.0	17.6	IIa
031214	PL	258 ± 124	0.95 ± 0.17	—	3.1	127.3	Ia
031219	biased PL	2464 ± 936	1.79 ± 0.18	1.63 ± 0.28	21.7	4.1	IIa
040324	PL	120 ± 12	0.96 ± 0.10	—	5.2	15.0	Ia
040421	—	—	—	—	5.3	1.7	Ia
040425	PL	8983 ± 259	1.80 ± 0.02	—	39.7	3.3	IIa
040612	—	—	—	—	5.3	6.0	Ia
040615	PL	74032 ± 16556	1.75 ± 0.06	—	31.0	5.7	IIa
040921	PL	1982 ± 1019	1.23 ± 0.17	—	13.4	6.8	Ia
040922	PL	317731 ± 70155	1.81 ± 0.05	—	39.3	4.8	IIa

**Примечание.** <sup>a</sup> Наилучшая модель для аппроксимации продленного излучения.

<sup>b</sup> Параметр нормировки (амплитуда) в модели продленного излучения.

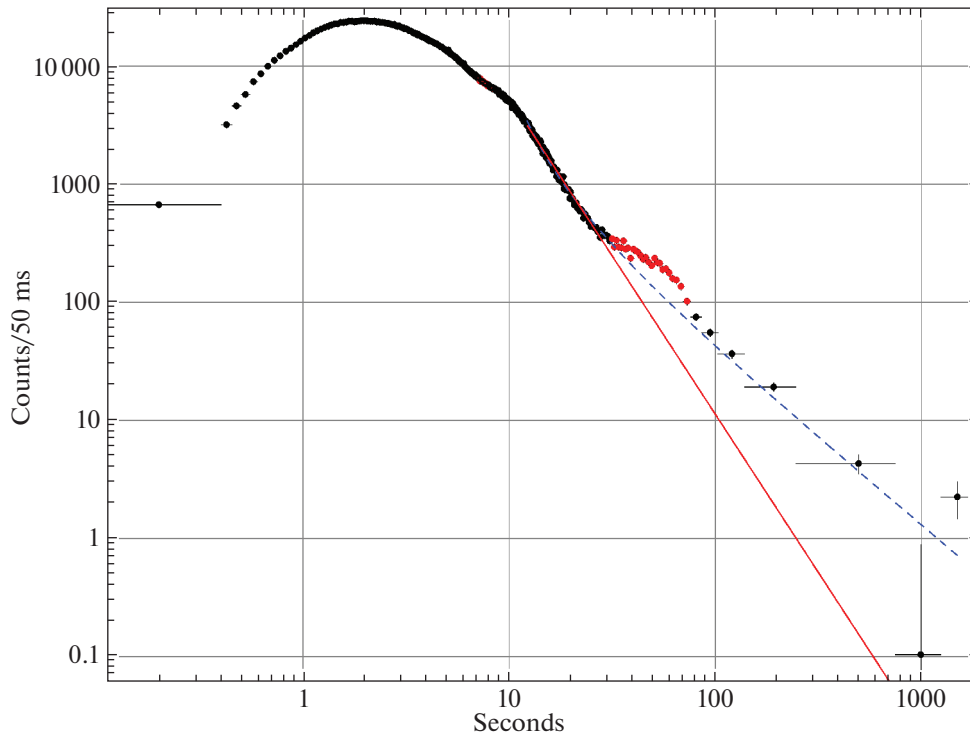
<sup>b</sup> Показатель степени в модели продленного излучения.

<sup>r</sup> Параметр  $t_{EE}$  в biased PL модели продленного излучения. Если наилучшей моделью является PL или аппроксимация моделями PL и biased PL является неудовлетворительной, указан прочерк.

<sup>d</sup> Статистическая значимость продленного излучения.

Полная версия таблицы доступна в электронном виде <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>





**Рис. 4.** Кривая блеска GRB 041212. По горизонтальной оси — время относительно начала всплеска  $t_s$ . По вертикальной — количество отсчетов за 50 мс. Красные бины не участвуют в аппроксимации. Красной и синей кривой обозначены аппроксимации PL и biased PL соответственно.

### Суммирование кривых блеска

Здесь мы хотим проверить гипотезу о том, что продленное излучение является общим свойством всех всплесков, но в некоторых событиях оно не детектируется из-за его низкой значимости. Если предположить, что продленное излучение действительно присутствует во всех гамма-всплесках, то увеличить его статистическую значимость можно с помощью суммирования кривых блеска. Действительно, если просуммировать одинаковые кривые блеска с одинаковым уровнем фона, то статистическая значимость полезного сигнала увеличится в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  — количество всплесков в сумме. Для построения суммарной кривой используются гамма-всплески без продленного излучения в индивидуальных кривых блеска.

Как уже обсуждалось во Введении, короткие и длинные всплески имеют различную природу, и механизмы продленного излучения могут быть различны. Поэтому суммирование двух классов всплесков нужно проводить отдельно. Распределение по параметру длительности  $T_{90}$ , построенное по данным этой работы, очевидно, является искаженным. Методика отбора на временной шкале 1 с отбрасывает очень короткие всплески. В работе Минаева и др. (2010б) был использован другой критерий отбора. Граничное значение параметра  $T_{90}$ , полученное в работе Минаева и др. (2010б),

составляет 0.7 с и именно его мы будем использовать для разделения двух классов событий. Разделение классов коротких и длинных всплесков с использованием границы 0.7 с более оправдано для SPI-ACS, т.е. для энергетического диапазона более  $\sim 80$  кэВ.

Суммарная кривая блеска коротких всплесков построена на интервале  $[-500; 500]$  с. На рис. 5 представлена суммарная кривая блеска 40 коротких всплесков в логарифмическом масштабе. Примерно на 1 с заканчивается активная фаза, после нее значимого излучения не обнаружено. Это позволяет определить верхний предел на интегральный (по времени) поток продленного излучения в интервале 125 с после окончания основной фазы. Для этого используется калибровка SPI-ACS (Вигано, Мерегетти, 2009) для пересчета отсчетов детектора в энергетические единицы. Для нормального угла между источником и осью  $X$  обсерватории INTEGRAL 1 отсчет SPI-ACS соответствует  $10^{-10}$  эрг  $\text{см}^{-2}$ . Учитывая среднее значение фона и коэффициента  $k = 1.26$ , получим, что интегральный поток энергии в продленном излучении составляет  $\sim 2 \times 10^{-6}$  эрг  $\text{см}^{-2}$ .

Суммарная кривая блеска длинных всплесков построена на интервале  $[-2000; 2000]$  с. Из 543 длинных ( $T_{90} > 0.7$  с) всплесков, без продленного излучения в индивидуальных кривых блеска, было

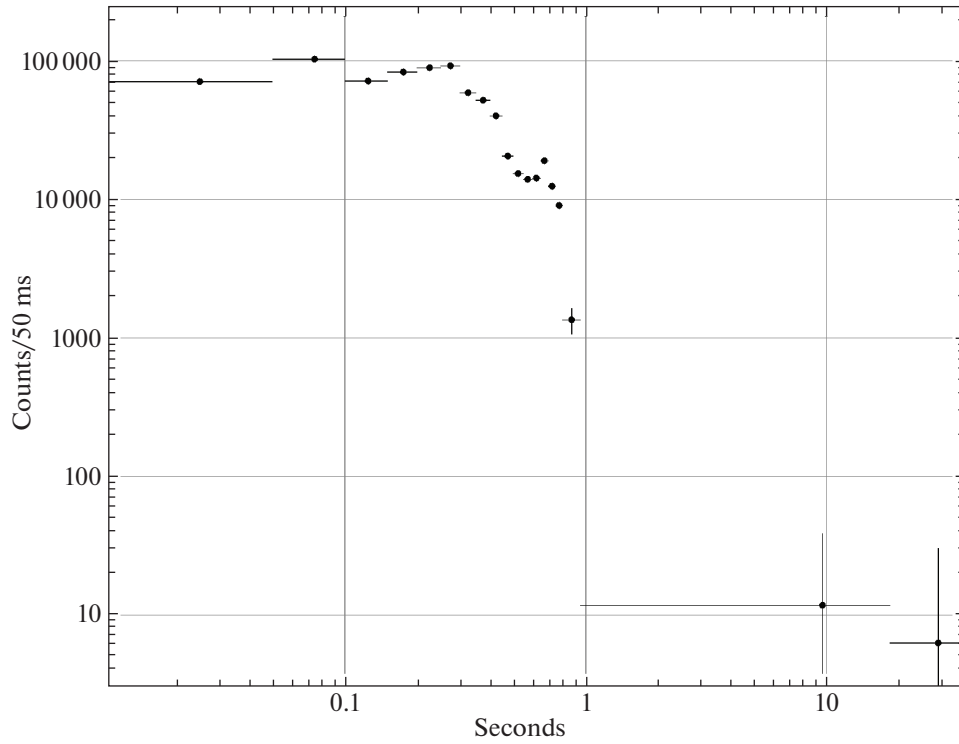


Рис. 5. Суммарная кривая блеска 40 коротких гамма-всплесков без продленного излучения в кривых блеска.

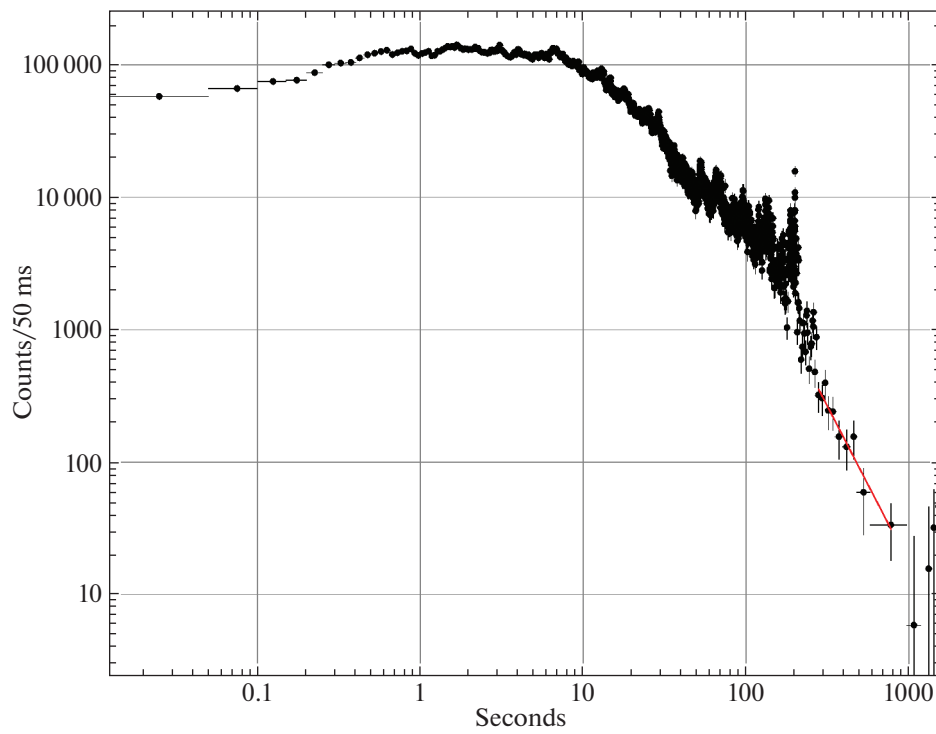


Рис. 6. Суммарная кривая блеска 308 длинных гамма-всплесков без продленного излучения в индивидуальных кривых блеска. Красной линией показана аппроксимация продленного излучения степенной моделью (PL).

отобрано 308 событий, у которых  $L, R \geq 2000$  с. На рис. 6 представлена суммарная кривая блеска. На ней присутствует значимый сигнал вплоть до  $\sim 800$  с, при медианном значении  $T_{90}$  выборки  $\sim 25$  с. Эти значения подтверждают наличие продленного излучения и в суммарной кривой блеска. Кривую блеска можно аппроксимировать степенной функцией (рис. 6, красная прямая), показатель степени  $\alpha = 2.4 \pm 0.3$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметр длительности  $T_{90}$ , вычисленный здесь, именно для тех всплесков с обнаруженным продленным излучением, может значительно превышать значения длительности  $T_{90}$  из других каталогов. Это связано с тем, что уровень 95% отсчетов на интегральной кривой блеска действительно включает часть интервала, в котором найдено продленное излучение. В то же время в интервал  $T_{50}$ , даже в событиях с наиболее ярким и длительным продленным излучением (например, GRB 021206, GRB 130427), попадает только активная фаза. Это говорит о том, что параметр  $T_{50}$  лучше характеризует длительность активной фазы, в отличие от параметра  $T_{90}$ .

Распределение значений отношения  $T_{90}/T_{50}$  представлено на рис. 7. Как и ожидалось, значение этого отношения систематически больше для всплесков с продленным излучением (соответствующие медианные значения  $T_{90}/T_{50} = 3$  и  $T_{90}/T_{50} = 5.6$ ). Все гамма-всплески без продленного излучения имеют  $T_{90}/T_{50} < 80$ . Если же  $T_{90}/T_{50} > 80$ , то у всплеска присутствует продленное излучение I типа. Однако данный параметр нельзя использовать как критерий наличия продленного излучения. При  $T_{90}/T_{50} < 80$  распределения значительно пересекаются и, основываясь только на этом значении, нельзя однозначно определить наличие продленного излучения. В этом случае необходимо более детальное исследование кривой блеска.

Продленное излучение было найдено в 151 индивидуальной кривой блеска всплесков выборки, что составляет  $\sim 20\%$  от общего числа исследованных событий.

Кривые блеска гамма-всплесков без продленного излучения в индивидуальных кривых блеска были просуммированы относительно времени начала регистрации гамма-излучения. Продленное излучение обнаружено в суммарной кривой блеска длинных всплесков. Значимый сигнал наблюдается вплоть до 800 с, что существенно больше медианного значения длительности выборки тех же всплесков ( $T_{90} \sim 25$  с). Следовательно, обнаруженный сигнал действительно можно считать продленным излучением. Это подтверждает результаты работы Коннатон (2002), где исследовалась

суммарная кривая блеска длинных всплесков по данным эксперимента BATSE (20–100 кэВ), а также результаты Буренина и др. (2000) по данным SIGMA/Гранат (35–300 кэВ). Характер поведения кривой блеска продленного излучения в суммарной кривой блеска (степенное падение с показателем  $\alpha = 2.4 \pm 0.3$ ) указывает на то, что оно, вероятно, связано с суперпозицией кривых блеска активной фазы на стадии затухания, а не с дополнительным компонентом кривой блеска, т.е. представляет собой второй тип продленного излучения. Действительно, несмотря на то, что частота обнаружения второго типа продленного излучения в 105/46  $\sim 2$  раза меньше чем первого типа, средняя интенсивность такого излучения в  $\sim 4$  раза больше. Следовательно, при суммировании большого количества кривых блеска доминирующий вклад на  $\lesssim 800$  с будет давать именно второй тип продленного излучения.

В суммарной кривой блеска коротких гамма-всплесков не обнаружено продленного излучения. Данный результат противоречит результатом работы Минаева и др. (2010а), где длительность продленного излучения составила  $\sim 125$  с. Вероятная причина расхождения — меньший объем выборки в настоящей работе (40 против 105 событий) и различные критерии отбора коротких гамма-всплесков по параметру  $T_{90}$  (0.7 и 2 с).

Проанализировано распределение всплесков по показателю степени  $\alpha$  продленного излучения (рис. 8). Тест Колмогорова—Смирнова для двух выборок продленного излучения показал, что вероятность того, что эти распределения получены из одной генеральной совокупности  $p = 4 \times 10^{-10}$ , что подтверждает существование двух феноменологически разных типов продленного излучения. Медианное значение для I группы (105 событий) составляет  $\alpha = 1.0$ , для группы II состоящей из 46 событий —  $\alpha = 1.8$ . У всплесков I группы на кривой блеска присутствует излом между быстропеременной активной фазой и продленным излучением, т.е. оно является дополнительной компонентой, по-видимому, не связанной с активной фазой. Значения показателя  $\alpha$  близки к показателям степени кривой блеска послесвечения в рентгеновском и оптическом диапазонах. Вероятно, продленное излучение I типа является ранней стадией послесвечения. Всплески из II группы характеризуются большим показателем степени ( $\alpha = 1.8$ ), который, по-видимому, является окончанием основной фазы.

## ВЫВОДЫ

Проведены систематический поиск и исследование продленного излучения в гамма-диапазоне ( $> 80$  кэВ) для наиболее ярких гамма-всплесков,

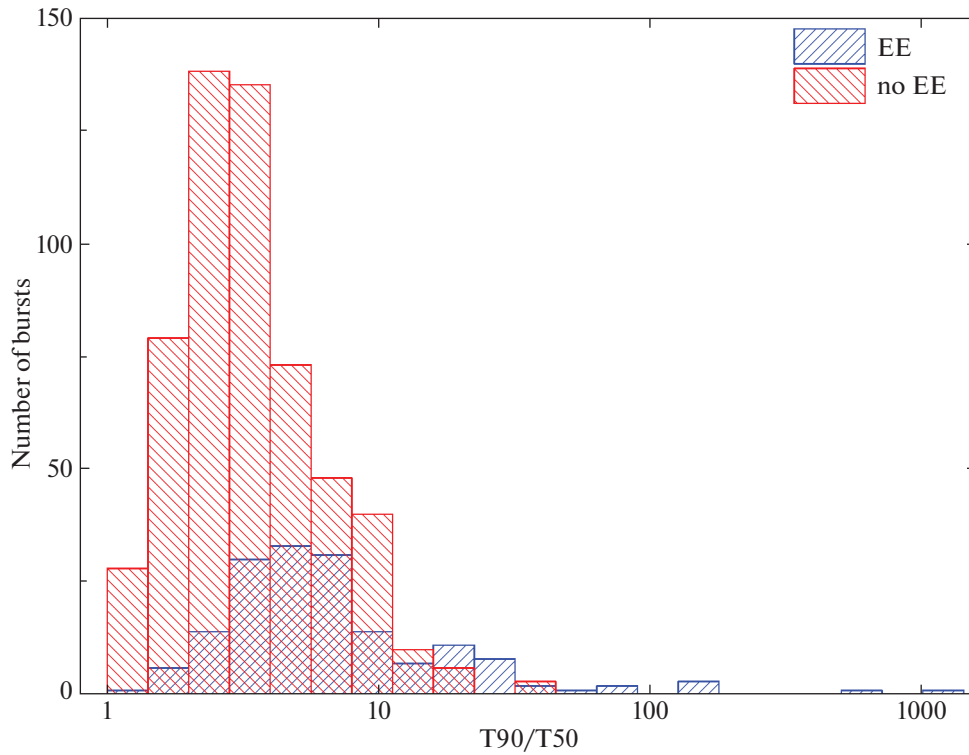


Рис. 7. Распределение всплесков по параметру отношения  $T_{90}/T_{50}$ . Синим обозначены всплески со значимым продленным излучением. Красным — всплески без него.

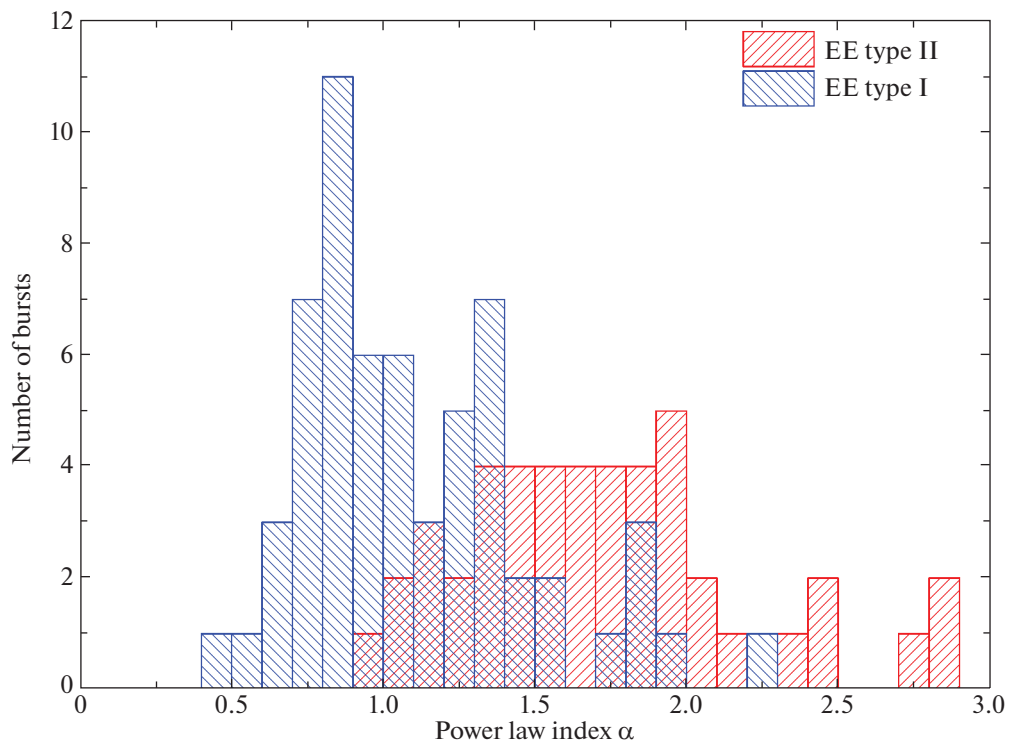


Рис. 8. Распределение всплесков по показателю степени  $\alpha$  в модели продленного излучения. Синим цветом обозначены всплески с продленным излучением первого типа, красным — второго.

зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. Из 739 событий 45 принадлежат к классу коротких гамма-всплесков, остальные 694 — к классу длинных. Доля всплесков с продленным излучением составила  $\sim 20\%$ . Наибольшая длительность продленного излучения составила 10 000 с. Исследование продленного излучения стало возможным благодаря стабильному фону на орбите КО INTEGRAL.

В индивидуальных кривых блеска длинных гамма-всплесков обнаружены два типа продленного излучения, характеризующегося кривой блеска со степенным падением и различными показателями степени, (I)  $\alpha = 1.0$  и (II)  $\alpha = 1.8$ . У всплесков I группы продленное излучение является дополнительной компонентой, не связанной с активной фазой, и, вероятно, является ранней стадией послесвечения. Всплески из II группы характеризуются большим показателем степени ( $\alpha = 1.8$ ), который, по-видимому, связан с продолжением работы центральной машины и является окончанием активной фазы.

В суммарной кривой блеска длинных всплесков, для которых в индивидуальных случаях продленное излучение не было найдено (543 всплеска), также обнаружено статистически значимое продленное излучение, которое наблюдается до 800 с и аппроксимируется степенным законом с показателем  $\alpha = 2.4 \pm 0.3$ . Это является подтверждением того, что продленное излучение является общим свойством всех длинных всплесков и является суммой продленного излучения типов I и II.

Показано, что параметр  $T_{50}$  лучше характеризует длительности активной фазы, в то время как параметр  $T_{90}$  в качестве характеристики длительности активной фазы надо использовать с осторожностью.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 18-12-00378.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барков, Позаненко (M.V. Barkov and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **417**, 2161 (2011).
2. Бильцингер и др. (B. Biltzinger, F. Kunzweiler, J. Greiner, K. Toelge, and J.M. Burgess), *Astron. Astrophys.* **640**, A8 (2020).
3. Бисноватый-Коган, Позаненко (G.S. Bisnovatyi-Kogan and A.S. Pozanenko), *Astrophys. Space Sci.* **332**, 57 (2011).
4. Бостанци и др. (Z.F. Bostanci, Y. Kaneko, and E. Göğüs), *MNRAS* **428**, 1623 (2013).
5. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **26**, 323 (2000) [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **26**, 269 (2000)].
6. Буренин и др. (R.A. Burenin, A.A. Vikhlinin, M.R. Gilfanov, O.V. Terekhov, A.Yu. Tkachenko, S.Yu. Sazonov, E.M. Churazov, R.A. Sunyaev, P. Goldoni, et al.), *Astron. Astrophys.* **344**, L53 (1999).
7. Буренин Р.А., Терехов О.В., Сюняев Р.А. и др., Письма в Астрон. журн. **26**, 483 (2000) [R.A. Burenin, O.V. Terekhov, R.A. Sunyaev, A.V. Dyachkov, G. Khavenson, B.S. Novikov, I.D. Tserein, K.M. Sukhanov, P. Goldoni, et al., *Astron. Lett.* **26**, 413 (2000)].
8. Бхат и др. (P.N. Bhat, C.A. Meegan, A. von Kienlin, W.S. Paciesas, M.S. Briggs, J.M. Burgess, E. Burns, V. Chaplin, W.H. Cleveland, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **223**, 28 (2016).
9. Варрен и др. (D.C. Warren, M.V. Barkov, H. Ito, S. Nagataki, and T. Laskar), *MNRAS* **480**, 4060 (2018).
10. Вигано, Мерегетти (D. Viganò and S. Mereghetti), *astro-ph/0912.5329* (2009).
11. Вузли (S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **405**, 273 (1993).
12. Герельс и др. (N. Gehrels, J.P. Norris, V. Mangano, S.D. Barthelmy, D.N. Burrows, J. Granot, Y. Kaneko, C. Kouveliotou, C.B. Markwardt, et al.), *Nature* **444**, 1044 (2006).
13. Гиблин и др. (T.W. Giblin, J. van Paradijs, C. Kouveliotou, V. Connaughton, R.A.M.J. Wijers, M.S. Briggs, R.D. Preece, and G.J. Fishman), *AIP Conf. Proceed.* **526**, 394 (2000).
14. Гомпертс и др. (B.P. Gompertz, P.T. O'Brien, G.A. Wynn, and A. Rowlinson), *MNRAS* **431**, 1745 (2013).
15. Готлиб и др. (O. Gottlieb, E. Nakar, T. Piran, and K. Hotokezaka), *MNRAS* **479**, 588 (2018).
16. Джендр и др. (B. Gendre, G. Stratta, J.L. Atteia, S. Basa, M. Boër, D.M. Coward, S. Cutini, V. D'Elia, and E.J. Howell), *arXiv:1308.1001* (2013).
17. Канеко и др. (Y. Kaneko, Z.F. Bostanci, E. Göğüs, and L. Lin), *MNRAS* **452**, 824 (2015).
18. фон Кьенлин и др. (A. von Kienlin, V. Beckmann, A. Rau, N. Arend, K. Bennett, B. McBreen, P. Connell, S. Deluit, L. Hanlon, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L299 (2003).
19. Клебесадел и др. (R.W. Klebesadel, I.B. Strong, and R.A. Olson), *Astrophys. J.* **182**, L85 (1973).
20. Коннатон (V. Connaughton), *Astrophys. J.* **567**, 1028 (2002).
21. 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).
22. 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).
23. Лаззати и др. (D. Lazzati, E. Ramirez-Ruiz, and G. Ghisellini), *Astron. Astrophys.* **379**, L39 (2001).
24. Лиддл (A.R. Liddle), *MNRAS* **377**, L74 (2007).

25. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golenetskii, V.N. Il'inskii, V.N. Panov, R.L. Aptekar, Yu.A. Guryan, M.P. Proskura, I.A. Sokolov, Z.Ya. Sokolova, et al.), *Astrophys. Space Sci.* **80**, 119 (1981).
26. Мазец и др. (E.P. Mazets, R.L. Aptekar, D.D. Frederiks, S.V. Golenetskii, V.N. Il'inskii, V.D. Palshin, T.L. Cline, and P.S. Butterworth), *arXiv:astro-ph/0209219* (2002).
27. Межарос, Рис (P. Meszaros and M.J. Rees), *MNRAS* **257**, 29P (1992).
28. Мецгер и др. (B.D. Metzger, E. Quataert, and T.A. Thompson), *MNRAS* **385**, 1455 (2008).
29. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Лозников В., Письма в Астрон. журн. **26**, (2010). [P. Minaev, A. Pozanenko, and V. Loznikov, *Astron. Lett.* **36**, 707 (2010a)].
30. Минаев и др. (P. Minaev, A. Pozanenko, and V. Loznikov), *Astrophys. Bull.* **65**, 343 (2010b).
31. Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Позаненко А.С. и др., Письма в Астрон. журн. **38**, 687 (2012). [P.Yu. Minaev, S.A. Grebenev, A.S. Pozanenko, S.V. Molkov, D.D. Frederiks, and S.V. Golenetskii, *Astron. Lett.* **38**, 613 (2012)].
32. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Мольков С.В., Гребенев С.А., Письма в Астрон. журн. **40**, 271 (2014). [P.Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, S.V. Molkov, S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **40**, 235 (2014)].
33. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Письма в Астрон. журн. **43**, 3 (2017). [P. Minaev and A. Pozanenko, *Astron. Lett.* **43**, 1 (2017)].
34. Минаев, Позаненко (P. Minaev and A. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2020).
35. Норрис и др. (J.P. Norris, N. Gehrels, and J.D. Scargle), *Astrophys. J.* **735**, 23 (2011).
36. Орли (K. Hurley), <http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/masterli.txt> (2008).
37. Пачинский (B. Paczyński), *Astrophys. J.* **308**, L43 (1986).
38. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Y. Minaev, A.A. Volnova, E.D. Mazaeva, A.S. Moskvitin, M.A. Krugov, V.A. Samodurov, V.M. Loznikov, and M. Lyutikov), *Astrophys. J.* **852**, L30 (2018).
39. Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **45**, 768 (2019). [A.S. Pozanenko, P.Yu. Minaev, S.A. Grebenev, and I.V. Chelovekov, *Astron. Lett.* **45**, 710 (2019)].
40. Райд и др. (F. Ryde1, L. Borgonovo, S. Larsson, N. Lund, A. von Kienlin, and G. Licht), *Astron. Astrophys.* **411**, L331 (2003).
41. Рау и др. (A. Rau, A.V. Kienlin, K. Hurley, and G.G. Licht), *Astron. Astrophys.* **438**, 1175 (2005).
42. Рипа и др. (J. Ripa, A. Meszaros, C. Wigger, D. Huja, R. Hudec, and W. Hajdas), *Astron. Astrophys.* **312**, 399 (2009).
43. Рончи и др. (M. Ronchi, F. Fumagalli, M.E. Ravaio, G. Oganessian, M. Toffano, O.S. Salafia, L. Nava, S. Ascenzi, G. Ghirlanda, and G. Ghisellini), *Astron. Astrophys.* **636**, A55 (2019).
44. Свинкин и др. (D.S. Svinkin, D.D. Frederiks, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, V.D. Palshin, Ph.P. Oleynik, A.E. Tsvetkova, M.V. Ulanov, T.L. Cline, and K. Hurley), *Astrophys. Space Sci.* **224**, 10 (2016).
45. Ткаченко и др. (A.Yu. Tkachenko, O.V. Terekhov, R.A. Sunyaev, R.A. Burenin, C. Barat, J.P. Dezalay, and G. Vedrenne), *Astron. Astrophys.* **358**, L41 (2000).
46. Фредерикс и др. (D.D. Frederiks, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, V.N. Il'inskii, E.P. Mazets, V.D. Palshin, and T.L. Cline), Third Rome Workshop on Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, *ASP Conf. Ser.* **312**, 197 (2004).
47. Цветкова и др. (A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii, A. Lysenko, P. Oleynik, V. Palshin, D. Svinkin, M. Ulanov, T. Cline, et al.), *Astrophys. J.* **850**, 161 (2017).
48. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R. X. Adhikari, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L12 (2017).
49. Swift GRB table [https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb\\_table](https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table) (2008).
50. HETE table <https://space.mit.edu/HETE/Bursts/Data/> (2006).