

НОВЫЕ ГАММА-ВСПЛЕСКИ, НАЙДЕННЫЕ В АРХИВНЫХ ДАННЫХ ТЕЛЕСКОПА IBIS/ISGRI ОБСЕРВАТОРИИ INTEGRAL

© 2019 г. И. В. Человеков^{1*}, С. А. Гребенев¹, А. С. Позаненко¹, П. Ю. Минаев¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 16.11.2018 г.; после доработки 24.11.2018 г.; принята к публикации 28.11.2018 г.

Выполнен систематический поиск космических гамма-всплесков и других коротких жестких рентгеновских событий в архивных данных телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL за 2003–2018 гг. В поле зрения телескопа зарегистрированы 7 ранее неизвестных гамма-всплесков, все они локализованы с точностью ≤ 2 мин. дуги. Эти события не были выявлены системой IBAS автоматического поиска гамма-всплесков и оповещения о них. Найденны еще 4 подобных локализованных события, пропущенных системой IBAS, но ранее известных — наблюдавшихся в других экспериментах. Также зарегистрированы 886 гамма-всплесков вне поля зрения, пришедших под большими углами к оси телескопа IBIS/ISGRI. Все они ранее были зарегистрированы в других экспериментах, прежде всего защитой ACS гамма-спектрометра SPI обсерватории INTEGRAL, детектором PICsIT гамма-телескопа IBIS, монитором KONUS/WIND. На порядок больше зарегистрировано событий, не имеющих подтверждений в других экспериментах. Среди них могут быть как гамма-всплески, так и солнечные вспышки или магнитосферные транзиентные явления. Составлены каталоги с основными параметрами подтвержденных и ранее неизвестных космических гамма-всплесков, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI. Построены и исследованы статистические распределения всплесков по различным параметрам.

Ключевые слова: гамма-всплески, транзиентные события.

DOI: 10.1134/S0320010819100024

ВВЕДЕНИЕ

Космические гамма-всплески десятилетиями возглавляли список наиболее загадочных, необычных астрономических явлений. И хотя сейчас можно считать доказанным, что такие всплески — одно из проявлений вспышек сверхновых, многие их свойства все еще не имеют удовлетворительного объяснения. Стало очевидным, что гамма-всплески нельзя считать событиями однородной выборки: короткие (с длительностью $T_{90} \lesssim 2$ с, см. Кошут и др., 1996) всплески оказались связанными с килоновыми, вспыхивающими из-за слияния двух нейтронных звезд (или нейтронной звезды и черной дыры), длинные (с $T_{90} \gtrsim 2$ с) — с гиперновыми, вспыхивающими из-за коллапса почти голого ядра массивной звезды (например, звезды Вольфа-Райе) на поздней стадии ее эволюции.

Для правильного, объективного представления о происхождении всплесков, составе их популяции необходимо иметь максимально полную выборку событий для статистического исследования, включающую как слабые, так и сильные всплески, как

жесткие, так и мягкие, но главное — все, которые допускаются чувствительностью инструмента, используемого для их наблюдения. Большой интерес представляет выборка всплесков, зарегистрированных гамма-телескопом IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL, имеющим низкий порог регистрации по потоку, широкий, но достаточно мягкий для гамма-всплесковых приборов диапазон энергий (максимум чувствительности приходится на полосу 20–200 кэВ), способность определять положение обнаруженных в поле зрения всплесков с точностью 1–2 мин. дуги, а также огромную экспозицию (почти непрерывные наблюдения продолжаются уже более 16 лет).

Хорошая локализация событий позволяет организовать оперативный поиск оптических компонентов гамма-всплесков для изучения оптических и рентгеновских послесвечений всплесков и исследования вспышек сверхновых, с ними связанных. Понимая важность быстрого отождествления всплесков, еще до запуска спутника INTEGRAL на орбиту, его создатели разработали систему IBAS (Мерегети и др., 2003) автоматического поис-

* Электронный адрес: chelovekov@iki.rssi.ru

ка и регистрации всплесков в данных телескопа IBIS/ISGRI, а также оповещения о них через электронные письма GCN (Gamma-ray Coordinates Network). На данный момент системой зарегистрировано уже более 130 гамма-всплесков (Готс и др., 2006; Вианелло и др., 2009; Фоли и др., 2008, 2009).

Ранее в архивных данных телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL были обнаружены два гамма-всплеска GRB 060428C (Гребенев, Человеков, 2007) и GRB 070912 (Минаев и др., 2012), попавшие в поле зрения телескопа, но по разным причинам пропущенные системой IBAS. Всплески были обнаружены случайно, один — при поиске рентгеновских всплесков термоядерного происхождения, второй — сначала в данных гамма-спектрометра SPI той же обсерватории и лишь затем в данных IBIS/ISGRI. Он был также зарегистрирован в эксперименте KONUS/WIND (Минаев и др., 2012). В данных спектрометра SPI нами был обнаружен еще один, ранее никем не наблюдавшийся всплеск GRB 060221C (Минаев и др., 2014), но этот всплеск был коротким ($T_{90} \lesssim 2$ с) и жестким, телескоп IBIS/ISGRI зарегистрировал его с низкой значимостью, поэтому отсутствие регистрации системой IBAS не вызывало удивления.

После этих открытий возникла идея выполнить систематический поиск пропущенных гамма-всплесков в данных многолетних наблюдений неба телескопом IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. Результаты подобного анализа (поиска всплесков и их исследования) и представлены в данной работе.

ПРИБОРЫ И НАБЛЮДЕНИЯ

Гамма-телескоп IBIS (Убертини и др., 2003) — один из двух основных приборов на борту международной астрофизической обсерватории гамма-лучей INTEGRAL (Винклер и др., 2003). Он предназначен для картографирования неба и исследования обнаруженных источников в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах. В настоящей работе использовались данные детектора ISGRI (Лебран и др., 2003) телескопа, чувствительного в диапазоне $h\nu \lesssim 400$ кэВ.

Другой детектор телескопа — PICsIT (Лабанти и др., 2003), чувствительный в диапазоне 0.2–10 МэВ, к сожалению, мог использоваться для регистрации гамма-всплесков очень редко — лишь когда он работал в “спектрально-тайминговой” (ST) моде. Возможность локализации событий при этом отсутствовала. Бьянчин и др. (2011) провели анализ доступных данных этого детектора, полученных в период с мая 2006 г. по август 2009 г., и

выявили 39 событий, 23 из которых ранее наблюдались в других экспериментах.

Выше упоминалось, что отдельные гамма-всплески на борту обсерватории INTEGRAL регистрировались гамма-спектрометром SPI внутри его поля зрения (например, Минаев и др., 2012, 2014). Значительно большее их число регистрировалось вне поля зрения прибора — его антисовпадательной защитой ACS, имевшей большую эффективную площадь (средний темп регистрации доходил до ~ 15 всплесков в месяц, Рау и др., 2005; Минаев и др., 2010а; Минаев, Позаненко, 2017). При этом, в силу особенностей геометрии спектрометра SPI, его защита практически не регистрировала всплески, приходящие под малыми углами к оси телескопа. Детектор PICsIT, наоборот, имел наибольшую чувствительность при регистрации всплесков, приходящих под малыми углами к оси — внутри поля зрения телескопа IBIS. В полной мере это утверждение относится и к детектору ISGRI этого телескопа. Однако, как мы увидим ниже, телескоп регистрирует большое число гамма-всплесков и вне поля зрения.

Для получения изображений неба и исследования свойств разнообразных космических источников в телескопе IBIS используется принцип кодированной апертуры. Телескоп имеет поле зрения размером $30^\circ \times 30^\circ$ (область полного кодирования $9^\circ \times 9^\circ$) при угловом разрешении $12'$ (FWHM). Такое разрешение позволяет определять положение ярких всплесков с точностью $\lesssim 2'$. Максимум чувствительности детектора ISGRI телескопа приходится на диапазон 18–200 кэВ. Его полная площадь равна 2620 см², эффективная площадь для событий в центре поля зрения ~ 1100 см² (половина детектора затеняется непрозрачными элементами маски).

Анализ данных наблюдений в работе проводился с помощью стандартного пакета программ обработки данных обсерватории INTEGRAL — OSA. Для поиска всплесков изучались кривые скорости счета детектора ISGRI в диапазоне выше 30 кэВ, полученные в период с февраля 2003 г. по январь 2018 г. Всего было проанализировано более 143 тысяч наведений телескопа (отдельных сеансов его работы длительностью от получаса до часа), что соответствует более чем 405 Мс наблюдений. Для найденных кандидатов во всплески была предпринята попытка их локализации и отождествления, затем — проведено их всестороннее исследование.

Отметим, что по подходу и методам выполненное исследование в какой-то степени продолжает цикл наших работ (Человеков и др., 2006; Человеков, Гребенев, 2011; Человеков и др., 2017), посвященный поиску рентгеновских всплесков термоядерного происхождения от галактических барстеров по данным многолетних наблюдений неба

телескопами JEM-X и IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. В работах цикла анализировались детекторные кривые блеска в диапазоне $\lesssim 30$ кэВ. Всего был выявлен 2201 всплеск от известных и вновь обнаруженных (Человеков и др., 2007; Человеков, Гребенев, 2007, 2010; Мереминский и др., 2017) барстеров, исследованы и объяснены некоторые из их необычных свойств (например, Гребенев, Человеков, 2017, 2018). Полный каталог зарегистрированных рентгеновских всплесков и их параметров можно найти на сайте dlc.rsdcrssi.ru. Попутно при проведении этих работ были зарегистрированы сотни всплесков от мягких гамма-репитеров и вспыхивающих рентгеновских двойных источников, характеризующихся сильной нерегулярностью процесса аккреции.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе работы исследовались записи скорости счета всего детектора IBIS/ISGRI (детекторная кривая блеска) с временным шагом 5 с в двух энергетических диапазонах: 30–100 и 100–500 кэВ. Для выявления кандидатов в гамма-всплески сначала находилось среднее значение скорости счета за данное наблюдение (соответствующее отдельному наведению обсерватории на определенный участок неба), эмпирически определялась величина стандартного отклонения скорости счета от среднего значения. Отбирались события, отношение сигнала к шуму S/N для которых во временном бине превышало 3, — потенциальные кандидаты в гамма-всплески.

Для каждого такого события накапливалось (на временном интервале, соответствующем его длительности) и восстанавливалось изображение неба в поле зрения телескопа. В случае, если на полученном изображении удавалось обнаружить источник, значимость регистрации которого была не меньше значимости регистрации события на детекторной кривой блеска ($\gtrsim 3$ стандартных отклонения), для него вновь строилась кривая блеска, на этот раз при помощи программы, учитывающей пропускание теневой маски (апертуры) телескопа для данного источника. Если на кривой блеска присутствовало значимое отклонение темпа счета фотонов, зарегистрированных телескопом от источника, совпадающее по времени с отклонением на детекторной кривой блеска, исследуемое событие вносилось в каталог локализованных кандидатов в гамма-всплески (далее каталог 1). События, зарегистрированные на детекторной кривой скорости счета с большим (значимым) отношением S/N , но не обнаруженные на соответствующем изображении участка неба в поле зрения телескопа, не выбрасывались, а заносились в отдельный каталог (каталог 2) кандидатов в гамма-всплески. Среди

них могли быть как реальные гамма-всплески, пришедшие сбоку, — из направления, не попадающего в поле зрения телескопа, так и события, связанные с солнечными вспышками, заряженными частицами, тяжелыми ионами космического происхождения и др.

Полученные таким образом кандидаты в гамма-всплески из каталога 1 были проверены на совпадение по времени прихода и положению на небе со всплесками, зарегистрированными системой IBAS. Совпадающие гамма-всплески (113) были исключены из этого каталога. Отметим, что в текущем каталоге всплесков IBAS¹ содержится 131 всплеск, но из них 13 зарегистрированы вне временного интервала, используемого в данной работе для поиска всплесков (февраль 2003 — январь 2018 г., что соответствует 40–1910 орбитам спутника INTEGRAL), 3 всплеска (GRB 050922A, GRB 091015 и GRB 091111) оказались слишком слабы для автоматической регистрации нашим методом и еще 2 (GRB 050522 и GRB 120118A) были исключены, как не являющиеся гамма-всплесками. Отметим также, что всплеск GRB 070912 (Минаев и др., 2012), попавший в поле зрения телескопа, но по неясной причине пропущенный системой IBAS, так и не был включен в каталог IBAS.

Отобранные, не совпадающие со всплесками системы IBAS события из каталога 1 были затем сверены (в пределах ± 50 с) с каталогами всплесков, зарегистрированных гамма-спектрометром SPI (Минаев и др., 2012, 2014), защитой SPI/ACS², гамма-детектором IBIS/PICsIT (Бьянчин и др., 2011) обсерватории INTEGRAL, а также сводным по всем миссиям каталогом космических гамма-всплесков (Орли, 2010)³ и каталогом событий, зарегистрированных от мягких гамма-репитеров⁴. Оказалось, что 4 всплеска из каталога 1 ранее были известны — это уже упоминавшийся GRB 070912 (Минаев и др., 2012) и 3 всплеска, зарегистрированных в эксперименте KONUS/WIND⁵: GRB 130109, GRB 150704 и GRB 180118 (Цветкова и др., 2017; Фредерикс и др., 2019).

Параметры оставшихся 7 ранее неизвестных локализованных гамма-всплесков из каталога 1 (GRB 041106, GRB 080408C, GRB 111130,

¹ На сайте www.isdc.unige.ch/integral/science/grb#ISGRI

² На сайте www.isdc.unige.ch/integral/science/grb#ACS, в действительности защита SPI/ACS имеет низкую чувствительность для регистрации событий вблизи оси наведения телескопа IBIS

³ Файлы *masterli.txt* и *cosmic1.txt*, расположенные на сайте www.ssl.berkeley.edu/ipn3

⁴ Файлы *sgrlist.txt* и *sgrlist1.txt*, расположенные на сайте www.ssl.berkeley.edu/ipn3

⁵ Сайт www.ioffe.ru/LEA/kw/triggers

Таблица 1. Новые кандидаты в гамма-всплески, зарегистрированные в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI, но пропущенные системой их автоматической регистрации IBAS

Всплеск (дата)	ΔE^a	T_0^b (UTC)	δT^b	T_c^r	T_{90}^d	C_p^e	$S/N^{\text{ж}}$		F^z	Координаты ^и	
							LC	IM		R.A.	Decl.
							hh:mm:ss	с	с	с	отсч/с
GRB 041106	X	01:06:08	1	23	39	212	5.3	8.7	2496	304.749	37.295
GRB 080408C	X	18:33:54	1	21	19	669	10.4	11.5	5331	253.382	-6.694
GRB 111130	X	18:42:15	1	21	44	465	9.9	11.5	3721	345.757	48.929
	G	18:42:20	1	19	40	259	6.3	—	1604		
GRB 131107B	X	07:53:57	1	14	42	248	7.2	11.3	1794	123.378	-16.632
GRB 150803B	X	08:32:28	1	12	19	344	9.3	7.6	1776	254.055	27.121
	G	08:32:28	1	6	9	158	4.5	—	502		
GRB 160418B	X	04:20:43	5	214	179	75	3.8	7.8	1204	291.830	-44.660
GRB 161209	X	02:07:42	1	17	15	1193	17.3	26.6	9474	193.437	3.072
	G	02:07:48	1	15	25	289	4.1	—	1878		

^a Диапазон энергий: рентгеновский $X = 30\text{--}100$ кэВ и гамма $G = 100\text{--}500$ кэВ.

^b Середина первого бина с $S/N > 3$ в профиле события на детекторной кривой блеска с шагом 5 с.

^c Длина временного бина кривой блеска всплеска, используемой для определения его параметров.

^r Длительность события на кривой блеска всплеска на уровне 10% от пиковой скорости счета.

^d Длительность события на кривой блеска всплеска по методу Кошута и др. (1996).

^e Пиковая скорость счета на демаскированной кривой блеска всплеска после удаления фона.

^ж Значимость регистрации всплеска по пиковой скорости счета (LC) и на изображении (IM).

^z Интегральная по профилю всплеска (в интервале времени T_{90}) скорость счета после удаления фона.

^и Координаты всплеска по данным IBIS/ISGRI (эпоха 2000.0, радиус круга 1σ -ошибки $\sim 1'.5$).

GRB 131107B, GRB 150803B, GRB 160418B, GRB 161209) приведены в табл. 1. Для каждого всплеска указаны следующие величины: момент регистрации T_0 , длительность T_{90} и длительность на уровне 10% от пиковой скорости счета T_c , пиковая скорость счета C_p (после удаления фона), значимость регистрации S/N по скорости счета (LC) и на изображении (IM), интегральная по профилю всплеска в интервале времени T_{90} скорость счета F (после удаления фона), координаты всплеска на небе, измеренные телескопом IBIS/ISGRI. Отметим, что значения величин T_c , T_{90} , C_p , $S/N(LC)$ и F определены не по

детекторной кривой блеска, а по демаскированной кривой, полученной для найденного положения источника всплеска на небе с учетом пропуска апертюры.

На рис. 1 и 2 приведены рентгеновские изображения (карты отношения сигнала к шуму) участков неба внутри поля зрения телескопа, по которым выполнена локализация всплесков, а также временные профили всплесков в диапазоне 30–100 кэВ. Контурными на изображениях показаны уровни $S/N = 3, 4, 5$ и т.д. Отмечены известные источники рентгеновского излучения. Видно, что все всплески яркие, их локализация, отождествление и в целом — реальность не вызывают сомнений.

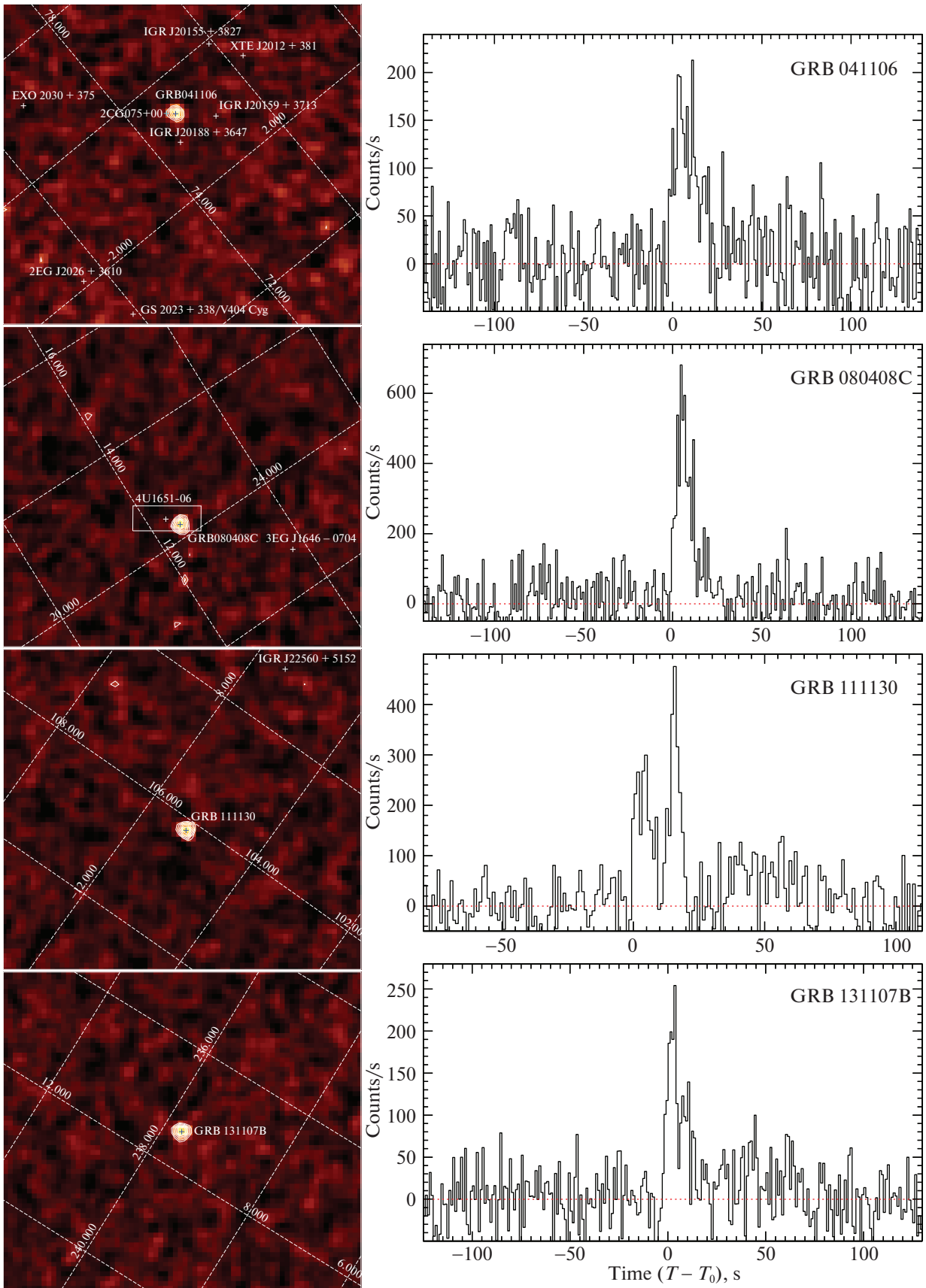


Рис. 1. Карты локализации гамма-всплесков GRB 041106, GRB 080408C, GRB 111130 и GRB 131107B, впервые зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI (слева) и их временной профиль в диапазоне энергий 30–100 кэВ (справа).

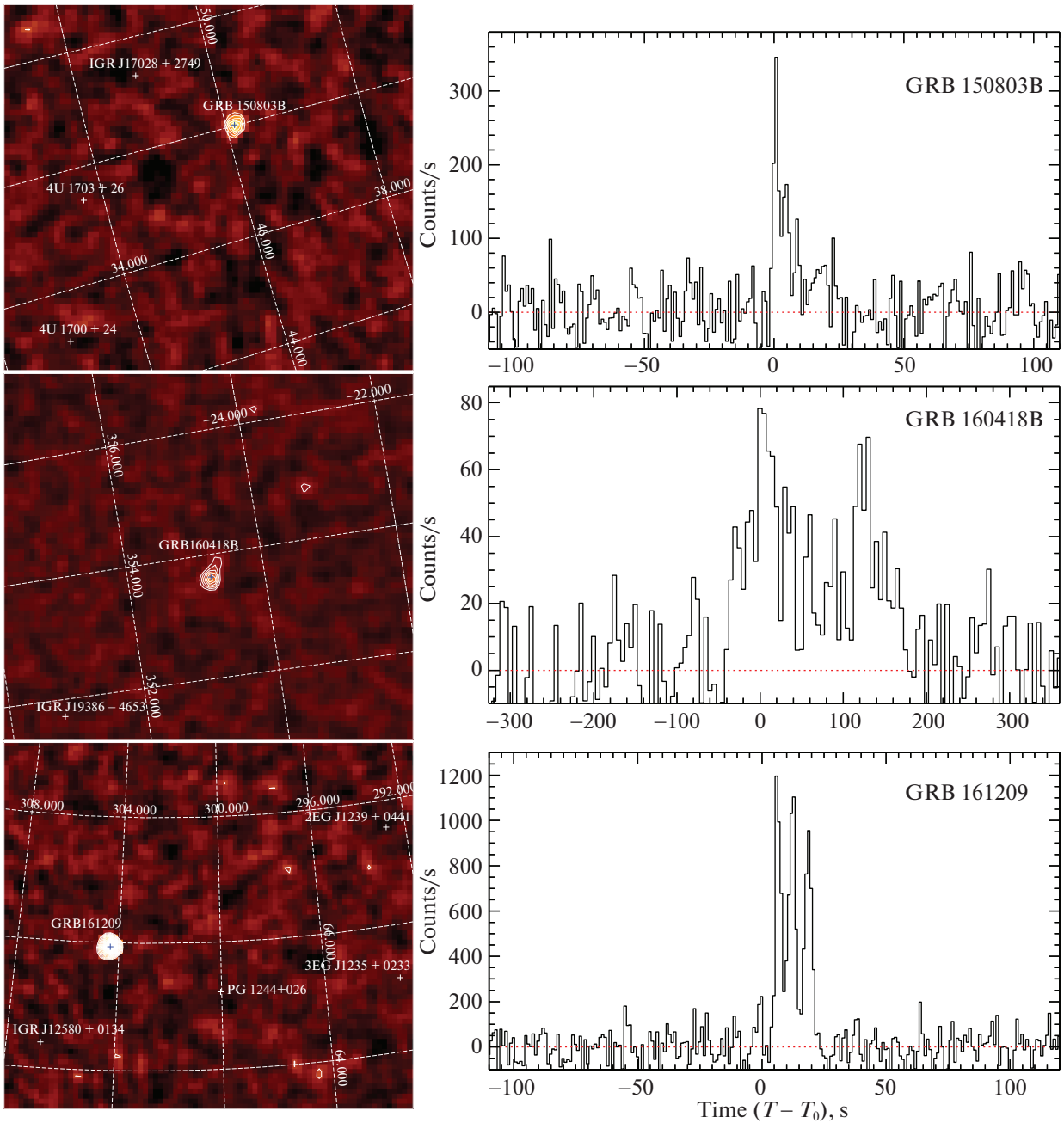


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для ранее неизвестных всплесков GRB 150803B, GRB 160418B и GRB 161209. На обоих рисунках белыми контурами показаны уровни отношения сигнала к шуму $S/N = 3, 4, 5$ и т.д. Указаны положения известных источников постоянного излучения в поле зрения.

Тем не менее до подтверждения в архивных данных других экспериментов (где они могли быть зарегистрированы как слабые события с низким уровнем достоверности и поэтому не войти в базовые каталоги) мы считаем их кандидатами во всплески.

На рис. 3 показаны временные профили всплесков GRB 111130, GRB 150803B и GRB 161209 в диапазоне энергий 100–500 кэВ в сравнении с

их профилями в мягком диапазоне (30–100 кэВ). В жестком диапазоне были зарегистрированы только эти 3 всплеска. В случае GRB 111130 и GRB 161209 это, скорее всего, связано с их большой мощностью, в случае GRB 150803B — с (как мы увидим дальше) аномальной жесткостью. В целом же жесткие профили повторяют мягкие,

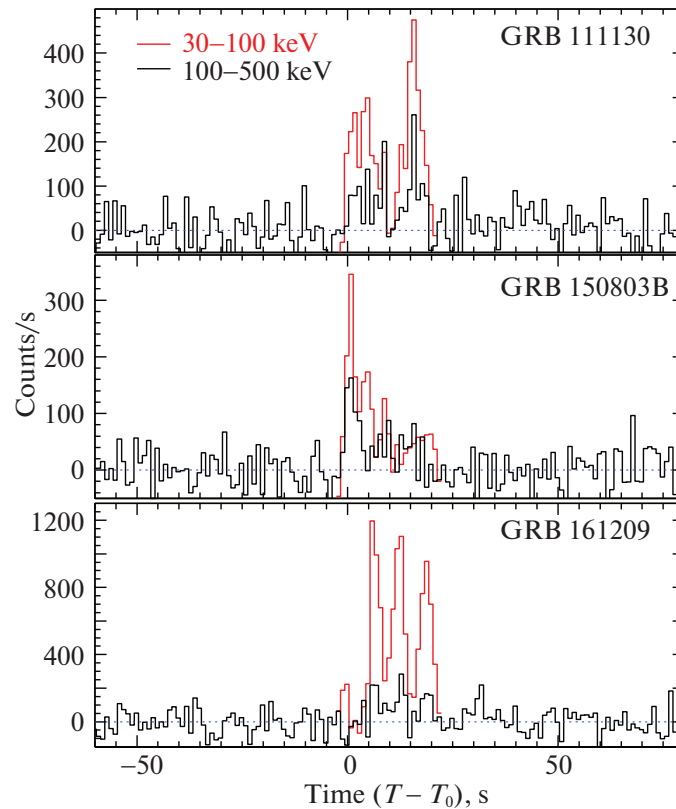


Рис. 3. Временные профили гамма-всплесков GRB 111130, GRB 150803B и GRB 161209, впервые зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI, в диапазоне энергий 100–500 кэВ (черные гистограммы) и их сравнение с профилями в диапазоне 30–100 кэВ (красные гистограммы).

что свидетельствует об едином однокомпонентном спектре их излучения.

Это подтверждает и рис. 4, на котором приведе-

Таблица 2. Параметры аппроксимации спектров излучения новых кандидатов в гамма-всплески, зарегистрированных в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI

Всплеск (дата)	α^a	F_X^b
GRB 041106	1.31 ± 0.04	21.1 ± 3.1
GRB 080408C	1.86 ± 0.03	69.2 ± 6.7
GRB 111130	1.22 ± 0.02	37.6 ± 3.4
GRB 131107B	1.70 ± 0.03	15.8 ± 2.0
GRB 150803B	1.06 ± 0.03	28.7 ± 3.7
GRB 160418B	2.08 ± 0.02	5.5 ± 0.4
GRB 161209	2.20 ± 0.01	77.9 ± 4.0
	1.14 ± 0.01^b	68.4 ± 3.5

^a Фотонный индекс.

^b Поток излучения в диапазоне 30–200 кэВ, 10^{-9} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$.

^b С завалом на $E_{\text{cut}} = 46.3 \pm 2.4$ кэВ.

ны спектры всех новых всплесков, накопленные в их интервале T_{90} в диапазоне энергий 30–200 кэВ. Они хорошо аппроксимируются простым степенным законом, как показывают сплошные линии на рисунках; только в случае GRB 161209 потребовалось усложнить модель, введя экспоненциальный завал на высоких энергиях (пунктирная линия). Параметры наилучшей аппроксимации (фотонный индекс и поток излучения) приведены в табл. 2. Видно, что из этих всплесков GRB 150803B имеет наиболее жесткий спектр с $\alpha \simeq 1.06$.

Аналогичные содержащимся в табл. 1 параметры 4 локализованных, но ранее известных всплесков (не зарегистрированных системой IBAS) приведены в табл. 3. Соответствующие им рентгеновские карты локализации и их демаскированные временные профили в диапазоне 30–100 кэВ показаны на рис. 5. Все всплески мощные; после их регистрации телескопом IBIS/ISGRI они могут быть переведены из кандидатов во всплески, которыми они считались до сих пор, в действительные гамма-всплески. Отметим, что за исключением GRB 180108, все они были значимо ($S/N \geq 9$) зарегистрированы в жестком диапазоне энергий 100–500 кэВ.

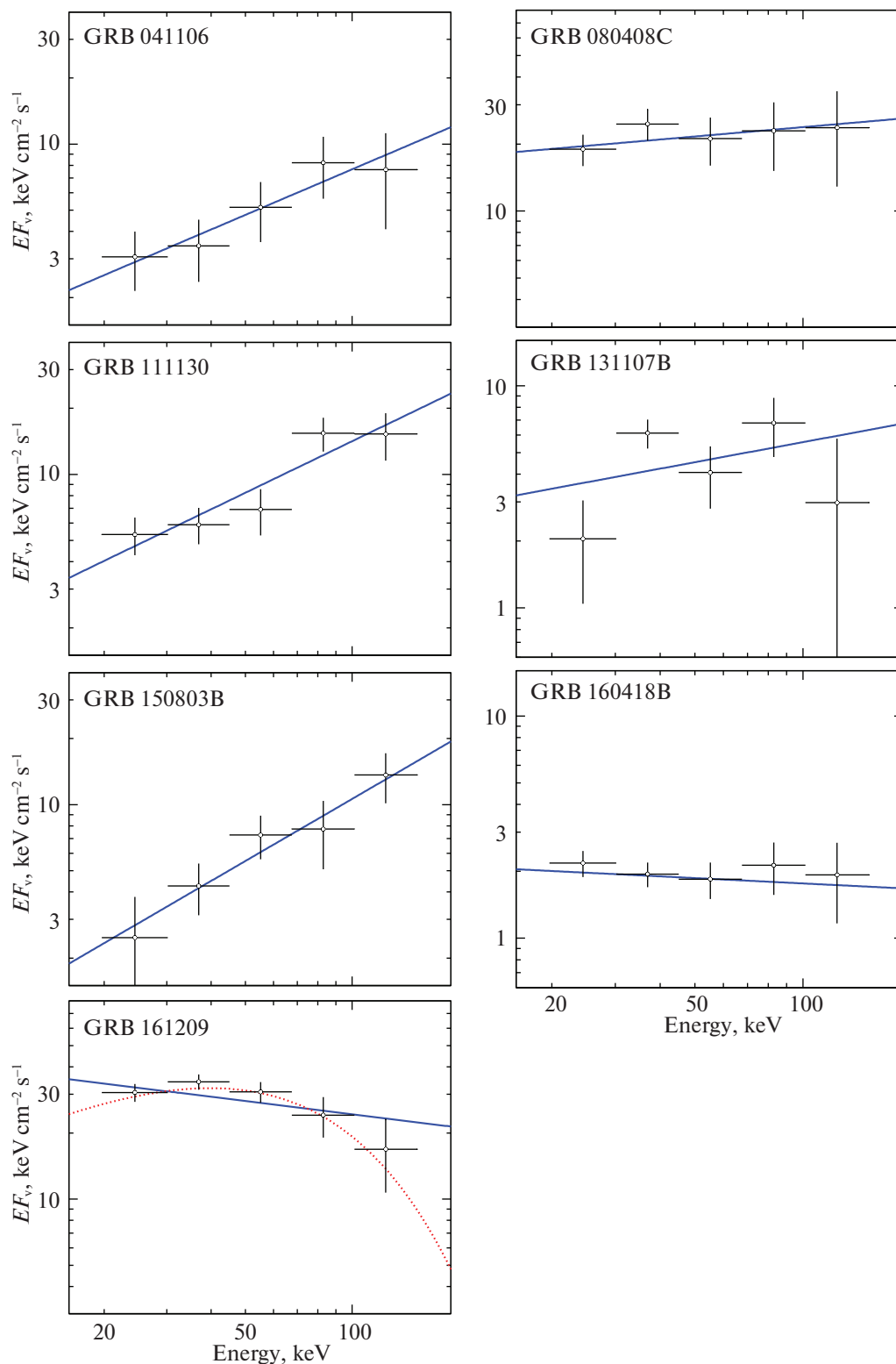


Рис. 4. Рентгеновские спектры излучения новых кандидатов в гамма-всплески GRB 041106, GRB 080408C, GRB 111130, GRB 131107B, GRB 150803B, GRB 160418B и GRB 161209, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI в поле зрения. Сплошной линией показан результат наилучшей аппроксимации степенным законом, пунктирной — результат аппроксимации степенным законом с экспоненциальным завалом.

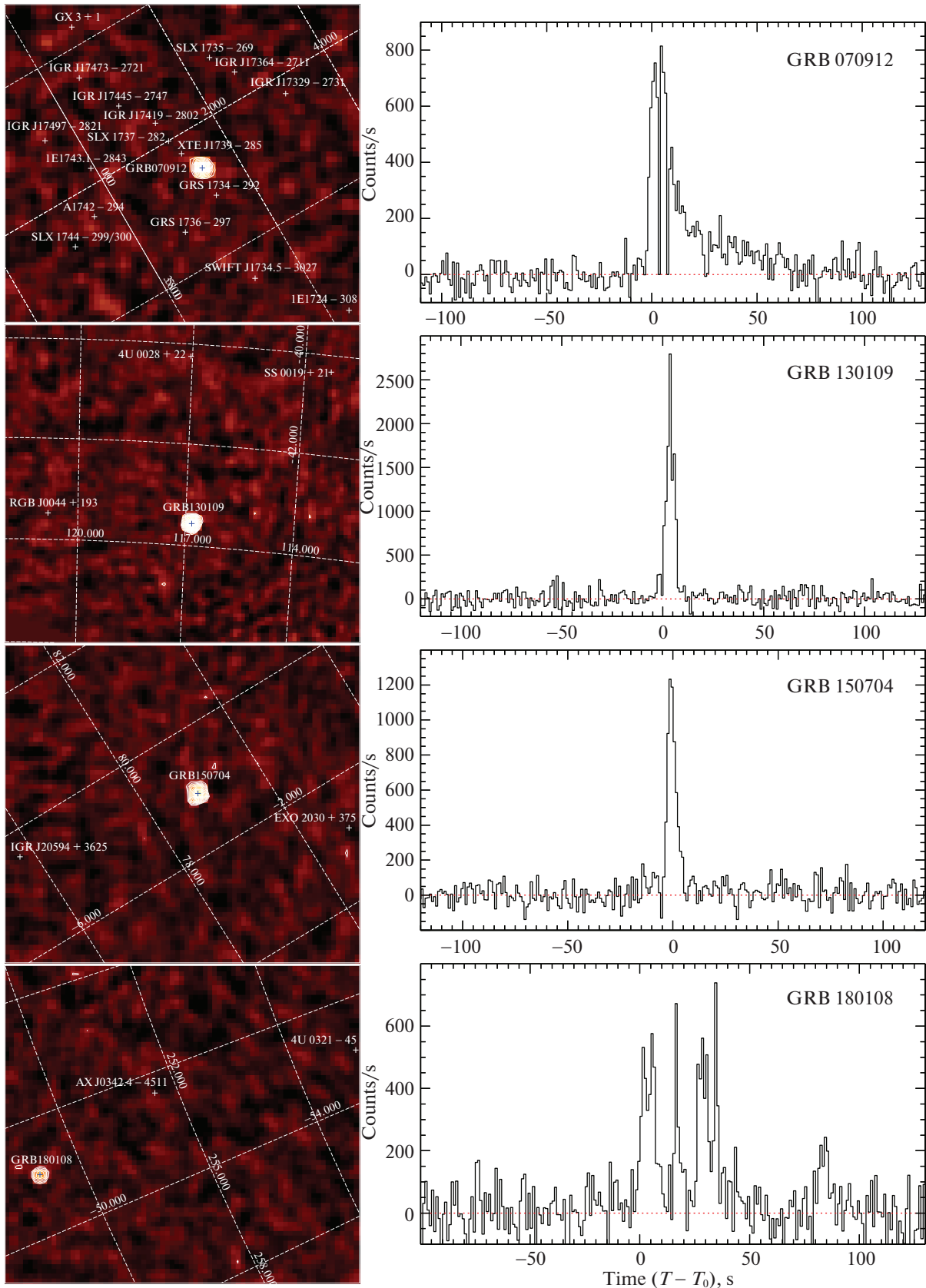


Рис. 5. Карты локализации гамма-всплесков GRB 070912, GRB 130109, GRB 150704 и GRB 180108, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI внутри поля зрения (слева) и их временной профиль в диапазоне энергий 30–100 кэВ (справа). Контурами на картах показаны уровни $S/N = 3, 4, 5$ и т.д. Отмечены положения источников постоянного излучения.

Таблица 3. Ранее известные гамма-всплески, зарегистрированные телескопом IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL внутри поля зрения, но пропущенные системой IBAS

Всплеск (дата)	ΔE^a	T_0^b (UTC)	T_c^b	T_{90}^b	C_p^d	S/N^e		$F^{ж}$	Координаты ^и		Миссия ^к
						LC	IM		R.A.	Decl.	
						σ	σ		отсч.	град.	
GRB 070912	X	07:32:21	27	41	816	19	14.5	11238	264.608	-28.706	ASIJ ^к
	G	07:32:21	13	36	390	10	—	3280			
GRB 130109	X	04:56:25	7	9	2787	35	19.5	9770	8.180	19.085	K
	G	04:56:25	9	17	726	9	—	2751			
GRB 150704	X	02:14:09	9	34	1231	21	14.2	6815	311.343	37.927	<u>K</u>
	G	02:14:09	8	15	498	9	—	2126			
GRB 180108	X	10:15:37	31	52	734	11	8.4	9240	58.711	-46.267	K

^a Диапазон энергий: рентгеновский X = 30–100 кэВ и гамма G = 100–500 кэВ.

^b Середина первого бина с $S/N > 3$ в профиле события на детекторной кривой блеска с шагом 5 с.

^в Длительность события на кривой блеска всплеска на уровне 10% от пиковой скорости счета.

^г Длительность события на кривой блеска всплеска по методу Кошута и др. (1996).

^д Пиковая скорость счета на демаскированной кривой блеска всплеска после удаления фона.

^e Значимость регистрации всплеска по пиковой скорости счета (LC) и на изображении (IM).

^ж Интегральная по профилю всплеска (в интервале времени T_{90}) скорость счета после удаления фона.

^з Координаты всплеска по данным IBIS/ISGRI (эпоха 2000.0, радиус круга 1σ -ошибки $\sim 1'.5$).

^и Регистрация в других экспериментах (K — KONUS/WIND, A, S, I, J — приборы SPI/ACS, SPI, IBIS/ISGRI, JEM-X обсерватории INTEGRAL). Подчеркивание указывает на неполную регистрацию события данным прибором.

^к Всплеск был ранее обнаружен и описан Минаевым и др. (2012).

Нелокализованные события из каталога 2 также были проверены на совпадение (в пределах ± 50 с) с каталогами гамма-всплесков, найденных в экспериментах PICsIT и SPI/ACS обсерватории INTEGRAL, а также со сводным по всем миссиям каталогом (Орли, 2010). События, совпавшие с наблюдавшимися ранее, приведены в табл. 4, в полном виде находящейся на сайте hea.iki.rssi.ru/integral/ibisgrbs. Всего таких событий оказалось 886; событий, не совпавших ни с одним гамма-всплеском, было на порядок больше. В основном это — вспышки, связанные с флуктуациями потоков заряженных частиц вблизи магнитных поясов Земли, солнечные вспышки, возможные всплески от мягких гамма-репитеров и рентгеновских двойных. Даже если среди этих событий присутствуют гамма-всплески, отождествить и отобрать их не представляется возможным. Экстраполируя число всплесков, зарегистрированных

в поле зрения телескопа (124), к площади видимой полусферы неба (и пренебрегая падением эффективности регистрации всплесков под большими углами к оси телескопа), получаем оценку максимального числа всплесков, которые могли бы присутствовать в выборке, ~ 2840 . Это число более чем 3 раза превышает количество реально зарегистрированных всплесков.

Из 39 гамма-всплесков, зарегистрированных детектором PICsIT (Бьянчин и др., 2011)⁶, 4 наблюдались внутри поля зрения телескопа IBIS и были зарегистрированы системой IBAS. Как оказалось, все остальные всплески тоже были зарегистрированы детектором IBIS/ISGRI и содержатся

⁶ В сводном каталоге Орли (2010) из этих 39 событий 5 отсутствуют: GRB 060905, GRB 060928, GRB 061222A, GRB 070403, GRB 080408B.

Таблица 4. События, зарегистрированные телескопом IBIS/ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ в детекторных кривых блеска с шагом $\delta T = 5$ с на уровне $S/N \gtrsim 3$, совпадающие по времени ($\Delta T \lesssim 50$ с) с кандидатами в гамма-всплески, зарегистрированными хотя бы еще одной миссией

Дата всплеска	ΔE^a	T_0^b (UTC)	ΔT^b	T_c^r	T_{90}^d	C_p^e	S/N^k	F^z	M^h
		hh:mm:ss	с	с	с	отсч/с	σ	отсч.	
2003-02-22	G	18:53:25	-32	2	10	85.3	5.1	110	A
2003-02-24	X	11:44:37	39	2	12	123.3	5.3	228	A
2003-03-19	G	23:32:54	-27	3	1	107.8	5.3	107	A
2003-05-10	X	03:32:25	0	19	71	277.3	6.1	4338	A
2003-06-09	X	23:27:40	-3	26	-	136.2	5.7	2138	A
	G	23:27:45	1	19	29	74.3	4.1	867	A
2003-07-31	X	05:14:49	17	24	27	165.6	8.0	1847	A
	G	05:14:49	17	22	29	103.7	5.9	1205	A
2003-08-11	X	21:31:31	13	116	108	142.4	7.0	4730	A
	G	21:31:36	18	89	106	90.7	5.1	2334	A
2003-08-21	X	23:24:27	7	59	72	118.6	6.2	1443	A
	G	23:25:02	42	10	46	60.1	3.3	533	A
2003-11-24	X	17:04:34	22	23	57	78.3	3.4	1444	A
2004-01-07	X	09:03:09	-4	41	47	85.0	4.4	1386	A
2004-06-21	X	18:24:47	12	15	35	150.0	7.4	1535	K
	G	18:24:47	12	15	33	160.4	8.3	1718	K
2004-08-18	X	17:31:15	-25	71	72	754.8	29.6	16567	A
	G	17:31:45	4	7	41	58.7	3.0	414	A
2004-08-23	X	13:21:03	-4	2	10	1976.3	91.9	2556	A
	G	13:21:03	-4	9	49	87.7	4.5	649	A
2004-10-05	X	13:56:48	-177	198	208	3140.6	95.8	74960	A
	G	13:59:33	-12	30	69	96.7	4.5	1226	A
2004-12-27	X	21:28:04	3	2	7	1514.6	50.5	1591	A
2004-12-30	X	06:26:04	5	23	-	129.7	6.2	990	A
	G	06:26:04	5	16	8	61.4	3.2	223	A
2005-02-23	X	09:34:29	3	7	-	119.9	4.7	454	H
2005-02-28	X	22:28:06	-4	18	28	390.6	16.6	1992	A
2005-04-04	X	21:34:36	-38	121	123	783.4	9.1	16329	A
2005-08-11	X	13:35:48	2	2	8	466.7	22.4	499	A
2006-03-19	X	00:24:52	11	37	30	137.5	4.2	1799	A
2006-09-05	X	14:47:05	-105	240	217	1131.8	38.4	118243	P
	G	14:47:35	-75	96	157	495.8	19.5	22536	P
2006-09-11	X	08:56:44	2	2	31	148.7	6.5	437	A
2006-09-16	X	23:42:55	1	2	2	2055.6	88.9	2754	A
2006-09-28	X	01:19:59	15	26	35	645.4	29.2	7712	AP
	G	01:19:47	3	25	29	811.4	37.0	10984	AP
2006-12-22	G	03:30:12	-2	5	18	173.1	7.8	905	P
2006-12-24	X	15:38:12	5	62	57	135.5	5.2	3930	A
	G	15:38:42	35	7	25	62.8	2.9	461	A
2006-12-24	X	18:43:09	1	42	78	98.5	3.9	3660	A
	G	18:43:39	31	4	27	58.9	2.5	448	A
2006-12-24	X	19:56:21	-9	56	59	125.7	4.8	3741	A
	G	19:56:31	0	7	37	89.7	4.1	760	A
2006-12-24	X	21:58:45	4	42	44	615.8	26.4	13949	A
	G	21:59:05	24	27	36	161.9	7.0	2496	A

Таблица 4. Продолжение

Дата всплеска	ΔE^a	T_0^b (UTC)	ΔT^b	T_c^r	T_{90}^d	C_p^e	S/N^j	F^z	M^h
		hh:mm:ss	с	с	с	отсч/с	σ	отсч.	
2006-12-25	X	00:47:04	9	10	14	228.4	9.7	702	A
2007-01-17	X	00:28:11	3	38	29	246.8	10.6	3694	A
	G	00:28:11	3	25	27	79.8	3.6	955	A
2007-01-29	G	22:47:19	35	2	—	107.3	4.8	130	Z
2007-01-31	X	02:13:18	7	47	101	169.0	4.0	4980	A
2007-04-03	X	12:40:17	-10	48	54	906.0	29.4	26207	P
	G	12:40:22	-5	49	54	313.5	13.4	8768	P
2007-04-07	X	14:24:24	1	2	8	182.6	7.7	211	Z
2007-09-18	X	17:08:47	0	3	26	499.3	21.9	790	A
2007-11-20	X	11:40:02	1	24	49	113.8	5.0	1620	A
	G	11:40:07	6	10	19	57.0	2.5	411	A
2007-11-24	X	15:07:46	6	21	—	74.6	2.4	437	A
2007-11-24	X	17:26:17	35	6	26	98.6	4.2	808	A
2008-01-08	X	08:33:16	32	29	87	328.5	9.8	4784	A
	G	08:32:51	7	51	102	135.3	5.4	3063	A
2008-01-08	X	23:27:01	-6	53	54	271.0	10.6	7055	A
	G	23:27:06	-1	33	38	105.8	4.5	1988	A
2008-02-03	X	04:54:51	4	18	31	150.6	6.4	1749	A
	G	04:54:51	4	3	12	90.8	3.9	270	A
2008-02-03	X	11:03:20	-6	14	24	94.7	3.8	1037	A
	G	11:03:25	-1	8	53	83.3	3.5	815	A
2008-02-12	X	17:15:33	-28	55	57	187.9	7.5	4098	A
	G	17:16:18	16	8	40	50.9	2.3	442	A
2008-02-14	X	20:14:42	0	61	50	264.9	6.9	7335	A
	G	20:15:02	19	21	32	83.8	3.4	884	A
2008-02-14	X	20:29:24	1	21	43	175.5	6.3	2464	A
2008-02-29	X	22:04:16	5	6	22	229.3	5.6	1803	A
2008-02-29	X	22:24:41	3	87	75	366.6	13.2	12830	A
	G	22:25:21	43	19	38	106.1	4.5	1292	A
2008-02-29	X	22:44:36	0	101	119	182.9	6.6	7850	A
	G	22:44:46	10	12	44	76.5	3.3	1086	A
2008-03-01	X	00:43:26	-2	57	93	352.0	13.7	5339	A
2008-03-01	X	04:22:43	26	56	49	214.3	8.6	5479	A
	G	04:22:43	26	58	100	86.6	3.7	2345	A
2008-03-02	X	06:51:09	2	31	35	143.7	5.3	1679	A
	G	06:51:09	2	3	40	69.4	2.9	753	A
2008-03-08	X	12:04:47	-5	43	36	173.6	6.1	3203	A
	G	12:04:57	4	44	33	128.3	4.9	2438	A
2008-03-13	X	11:03:37	6	69	85	159.2	6.0	3882	A
	G	11:04:12	41	40	44	100.1	4.3	1613	A
2008-03-13	X	13:36:56	9	79	68	395.4	9.7	12137	A
	G	13:36:56	9	18	16	99.3	4.2	920	A
2008-03-13	X	13:39:56	-10	97	19	242.5	6.0	2324	A
	G	13:40:01	-5	10	21	74.8	3.2	375	A
2008-03-13	X	13:43:06	-1	98	80	232.7	5.7	8334	A
	G	13:43:16	8	15	45	70.7	3.0	789	A
2008-03-27	X	19:24:58	0	12	30	110.6	4.2	1075	A
	G	19:25:03	4	9	—	70.3	3.0	418	A

Таблица 4. Продолжение

Дата всплеска	ΔE^a	T_0^b (UTC)	ΔT^b	T_c^r	T_{90}^d	C_p^e	S/N^k	F^z	M^h
		hh:mm:ss	с	с	с	отсч/с	σ	отсч.	
2008-04-08	X	10:21:34	-110	119	116	1404.7	31.0	37709	P
	G	10:21:39	-105	121	125	241.6	8.3	9027	P
2008-04-14	X	15:40:02	-7	2	5	141.7	6.3	196	A
2008-05-05	X	14:41:27	-8	17	22	222.5	8.9	2006	A
2008-10-11	X	17:39:12	-50	78	72	207.9	7.0	3247	A
2008-10-31	X	01:48:30	11	65	60	194.5	5.7	6129	A
	G	01:48:30	11	51	53	90.8	3.7	2036	A
2008-11-08	X	13:00:25	20	36	63	183.4	4.9	4775	A
2009-01-03	X	12:23:27	-36	58	81	155.5	6.1	5065	A
	G	12:24:32	28	10	51	90.2	3.9	834	A
2009-04-01	X	00:03:03	23	9	9	101.2	4.1	335	A
	G	00:03:03	23	4	21	124.2	4.9	307	A
2010-02-26	G	04:46:15	-1	4	4	102.3	4.2	202	A
2010-08-10	G	00:51:21	16	1	1	163.3	7.0	163	Z
2010-10-14	X	04:15:19	9	10	22	347.7	14.0	1285	A
	G	04:15:14	4	6	37	194.3	8.0	569	A
2011-03-02	G	16:27:00	47	19	-	79.9	3.3	923	A
2011-09-03	X	02:42:31	-15	38	37	442.5	18.2	9107	A
	G	02:42:31	-15	25	42	290.1	12.2	4158	A
2011-09-08	X	15:42:51	-15	36	48	228.4	9.5	4036	A
	G	15:43:06	0	17	42	96.2	4.1	1729	A
2011-09-26	X	20:16:59	6	54	53	386.8	14.3	11582	A
2011-12-05	X	15:17:05	4	17	15	65.7	3.1	344	K
2011-12-28	X	15:45:33	0	6	23	105.4	4.8	484	A
2012-02-14	X	19:07:36	9	2	-	126.7	5.4	146	S
2012-06-03	X	17:53:18	5	26	47	406.9	3.8	5871	A
	G	17:53:18	5	19	42	107.7	3.5	1277	A
2012-06-24	X	22:24:02	3	16	28	162.2	7.2	899	A
	G	22:24:02	3	13	10	130.1	5.7	457	A
2012-06-28	X	16:10:57	-3	72	69	355.4	16.1	5432	A
	G	16:11:02	1	7	26	84.6	3.9	722	A
2012-07-06	X	23:04:49	0	146	253	2299.7	84.8	176156	A
	G	23:04:59	10	139	154	1952.8	75.8	138736	A
2012-08-02	X	13:41:54	8	19	68	140.3	5.0	2491	A
	G	13:41:54	8	15	55	129.3	5.1	1509	A
2012-09-16	X	04:07:47	2	5	13	99.2	3.7	393	A
2012-11-27	X	15:55:33	-23	27	33	207.0	10.2	2623	A
	G	15:55:53	-3	28	44	143.0	6.8	2391	A
2013-02-19	X	18:37:12	3	10	22	135.2	4.6	747	A
	G	18:37:12	3	9	23	143.2	4.2	960	A
2013-03-20	X	13:24:08	1	13	12	192.2	8.9	1183	A
	G	13:24:08	1	5	9	242.9	11.8	831	A
2013-06-23	X	07:01:36	-2	41	37	572.1	28.7	7876	A
2013-09-07	X	21:39:21	3	19	15	181.9	9.1	1217	A
	G	21:39:21	3	16	14	134.4	6.0	808	A
2014-04-13	X	11:27:27	-9	11	10	253.6	11.8	1272	Z
2014-10-16	X	13:01:16	-24	41	41	520.8	20.9	9339	A
	G	13:01:26	-14	26	30	286.7	12.8	3846	A

Таблица 4. Окончание

Дата всплеска	ΔE^a	T_0^b (UTC)	ΔT^b	T_c^r	T_{90}^d	C_p^e	$S/N^{\text{ж}}$	F^z	$M^{\text{н}}$
		hh:mm:ss	с	с	с	отсч/с	σ	отсч.	
2014-10-29	X	03:14:34	-23	10	34	110.4	5.9	768	A
	G	03:14:39	-18	5	21	86.3	4.1	261	A
2014-12-31	X	15:09:22	0	78	78	163.6	6.7	4569	A
	G	15:09:27	5	58	73	74.3	3.4	1817	A
2015-02-06	X	14:31:25	13	24	38	115.7	6.1	1413	A
	G	14:31:20	8	25	44	200.8	9.9	1572	A
2015-03-09	X	23:00:04	19	20	17	125.1	5.5	1141	A
	G	22:59:59	14	20	22	206.8	9.9	1988	A
2015-03-30	X	19:54:07	-17	27	31	430.2	22.5	4077	A
	G	19:54:07	-17	26	42	770.3	35.6	6094	A
2015-07-04	X	02:14:11	0	9	11	177.8	8.7	653	K
	G	02:14:11	0	8	9	113.8	5.5	426	K
2015-12-29	X	03:01:05	-14	63	65	300.4	11.9	11068	K
	G	03:01:15	-4	56	56	141.7	5.8	3554	K
2016-02-15	X	18:36:23	0	12	32	85.3	3.8	1157	A
	G	18:36:23	0	21	21	153.6	6.5	1164	A
2016-08-06	G	09:30:42	7	68	88	83.7	3.4	2013	A
2016-08-21	X	20:36:26	5	36	39	559.6	25.5	9500	A
	G	20:36:26	5	40	37	660.7	27.5	10899	A
2016-09-20	X	07:26:32	0	17	17	335.8	15.6	3074	A
2016-10-18	X	00:58:58	4	63	46	632.6	24.4	7880	A
	G	00:58:58	4	63	60	555.3	21.1	7221	A
2016-12-23	X	20:59:11	-1	33	31	125.5	6.0	1586	A
	G	20:59:26	13	21	39	88.8	3.7	1117	A
2016-12-26	X	03:15:50	3	3	-	224.1	11.0	370	A
2017-02-18	X	17:58:10	-2	23	70	361.1	13.7	4232	A
	G	17:58:10	-2	19	-	138.4	5.2	1274	A
2017-05-20	X	15:30:29	5	4	2	106.5	4.9	106	A
	G	15:30:29	5	3	12	196.5	7.8	583	A
2017-06-01	X	08:27:41	0	52	9	113.1	5.0	286	A
	G	08:27:46	4	7	41	87.2	3.4	464	A
2017-08-19	X	02:38:49	-13	24	20	486.7	24.0	4677	A
2017-11-10	X	08:40:17	-1	27	35	133.4	6.2	2014	A
2018-01-08	X	10:15:37	3	34	93	123.6	5.5	1889	K

^a Диапазон энергий: X = 30–100 кэВ, G = 100–500 кэВ.

^b Середина первого бина с $S/N > 3$ в профиле события на детекторной кривой блеска с шагом 5 с.

^b Задержка относительно ближайшего известного всплеска (отрицательная величина означает, что телескоп IBIS/ISGRI увидел событие раньше).

^r Длительность на детекторной кривой блеска на уровне 10% от пиковой скорости счета.

^d Длительность на детекторной кривой блеска по методу Кошута и др. (1996).

^e Пиковая скорость счета на детекторной кривой с шагом 1 с (фон удален).

^ж Значимость регистрации всплеска по пиковой скорости счета.

^z Интегральная по профилю всплеска с шагом 1 с (в интервале времени T_{90}) скорость счета после удаления фона (если T_{90} не определено, используется T_c).

^н Миссия, в которой ранее был зарегистрирован данный всплеск (как правило, в интервале ± 50 с): A, P — INTEGRAL SPI/ACS и IBIS/PICsIT, H — HETE, K — KONUS/WIND, S — SWIFT/BAT, Z — SUZAKU.

в табл. 4. То есть все эти события пришли сбоку — из направлений, отстоящих от оси наведения телескопа более чем на $\sim 15^\circ$ ⁷. Из них 4 события наблюдались только детектором PICsIT и сейчас подтверждены наблюдениями ISGRI. Отметим, что лишь 26 из 35 событий PICsIT, пришедших вне поля зрения, были зарегистрированы детекторами SPI/ACS.

Если из $\sim 13\,500$ событий, зарегистрированных антисовпадательной защитой ACS телескопа SPI в период времени, охватываемый данной статьей, исключить события, связанные с солнечной активностью, прохождением радиационных поясов Земли, источниками повторных всплесков, а также малозначимые ($S/N < 3$), короткие (с длительностью $T_c < 1$ с) и слабые (с потоком $C_p < 100$ отсч. с^{-1}), останется 1369 событий — реальных кандидатов в гамма-всплески. Сравнивая их с 886 всплесками, наблюдавшихся детектором IBIS/ISGRI вне поля зрения, видим, что IBIS/ISGRI регистрирует примерно 2/3 от числа всплесков, регистрируемых детектором ACS. Это неудивительно — чувствительность BGO-детекторов SPI/ACS в целом выше, чем у детектора IBIS/ISGRI (для направлений вне поля зрения $\gtrsim 15^\circ$), и меньше зависит от угла к оси наведения. Заметно отличаются диапазоны максимальной чувствительности детекторов: 20–200 кэВ для IBIS/ISGRI и $\gtrsim 75$ кэВ для SPI/ACS, что также влияет на соотношение числа зарегистрированных всплесков. Ясно, что SPI/ACS более эффективен при регистрации жестких всплесков.

Любопытно, что в табл. 4 на самом деле содержится только 787 всплесков, наблюдавшихся детектором SPI/ACS, т.е. около 100 всплесков из зарегистрированных детектором IBIS/ISGRI SPI/ACS не видел. Это может быть следствием присутствия заметного числа мягких всплесков, к которым SPI/ACS слабо чувствителен, но к которым чувствителен детектор IBIS/ISGRI. Отметим, что 59 всплесков SPI/ACS, которые были также зарегистрированы детектором IBIS/ISGRI, отсутствуют в сводном каталоге Орли (2010).

Существование всплесков, зарегистрированных IBIS/ISGRI, но пропущенных SPI/ACS, хорошо видно, в частности, из сокращенной версии табл. 4, непосредственно включенной в статью. В ней оставлены лишь 110 гамма-всплесков, для которых существует подтверждение еще только в одном эксперименте, помимо регистрации телескопом IBIS/ISGRI (всплеск GRB 060928 был виден

и SPI/ACS, и IBIS/PICsIT, но это детекторы одной миссии). В таблице содержится 15 всплесков, не зарегистрированных детектором SPI/ACS. Регистрация этих всплесков детектором IBIS/ISGRI позволяет перевести все всплески в этой таблице из кандидатов, которыми они считались до сих пор, в реальные всплески. В таблице (так же как в ее основной версии) приведены следующие параметры: момент регистрации T_0 , задержка относительно ближайшего известного всплеска ΔT , длительность T_{90} и длительность на уровне 10% от пиковой скорости счета T_c , пиковая скорость счета C_p (после удаления фона), значимость регистрации S/N по скорости счета, интегральная по профилю всплеска в интервале времени T_{90} скорость счета F (после удаления фона), миссии, наблюдавшие всплеск ранее (A, P — INTEGRAL SPI/ACS и IBIS/PICsIT, H — HETE, K — KONUS/WIND, S — SWIFT/BAT, Z — SUZAKU). В отличие от табл. 1 и 3, эти параметры были определены по детекторной кривой блеска, без учета реальной эффективности наблюдения гамма-всплесков.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выборка зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI всплесков, найденных в данной статье и зарегистрированных системой IBAS, достаточно представительна ($7 + 4 + 886 + 113 = 1010$ событий) и может быть использована для получения некоторых статистических зависимостей. Так, на рис. 6 приведено распределение числа зарегистрированных телескопом всплесков с пиковым потоком выше определенного значения C_p в зависимости от C_p , а на рис. 7 — распределение числа всплесков с интегральным потоком выше F в зависимости от F . Видно, что распределение жестких, зарегистрированных в диапазоне 100–500 кэВ, всплесков по C_p заметно отличается от однородного $\sim C_p^{-3/2}$. Распределение мягких всплесков, зарегистрированных в диапазоне 30–100 кэВ, практически следует однородному. Отметим также явный избыток мягких всплесков с большим интегральным потоком F над жесткими всплесками. Такого явного избытка нет в распределении всплесков по пиковому потоку, поэтому, видимо, речь идет о том, что всплески, ответственные за избыток, имеют большую длительность.

Рисунок 8 показывает распределение числа всплесков по длительности T_{90} в зависимости от диапазона энергий. Отдельно синей штриховой линией показано распределение всплесков, зарегистрированных системой IBAS в поле зрения телескопа. Средняя длительность равна ~ 18 с. В то же время видно, что всплески, пришедшие

⁷ Поле зрения телескопа IBIS — квадратное с размером стороны 29° , поэтому в уголки поля могут попадать всплески, отстоящие от центра и более чем на 15° .

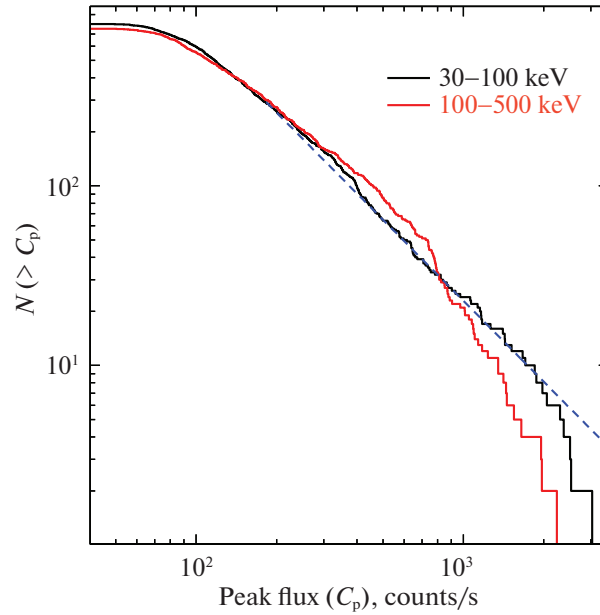


Рис. 6. Распределение числа зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI всплесков с пиковым потоком выше определенного значения C_p (в отсч. с^{-1}) в зависимости от C_p . Сплошными диаграммами черного и красного цвета показаны распределения всплесков, зарегистрированных в диапазонах 30–100 и 100–500 кэВ, штриховой линией — степенная зависимость с показателем степени $3/2$, ожидаемая при однородном распределении всплесков.

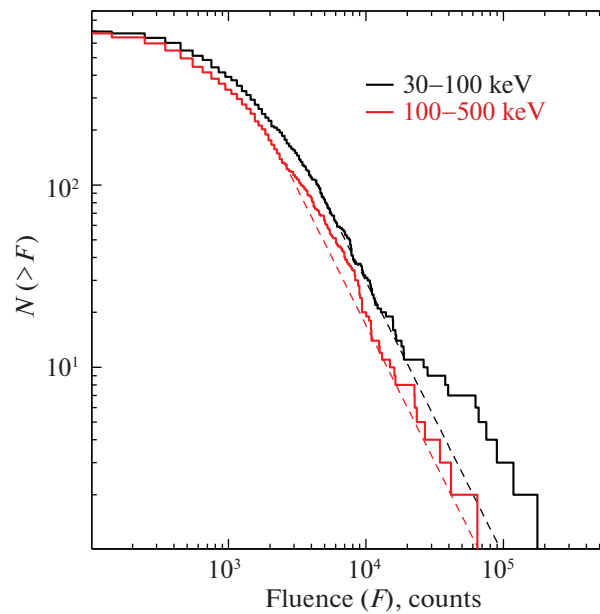


Рис. 7. Распределение числа зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI всплесков с интегральным потоком выше определенного значения F (в отсч.) в зависимости от F . Сплошными диаграммами черного и красного цвета показаны зависимости для всплесков, зарегистрированных в диапазонах 30–100 и 100–500 кэВ. Штриховыми линиями — соответствующие степенные зависимости с показателем степени $3/2$, ожидаемые при однородном распределении всплесков.

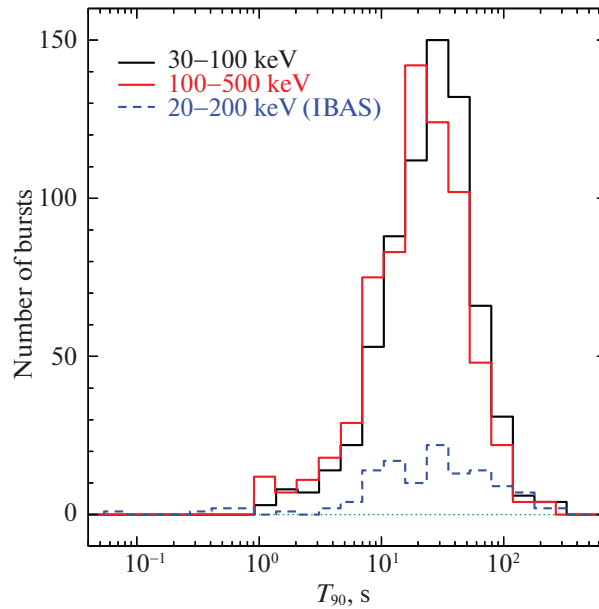


Рис. 8. Распределение всплесков, зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI, по их длительности T_{90} (черная кривая — всплески в диапазоне 30–100 кэВ, красная — 100–500 кэВ, синяя пунктирная — всплески, зарегистрированные системой IBAS в диапазоне 20–200 кэВ).

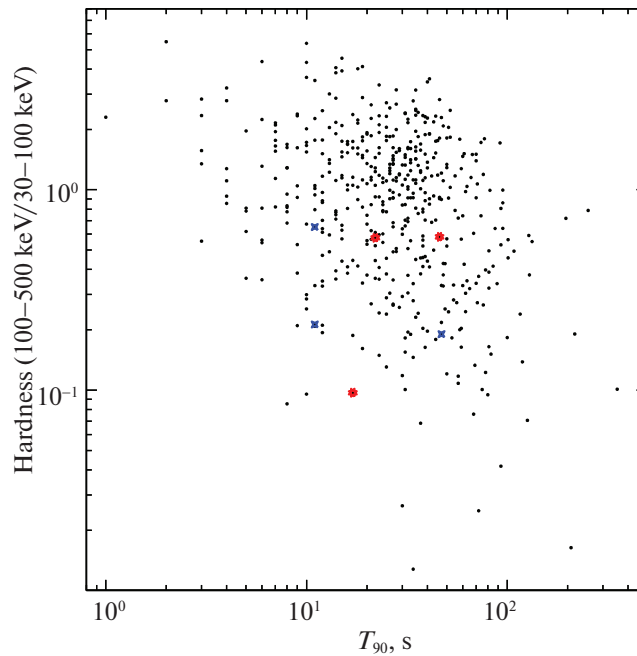


Рис. 9. Корреляция жесткости зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI всплесков (отношения интегральных потоков в диапазонах 100–500 кэВ и 30–100 кэВ) и их длительности T_{90} (черные точки). Если время T_{90} не определено, то используется T_c . Красными звездочками отмечены всплески, открытые в данной работе, синими — локализованные всплески, пропущенные системой IBAS.

не из поля зрения телескопа, в целом более короткие, чем те, которые были зарегистрированы в поле зрения (системой IBAS). Всплески, зарегистрированные в жестком диапазоне, короче, чем всплески, зарегистрированные в мягком. Подобное уменьшение длительности как отдельных

импульсов во временном профиле всплеска, так и всего всплеска с увеличением нижнего порога энергетического диапазона наблюдалось и в более ранних экспериментах (Фенимор и др., 1995; Минаев и др., 2010б).

На рис. 9 жесткость всплесков (отношение ин-

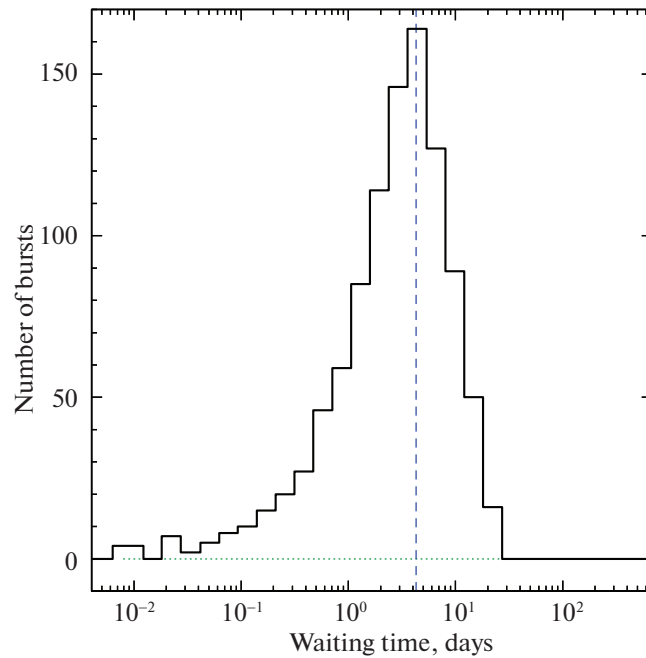


Рис. 10. Распределение длительности временного интервала между зарегистрированными телескопом IBIS/ISGRI всплесками. Наиболее вероятное время между всплесками $\Delta T \simeq 4.2$ дня показано штриховой линией.

тегральных потоков в диапазонах 100–500 кэВ и 30–100 кэВ) показана в зависимости от их длительности T_{90} . Естественно, здесь представлены только те всплески, которые были зарегистрированы как в мягком, так и в жестком диапазонах. Красными звездочками отмечены всплески из табл. 1, открытые в данной работе, синими крестиками — локализованные всплески, пропущенные системой IBAS, из табл. 3. В целом распределение имеет достаточно симметричную форму. Прежде всего это связано с отсутствием коротких событий в выборке, исключенных из-за используемого метода поиска всплесков. По этой причине на рисунке нет хорошо известного кластера коротких жестких всплесков. Отметим также, что отдельные всплески сильно выбиваются из общего распределения, в частности, очень мягкие всплески, жесткость которых на порядок и более отличается от средней по выборке.

Наконец, на рис. 10 приведено распределение длительности временного интервала между зарегистрированными телескопом IBIS/ISGRI всплесками. Наиболее вероятное время между всплесками $\Delta T \simeq 4.2$ дня показано штриховой линией. Распределение сильно асимметрично. В области малых временных интервалов оно доходит вплоть до ~ 900 с. Сюда могут попадать всплески с прекурсором (например, Лаззати, 2005; Минаев, Позаненко, 2017), всплески с продленным излучением (например, Буренин и др., 1999; Джерелс и

др., 2006; Минаев и др., 2010а; Барков, Позаненко, 2011) и сверхдлинные всплески (например, Джендре и др., 2013). В области от нескольких до десятка часов распределение может быть слегка искажено из-за скважности наблюдений обсерватории INTEGRAL, в частности, из-за моментов, связанных с прохождением перигея орбиты и радиационных поясов Земли, когда все приборы выключаются. На больших временных интервалах число зарегистрированных всплесков быстро спадает.

Представленные распределения в какой-то степени могут быть искажены защитой детектора IBIS/ISGRI, так как основную массу всплесков в выборке составляют всплески, пришедшие под большим углом к оси телескопа и не попавшие в поле его зрения. То, что это искажение значительное, можно понять, сравнив поток всплесков, измеренный детектором ISGRI, с потоком, измеренным от них в других экспериментах. Результаты подобного исследования, выполненного для подвыборки всплесков, зарегистрированных одновременно приборами IBIS/ISGRI и FERMI/GBM, приведены в Приложении к данной статье.

Измерение эффективности регистрации гамма-всплесков телескопом IBIS/ISGRI, пришедших под большими углами к его оси, важно прежде всего для задач, связанных с поиском и исследованием в данных IBIS/ISGRI всплесков, ассоциированных с гравитационно-волновыми событиями

LIGO/Virgo. Например, всплеск GRB 170817A, зарегистрированный монитором FERMI/GBM (Голдстейн и др., 2017) и отождествленный с первым таким событием GW 170817, связанным со слиянием двойной системы нейтронных звезд (Аббот и др., 2017), состоял из двух эпизодов: первого — короткого и довольно жесткого, и второго — существенно более мягкого (Позаненко и др., 2018). Первое событие было зарегистрировано детектором SPI/ACS, чувствительным на энергиях $\gtrsim 70$ кэВ, а второе — нет (Савченко и др., 2017).

При благоприятном стечении обстоятельств телескоп IBIS/ISGRI способен регистрировать мягкую компоненту такого рода всплесков параллельно с регистрацией жесткой компоненты детектором SPI/ACS. Близкий по чувствительности и энергетическому диапазону эксперимент FERMI/GBM далеко не всегда может наблюдать такой всплеск из-за низкой орбиты спутника и большой вероятности его затенения Землей. Подобная ситуация сложилась (см. подробнее Позаненко и др., 2019) при регистрации в эксперименте LIGO/Virgo второго гравитационно-волнового события S190425z от слияния пары нейтронных звезд (Зингер, 2019). В ходе события детектор SPI/ACS на борту обсерватории INTEGRAL зарегистрировал значимое превышение скорости счета (Мартин-Карилло и др., 2019; Минаев и др., 2019a), а монитор GBM на борту обсерватории FERMI — нет (Флетчер, 2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен поиск гамма-всплесков и других жестких транзиентных событий в архивных данных телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL, полученных по наблюдениям с февраля 2003 по январь 2018 гг.; полезное время работы телескопа за этот период составило 405 Мс. В поле зрения телескопа зарегистрированы 7 ранее неизвестных всплесков, пропущенных системой их автоматического поиска IBAS. Всплески локализованы с точностью лучше 2 мин. дуги. Также в поле зрения зарегистрированы еще 4 всплеска, пропущенные системой IBAS, но найденные ранее другими телескопами обсерватории INTEGRAL или другими миссиями. Таким образом, в поле зрения обнаружено и локализовано 11 всплесков, что составляет 10% от числа всплесков, обнаруженных системой IBAS. Для гамма-всплеска GRB 161209 удалось определить характерную энергию спектрального завала $E_c \simeq 46$ кэВ, необходимую для размещения события на диаграмме корреляции $E_p - E_{iso}$ (Амати и др., 2002). Кажется первостепенно важным проверить совпадение найденных

хорошо локализованных всплесков со списком сверхновых, наблюдавшихся в это время.

Большое число (886) ранее обнаруженных в других экспериментах гамма-всплесков было зарегистрировано вне поля зрения телескопа IBIS. Это всплески, прошедшие сбоку от кодирующей маски, через зазор между маской и детектором. Те события, которые до поиска в данных IBIS/ISGRI были зарегистрированы лишь одним прибором (в основном защитой ACS гамма-спектрометра SPI обсерватории INTEGRAL), из кандидатов во всплески могут быть, таким образом, переведены в действительные космические всплески. Составлены каталоги зарегистрированных всплесков, в которые внесены их основные параметры. Исследованы корреляции параметров найденных всплесков.

Исследована эффективность регистрации всплесков на разных энергиях в зависимости от угла между направлением их прихода и осью наведения телескопа. Получена калибровочная функция, которая может быть использована для оценок потока жесткого рентгеновского излучения от гамма-всплесков и гравитационно-волновых событий, происходящих на больших угловых расстояниях от центра поля зрения.

Полное число зарегистрированных телескопом IBIS/ISGRI жестких кратковременных событий на порядок и более превышает число событий, вошедших в каталог всплесков. Несомненно, среди них есть гамма-всплески, однако отделить их от солнечных вспышек, магнитосферных событий, событий, связанных с флуктуациями потока заряженных частиц на орбите космического аппарата и с активацией детектора космическими лучами, невозможно. Сам факт регистрации такого большого числа гамма-всплесков, пришедших не из поля зрения, показывает, что возможности телескопа IBIS/ISGRI для исследования гамма-всплесков сильно недооценены. Необходимо вести постоянный мониторинг транзиентных событий во вновь поступающих данных обсерватории и сопоставление найденных событий с событиями, зарегистрированными детектором SPI/ACS и любыми другими миссиями. Телескоп IBIS/ISGRI позволяет измерять спектр рентгеновского и мягкого гамма-излучения зарегистрированных гамма-всплесков и может поэтому стать важным дополнением детектора SPI/ACS, не предоставляющего спектральной информации. Более того, как показано в данной работе, телескоп регистрирует определенное количество (10–15%) всплесков, не вызвавших срабатывания в SPI/ACS.

Работа основана на данных многолетних наблюдений, выполненных международной астрофизической обсерваторией гамма-лучей INTEGRAL и полученных через Российский и Европейский

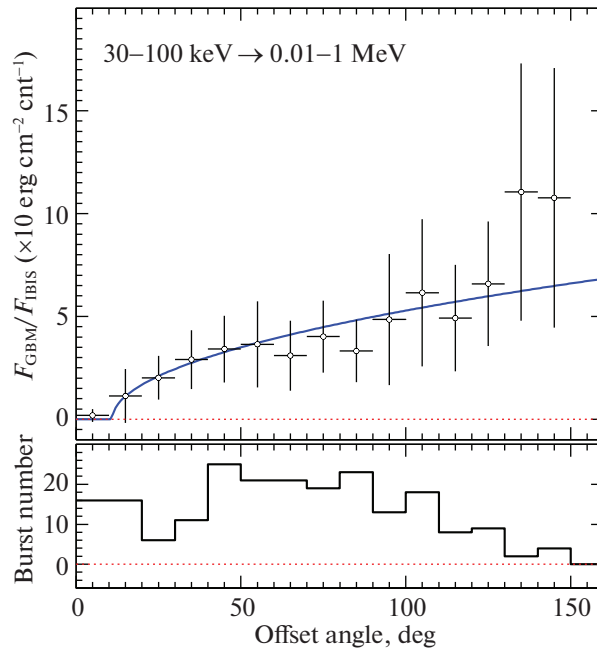


Рис. 11. Коэффициент пересчета интегрального потока гамма-всплеска, зарегистрированного (в отсч.) детектором IBIS/ISGRI в диапазоне 30–100 кэВ, в интегральный поток монитора FERMI/GBM в диапазоне 10–1000 кэВ в зависимости от угла между направлением на всплеск и осью наведения телескопа IBIS.

центры научных данных обсерватории. Авторы благодарны Российскому Научному Фонду за финансовую поддержку (грант 18-12-00522).

ПРИЛОЖЕНИЕ

КАЛИБРОВКА НАБЛЮДЕНИЙ ВСПЛЕСКОВ ВНЕ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ

Для определения чувствительности телескопа IBIS/ISGRI к наблюдению гамма-всплесков под большими углами к оси наведения телескопа была составлена выборка всплесков, зарегистрированных одновременно телескопом IBIS/ISGRI и монитором FERMI/GBM⁸ (Бхат и др., 2016). К всплескам IBIS/ISGRI из табл. 4 были добавлены всплески, зарегистрированные этим телескопом внутри поля зрения (из табл. 1, 3 и таблицы всплесков, выявленных системой IBAS, см. www.isdc.unige.ch/integral/science/grb#ISGRI). В выборку вошли 306 событий, события считались совпадающими, если их времена прихода в этих двух приборах отличались не более чем на $2 \times T_{90}$, где длительность события T_{90} была взята из каталога всплесков FERMI/GBM.

⁸ heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/fermi/fermigbrst.html

Для каждого всплеска было определено отношение K интегрального потока в диапазоне энергий 10 кэВ — 1 МэВ в единицах [$\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$], согласно измерениям монитора FERMI/GBM, к его интегральному потоку в [отсч. с^{-1}], измеренному детектором IBIS/ISGRI (см. табл. 4). На рис. 11 и 12 полученное отношение приведено как функция угла θ (с шагом 10°) между направлением на гамма-всплеск (согласно локализации FERMI/GBM) и осью телескопа IBIS соответственно для двух использовавшихся диапазонов энергий детектора IBIS/ISGRI 30–100 и 100–500 кэВ. Ошибки значений в каждом бине по углу — среднеквадратичные для событий, попавших в данный бин. Распределение числа событий (всплесков) в бинах приведено на нижних панелях рисунков. Видно, что более 4–5 десятков всплесков, наблюдавшихся в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI, были также зарегистрированы монитором FERMI/GBM. Представленные зависимости хорошо описывают падение чувствительности телескопа к регистрации гамма-всплесков вплоть до углов $\theta \sim 100^\circ$ к оси телескопа. Ясно, что зависимости не стоит использовать для оценок потоков от всплесков внутри поля зрения телескопа IBIS/ISGRI (на угловом расстоянии от оси $\lesssim 15^\circ$). Для таких всплесков потоки можно определить на-

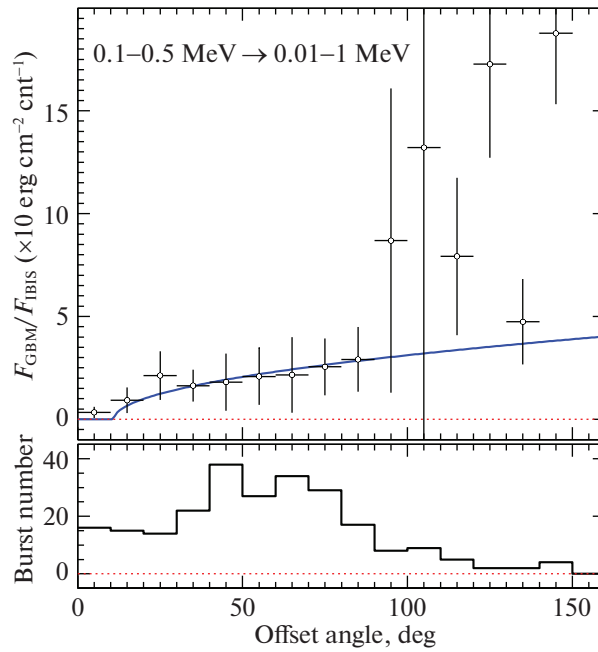


Рис. 12. То же, что на рис. 11, но для пересчета интегрального потока от гамма-всплеска, зарегистрированного в диапазоне телескопа IBIS/ISGR1 100–500 кэВ.

много точнее с помощью матрицы отклика самого телескопа.

Для удобства оценок представленные на рисунках зависимости коэффициента $K = F_{\text{GBM}}/F_{\text{IBIS}}$ от угла θ были аппроксимированы простыми выражениями $K_s = 5.6 \times 10^{-9} \sqrt{\theta - 11^\circ}$ эрг см⁻² отсч.⁻¹ и $K_h = 3.3 \times 10^{-9} \sqrt{\theta - 11^\circ}$ эрг см⁻² отсч.⁻¹ для диапазонов 30–100 и 100–500 кэВ соответственно. Эти аналитические зависимости показаны на рисунках сплошными (синими) линиями. Они вполне удовлетворительно описывают падение чувствительности телескопа к регистрации гамма-всплесков, пришедших под большими углами к оси телескопа. Видно, что оно не столь уж велико и происходит довольно медленно. Аналогичные зависимости для чувствительности к всплескам детектора SPI/ACS были получены Вигано, Мерегетти (2009), Позаненко и др. (2019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббот и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, et al.), *Astrophys. J.* **848**, 13 (2017).
2. Амати (L. Amati), *MNRAS* **372**, 233 (2002).
3. Барков, Позаненко (M.V. Barkov, A.S. Pozanenko), *MNRAS* **417**, 2161 (2011).
4. Бьянчин и др. (V. Bianchin, S. Mereghetti, C. Guidorzi, L. Foschini, G. Vianello, G. Malaguti, G. Di Cocco, F. Gianotti, and F. Schiavone), *Astron. Astrophys.* **536**, id. A46 (2011).
5. 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, et al.), *Astron. Astrophys.* **344**, L53 (1999).
6. Бхат и др. (P.N. Bhat, C.A. Meegan, A. von Kienlin, W.S. Paciesas, M.S. Briggs, J.M. Burgess, E. Burns, V. Chaplin, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **223**, 28 (2016).
7. Вианелло и др. (G. Vianello, D. Götz, S. Mereghetti), *Astron. Astrophys.* **495**, 1005 (2009).
8. Вигано, Мерегетти (D. Vigano, S. Mereghetti), *POS* **96**, id. 49 (2009) [aph:0912.5329 (2009)].
9. 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).
10. Голдстейн и др. (A. Goldstein, P. Veres, E. Burns, M.S. Briggs, R. Hamburg, D. Kocevski, C.A. Wilson-Hodge, R.D. Preece, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L14 (2017).
11. Готс и др. (D. Götz, S. Mereghetti, S. Molkov, K. Hurley, I.F. Mirabel, R. Sunyaev, G. Weidenspointner, S. Brandt, et al.), *Astron. Astrophys.* **445**, 313 (2006).

12. Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **33**, 883 (2007) [S.A. Grebenev, I.V. Chelovekov, *Astron. Lett.* **33**, 789 (2007)].
13. Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **43**, 643 (2017) [S.A. Grebenev, I.V. Chelovekov, *Astron. Lett.* **43**, 583 (2017)].
14. Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **44**, 845 (2018) [S.A. Grebenev, I.V. Chelovekov, *Astron. Lett.* **44**, 777 (2018)].
15. Джендре и др. (B. Gendre, G. Stratta, J.L. Atteia, S. Basa, M. Boër, D.M. Coward, S. Cutini, V. D'Elia, et al.), *Astrophys. J.* **766**, id. 30 (2013).
16. Джерелс и др. (N. Gehrels, J.P. Norris, S.D. Barthelmy, J. Granot, Y. Kaneko, C. Kouveliotou, C.B. Markwardt, P. Meszaros, et al.), *Nature* **444**, 1044 (2006).
17. Зингер (L. Singer), *GCN Circular* **24168** (2019).
18. Кошут и др. (T.M. Koshut, W.S. Paciasas, C. Kouveliotou, J. van Paradijs, G.N. Pendleton, G.J. Fishman, C.A. Meegan), *Astrophys. J.* **463**, 570 (1996).
19. Лабанти и др. (C. Labanti, G. Di Cocco, G. Ferro, F. Gianotti, A. Mauri, E. Rossi, J.B. Stephen, A. Traci, M. Trifoglio), *Astron. Astrophys.* **411**, L149 (2003).
20. Лаззати (D. Lazzati), *MNRAS* **357**, 722 (2005).
21. Лебран и др. (F. Lebrun, J.P. Leray, P. Lavocat, J. Crétolle, M. Arquès, C. Blondel, C. Bonnin, A. Bouère, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L141 (2003).
22. Мартин-Карилло и др. (A. Martin-Carillo, V. Savchenko, C. Ferrigno, J. Rodi, A. Coleiro, S. Mereghetti), *GCN Circular* **24169** (2019).
23. Мерегетти и др. (S. Mereghetti, D. Götz, J. Borkowski, R. Walter, H. Pedersen), *Astron. Astrophys.* **411**, L291 (2003).
24. Мереминский И.А., Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 727 (2017) [I.A. Mereminskiy et al., *Astron. Lett.* **43**, 656 (2017)].
25. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Письма в Астрон. журн. **43**, 1 (2017) [P.Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, *Astron. Lett.* **43**, 1 (2017)].
26. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Лозников В.М., Письма в Астрон. журн. **36**, 744 (2010a) [P.Yu. Minaev et al., *Astron. Lett.* **36**, 707 (2010a)].
27. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Лозников В.М., *Астрофиз. Бюл.* **65**, 343 (2010b) [P.Yu. Minaev et al., *Astrophys. Bull.* **65**, 326 (2010b)].
28. 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)].
29. 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)].
30. Минаев и др. (P. Minaev, A. Pozanenko, S. Grebenev, I. Chelovekov), *GCN Circular* **24170** (2019a).
31. Орли (K. Hurley), Компильтивный (сводный) каталог гамма-всплесков разных миссий www.ssl.berkeley.edu/ipn3/masterli.txt (2010).
32. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Yu. Minaev, A.A. Volnova, E.D. Mazaeva, A.S. Moskvitin, M.A. Krugov, V.A. Samodurov, V.M. Loznikov, M. Lyutikov), *Astrophys. J.* **852**, L30 (2018).
33. Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **45**, в печати (2019) [A.S. Pozanenko, et al. *Astron. Lett.* **45**, in press (2019)].
34. Рау и др. (A. Rau, A. von Kienlin, K. Hurley, G.G. Lichti), *Astron. Astrophys.* **438**, 1175 (2005).
35. Савченко и др. (V. Savchenko, C. Ferrigno, E. Kuulkers, A. Bazzano, E. Bozzo, S. Brandt, J. Chenevez, T.J.-L. Courvoisier, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L15 (2017).
36. 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).
37. Фенимор и др. (E.E. Fenimore, J.J. M. in't Zand, J.P. Norris, J.T. Bonnell, R.J. Nemiroff), *Astrophys. J.* **448**, L101 (1995).
38. Флетчер (C. Fletcher), *GCN* **24185** (2019).
39. Фоли и др. (S. Foley, S. McGlynn, L. Hanlon, S. McBreen, B. McBreen), *Astron. Astrophys.* **484**, 143 (2008).
40. Фоли и др. (S. Foley, S. McGlynn, L. Hanlon, S. McBreen, B. McBreen), *Sixth Huntsville Symposium "Gamma-Ray Bursts"*, *AIP Conf. Proc.* **1133**, 362 (2009).
41. Фредерикс и др. (D. Frederiks, D. Svinikin, A. Tsvetkova, R. Aptekar, S. Golenetskii, A. Kozlova, A. Lysenko, M. Ulanov), *Proc. the 12th INTEGRAL conference and 1st AHEAD Gamma-ray Workshop (Geneva, Switzerland, February 11–15, 2019, Ed. C. Ferrigno, E. Bozzo, P. von Balmoos; astro-ph:1907.00402)* (2019).

42. Цветкова и др. (A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii, A. Lyenko, P. Olyunik, V. Pal'shin, D. Svinkin, M. Ulanov, T. Cline, K. Hurley, R. Artekhar), *Astrophys. J.* **850**, 161 (2017).
43. Чело́векoв И.В., Гребенев С.А., Письма в Астрoн. журн. **33**, 903 (2007) [I.V. Chelovekov and S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **33**, 807 (2007)].
44. Чело́векoв И.В., Гребенев С.А., Письма в Астрoн. журн. **36**, 946 (2010) [I.V. Chelovekov and S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **36**, 895 (2010)].
45. Чело́векoв И.В., Гребенев С.А., Письма в Астрoн. журн. **37**, 651 (2011) [I.V. Chelovekov and S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **37**, 597 (2011)].
46. Чело́векoв И.В., Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Письма в Астрoн. журн. **32**, 508 (2006) [I.V. Chelovekov et al., *Astron. Lett.* **32**, 456 (2006)].
47. Чело́векoв и др. (I.V. Chelovekov, S.A. Grebenev, R.A. Sunyaev), in Proc. of the 6th INTEGRAL Workshop "The Obscured Universe" (eds. S. Grebenev, R. Sunyaev, C. Winkler), ESA SP-622, 445 (2007).
48. Чело́векoв И.В., Гребенев С.А., Мереминский И.А., Просветов А.В., Письма в Астрoн. журн. **43**, 859 (2017) [I.V. Chelovekov et al., *Astron. Lett.* **43**, 781 (2017)].