

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 520.8; 524.3; 52-732

Минаев Павел Юрьевич

**Исследование коротких транзиентных событий в
гамма-диапазоне по результатам космических
лабораторий INTEGRAL, Swift и Fermi.**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
к. ф.-м. н.
Позаненко Алексей Степанович

Москва – 2014

Содержание

Введение	5
Короткие транзистентные события астрофизического происхождения, на- блюдающиеся в гамма-диапазоне	5
Космические гамма-всплески	5
Источники мягкого повторного гамма-излучения (SGR)	8
Аномальные рентгеновские пульсары (АХР)	10
Актуальность исследования	11
Цель диссертационной работы	12
Научная новизна	12
Практическая значимость	14
Положения, выносимые на защиту	15
Публикации	16
Апробация работы	17
Личный вклад	21
Структура и объем диссертации	22
 Глава 1. Короткие гамма-всплески в эксперименте SPI-ACS IN- TEGRAL	 28
1.1. Проблема классификации гамма-всплесков и продленное излуче- ние коротких гамма-всплесков	28
1.2. Эксперимент SPI-ACS INTEGRAL	32
1.3. Каталог коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS INTE- GRAL, подтвержденных другими космическими экспериментами	33
1.4. Исследование кривых блеска коротких гамма-всплесков экспери- мента SPI-ACS INTEGRAL	39
1.5. Продленное излучение коротких гамма-всплесков	45

1.6.	Распределение гамма-всплесков по длительности	52
1.7.	„Сверхкороткие“ гамма-всплески	61
1.8.	Обсуждение и основные результаты	62
1.9.	Выводы главы	68

Глава 2. Поиск коротких гамма-транзиентов в эксперименте SPI

INTEGRAL	69
2.1. Обсерватория INTEGRAL	69
2.1.1. Гамма-телескоп IBIS	69
2.1.2. Гамма-телескоп SPI	70
2.1.3. Антисовпадательная защита SPI-ACS телескопа SPI . . .	71
2.2. Постановка задачи	71
2.3. Алгоритм отбора событий	72
2.4. Классификация обнаруженных событий	78
2.4.1. Флуктуации	78
2.4.2. Взаимодействие детекторов SPI с высокоэнергичными про- тонами	79
2.4.3. Взаимодействие детекторов SPI с пучками электронов . .	82
2.4.4. Спектральные линии 53 кэВ, 66 кэВ, 198 кэВ	87
2.4.5. Вспышки источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408	91
2.4.6. Кандидаты во вспышки источников SGR и AXP	94
2.4.7. Гамма-всплески, подтвержденные другими космическими экспериментами	96
2.4.8. Кандидаты в гамма-всплески	110
2.5. Обсуждение и основные результаты главы	114

Глава 3. Спектральная эволюция гамма-всплесков

3.1. Постановка задачи	118
----------------------------------	-----

3.2.	Методы исследования	121
3.3.	Обработка данных	122
3.4.	Обсуждение	135
3.5.	Выводы главы	140
Глава 4.	Индивидуальные исследования гамма-всплесков по дан-	
	ным различных экспериментов	141
4.1.	Гамма-всплеск GRB070912	141
4.1.1.	Введение	142
4.1.2.	Обработка данных	144
4.1.3.	Результаты	145
	Локализация	147
	Временной профиль	149
	Спектрально-временная задержка	154
	Спектр излучения	157
	Результаты эксперимента KONUS/WIND	162
4.1.4.	Обсуждение	164
4.2.	Гамма-всплеск GRB051008	172
4.2.1.	Исследование всплеска GRB051008 в гамма-диапазоне . .	173
	Заключение	181
	Литература	185

Введение

Короткие транзиентные события астрофизического происхождения, наблюдающиеся в гамма-диапазоне

Под короткими транзиентными событиями астрофизического происхождения, наблюдающимися в гамма-диапазоне, в данной работе подразумеваются события с длительностью 0.01 - 100 с, наблюдающиеся в энергетическом диапазоне (50, 1000) кэВ, которые связаны с такими астрофизическими источниками, как космические гамма-всплески, источники мягкого повторного гамма-излучения (SGR) и аномальные рентгеновские пульсары (AXP).

Космические гамма-всплески

Гамма-всплески – одни из самых мощных взрывов во Вселенной. Несмотря на то, что они активно исследуются уже почти полвека, их природа до сих пор до конца не выяснена.

В эпоху наземных астрономических наблюдений никто не предполагал о существовании гамма-всплесков, и они были открыты случайно американскими военными спутниками Vela в 1967 году, которые были запущены для контроля за соблюдением запрета на испытания ядерного оружия [1].

Одни из первых исследований гамма-всплесков в СССР проведены с помощью инструментов серии КОНУС, которые были установлены на межпланетных станциях „Венера 11-14“ и „Прогноз“ в 1978-83 гг. В них была обнаружена бимодальность гамма-всплесков по длительности. Около 160 источников гамма-всплесков было локализовано; оказалось, что они распределены на небесной сфере изотропно [2]. Также впервые зарегистрированы источники мягкого повторного гамма-излучения (SGR).

В 1991 году была запущена американская гамма-обсерватория имени Комптона (Compton Gamma-Ray Observatory, CGRO), на которой был размещен инструмент BATSE (Burst And Transient Search Experiment) [3], энергетический диапазон которого составлял (20, 2000) кэВ [4]. Он значительно увеличил базу данных о космических гамма-всплесках – за почти 9 лет непрерывной работы (с 1991 по 2000 гг.) было обнаружено более 2000 всплесков [5].

Одним из главных результатов, полученных с помощью эксперимента BATSE, стало подтверждение изотропии распределения гамма-всплесков на небесной сфере [6]. Совместно с видом распределения $\log N - \log S$ (N – количество всплесков с темпом счета в максимуме кривой блеска, превышающим значение S) это указывало на возможную космологическую природу их источников. Также по результатам эксперимента BATSE было подтверждено, что распределение гамма-всплесков по длительности бимодально [7] и предложен устойчивый параметр определения длительности T_{90} [8]. Оказалось, что длинные гамма-всплески имеют длительность $T_{90} > 2$ с и более мягкий спектр по сравнению с короткими [7, 9].

Кроме этого исследовалась структура кривых блеска гамма-всплесков. Часть всплесков состояли из одного или нескольких импульсов, имеющих так называемую FRED-форму – Fast Rise - Exponential Decay – быстрый рост и экспоненциальный спад [9–11]. Другие же всплески, наоборот, обладали значительной переменностью излучения и имели сложную структуру кривых блеска, не разделяющуюся на отдельные импульсы. Временные и спектральные профили различных гамма-всплесков, а также свойства их глобального распределения представлены в работе [12].

К середине 90-х годов было предложено более ста различных моделей источников гамма-всплесков [13]. В двух основных гипотезах предполагалось, что источники гамма-всплесков либо расположены в Галактическом гало, либо имеют космологическую природу (см. например [14]). Хотя изотропное распределе-

ние источников гамма-всплесков на небесной сфере и недостаток слабых событий указывали на космологическую природу гамма-всплесков, окончательным доказательством в пользу этой гипотезы стало открытие рентгеновского и оптического послесвечения. Космической обсерваторией ВерроSAX 28 февраля 1997 г. был зарегистрирован гамма-всплеск, для которого точность локализации на небесной сфере составила несколько угловых минут [15]. Это позволило провести оптические наблюдения, которые привели к открытию оптического послесвечения всплеска GRB970228 [16].

Важное открытие было сделано 8 мая 1997 года [17]. После вспышки в гамма-диапазоне рентгеновский телескоп спутника ВерроSAX обнаружил рентгеновское послесвечение [18]. Локализация с точностью нескольких угловых минут позволила наземным телескопам обнаружить затухающий со временем оптический источник [19]. Был получен спектр оптического источника, положение линий которого соответствовало космологическому красному смещению $z = 0.835$ [20]. Через 2 недели после регистрации гамма-всплеска на месте локализации его источника была обнаружена родительская галактика [21]. Открытие родительской галактики было еще одним свидетельством в пользу того, что источники гамма-всплесков находятся на космологических расстояниях.

В настоящее время гамма-всплески принято классифицировать на два типа, которые связаны с двумя различными прародителями. Первый тип – короткие гамма-всплески, связан, по-видимому, со слиянием компактных компонентов (нейтронных звезд, черных дыр) в двойной системе, вследствие чего этот класс гамма-всплесков также называют „mergers“ [22–26]. Большинство коротких гамма-всплесков имеют длительность T_{90} менее 2 с [7, 9]. Характерная величина длительности, отделяющей длинные всплески от коротких, зависит от спектрального диапазона [27], в котором проводятся исследования. Детальное рассмотрение феноменологических признаков коротких гамма-всплесков содержится в работе [28]. Однако в кривых блеска как некоторых индивидуальных со-

бытий, так и в суммарной кривой блеска группы событий, обнаружено продленное излучение, длительность которого составляет десятки секунд [27, 29–35]. Природа и модели продленного излучения обсуждаются, например, в работах [36, 37]. До сих пор не выяснено, является ли продленное излучение общим свойством всех коротких гамма-всплесков.

Второй тип гамма-всплесков – длинные всплески, вероятно, связаны с коллапсом ядер сверхмассивных звезд, поэтому данный класс также называют „collapsars“ [38–41]. В некоторых случаях длинный гамма-всплеск также сопровождается наблюдением Сверхновой типа Ib/c [42, 43], которую часто называют Гиперновой [39] вследствие очень высокой светимости, на порядки превышающей светимость типичных Сверхновых данного типа [44]. Длительность большинства событий этого класса существенно больше 2 с [7, 9].

Есть предположение, что существуют сверхкороткие гамма-всплески ($T_{90} < 0.1$ с), составляющие отдельный класс событий, наряду с выделяемыми в настоящее время длительными и короткими гамма-всплесками, и что источником сверхкоротких всплесков могло бы быть испарение первичных черных дыр в Галактике [45, 46].

Обзор теоретических моделей источников гамма-всплесков представлен в работах [47, 48].

Источники мягкого повторного гамма-излучения (SGR)

5 и 6 марта 1979 инструментом Конус, размещенном на космических аппаратах Венера-11 и Венера-12, были зарегистрированы две мощные вспышки гамма-излучения, принадлежащие одному источнику [49]. Первая вспышка также наблюдалась аппаратами Pioneer Venus Orbiter, Helios-B и ISEE-3 [50]. Локализация источника была проведена с помощью метода триангуляции. Источник оказался расположен в остатке сверхновой в Большом Магеллановом Облаке.

Он стал первым известным источником мягкого повторного гамма-излучения SGR 0525-66.

27 августа 1998 года наблюдался гигантский всплеск гамма-излучения от объекта SGR 1900+14 [51]. Инструментом GRBM на спутнике ВерроSAX на протяжении ~ 300 с были зарегистрированы осцилляции с периодом 5.16 с [52]. Несмотря на большое расстояние до этого источника, оцениваемое в 20000 световых лет, взрыв произвёл большой эффект на ионосферу Земли. В экспериментах ASCA и RXTE в рентгеновском диапазоне (2, 10) кэВ были обнаружены пульсации этого источника в спокойном состоянии с периодом 5.16 с [53–55].

27 декабря 2004 года наблюдался гигантский всплеск гамма-излучения от объекта SGR 1806-20 [56]. В кривой блеска этого события в рентгеновском диапазоне были найдены пульсации с частотами 18 Гц, 30 Гц и 92.5 Гц [57]. В радиодиапазоне с 6-го по 19-ый дни после вспышки найдена туманность, расширяющаяся со скоростью, равной почти четверти скорости света [58].

Большинство источников мягкого повторного гамма-излучения располагаются вблизи Галактической плоскости, но также известны источники, расположенные в близлежащих галактиках (например, в галактике M31 [59]). По сравнению с „классическими“ гамма-всплесками они являются повторными источниками, имеют более мягкий энергетический спектр, типичная длительность составляет 0.1-1 с. В настоящее время известно 10 источников мягкого повторного гамма-излучения и 3 кандидата [60].

Источники мягкого повторного гамма-излучения, вероятно, связаны с магнетарами - сильно намагниченными нейтронными звездами (величина магнитного поля на полюсе нейтронной звезды $B = 10^{14}$ - 10^{15} Гс), излучающими за счет диссипации магнитной энергии [61]. Однако недавно был открыт источник SGR0418+5729 с магнитным полем, не превышающим значение 7.5×10^{12} Гс [62], которое типично для обычных радиопульсаров. Таким образом, сильное магнитное поле, по-видимому, не является необходимым условием активности

одионочной изолированной нейтронной звезды.

В сценарии с магнетаром предполагается, что вспышки вызваны звездотрясениями, происходящими на поверхности твердой коры магнетара. Поскольку происходят колоссальные изменения силовых линий магнитного поля магнетара, кора вследствие этого деформируется, что зачастую приводит к колебаниям коры с образованием сейсмических волн, подобных тем, которые образуются во время землетрясений, и происходит вспышка гамма-излучения [63].

В работе [64] предложена альтернативная модель источников, в основе которой лежит аккреция вещества на молодую нейтронную звезду. В рамках данной модели нейтронная звезда не обязательно должна иметь сильное магнитное поле, характерное для магнетаров.

Аномальные рентгеновские пульсары (АХР)

Аномальные рентгеновские пульсары (Anomalous X-ray Pulsars, АХР) — источники пульсирующего рентгеновского излучения. Название „аномальные“ появилось в результате того, что долгое время не был ясен источник энергии, который используется одионочной нейтронной звездой для генерации рентгеновского излучения. Вращательной энергии, теряемой нейтронной звездой, не хватало для объяснения рентгеновской светимости, а признаков аккреции, которая могла бы дать необходимый источник энергии, у аномальных рентгеновских пульсаров не наблюдалось. В настоящее время считается, что аномальные рентгеновские пульсары, так же как и источники мягкого повторного гамма-излучения [65], являются одионочными нейтронными звездами с экстремально сильными магнитными полями (до 10^{15} Гс) — магнетарами.

В настоящее время известно 11 аномальных рентгеновских пульсаров и 2 кандидата [60]. Периоды пульсаций аномальных рентгеновских пульсаров лежат в пределах 2-12 с. Рентгеновская светимость составляет 10^{33} - 10^{35} эрг/с в

диапазоне 2-10 кэВ.

Предполагается, что природа источников мягкого повторного гамма-излучения (SGR) и аномальных рентгеновских пульсаров (АХР) одинакова, поэтому в настоящее время принято объединять их в один класс.

Актуальность исследования

Актуальной задачей современной астрофизики является исследование коротких транзиентных событий в гамма-диапазоне. Космические гамма-всплески - одни из самых интересных представителей этого класса явлений, прежде всего, потому, что являются наиболее мощными явлениями во Вселенной [22]. Несмотря на то, что с момента их открытия прошло более 50 лет [1], их природа до конца не выяснена. Предложено много теоретических моделей гамма-всплесков, однако ни одна из них не учитывает все наблюдаемые особенности этих явлений. Длительное время считалось, что распределение гамма-всплесков по длительности бимодально [2], и, как следствие, существует два типа гамма-всплесков - длинные [38, 39] и короткие [22, 23]. В последнее время эта классификация подвергается пересмотру, поскольку недавно были обнаружены так называемые короткие гамма-всплески с продленным излучением, которые по многим феноменологическим признакам напоминают короткие, но при этом имеют длительности, характерные для длинных гамма-всплесков [29, 35]. Таким образом, феноменологическое исследование и построение элементов модели гамма-всплесков различной природы является актуальной задачей современной астрофизики.

Цель диссертационной работы

Диссертация посвящена исследованию космических гамма-всплесков в гамма-диапазоне. В работе использовались данные космических обсерваторий INTEGRAL, Swift, Fermi. В рамках поставленной цели решены следующие задачи:

1. Составлен каталог коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL. Проведен поиск продленного излучения коротких всплесков из каталога и сделана оценка доли коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. Проведено сравнение с экспериментами IBIS/ISGRI/INTEGRAL, BAT/Swift, GBM/Fermi, RHESSI, BATSE, и другими.
2. Проведен поиск, классификация и исследование коротких гамма-событий в данных эксперимента SPI/INTEGRAL. Составлен каталог космических гамма-всплесков, а также вспышек источников повторного мягкого гамма-излучения и аномальных рентгеновских пульсаров по данным экспериментов SPI, SPI-ACS, IBIS/ISGRI. Проведены классификация событий и исследование гамма-всплесков из этого каталога.
3. Исследована спектральная эволюция гамма-всплесков. Разработан метод исследования и проведена интерпретация результатов, полученных с помощью данного метода.
4. Проведены комплексные исследования индивидуальных, наиболее интересных гамма-всплесков по данным различных экспериментов.

Научная новизна

- В настоящей работе впервые составлен каталог коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL, подтвержденных другими косми-

ческими экспериментами, зарегистрированных за период 2002-08 гг.

- Впервые проведен поиск продленного излучения у коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL.
- Впервые обнаружено продленное излучение коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL как в кривых блеска индивидуальных событий, так и в суммарной кривой блеска всех событий.
- Впервые проанализированы данные эксперимента SPI/INTEGRAL с целью поиска и исследования коротких транзиентных событий на временной шкале 0.001 - 100 с.
- Впервые проведена классификация и интерпретация коротких транзиентных событий, зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL.
- Впервые составлен каталог коротких гамма-транзиентов (гамма-всплесков, вспышек источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408) в эксперименте SPI/INTEGRAL.
- Усовершенствован метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, позволяющий количественно исследовать спектральную эволюцию.
- Впервые показано, что для всех гамма-всплесков (в том числе и коротких), зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL и состоящих из одного импульса, и для отдельных импульсов гамма-всплесков зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывается логарифмической функцией $lag \sim A \log(E)$, причем параметр A во всех случаях положителен. Это означает отсутствие отрицательной задержки отдельных импульсов гамма-всплесков.

- Впервые показано, что эволюция энергетического спектра гамма-всплесков от мягкого излучения к жесткому, а также отрицательное значение спектрально-временной задержки, могут быть следствием эффекта „нагромождения“, который возникает при анализе гамма-всплесков, состоящих из нескольких, перекрывающихся между собой, импульсов.

Практическая значимость

- Каталог коротких гамма-всплесков и кандидатов в короткие гамма-всплески эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL будет использован для поиска и подтверждения кандидатов при анализе данных GBM/Fermi и RHESSI.
- Методика поиска и классификации событий в данных эксперимента SPI/INTEGRAL может быть применена к исследованию данных других гамма-экспериментов, в частности, к данным эксперимента RHESSI, детекторы которого аналогичны детекторам гамма-спектрометра SPI, а также для дальнейшего анализа поступающих с обсерватории INTEGRAL данных.
- Каталог гамма-всплесков эксперимента SPI/INTEGRAL расширяет число исследованных событий, зарегистрированных обсерваторией INTEGRAL, в части количества, локализации и исследования спектров в диапазоне энергий 20 кэВ - 8 МэВ.
- Каталог гамма-всплесков, вспышек источников AXP 1E_1547.0-5408 и SGR 1806-20 эксперимента SPI INTEGRAL может быть использован для статистического анализа вспышечной активности источников.
- Разработанный метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков может быть применен для анализа данных любых транзиентных событий,

зарегистрированных гамма- и рентгеновскими телескопами, обладающими высокими временным и энергетическим разрешениями.

- Результаты исследования спектральной эволюции гамма-всплесков будут использованы для проверки теоретических моделей излучения гамма-всплесков (например, [66]).

Положения, выносимые на защиту

1. Обнаружение продленного излучения коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL в нескольких индивидуальных кривых блеска и в суммарной кривой.
2. Метод поиска и классификации событий в данных эксперимента SPI/INTEGRAL.
3. Каталог событий, связанных с космическими гамма-всплесками, вспышками источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL и подтвержденных другими экспериментами.
4. Каталог коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL, подтвержденных другими экспериментами.
5. Метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, основанный на кросс-корреляционном анализе кривых блеска в узких энергетических каналах.
6. Результаты исследования спектральной эволюции гамма-всплесков в эксперименте SPI INTEGRAL, показавшие, что для всплесков с простой временной структурой и для отдельных импульсов многоимпульсных событий зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывает-

ся логарифмической функцией $lag \sim A \log(E)$, причем параметр A всегда имеет положительное значение.

7. Эволюция энергетического спектра гамма-всплесков от мягкого излучения к жесткому может быть следствием эффекта „нагромождения“, который возникает при анализе гамма-всплесков со сложной спектрально-временной структурой.

Публикации

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. Минаев П. Ю., Позаненко А. С., Лозников В. М. **Письма в Астрономический журнал**, 36, 744 (2010); *Продленное излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL*;
2. Минаев П. Ю., Позаненко А. С., Лозников В. М. **Астрофизический Бюллетень**, 65, 343 (2010); *Короткие гамма-всплески в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL*;
3. Минаев П. Ю., Гребенев С. А., Позаненко А. С., Мольков С. В., Фредерикс Д. Д., Голенецкий С. В. **Письма в Астрономический журнал**, 38, 687 (2012); *GRB 070912 - необычный гамма-всплеск, зарегистрированный из направления на Галактический центр*
4. Минаев П. Ю., Позаненко А. С., Гребенев С. А., Мольков С. В. **Письма в Астрономический журнал**, 40, 271 (2014); *Каталог коротких гамма-транзиентов, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL*;
5. Volnova A. A., Pozanenko A. S., Gorosabel J., Perley D. A., Frederiks D. D., Kann D. A., Rumyantsev V. V., Biryukov V. V., Burkhonov O., Castro-Tirado

A. J., Ferrero P., Golenetskii S. V., Klose S., Loznikov V. M., Minaev P. Yu., Stecklum B., Svinkin D. S., Tsvetkova A. E., de Ugarte Postigo A., Ulanov M. V. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 442, 2586 (2014); *GRB 051008: A long, spectrally-hard dust-obscured GRB in a Lyman-Break Galaxy at $z \approx 2.8$* ;

В сборниках трудов конференций, препринтах и циркулярах:

1. Minaev P., Pozanenko A., Grebenev S., Molkov S., [Proceedings of „An INTEGRAL view of the high-energy sky \(the first 10 years\)” - 9th INTEGRAL Workshop and celebration of the 10th anniversary of the launch \(INTEGRAL 2012\)](#) id.127, *Investigation of the spectral lag - energy relation of GRBs registered by INTEGRAL*
2. Minaev P. Yu., Pozanenko A. S., Grebenev S. A., Molkov S. V. **EAS Publications Series**, 61, 75 (2013); *Gamma-ray bursts: the dependence of the spectral lag on the energy*;
3. Volnova A., Pozanenko A., Gorosabel J., Perley D., Kann D. A., Frederiks D., Rumyantsev V., Castro-Tirado A. J., Minaev P. **EAS Publications Series**, 61, 275 (2013); *A case study of dark GRB 051008*;
4. Minaev P. Yu., [arXiv:1304.0348](#), *Investigation of the spectral lag - energy relation of GRBs registered by INTEGRAL*;
5. Pozanenko A., Minaev P., Volnova A., GRB Coordinates Network, Circular Service, 14484, 1 (2013), *GRB 130427A: SPI-ACS/INTEGRAL observations*.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на конференциях:

1. Конференция молодых ученых „Фундаментальные и прикладные космические исследования“ (Москва, Россия), устный доклад: „*Продленное излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в ACS-SPI INTEGRAL*“, апрель 2008
2. Конференция „Physics of Neutron Stars - 2008“ (Санкт-Петербург, Россия), постер: „*Searching for signature of extended emission in short GRBs registered by SPI-ACS of INTEGRAL observatory*“, июнь 2008
3. Конференция „Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (Москва, Россия), постер: „*Продленное излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в SPI-ACS INTEGRAL*“, декабрь 2008
4. Конференция молодых ученых „Фундаментальные и прикладные космические исследования“ (Москва, Россия), устный доклад: „*Сверхкороткие космические гамма-всплески в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL*“, апрель 2009
5. Конференция „Astrophysics and Cosmology after Gamow: recent progress and new horizons“ (Одесса, Украина), постер: „*Extended emission in short gamma-ray bursts registered by SPI-ACS of INTEGRAL observatory*“, август 2009
6. Конференция „Many faces of GRB phenomena - optics vs high energy“ (Нижний Архыз, Россия), устный доклад: „*Extended emission in short gamma-ray bursts registered by SPI-ACS of INTEGRAL observatory*“, октябрь 2009
7. Конференция „Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (Москва, Россия), постер: „*Продленное излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL*“, декабрь 2009

8. „31-ая Всероссийская конференция по космическим лучам“ (Москва, Россия), устный доклад: *„Короткие гамма-всплески, их продленное излучение и оценки для испаряющихся первичных черных дыр“*, июль 2010
9. Конференция „Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (Москва, Россия), постер: *„Поиск транзиентных гамма-событий, зарегистрированных телескопом SPI обсерватории INTEGRAL“*, декабрь 2010
10. Конференция молодых ученых „Фундаментальные и прикладные космические исследования“ (Москва, Россия), устный доклад: *„Поиск транзиентных гамма-событий, зарегистрированных телескопом SPI обсерватории INTEGRAL“*, апрель 2011
11. „14-ая Российская гравитационная конференция – Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике“ (Ульяновск, Россия), устный доклад: *„Короткие гамма-всплески, их продленное излучение и оценки для испаряющихся первичных черных дыр“*, июнь 2011
12. Конференция „Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (Москва, Россия), постер: *„Исследование спектральной эволюции гамма-всплесков с помощью спектрально-временной диаграммы“*, декабрь 2011
13. Конференция молодых ученых „Фундаментальные и прикладные космические исследования“ (Москва, Россия), устный доклад: *„Особенности спектральной эволюции гамма-всплесков в гамма-диапазоне“*, апрель 2012
14. „IV Пулковская молодежная астрономическая конференция - 2012“ (Санкт-Петербург, Россия), устный доклад: *„Гамма-всплески: наблюдаемые свойства и модели источников. Спектральная эволюция гамма-всплесков“*, сентябрь 2012

15. Конференция „X-ray sky: from stars and black holes to cosmology. Science with eROSITA and ART-XC aboard Spectrum-RG“ (Казань, Россия), постер: „*Gamma-ray bursts: the dependence of the spectral lag on the energy*“, сентябрь 2012
16. Конференция „Fall 2012 Gamma-Ray Burst Symposium“ (Малага, Испания), постер: „*Gamma-ray bursts: the dependence of the spectral lag on the energy*“, октябрь 2012
17. Конференция „An INTEGRAL view of the high-energy sky (the first 10 years) 9th INTEGRAL Workshop“ (Париж, Франция), постер: „*Investigation of the spectral lag - energy relation of GRBs registered by INTEGRAL*“, октябрь 2012
18. Конференция „Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (Москва, Россия), постер: „*Спектральная эволюция гамма-всплесков в гамма-диапазоне*“, декабрь 2012
19. Конференция „Galaxies meet GRBs at Cabo de Gata“ (Лас Неграс, Испания), устный доклад: „*To the dichotomy of short gamma-ray bursts*“, сентябрь 2013
20. Конференция „Gamma-Ray Bursts: New Missions to New Science“ (Москва, Россия), устный доклад: „*GRB spectral evolution: from complex profile to basic structure*“ октябрь 2013
21. Конференция „Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013“ (Киото, Япония), устный доклад: „*GRB spectral evolution: from complex profile to basic structure*“, ноябрь 2013
22. Конференция „Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра“ (Москва,

Россия), устный доклад: „*Декомпозиция сложных кривых блеска и спектральная эволюция гамма-всплесков*“, декабрь 2013

23. Конференция молодых ученых „Фундаментальные и прикладные космические исследования“ (Москва, Россия), устный доклад: „*Каталог транзитных гамма-событий, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL*“, апрель 2014

24. Конференция „Gamma-Ray Bursts in the Multi-messenger Era“ (Париж, Франция), постер: „*Spectral evolution and pulse decomposition of Gamma-ray Burst light curves*“, июнь 2014

Личный вклад

Соискатель совместно с научным руководителем А. С. Позаненко разработал методику поиска и классификации коротких событий в эксперименте SPI INTEGRAL, методику анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, методику поиска продленного излучения коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. Соискателем самостоятельно был разработан пакет программ и выполнен анализ всех используемых в работе данных экспериментов SPI, SPI-ACS/INTEGRAL. Спектральный анализ данных эксперимента SPI выполнен с помощью программ XSPEC. Анализ данных экспериментов IBIS/ISGRI и JEM-X проводился совместно с С. А. Гребеневым (ИКИ РАН) и С. В. Мольковым (ИКИ РАН). Обсуждение, интерпретация полученных результатов - в равных долях с А. С. Позаненко. Написание текстов публикаций - совместно с А. С. Позаненко, за исключением статьи „GRB 070912 - необычный гамма-всплеск, зарегистрированный из направления на Галактический центр“, написанной совместно с С. А. Гребеневым и А. С. Позаненко, а также статьи „GRB 051008: A long, spectrally-hard dust-obscured GRB in a Lyman-Break Galaxy

at $z \approx 2.8$ “, написанной совместно с А. А. Вольновой (ИКИ РАН) и А. С. Позаненко.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 211 страниц, включая 57 рисунков, 17 таблиц. Библиография включает 225 наименования на 26 страницах.

Во **введении** приведен обзор литературы по рассматриваемой проблеме, обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Также сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту, и приведен список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена исследованию коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. В начале главы приводится описание феноменологической проблемы классификации гамма-всплесков, основанной на их длительности. Описан феномен продленного излучения, наблюдающегося у части коротких гамма-всплесков, который существенно осложняет их классификацию. Природа продленного излучения не выяснена, поэтому исследование коротких гамма-всплесков и продленного излучения является актуальной задачей исследований, которому посвящена остальная часть главы.

Составлен каталог подтвержденных другими космическими обсерваториями коротких гамма-всплесков (далее в тексте - „подтвержденные гамма-всплески“), зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL за период 2002--08гг. Приведено описание эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL. Помимо подтвержденных гамма-всплесков исследовались события, вероятно связанные с космическими гамма-всплесками (далее - „кандидаты в гамма-всплески“) из работы [67] и события, вероятно связанные с взаимодействием детекторов с заряжен-

ными частицами. У нескольких коротких всплесков (GRB031214 и GRB060221) обнаружено значимое продленное излучение. Продленное излучение также обнаружено в суммарных кривых блеска групп подтвержденных всплесков и кандидатов в гамма-всплески, что может свидетельствовать о том, что продленное излучение является общим свойством всех коротких гамма-всплесков, и что часть кандидатов в гамма-всплески - реальные гамма-всплески. В суммарной кривой блеска контрольной группы событий, связанных с взаимодействием детекторов с заряженными частицами, продленное излучение не обнаружено. Таким образом, доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS/INTEGRAL, значительно больше, чем считалось до сих пор, и может составлять от 30 до 45% всех гамма-всплесков, зарегистрированных в этом эксперименте.

В данной главе также проведено исследование распределений гамма-всплесков по длительности в экспериментах SPI-ACS/INTEGRAL, Swift, BATSE, и других. Как и следовало ожидать, доля коротких, более жестких гамма-всплесков растет с увеличением нижнего энергетического порога срабатывания детекторов.

При исследовании распределения длительностей и продленного излучения коротких гамма-всплесков SPI-ACS/INTEGRAL не получено убедительных свидетельств в пользу существования отдельного класса сверхкоротких гамма-всплесков.

Глава 2 посвящена поиску и исследованию гамма-всплесков, а также других транзиентных гамма-событий, в данных эксперимента SPI/INTEGRAL. В 1-ой главе было показано, что доля коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL может составлять до 45% от всех гамма-всплесков в этом эксперименте. В то же время доля коротких гамма-всплесков в эксперименте IBIS/ISGRI, также размещенном на обсерватории INTEGRAL, составляет всего 10%. Иными словами, в эксперименте SPI-ACS наблюдается избыток, а в

эксперименте IBIS/ISGRI - недостаток коротких гамма-всплесков. На обсерватории INTEGRAL размещен еще один гамма-телескоп - спектрометр SPI. Система автоматического отбора событий IBAS используется только для анализа данных инструментов IBIS/ISGRI и SPI-ACS. Поэтому в данных эксперимента SPI/INTEGRAL могут присутствовать неидентифицированные гамма-события. Спектрометр SPI более чувствителен к жесткому гамма-излучению (по сравнению с IBIS/ISGRI), которое наблюдается от коротких гамма-всплесков. Таким образом, основная цель данной главы - поиск коротких гамма-всплесков в данных эксперимента SPI/INTEGRAL. Помимо коротких гамма-всплесков, в работе также проводился поиск других коротких транзиентных явлений, таких, как длинные гамма-всплески, источники мягкого повторного гамма-излучения, аномальные рентгеновские пульсары.

В данной главе приведено краткое описание обсерватории INTEGRAL и размещенных на ней экспериментов SPI, SPI-ACS, IBIS/ISGRI. В главе описан разработанный метод поиска событий в архивных данных эксперимента SPI/INTEGRAL на масштабах времени 0.001 - 10 сек с различными порогами значимости. Данный метод применен к данным эксперимента SPI, охватывающих период с 12 июля 2003 года по 23 января 2010 года (91-888 витки обсерватории).

На основе наблюдательных свойств обнаруженных алгоритмом событий (длительность, жесткость спектра, распределение отсчетов по детекторам, и др.) построена классификация событий. Обнаружено три типа взаимодействий детекторов с заряженными частицами, связанных, предположительно, с высокоэнергичными протонами, пучками электронов магнитосферы Земли, а также с высокоэнергичными частицами Галактических космических лучей. Составлен каталог, состоящий из 48, 223 и 23 событий, связанных с космическими гамма-всплесками, вспышками источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408, соответственно, зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL и подтвер-

жденных другими экспериментами.

В **Главе 3** проведено исследование спектральной эволюции 28 ярких гамма-всплесков по данным экспериментов SPI и IBIS/ISGRI. Помимо длительности и жесткости спектра в исследованиях гамма-всплесков применяется параметр, характеризующий эволюцию спектра - спектрально-временная задержка (лаг). Лаг представляет собой смещение по времени профилей кривых блеска в различных энергетических каналах и считается положительным, если временной профиль в более мягких энергетических каналах „запаздывает“ относительно профиля в жестких каналах. Предложено несколько теоретических моделей спектральной эволюции гамма-всплесков, однако ввиду сильного различия ее характера для отдельных гамма-всплесков, ни одна из них не может удовлетворительно описать наблюдательные данные любого гамма-всплеска. Главная цель главы - провести детальное исследование спектральной эволюции гамма-всплесков и объяснить различные наблюдательные особенности этого явления.

Впервые предложен метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, основанный на кросс-корреляционном анализе кривых блеска в большом числе узких энергетических каналов, который позволяет исследовать спектральную эволюцию количественно. Показано, что для всплесков с простой временной структурой и для отдельных импульсов многоимпульсных событий зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывается логарифмической функцией $lag \sim A \log(E)$, причем параметр A (индекс задержки) всегда имеет положительное значение.

Обнаружена корреляция между индексом задержки и длительностью импульса, причем зависимость одинакова для исследованных коротких и длинных гамма-всплесков, что, по-видимому, может свидетельствовать о едином механизме излучения. Однако для подтверждения последнего предположения требуется исследование большего числа коротких всплесков.

Описана предложенная нами модель, объясняющая эволюцию энергетиче-

ского спектра гамма-всплесков от мягкого к жесткому эффектом „нагромождения“ - наложения отдельных импульсов, составляющих гамма-всплеск, друг на друга.

Проведенные исследования спектральной эволюции гамма-всплесков позволяют значительно упростить существующую неоднозначность в характере спектральной эволюции, проявляющуюся при исследовании гамма-всплесков со сложной структурой кривой блеска, и тем самым позволяют сделать ограничения на модели спектральной эволюции. Показано, что спектральная эволюция отдельных импульсов гамма-всплесков, в том числе и коротких, носит универсальный характер.

Глава 4 посвящена исследованию двух гамма-всплесков: GRB070912 и GRB051008.

Гамма-всплеск GRB070912 был обнаружен в данных эксперимента SPI/INTEGRAL, и также зарегистрирован в поле зрения телескопов IBIS/ISGRI и JEM-X. GRB070912 - один из немногих гамма-всплесков, для которых удалось получить широкополосный (3 кэВ - 8 МэВ) спектр рентгеновского и гамма-излучения во время его активной фазы и проследить спектральную эволюцию. В первые секунды после начала всплеска его спектр имел степенной вид с фотонным индексом 0.8, но отличался заметным дефицитом фотонов на энергиях ниже 20 кэВ. Спектральная эволюция этого всплеска подчиняется закону $lag \sim A \log(E)$ в широком диапазоне энергий (3 кэВ - 8 МэВ). Спектр на затухающей стадии хорошо описывался чернотельным законом, что позволяет оценить максимальное расстояние (красное смещение) до источника всплеска.

Гамма-всплеск GRB051008 обнаружен в данных эксперимента BAT/Swift и зарегистрирован также в экспериментах XRT/Swift, KONUS/WIND, SPI-ACS/INTEGRAL в рентгеновском и гамма-диапазоне. Всплеск не имел ни оптического, ни радио послесвечения - оптический компонент не был обнаружен вплоть до 23.3 зв. вел. через полчаса после начала всплеска, что позволило отнести этот гамма-

всплеск к классу оптически тёмных гамма-всплесков. В главе описаны исследования этого гамма-всплеска в гамма- и рентгеновском диапазонах. В данных эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL обнаружено продленное излучение длительностью 800 сек. С помощью данных эксперимента KONUS/WIND сделан пересчет данных эксперимента SPI-ACS в энергетические единицы, что позволило построить максимально детальную кривую блеска этого всплеска в энергетическом диапазоне (15, 50) кэВ, которую можно аппроксимировать степенным законом с изломом. Положение излома кривой блеска на временной шкале дает возможность оценить угол раствора конуса джета источника гамма-всплеска, полная ширина которого составила $\sim 4^\circ$. Показано, что всплеск принадлежит к классу всплесков с рентгеновской кривой блеска, не содержащей фазы плато. По данным эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL также была исследована кривая блеска главного эпизода всплеска GRB051008. Показано, что она состоит как минимум из 10 отдельных импульсов. Именно сложная структура кривой блеска этого всплеска может быть причиной отсутствия спектрального лага для всего события.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации.

Глава 1

Короткие гамма-всплески в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL

В этой Главе описывается каталог коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS INTEGRAL, подтвержденных другими космическими обсерваториями, а также анализ кривых блеска событий из сформированной выборки. Проведен поиск продленного излучения как в кривых блеска индивидуальных коротких всплесков, так и в суммарных кривых блеска нескольких групп событий. Также проведено исследование распределения гамма-всплесков по длительности по данным эксперимента SPI-ACS и других космических телескопов.

1.1. Проблема классификации гамма-всплесков и продленное излучение коротких гамма-всплесков

Бимодальность в распределении длительностей гамма-всплесков была открыта в серии экспериментов Konus [2] и впоследствии подтверждена на большем статистическом материале по данным эксперимента BATSE [7], где был предложен устойчивый параметр длительности гамма-всплеска T_{90} (см. раздел 1.4). Длинные гамма-всплески имеют длительность $T_{90} > 2$ с. Значение параметра T_{90} , разделяющего группы гамма-всплесков, может зависеть от эксперимента ($T_{90} > 2$ с используется в эксперименте BATSE). Длинные гамма-всплески имеют более мягкий спектр по сравнению с короткими (максимум в энергетическом спектре νF_ν смещен в область низких частот); также они обладают значимой спектральной временной задержкой - временной профилей в более мягких энергетических каналах „запаздывает“ относительно профиля в жестких каналах. Считается, что длинные гамма-всплески связаны с коллапсом массивных звезд

[38–41]. Короткие гамма-всплески могут быть связаны со слиянием компактных объектов (нейтронных звезд или черных дыр) в двойных системах [22–26]. Это подтверждается отсутствием наблюдательных признаков сверхновой в кривой блеска оптического послесвечения коротких гамма-всплесков. Также есть предположение, что существуют сверхкороткие гамма-всплески ($T_{90} < 0.1$ с), составляющие отдельный класс событий, наряду с выделяемыми в настоящее время длинными и короткими гамма-всплесками, и что источником сверхкоротких всплесков могло бы быть испарение первичных черных дыр в Галактике [45, 46].

Очевидно, что класс коротких гамма-всплесков сильнее подвержен эффектам селекции вследствие меньшей длительности и более жесткого энергетического спектра события. Поскольку, чем короче гамма-всплеск, тем большей интенсивности он должен быть для того, чтобы быть зарегистрированным на фиксированном временном интервале, превышающем длительность всплеска. С другой стороны, эффективность регистрации фотонов уменьшается с увеличением их энергии для большинства детекторов, используемых для регистрации гамма-всплесков.

В 2009-ом году был зарегистрирован один из самых далеких гамма-всплесков - GRB090423, красное смещение которого составляет $z \sim 8.2$, длительность в системе отсчета наблюдателя $T_{90} = 10.3$ с, однако, в системе отсчета, связанной с источником гамма-всплеска, $T_{90} = 1.1$ с. Не известно, какому классу следует отнести это событие - к длинным или коротким всплескам, поскольку значительное энерговыделение (10^{53} эрг) этого события характерно для длинных всплесков. К сожалению, не всегда удается получить какую-либо дополнительную информацию (энергетический спектр, красное смещение источника, и т.п.) о конкретном событии помимо его длительности T_{90} . Поэтому существует неопределенность при выборе модели конкретного события только лишь на основании значения длительности T_{90} в системе отсчета наблюдателя. Одна из серьезных проблем отождествления короткого события с гамма-всплеском связана с существовани-

ем источников повторного мягкого гамма-излучения, кривые блеска которых очень похожи на кривые блеска гамма-всплесков [59].

В экспериментах BATSE [29, 30], Konus [31], ВерроSAX [32] в усредненной кривой блеска коротких гамма-всплесков было найдено продленное излучение (возможно, послесвечение) в мягком гамма-диапазоне ($>25\text{--}50$ кэВ) длительностью более 30 с (таблица 1.1). Продленное излучение с длительностью десятки секунд также найдено в кривых блеска некоторых индивидуальных коротких гамма-всплесков ($T_{90} < 2$ с) в экспериментах Swift, BATSE, HETE-2, Konus [68, 69], причем, найденное в этих экспериментах продленное излучение имеет более мягкий спектр по отношению к главному короткому эпизоду, который по своим спектральным свойствам аналогичен коротким всплескам. В кривых блеска нескольких событий с продленным излучением спектральная задержка присутствует, такие гамма-всплески можно отнести к классу длинных всплесков, однако в кривых блеска большинства „коротких“ гамма-всплесков с продленным излучением спектральная задержка не наблюдается, как, например, в случае гамма-всплеска GRB060614 [35]: длительность T_{90} в диапазоне 15-350 кэВ составляет 102 с (Рис. 1.1); на месте всплеска GRB060614 не было найдено признака сверхновой, несмотря на то, что расстояние его источника невелико ($z=0.125$, что соответствует фотометрическому расстоянию 589.1 Мпк; здесь и далее используем модель Вселенной с параметрами $\Omega_M=0.286$, $\Omega_{vac}=0.714$, $H_0=69.6$ (км/с)/Мпк). Кривая блеска этого события состоит из короткого жесткого эпизода с длительностью менее 5 с и более мягкого излучения длительностью ~ 100 с (Рис. 1.1). Спектральная задержка в кривой блеска отсутствует. Так длинный этот гамма-всплеск или все же короткий? Является ли продленное излучение общим свойством коротких гамма-всплесков? Какова физика продленного излучения - является ли это излучение продолжением активности „центральной машины“ или это начало рентгеновского послесвечения? Эта глава посвящена попытке ответить на эти вопросы с помощью иссле-

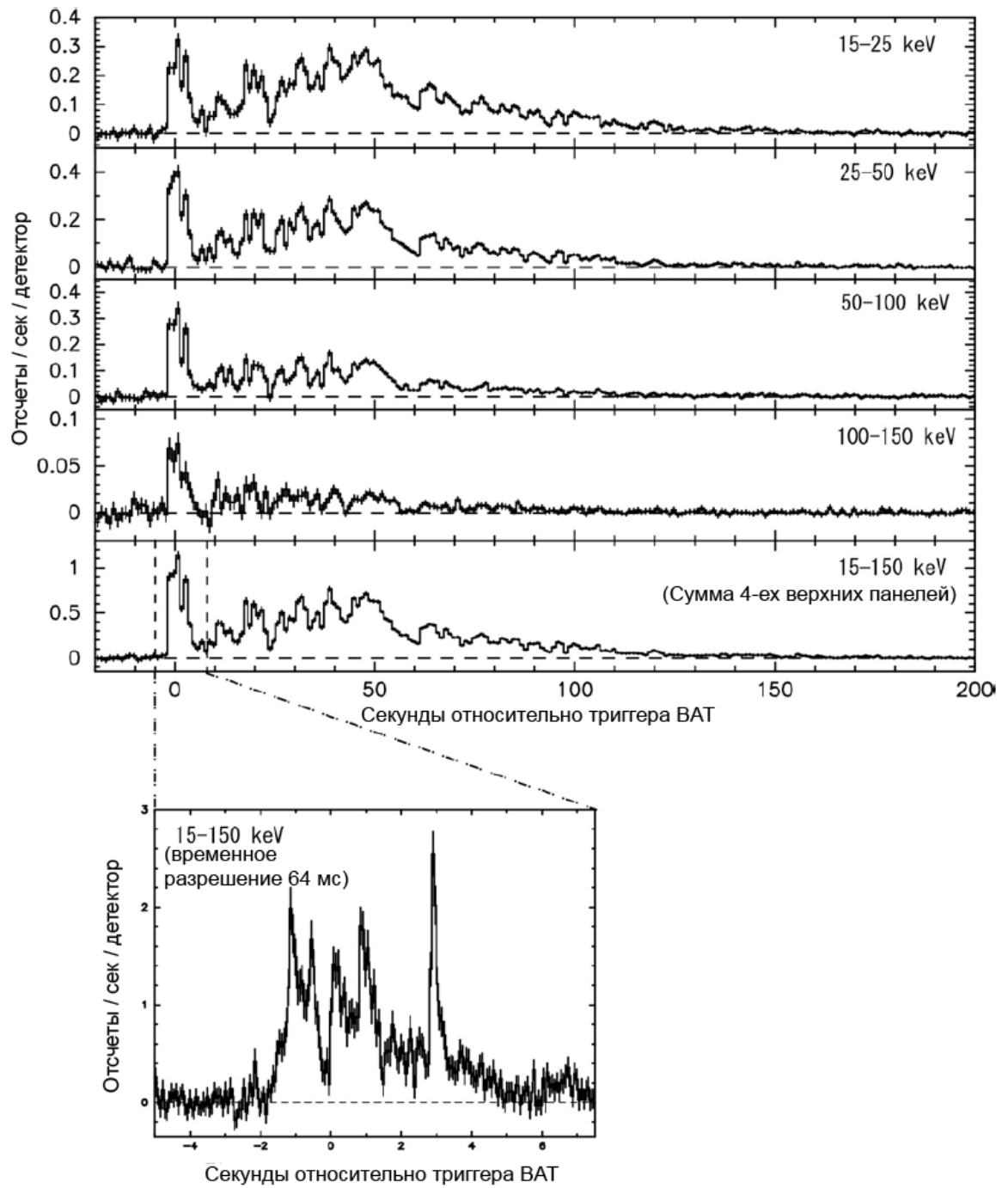


Рис. 1.1. Кривая блеска GRB060614 по данным эксперимента BAT/Swift в различных энергетических каналах (вверху) и кривая блеска короткого начального эпизода с временным разрешением 64 мс (внизу). Из работы [35].

дования коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в более жестком энергетическом диапазоне (>80 кэВ) по отношению к предыдущим исследованиям продленного излучения с помощью антисовпадательной защиты (ACS) спектрометра SPI обсерватории INTEGRAL. Составлен каталог подтвержденных коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL за период 2002-07 гг., который в части коротких гамма-всплесков дополняет и расширяет каталог [67], содержащий данные за 2002-05гг.

Таблица 1.1. Продленное излучение в усредненной кривой блеска коротких гамма-всплесков

Эксперимент	Диапазон энергий, кэВ	Число исслед. GRBs	Длительность излучения, с
BATSE	25-110	76	100 [30]
BATSE	50-300	100	100 [29]
Konus	10-750	125	100 [31]
BeppoSAX	40-700	93	30[32]
INTEGRAL	> 80	53	25 ¹
INTEGRAL	> 80	43	125 ²

¹ - Данная работа, первая группа событий

² - Данная работа, третья группа событий

1.2. Эксперимент SPI-ACS INTEGRAL

Для увеличения чувствительности телескопа SPI за счет устранения фона, связанного с взаимодействием аппаратуры с космическими лучами, используется антисовпадательная защита SPI-ACS, состоящая из 91 кристалла германата висмута (BGO) с максимальной эффективной площадью около 0.3 м^2 [70] (Рис. 1.2). Каждый BGO-кристалл просматривается двумя фотоумножителями (ФЭУ), и отсчеты со всех ФЭУ регистрируются в едином канале. SPI-ACS

регистрирует фотоны почти со всех направлений. Наименее чувствительным является направление, совпадающее с полем зрения телескопа SPI, которое составляет 30° . SPI-ACS имеет нижний порог чувствительности ~ 80 кэВ - физические свойства отдельных сборок BGO (детектор + ФЭУ + дискриминатор) немного отличаются и поэтому имеют различные нижние энергетические пороги: от 60 до 120 кэВ; верхний порог составляет ~ 10 МэВ. Временное разрешение SPI-ACS - 50 мс [70]. Для анализа данных SPI-ACS используется система IBAS (INTEGRAL Burst Alert System; [71]). Программно-реализованный алгоритм IBAS выделяет события на 9 различных временных масштабах (0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1, 2 и 5 с) при условии, что значимость события по отношению к среднему значению фона составляет 9, 6, 9, 6, 9, 6, 9 и 6σ , соответственно. Кривые блеска выделенных этим алгоритмом событий (содержащие данные от -5 с до 100 с относительно времени срабатывания) являются общедоступными [72]. Система IBAS также используется при автоматическом анализе данных эксперимента IBIS/ISGRI, однако система IBAS не используется совместно со спектрометром SPI.

1.3. Каталог коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS INTEGRAL, подтвержденных другими космическими экспериментами

Здесь и далее под термином „гамма-всплеск, подтвержденный другими космическими экспериментами“ подразумевается событие, также обнаруженное в данных, как минимум, еще одного космического эксперимента, и классифицированное в этом эксперименте как космический гамма-всплеск. Обнаружение конкретного события в данных другого эксперимента исключает связь с событиями, вызванными, к примеру, взаимодействием детекторов телескопа с заря-

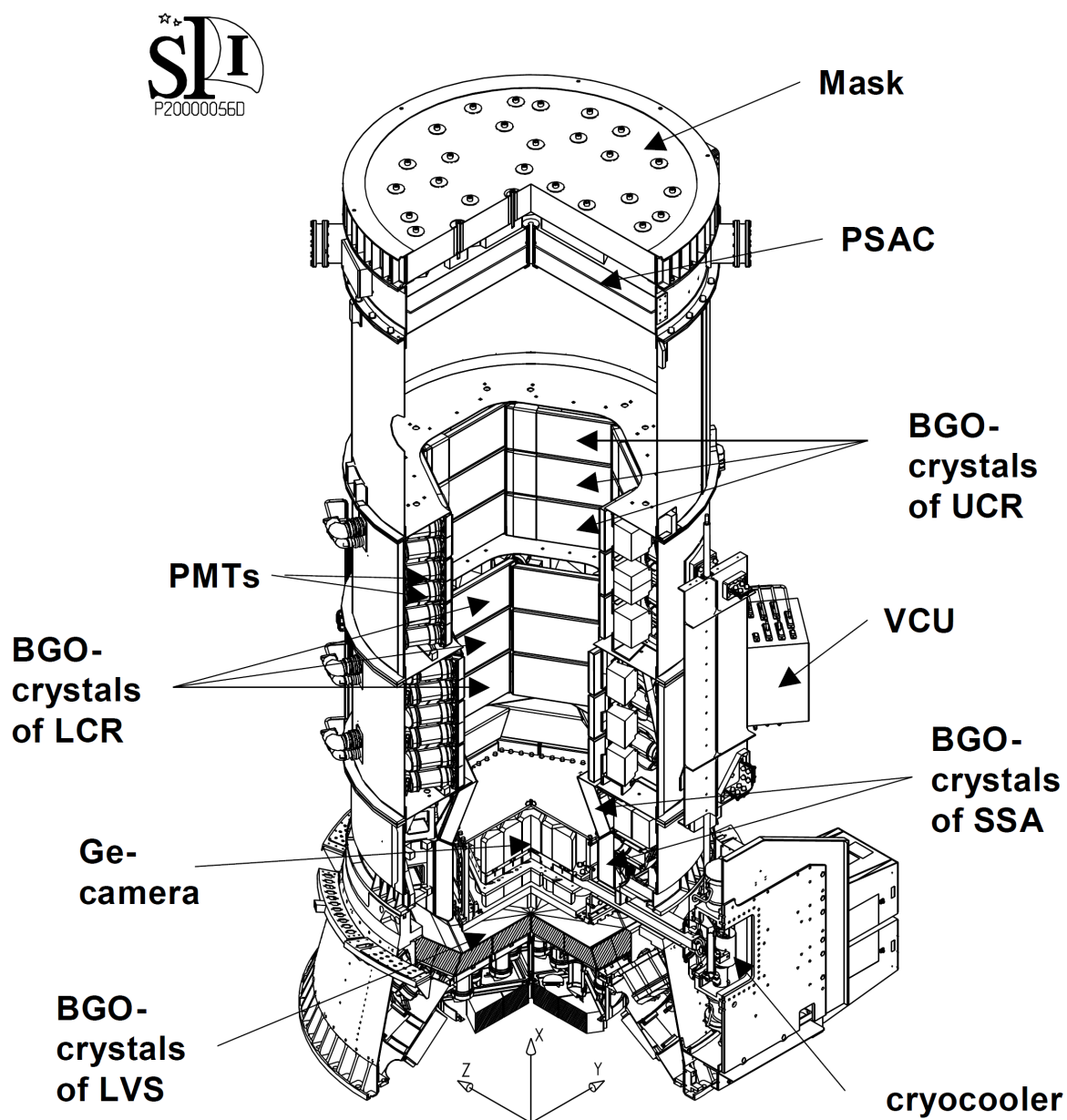


Рис. 1.2. Спектрометр SPI/INTEGRAL и антисовпадательная защита SPI-ACS/INTEGRAL.

женными частицами.

Для создания каталога коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL и подтвержденных другими космическими обсерваториями, частично использовался каталог [67], который содержит данные о подтвержденных другими обсерваториями гамма-всплесках: дата и время (UTC) события, значимость, длительность события T_{90} , интегральный поток, максимальный поток на шкале 0.25 с, параметр $V/V_{\max}$ [73]. Помимо данных о подтвержденных гамма-всплесках, в этом каталоге содержится информация о неподтвержденных событиях, являющихся кандидатами в гамма-всплески. Такие события отбирались по следующему алгоритму:

- каждое событие, выделенное автоматической системой отбора событий IBAS, проверялось на совпадение с экспериментами IREM (INTEGRAL Radiation Monitor [74]) и GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites [75]), чтобы исключить события, относящиеся к результатам взаимодействия SPI-ACS с потоками заряженных частиц;
- исключались источники мягкого повторного гамма-излучения (SGR);
- значимость события должна превышать порог в 12σ в исходном временном разрешении SPI-ACS - 0.05 с.

Таким образом, каталог [67] содержит данные о 388 событиях, зарегистрированных за период с 27.11.02 по 12.01.05, среди которых лишь 179 событий являются подтвержденными гамма-всплесками. Наибольший вклад ($\sim 40\%$) в группу неподтвержденных коротких событий вносят события с длительностью $T_{90} \leq 0.05$ с (0.05 с - временное разрешение SPI-ACS). Подробнее эта группа событий описана в разделах 1.4 и 1.8.

Нами составлен каталог подтвержденных другими космическими обсерваториями коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL за период с 27.11.02 по 23.01.08 (таблица 1.2). Источники подтверждений: электронный каталог GRBlog [76], являющийся полной компиляцией

циркуляров GCN [77] и телеграмм IAU, и мастер-каталог [78], поддерживаемый К. Hurley.

Таблица 1.2. Каталог подтвержденных коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL

GRB	Время срабат., UT	T_{90} , с	C_{max} , 10^3 отсч.	Подтверждение, T_{90} , с ¹	Комментарии
030101	20:43:32	0.7 ± 0.1	1.9 ± 0.1	u (1 [79] ²), h, k	+
030105	14:34:12	$1.2 \pm 0.15^{**}$	3.7 ± 0.1	m, k, r (1.23)	+
030109	9:37:37	0.35 ± 0.1	0.6 ± 0.1	u	+
030110	9:39:28	0.1 ± 0.05	1.3 ± 0.1	k	+ пер. ³ (от 130с) ⁴
030117	17:36:14	0.15 ± 0.05	3.7 ± 0.1	k	+
030217	23:31:42	0.35 ± 0.05	4.1 ± 0.1	m	+
030325	14:15:11	2 ± 0.15	2 ± 0.1	u (2 [80]), k, m	+
030523	14:10:52	0.15 ± 0.05	1 ± 0.1	k, r (0.12)	+
030607	2:19:21	0.1 ± 0.05		k	пер.
030629	3:26:39	0.15 ± 0.05	3.1 ± 0.1	k	+ пер. (до -95с)
030711	0:04:01	0.25 ± 0.05		m	пер.
030717	20:49:24	0.05 ± 0.05	4.1 ± 0.1	u (0.06 [81])	пл. фон ⁵
030916	21:59:18	0.65 ± 0.1	1 ± 0.1	k	+
030926	16:52:27	0.2 ± 0.05	0.6 ± 0.1	r (0.28), h, m, k	+
030929	14:27:14	0.45 ± 0.05		k	пер.
031026	1:26:29	0.25 ± 0.05	2.3 ± 0.1	m, k	+
031208	1:18:28	2.0 ± 0.5		k	пер.
031210	11:51:06	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1	k	+
031214	10:10:50	0.3 ± 0.05	59.9 ± 0.4	k (0.3 [82]), m	пр. изл. ⁶
040202	13:29:52	0.4 ± 0.05	2 ± 0.1	u	+
040312	0:02:35	0.3 ± 0.1	2.9 ± 0.1	k, r (0.16)	+
040322	7:29:02	0.1 ± 0.05		k (0.19 [83]), m	пер.
040324	10:21:10	0.2 ± 0.05	11.7 ± 0.2	k, r (0.26)	+
040329	11:10:49	2 ± 0.05	14.3 ± 0.2	k, r (2.07)	+
040417	8:05:09	1.25 ± 0.1	0.4 ± 0.1	k	+
040802	18:02:20	1.1 ± 0.3	0.5 ± 0.1	h, m, k	+

GRB	Время срабат., УТ	T_{90} , с	C_{max} , 10^3 отсч.	Подтверждение, T_{90} , с ¹	Комментарии
040822	21:21:53	0.55 ± 0.1	0.9 ± 0.1	k, r (1.38)	+
041013	22:56:26	0.35 ± 0.05	2.2 ± 0.1	m, k, r (0.36)	+
041116	14:42:41	1.1 ± 0.15	1 ± 0.1	h, k (0.5 [83])	+
041213	6:59:36	0.1 ± 0.05	2.9 ± 0.1	k, r (0.14)	+ пер. (от 100с)
050111	6:52:26	0.1 ± 0.1	0.9 ± 0.1	k, h	+
050112	11:10:23	0.45 ± 0.05	17.9 ± 0.2	k (0.52 [84]), h	+
050212	21:24:12	0.2 ± 0.05	6.9 ± 0.2	k	+
050216	7:26:34	0.3 ± 0.05	2.9 ± 0.1	r (0.5), k	+
050328	3:25:14	0.45 [r]		k, r (0.45)	пер.
050409	1:18:35	1.15 ± 0.1	10.6 ± 0.2	m, k, r (1.26)	+
050502	19:56:55	1.05 ± 0.05	0.4 ± 0.1	r (1.6)	+ пер. (от 185с)
050513	4:39:59	0.8 ± 0.1	1.3 ± 0.1	k, m, mes	+
050724	12:34:09	0.75 ± 0.15	0.9 ± 0.1	k, s (0.25 [85])	+
050805	13:29:47	0.45 ± 0.05	2.8 ± 0.1	r (1.05), k, m	+
050809	20:15:24	1.35 ± 0.15	1.5 ± 0.1	r (2.4), k, m	+
050821	10:55:41	0.2 ± 0.05	1.9 ± 0.1	k, sz (2)	+
051016	5:19:37	$1.05 \pm 0.05^*$		k	пер.
051107	2:30:41	1.75 [k]		k (1.75 [86]), s ⁷ , sz (5)	пер.
051221	1:51:15	0.25 ± 0.05	9.1 ± 0.2	m, r (0.28), s (1.40), sz (0.5)	+
060103	8:42:47	0.9 ± 0.1	0.8 ± 0.1	m, k	+
060126	9:30:04	0.15 ± 0.05	1.9 ± 0.1	h, r	+
060130	6:10:52	0.41 [sz]		k, r, sz (0.41)	пл. фон
060221	21:14:58	0.2 ± 0.15	0.8 ± 0.1	sz (0.75)	пр. изл.
060303	22:42:47	0.35 ± 0.05	9.5 ± 0.2	k, s ⁷ , sz (0.38), r (0.5)	+
060306	15:22:39	0.85 ± 0.05	64.1 ± 0.4	k, r (0.92), s ⁷	+ пер. (до -90с)
060312	6:17:20	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.1	r (0.24), s ⁷ , sz (3)	+
060313	0:12:06	0.7 ± 0.05	6.4 ± 0.2	m, k (0.8 [87]), s (0.74)	+
060425	16:57:37	0.19 [sz]		s ⁷ , sz (0.19), r (0.14), k	пер.
060427	23:51:55	0.2 [k]		m, k (0.2 [88]), s ⁷	пер.
060429	12:19:51	0.1 ± 0.05	11.9 ± 0.2	m, k, r (0.2), sz (0.13)	+
060601	7:55:39	0.5 [sz]		sz (0.5)	пер.
060610	11:22:24	0.65 ± 0.05	2 ± 0.1	m, k, r (0.6), sz (0.69)	+
060823	8:05:33	1.05 ± 0.05	0.7 ± 0.1	sz (2), r (1.0)	+
060912	18:31:01	0.5 [sz]		sz (0.5)	н/д ⁸

GRB	Время срабат., UT	T_{90} , с	C_{max} , 10^3 отсч.	Подтверждение, T_{90} , с ¹	Комментарии
060916	14:33:34	0.13 [sz]		sz (0.13)	н/д
061001	21:14:28	$0.85 \pm 0.65^*$		s ⁷	н/д
061003	12:14:20	$0.85 \pm 0.05^*$		k, s ⁷	н/д
061006	16:45:28	0.45 ± 0.05	2.2 ± 0.1	k, r (0.4), s (129.9) ⁹ , sz (0.44)	+
061006	8:43:36	1.65 ± 0.05	2 ± 0.1	m, k, r (1.65), s ⁷ , sz (1.6)	+
061014	6:17:02	1 ± 0.05	2.1 ± 0.1	r (0.2), sz (1.2)	+
061021	18:29:24	1.1 ± 0.1	0.5 ± 0.1	k	+
070113	11:56:23	0.27 [r]		k, r (0.27), sz (0.23)	н/д
070129	22:09:25	0.22 [sz]		k, s ⁷ , sz (0.22)	н/д
070203	23:06:44	0.69 [sz]		sz (0.69)	н/д
070321	18:52:15	0.4 ± 0.05	0.7 ± 0.1	sz (0.34), s ⁷ , k, m	+
070413	20:37:55	0.19 [sz]		sz (0.19)	н/д
070516	20:41:24	0.35 [r]		k, r (0.35), s ⁷ , mes, sz (1)	н/д
070713	13:08:37	$0.55 \pm 0.2^*$		k, s ⁷	н/д
070721	14:24:09	$0.9 \pm 0.25^*$		m, k	н/д
070915	8:34:48	$0.65 \pm 0.05^*$		k, s ⁷ , mes	н/д
070921	9:47:54	$1.25 \pm 0.50^*$		sz (2.7)	н/д
070927	22:25:20	0.8 ± 0.3	0.5 ± 0.1	m	+
070927	16:27:55	0.25 ± 0.15	1.4 ± 0.1	r, s ⁷ , mes, sz	+
071112	18:23:31	1 [s]		s (1 [89]), sz (1)	н/д
071227	20:13:47	1.8 [s]		k, s (1.8 [90]), sz	н/д
080121	21:29:55	0.7 [s]		s (0.7 [91])	н/д
080123	4:21:57	0.4 [sz]		k, s, sz (0.4 [92])	н/д

* - значения получены по публичным данным от IBAS, т.е. в диапазоне [-5; 100] с относительно времени срабатывания.

** - в работе [93] длительность этого всплеска указана 13 с. В других источниках длительность всплеска равна 0.9 [67] и 1.3 [94]. В стандартном анализе, проведенном в этой работе, мы не обнаружили значимого продленного излучения в энергетическом диапазоне SPI-ACS. Совместный анализ длительности и жесткости данного всплеска в эксперименте RHESSI [94] позволяет классифицировать его как короткий/жесткий всплеск с возможным наличием продленного излучения.

+ - используется в усредненной кривой блеска.

¹ - обсерватории, также зарегистрировавшие данное событие: u - Ulysses, h - HETE-2, k - Konus, s - Swift, mes - Messenger, sz - Suzaku, r - RHESSI, m - Mars-observer.

GRB	Время срабат., UT	T_{90} , с	C_{max} , 10^3 отсч.	Подтверждение, T_{90} , с ¹	Комментарии
-----	----------------------	-----------------	-----------------------------	---	-------------

² - в круглых скобках указаны значения длительности в соответствующем эксперименте, в квадратных скобках - номер соответствующей ссылки: длительность в эксперименте RHESSI приведена из работы [94]; Suzaku - из он-лайн каталога [95], Swift - из работы [96], в остальных случаях - из циркуляров GCN.

³ - данные для соответствующего события недоступны в связи с перенаведением обсерватории.

⁴ - указан конечный (либо начальный) момент времени в кривой блеска (относительно T_0), использованной для усреднения.

⁵ - кривая блеска исключена из усредненной кривой блеска в связи с неудовлетворительным качеством аппроксимации фона.

⁶ - короткий гамма-всплеск с обнаруженным продленным излучением.

⁷ - данное событие наблюдалось вне поле BAT/Swift.

⁸ - исходные данные для соответствующего события недоступны.

⁹ - Длительность этого события в диапазоне 15-100 кэВ - 120 с, а в диапазоне >100 кэВ - 0.58 с [97], всплеск состоит из короткого жесткого эпизода и более длительного периода активности в мягком диапазоне. Данный всплеск был изначально классифицирован как короткий/жесткий всплеск [98]. В стандартном анализе проведенным в нашей статье мы не обнаружили у GRB 061006 продленного излучения в энергетическом диапазоне SPI-ACS и также классифицируем его как короткий всплеск.

1.4. Исследование кривых блеска коротких

гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS INTEGRAL

Каталог (таблица 1.2) содержит данные о 83 подтвержденных гамма-всплесках с длительностью $T_{90} < 2$ с, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL за период 2002-08гг, который дополняет и расширяет каталог [67] в части коротких всплесков. Для построения усредненной кривой блеска отобрано 53 кривых блеска, поскольку для остальных событий кривые блеска в полном объеме недоступны либо вследствие того, что не являются публичными, либо вследствие остановки телеметрии из-за перенаведения обсерватории. Эти гамма-всплески составляют первую группу исследованных событий. Вторая группа - короткие, не подтвержденные другими космическими обсерваториями, канди-

даты в гамма-всплески из каталога [67] с длительностью $T_{90} < 2$ с (105 событий). Третья группа является подмножеством второй группы - это короткие неподтвержденные кандидаты в гамма-всплески из каталога [67] с длительностью $T_{90} \leq 0.05$ с (43 события).

В работе [67] было показано, что существует класс коротких событий с длительностью $T_{90} \leq 0.05$ с, регистрируемых SPI-ACS, который обладает следующим свойством: одновременно с коротким всплеском в SPI-ACS, в одном или нескольких соседних германиевых детекторах телескопа SPI наблюдается „насыщение“ - отсутствие сигнала в течение нескольких (до нескольких десятков) секунд. Кривая блеска одного из таких событий показана на Рис. 1.3. В работе [67] предполагается, что этот класс событий связан с взаимодействием детекторов SPI-ACS и SPI с заряженными частицами. Из таких событий состоит четвертая, контрольная группа (первая, вторая и третья группы не содержат такие события). Подробнее этот класс событий рассмотрен в разделе 2.4.4 диссертации.

Все кривые блеска выравнивались относительно главного пика аналогично процедуре, предложенной в работе [99] (на Рис. 1.4 в качестве примера рассмотрена кривая блеска GRB060221), и исследовались на интервале времени $(-150; +200)$ с.

Процедура обработки состоит из следующих действий:

- 1) *Построение модели фона.* Проведены исследования вариаций фона на различных временных масштабах: производилась группировка бинов с временным разрешением 50 с, как показано на Рис. 1.5 для 405 витка обсерватории, и вычислялись максимальные изменения фона на масштабе времени 350 с, соответствующему интервалу, на котором исследовались кривые блеска всех анализируемых нами событий. Из Рис. 1.5 следует, что поведение фона на временном масштабе 350 с монотонно, поэтому мы использовали модель линейной аппроксимации фона на интервалах $(-150; -50)$ с и $(+100; +200)$ с относительно глав-

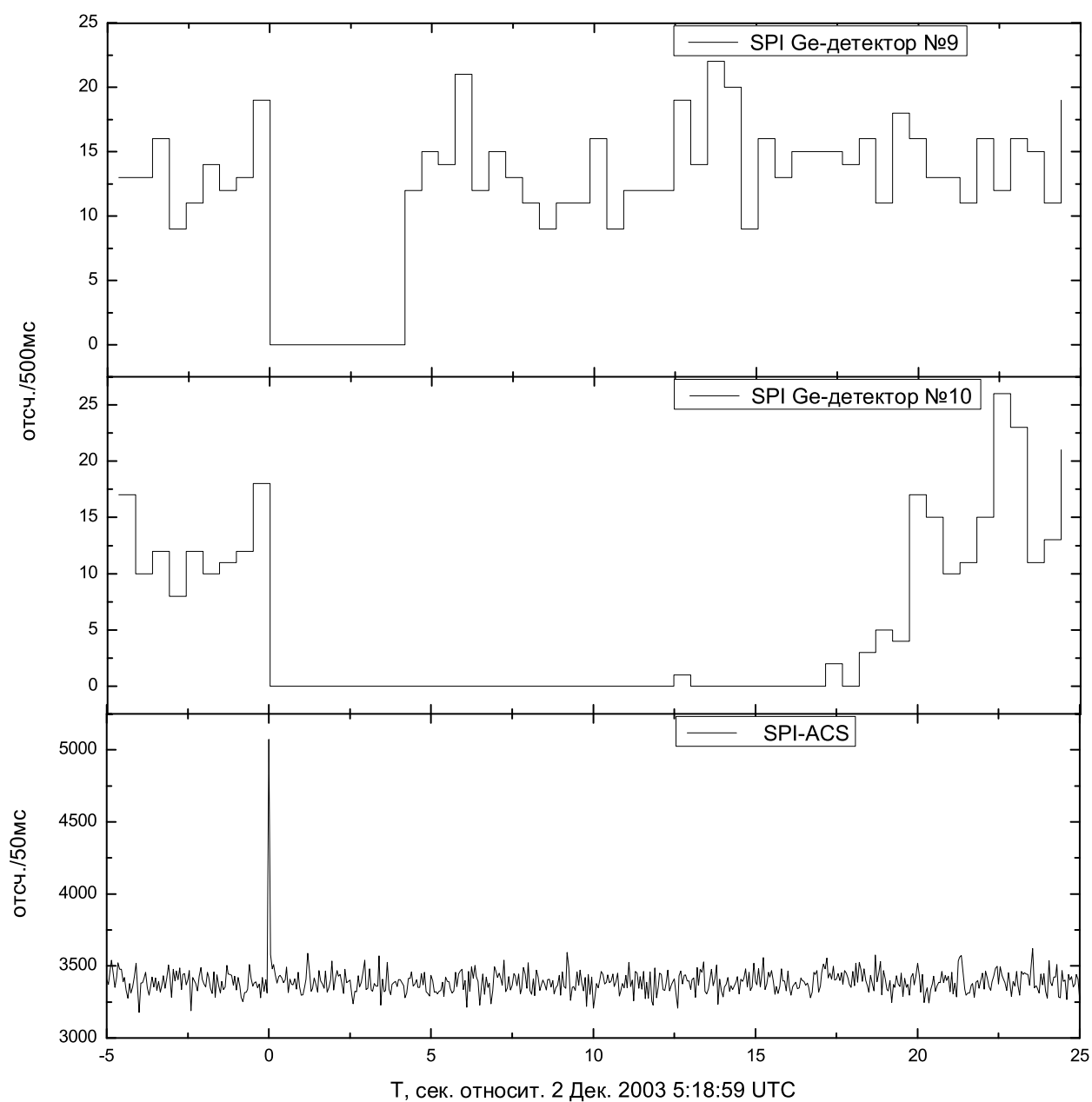


Рис. 1.3. Пример сверхкороткого события SPI-ACS (внизу) с одновременным „насыщением“ двух германиевых детекторов телескопа SPI (вверху). Кривая блеска SPI-ACS представлена в исходном временном разрешении 50мс, кривые блеска германиевых детекторов №9 и №10 телескопа SPI - с временным разрешением 500мс.

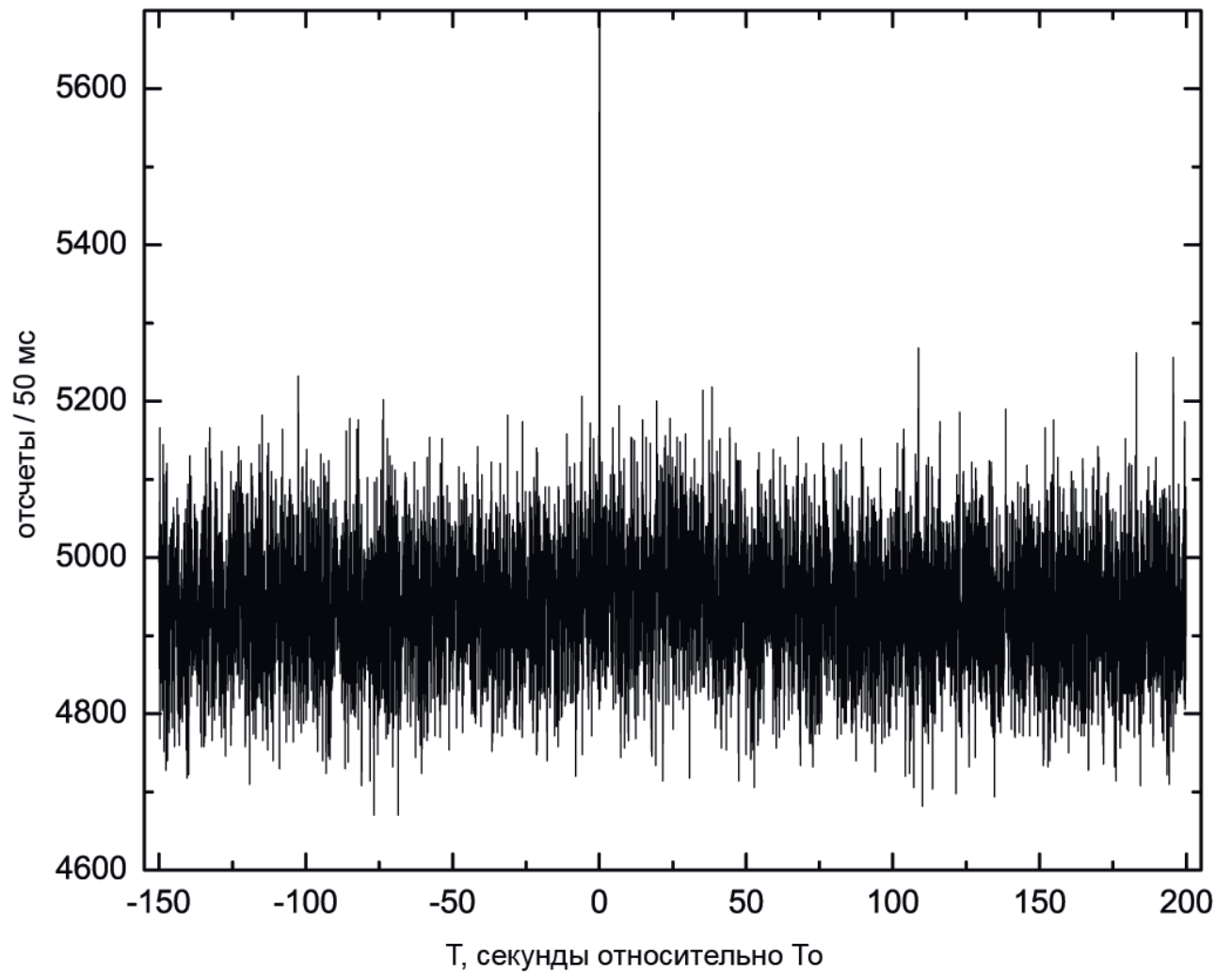


Рис. 1.4. Кривая блеска GRB060221 представлена с исходным временным разрешением SPI-ACS 50 мс. По оси абсцисс - время относительно срабатывания T_0 .

ного пика. Также установлено, что за промежуток времени 350 с фон меняется не более чем на 0.3%. В абсолютном большинстве случаев модель хорошо описывает поведение фона, однако в нескольких случаях качество аппроксимации было неудовлетворительным и такие события исключены из рассмотрения.

2) *Вычитание модели фона из кривой блеска.*

3) *Вычисление длительности события T_{90} .* Алгоритм вычисления T_{90} обсуждается в работе [8]. На Рис. 1.6 представлена схема вычисления T_{90} для GRB030325. Строится интегральная кривая блеска события. Затем определяются количества отсчетов, соответствующие долям 5% и 95% от полного числа отсчетов (показаны на Рис. 1.6 горизонтальными сплошными линиями). Далее находят соответствующие этим значениям потока времена T_5 и T_{95} (вертикальные сплошные линии) и вычисляется их разность, которая и представляет собой значение длительности $T_{90} = 2.00 \pm 0.15$ с. Значения T_{90} , вычисленные нами, сравнивались со значениями, полученными в работе [67] и со значениями, опубликованными для тех же событий, но определенными в других экспериментах: длительности в эксперименте RHESSI взяты из работы [94], в эксперименте Suzaku - из каталога [95], в эксперименте Swift - из [96], в остальных случаях - из циркуляров GCN. Эти значения также приведены в таблице 1.2. Существенные различия в значениях длительностей не обнаружены.

4) *Группировка бинов* - увеличение длительности бина от 0.05 с до 5 с. На Рис. 1.7 показан результат обработки кривой блеска GRB060221.

5) *Усреднение.* Выровненные относительно главного пика, обработанные по описанной выше процедуре, кривые блеска всех гамма-всплесков усреднялись (производилось усреднение точек кривых блеска, соответствующих одному моменту времени в различных кривых блеска). Дисперсия D суммы „фонов“ B_i нескольких (N) всплесков равна сумме дисперсий (формула 1.1), а средняя величина стандартного отклонения $\bar{\sigma}$ при усреднении уменьшается в $\sqrt{N}$ раз (формула 1.2). Таким образом, процедура усреднения кривых блеска позволяет понизить

уровень флуктуаций и „усилить“ сигнал продленного излучения над фоном, если оно присуще всем коротким гамма-всплескам и при этом достаточно слабое для того, чтобы быть обнаруженным в кривых блеска отдельных всплесков.

6) *Вычисление ошибок суммарного профиля.* При проведении статистического анализа фона SPI-ACS средняя выборочная (или эмпирическая) дисперсия фона $D_E(B) = (1/(N - 1)) * \sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2 \approx 1.57^2 B$ оказалась больше „пуассоновской“ дисперсии $D_P(B) = B$, что согласуется с результатами [70, 93]. Все дальнейшие вычисления ошибок учитывают этот факт. Мы предложили простое объяснение этого явления. Во-первых, есть инструментальный эффект, связанный с тем, что каждый сцинтилляционный кристалл германата висмута (BGO), из которых состоит детектор SPI-ACS, просматривается двумя фотоумножителями (см. раздел 1.2). Дисперсия суммарного сигнала, собранного с двух фотоумножителей, будет в $\sqrt{2} \approx 1.41$ раза больше пуассоновского значения при условии, что сигналы с двух фотоумножителей скоррелированы друг с другом, т.е. в том случае, когда любой гамма-фотон, попавший в кристалл BGO, регистрируется обоими ФЭУ. Во-вторых, реально наблюдаемые величины дисперсии могут быть несколько больше этой величины, поскольку нужно учесть ещё дисперсию переменных источников (эксперимент SPI-ACS регистрирует фотоны практически со всех направлений, и, как следствие, в его поле зрения попадают источники со „всего неба“). Дисперсия переменных источников может давать добавку в 10% к эмпирической дисперсии [100]. Почти половину этой добавки можно отнести на счёт ярких переменных Галактических источников Лебедь X-1 и Скорпион X-1.

$$D\left(\sum_{i=1}^N B_i\right) = \sum_{i=1}^N D(B_i) = N \times D(\bar{B}), \text{ если } B_i \approx \bar{B} \quad (1.1)$$

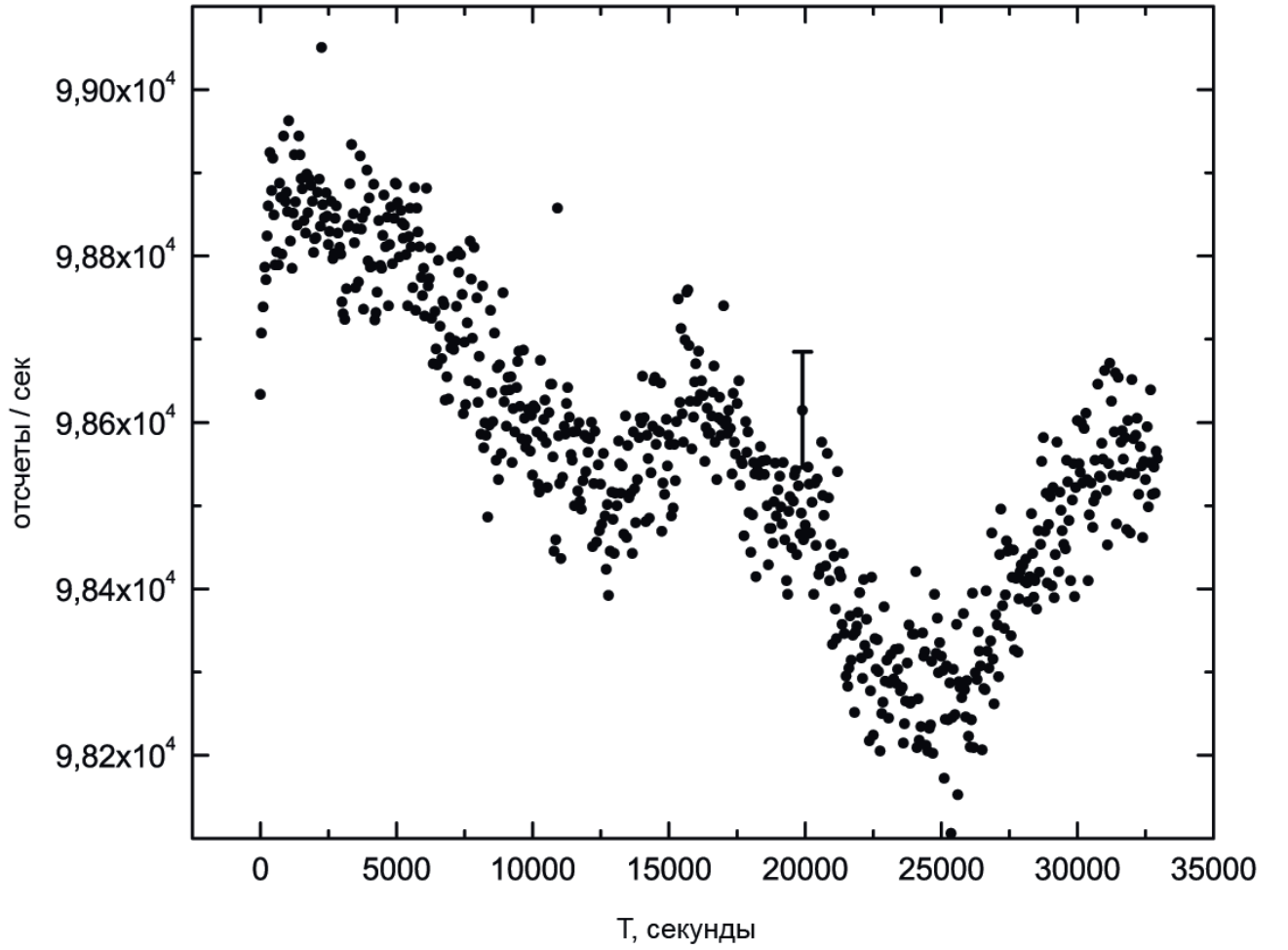


Рис. 1.5. Поведение фона на больших временных масштабах (виток 405). По горизонтальной оси - время относительно включения SPI-ACS после прохождения радиационных поясов. Для одной точки приведена ошибка уровня 1σ .

$$\bar{\sigma} = (1/N) \times \sqrt{D\left(\sum_{i=1}^N B_i\right)} = \sqrt{D(\bar{B})}/\sqrt{N} = \sigma(\bar{B})/\sqrt{N}. \quad (1.2)$$

1.5. Продленное излучение коротких гамма-всплесков

В индивидуальных кривых блеска GRB060221 (Рис. 1.7) и GRB031214 (Рис. 1.8) после описанной выше процедуры обработки в кривых блеска найдено статистически значимое продленное излучение длительностью ~ 50 с и

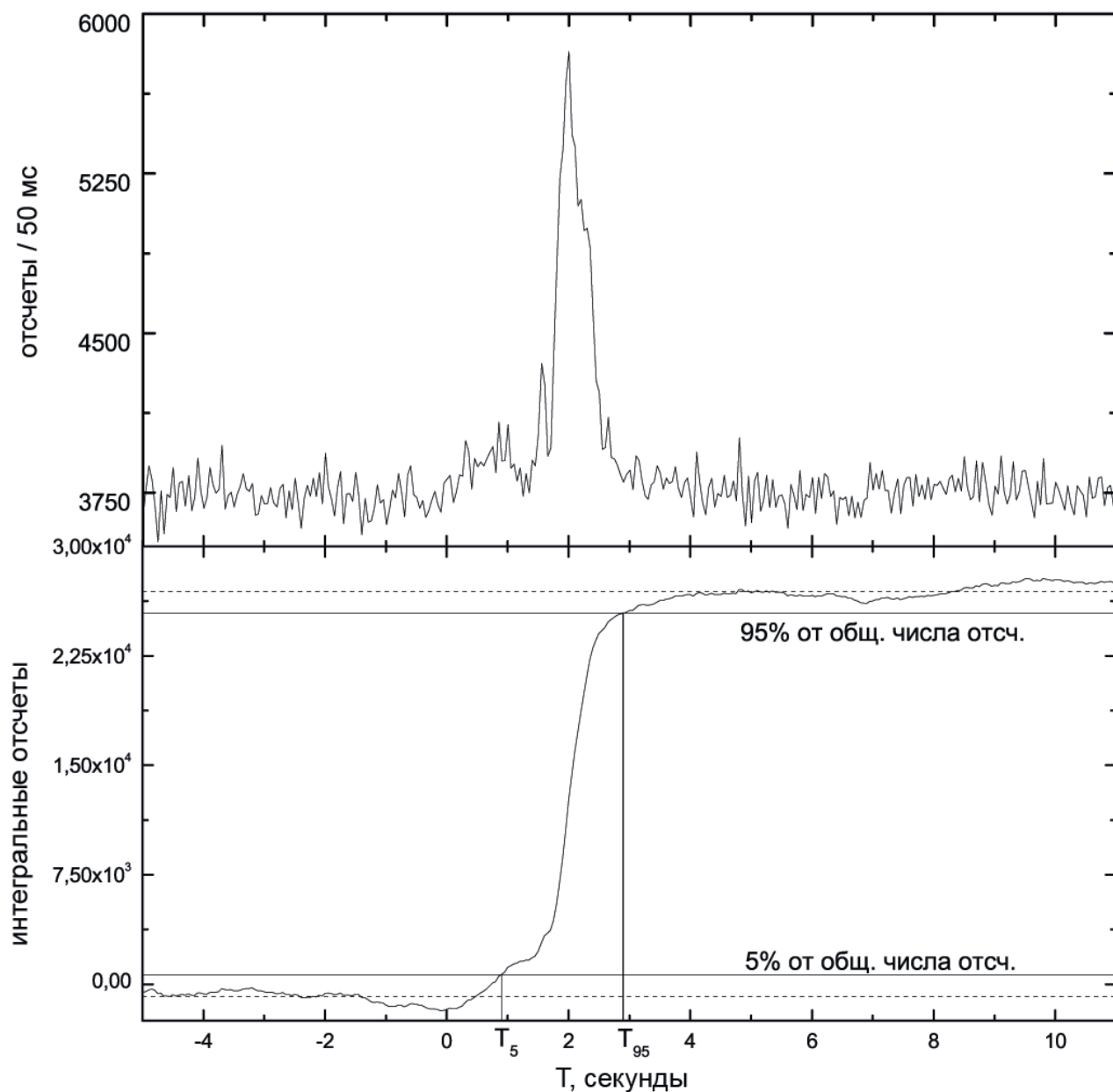


Рис. 1.6. Вычисление длительности гамма-всплеска GRB030325. Вверху - кривая блеска в исходном временном разрешении 50мс. По оси ординат - кол-во отсчетов за 50мс. Внизу - соответствующая ей интегральная кривая блеска. По оси ординат - интегральное кол-во отсчетов после вычитания фона. Горизонтальные пунктирные линии обозначают уровень 0% и 100% от полного числа отсчетов гамма-всплеска, соответственно, а сплошные - уровень 5% и 95%, соответственно. Показаны соответствующие значения T_5 и T_{95} .

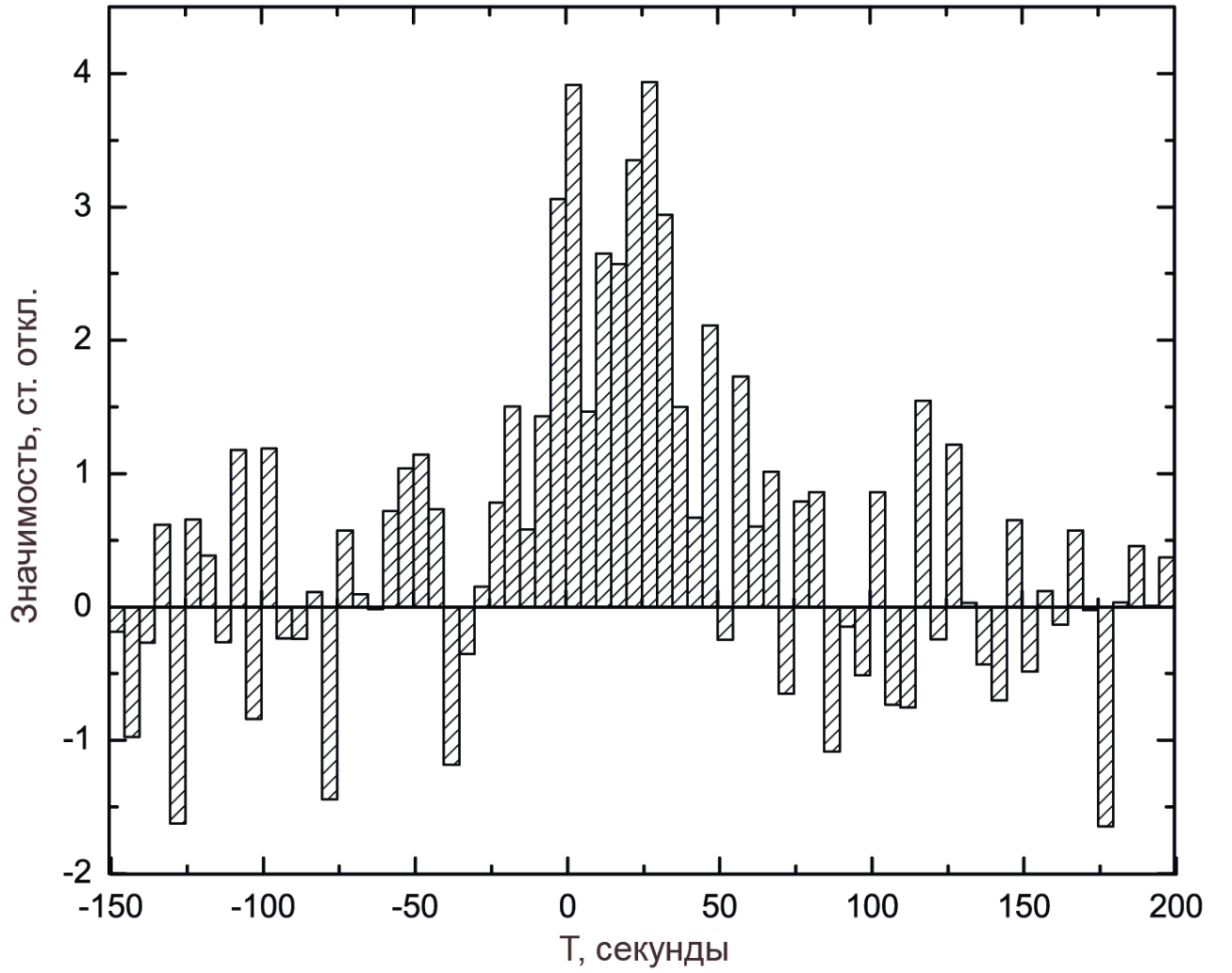


Рис. 1.7. Результат обработки кривой блеска GRB060221. По оси абсцисс - время относительно срабатывания T_0 . Временное разрешение 5 с. По оси ординат отложена значимость в единицах стандартных отклонений.

~ 20 с, соответственно (T_{90} у этих событий составляют 0.2 с и 0.3 с, соответственно), причем продленное излучение всплеска GRB031214 также найдено в эксперименте Konus [101]. Два этих гамма-всплеска исключены из дальнейшего анализа.

Как уже было отмечено в разделе 1.1, на основании только лишь кривой блеска зачастую нельзя однозначно определить, принадлежит ли гамма-всплеск к классу коротких или длинных всплесков. Для максимально полного анализа необходимы исследования спектра и спектральной эволюции события, а также

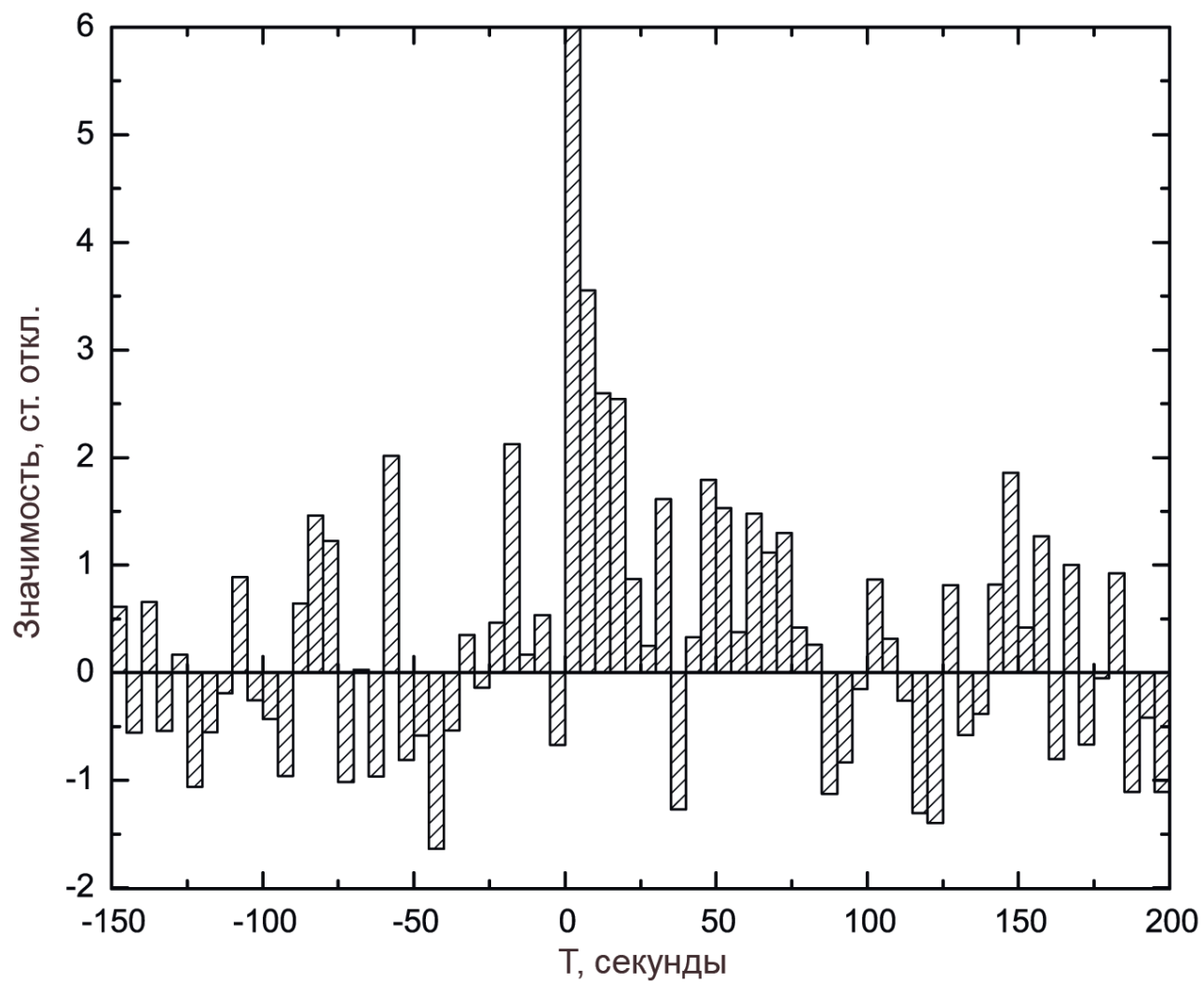


Рис. 1.8. Результат обработки кривой блеска GRB031214. По оси абсцисс - время относительно срабатывания T_0 . Временное разрешение 5 с. По оси ординат отложена значимость в единицах стандартных отклонений.

метод разделения всплесков на диаграмме Аматти $E_p - E_{iso}$ [102]. Не существует четкой границы в распределении длительностей, и граница $T_{90}=2$ с выбрана по аналогии с экспериментом BATSE. Поэтому, в выборке всплесков могут присутствовать и события, относящиеся к классу длинных гамма-всплесков. Количество примесных событий можно оценить из логарифмически нормальных распределений, описывающих бимодальное распределение длительностей. Для эксперимента BATSE такая оценка для границы 2 с дает 2%. Более точное определение границы обсуждается, например, в работе [28].

В усредненных кривых блеска первой и второй групп (51 и 105 событий, соответственно) коротких событий также найдено продленное излучение длительностью ~ 25 с. На Рис. 1.9 приведены кривые блеска подтвержденных и неподтвержденных коротких событий (первая и вторая группы гамма-всплесков). Так как продленное излучение найдено в усредненной кривой блеска коротких гамма-всплесков в различных экспериментах (SPI-ACS INTEGRAL, BATSE, Konus, Swift, ВерроSAX), то можно предположить, что это реально существующее явление. На имеющемся материале коротких гамма-всплесков можно делать только статистические заключения, основанные на усреднении различных выборок (подтвержденных и неподтвержденных гамма-всплесков). Мы не можем утверждать, что продленное излучение является свойством каждого короткого гамма-всплеска. Тем не менее, *продленное излучение, найденное в усредненной кривой блеска неподтвержденных коротких событий свидетельствует о том, что часть неподтвержденных коротких событий принадлежит к классу реальных гамма-всплесков.* Для независимой проверки отобранные короткие события, связанные со срабатываниями от заряженных частиц (четвертая группа гамма-всплесков). В усредненной кривой блеска 34 таких событий продленное излучение отсутствует (Рис. 1.10), следовательно, нет оснований отвергать предположение о том, что часть неподтвержденных коротких событий является реальными гамма-всплесками.

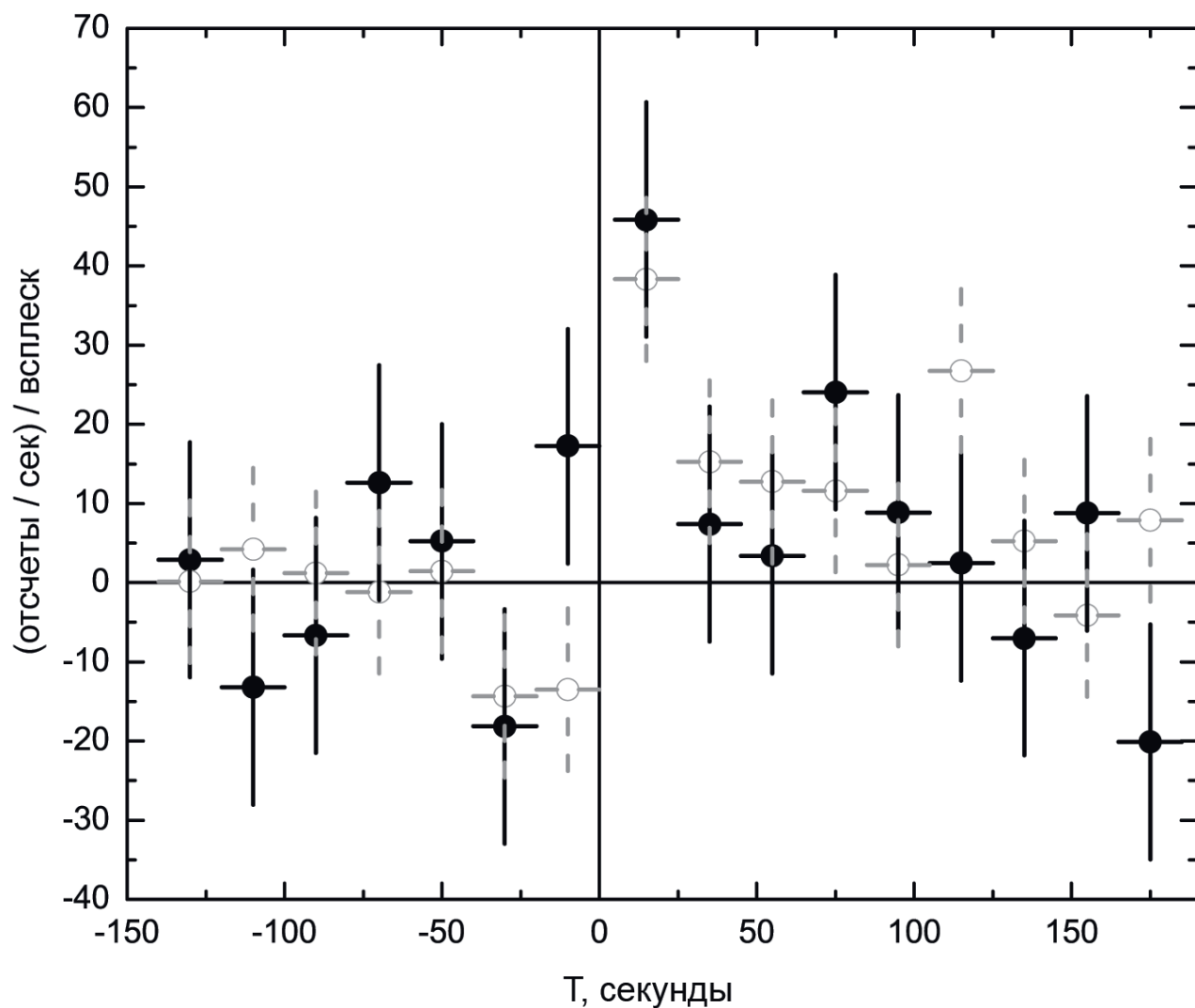


Рис. 1.9. Усредненная кривая блеска: черные точки - группа 1 (51 короткий подтвержденный гамма-всплеск), открытые серые точки - группа 2 (105 неподтвержденных коротких событий из каталога [67]). Ошибки приведены на уровне 1σ . По оси ординат представлено количество отсчетов в секунду в расчете на 1 событие. Значения, соответствующие главному пику вне шкалы по оси ординат.

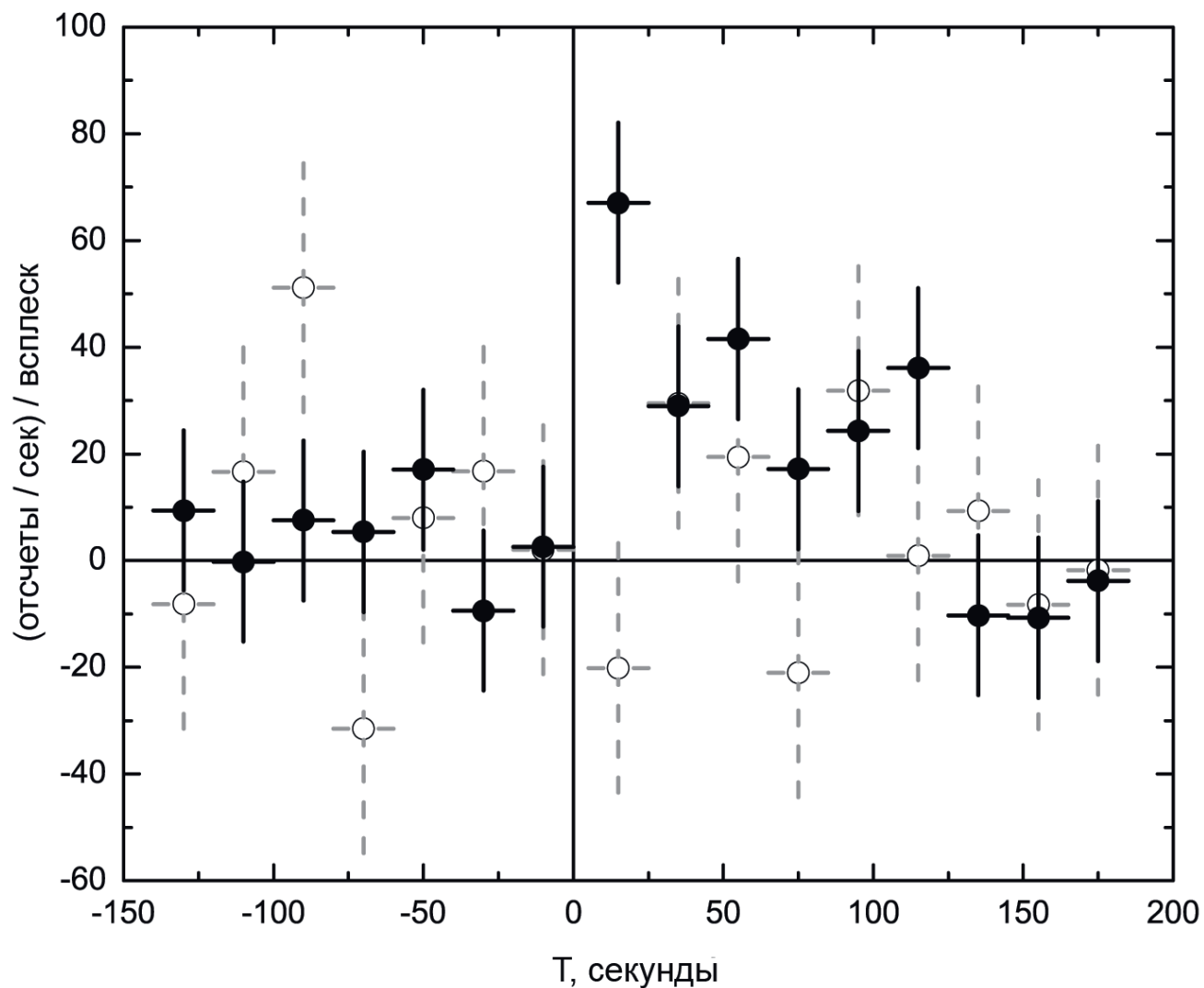


Рис. 1.10. Усредненная кривая блеска: черные точки - группа 3 (43 неподтвержденных сверхкоротких событий из каталога [67]), открытые серые точки - группа 4 (34 неподтвержденных событий, связанных со срабатываниями от заряженных частиц). Ошибки приведены на уровне 1σ . По оси ординат представлено количество отсчетов в секунду в расчете на 1 событие. Значения, соответствующие главному пику вне шкалы по оси ординат.

1.6. Распределение гамма-всплесков по длительности

Считается, что распределение гамма-всплесков по длительности является бимодальным (см. раздел 1.1). Однако, в эксперименте BAT/Swift распределение гамма-всплесков по длительности неудовлетворительно описывается только двумя логарифмически нормальными (далее - лог-нормальными) распределениями. В работе [103] показано, что распределение гамма-всплесков по длительности в эксперименте BAT/Swift можно аппроксимировать тремя лог-нормальными распределениями. Добавляется промежуточная (по отношению к коротким и длинным) группа гамма-всплесков. Поиск промежуточной группы гамма-всплесков также проводился в экспериментах BATSE [104] и RHESSI [94]. Природа третьей группы гамма-всплесков не выяснена. Возможно, появление данной группы связано с различными эффектами селекции. Алгоритм срабатывания телескопа BAT/Swift предполагает два разных метода, один из них - обнаружение точечного источника на изображении (image triggering), другой - классический алгоритм срабатывания по превышению общего темпа счета кривой блеска над фоновым значением (rate triggering). Первый алгоритм зависит от интегрального потока, а второй, в основном, зависит от максимального потока. С другой стороны, определение параметра длительности существенно зависит от модели фона и энергетического диапазона. Например, длительность T_{90} одного и того же короткого всплеска, определенная в разных энергетических каналах, имеет существенные различия (см., например, [105]). Выбор модели фона может влиять и на определение параметра T_{90} одного и того же всплеска (см., например, вычисление длительности GRB 030325 в работах [67, 93]). И, наконец, распределение длительности может быть смещено вследствие близости интервала дискретизации данных и значения T_{90} (см. также подпись к Рис. 1.15).

Распределение гамма-всплесков по длительности и аппроксимация 3 лог-

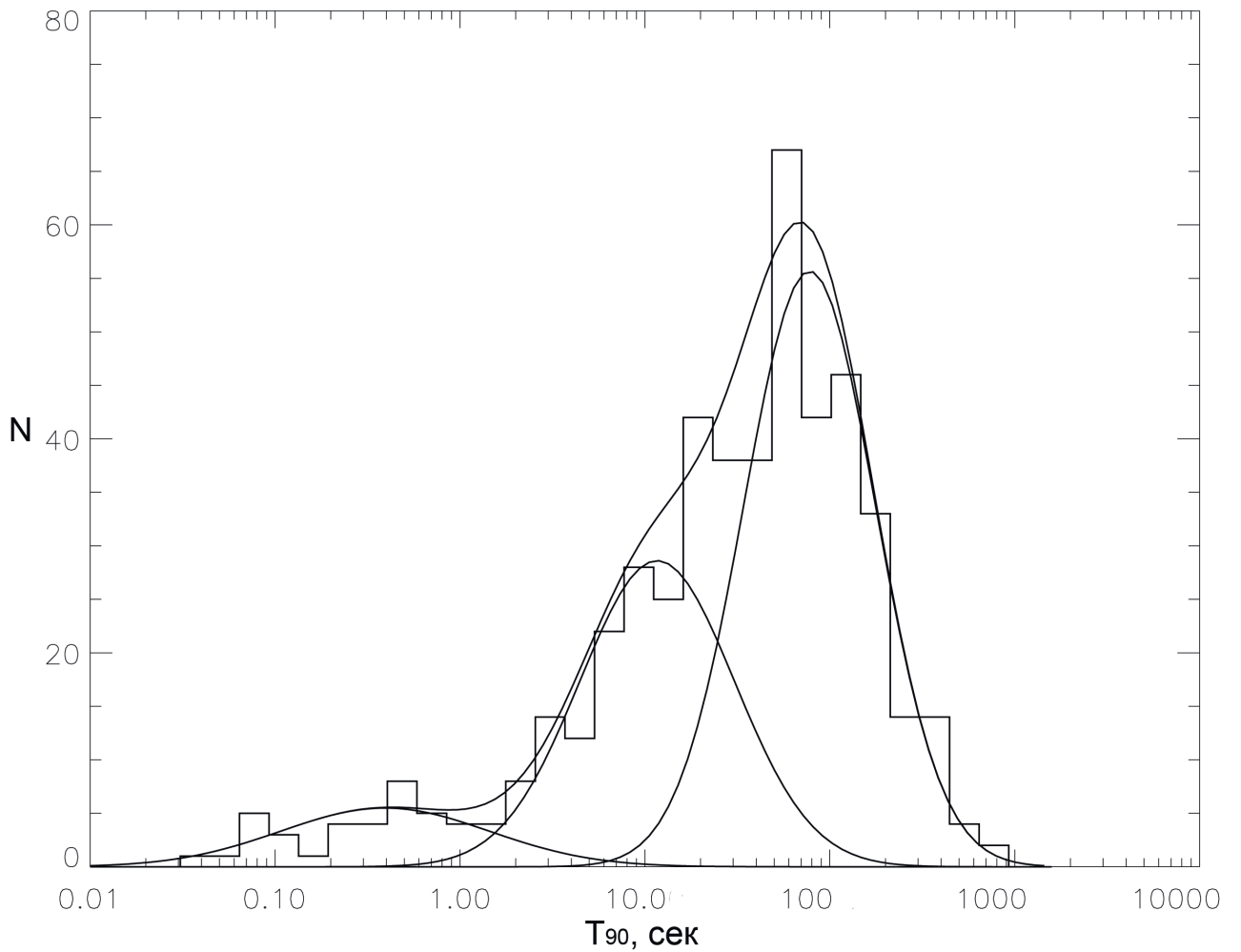


Рис. 1.11. Распределение гамма-всплесков по длительности в эксперименте Swift. Показана аппроксимация тремя лог-нормальными распределениями.

нормальными распределениями в эксперименте BAT/Swift показаны на Рис. 1.11. Таким образом, доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте BAT/Swift составляет $\sim 10\%$ (Рис. 1.11, таблица 1.3). Данная величина, полученная как интеграл под кривой лог-нормального распределения короткой моды всплесков, совпадает с долей коротких гамма-всплесков, официально признанных короткими (см. например [105]). Конечно, определение принадлежности конкретного гамма-всплеска к тому или иному классу требует более детального рассмотрения всех свойств гамма-всплеска, см. например [28].

Таблица 1.3. Распределение гамма-всплесков по длительности

Эксперимент	Диапазон энергий ¹ , кэВ	Временное разреш. ² , мс	Доля КГВ ³ , %	Общее кол-во КГВ ⁴	$\log(T_{90})$ ⁵ , с		
					КГВ	ПГВ ⁶	ДГВ ⁷
LILAS/Phobos-2	6-1000	250	5 ± 3 [106]	3			
BAT/Swift	15-150	4	10 ± 2 [107]	49	-0.31 ± 1.07	0.99 ± 0.31	1.88 ± 0.16
IBIS/ISGRI	15-1000	50	4 ± 3 [108]	2			
RHESSI	30-1500	- ⁸	19 ± 2 [94]	81	-0.46 ± 0.13	n/f ⁹	1.26 ± 0.09
BeppoSAX	40-700	1000	19 ± 2 [109]	191	0.31 ± 0.14	n/f	1.40 ± 0.03
BATSE/CGRO	50-300	64	25 ± 1 [7]	100	-0.13 ± 0.06	n/f	1.54 ± 0.02
Suzaku	50-5000	15.6	20 ± 2 [95]	211	-0.23 ± 0.20	n/f	1.32 ± 0.05
SPI-ACS/INTEGRAL	~80-10000	50	30-45	145	-0.81 ± 0.02	n/f	1.26 ± 0.04
PHEBUS/Granat	100-1600	250	27 ± 4 [110]	47			
APEX/Phobos-2	120-1400	250	38 ± 7 [106]	28			

¹ - энергетический диапазон, в котором происходит выделение гамма-всплеска над фоном. Диапазон энергий может не совпадать с диапазоном, используемым для вычисления параметра T_{90} . Подробнее см. описание экспериментов.

² - минимальный временной интервал для автоматической регистрации гамма-всплеска

³ - короткие гамма-всплески

⁴ - кол-во коротких гамма-всплесков, использованных для оценки доли

⁵ - характерная (наиболее вероятная) длительность

⁶ - промежуточная группа гамма-всплесков

⁷ - длинные гамма-всплески

⁸ - алгоритм поиска событий см. в работе [94]

⁹ - поиск промежуточной группы не проводился

В экспериментах BATSE, BeppoSAX и Suzaku распределение гамма-всплесков по длительности хорошо описывается двумя лог-нормальными распределениями, и доля коротких гамма-всплесков составляет $\sim 25\%$, $\sim 19\%$ и $\sim 20\%$ от всех зарегистрированных гамма-всплесков, соответственно (Рис. 1.12, таблица 1.3).

В первом каталоге эксперимента APEX [111] доля коротких гамма-всплесков составляла $\sim 10\%$. После статистического анализа было обнаружено, что доля коротких гамма-всплесков в эксперименте APEX может составлять $\sim 38\%$ [106].

Доля подтвержденных другими космическими обсерваториями коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL, составляет $\sim 16\%$. Но если считать все неподтвержденные короткие события (вторая группа) реальными гамма-всплесками, то общая доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных SPI-ACS INTEGRAL, составит $\sim 45\%$ (Рис. 1.13), что

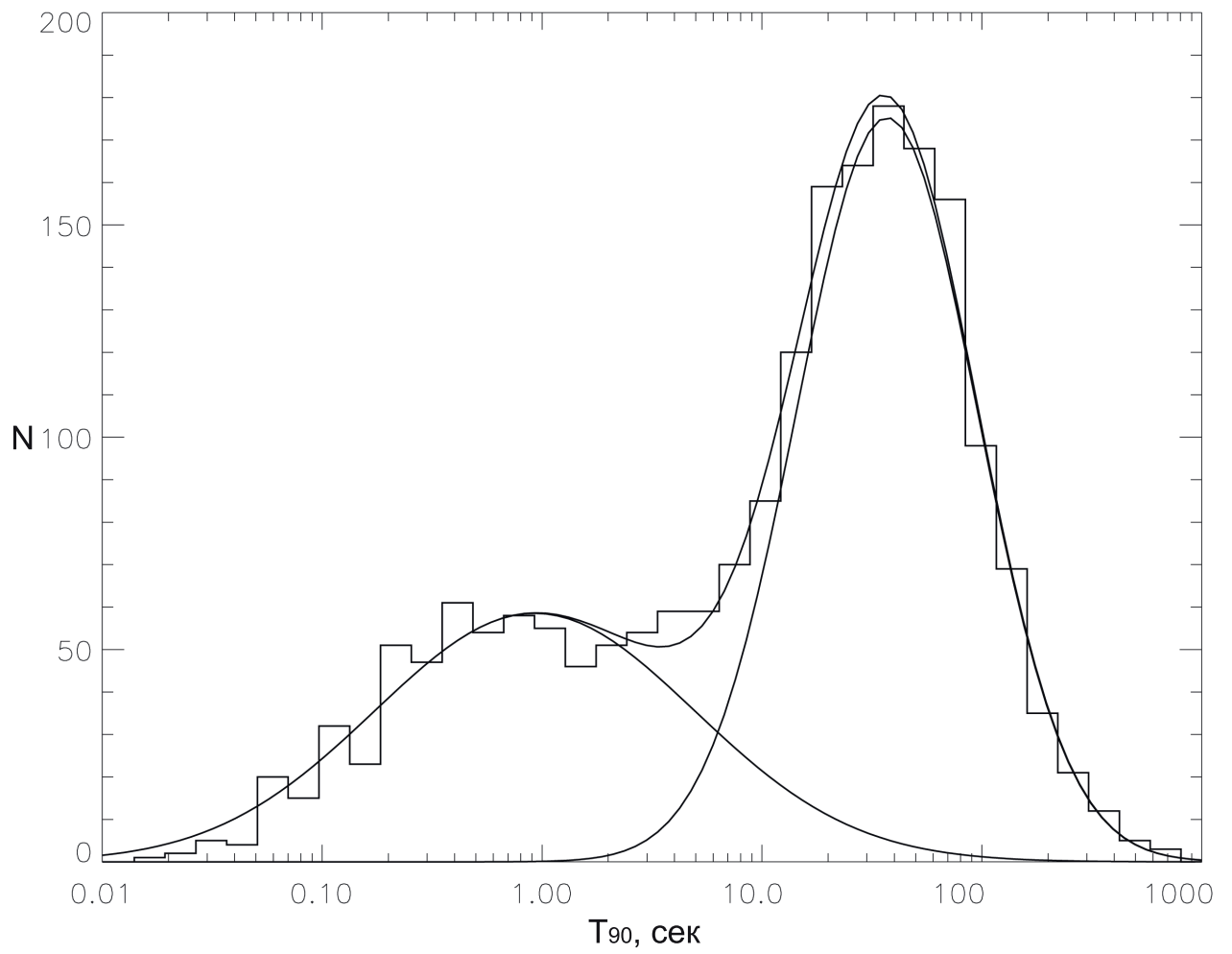


Рис. 1.12. Распределение гамма-всплесков по длительности в эксперименте BATSE. Показана аппроксимация двумя лог-нормальными распределениями.

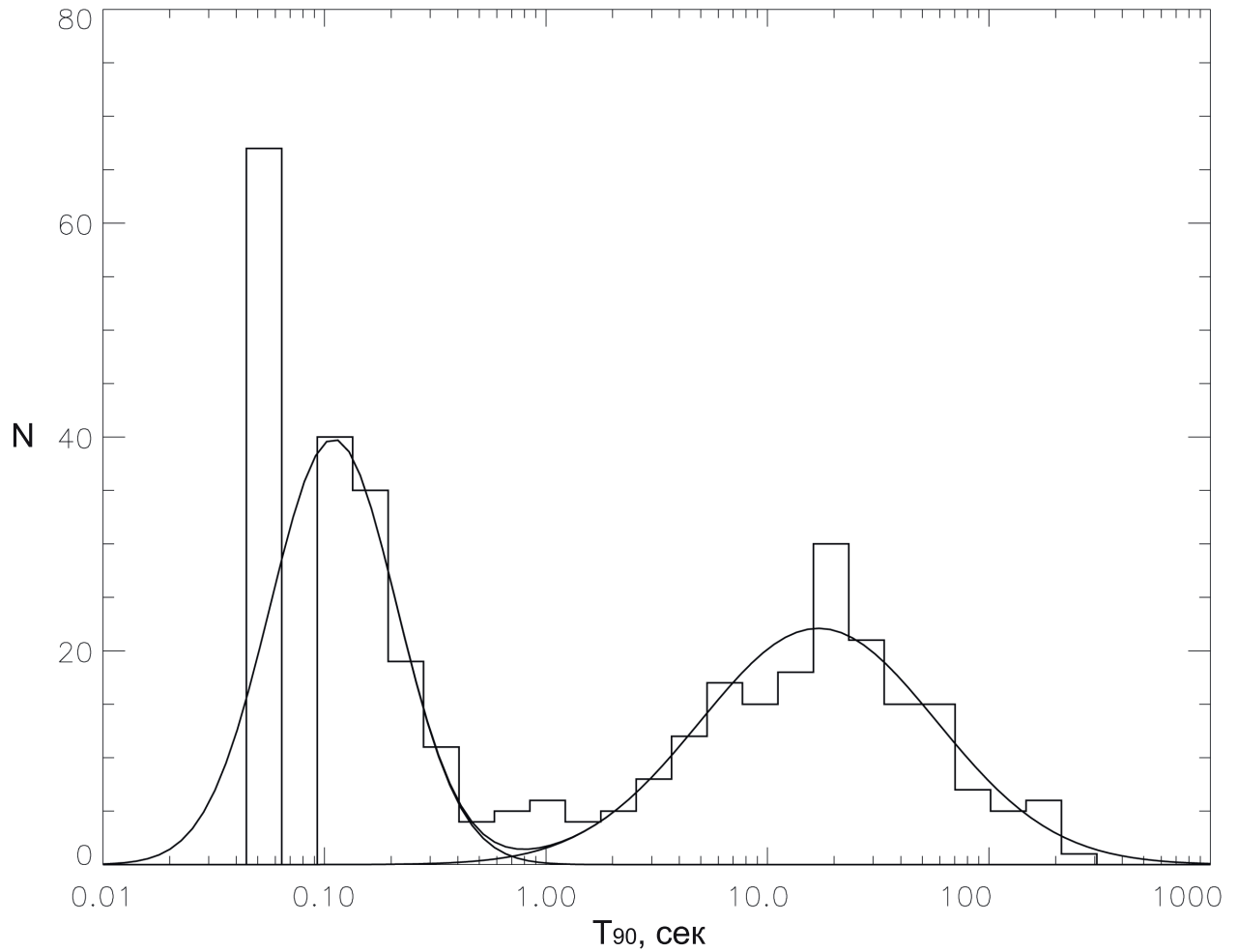


Рис. 1.13. Распределение гамма-всплесков по длительности в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL. Показана аппроксимация двумя лог-нормальными распределениями.

является верхним пределом количества коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS INTEGRAL. Нижний предел равен 30% в предположении, что доля реальных гамма-всплесков в группе неподтвержденных событий составляет 84%.

Из Рис. 1.13 и таблицы 1.3 следует, что характерная длительность коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL значительно меньше, чем в других экспериментах, и доля сверхкоротких событий, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL, значительно выше, чем ожидается в предположении лог-нормального распределения. Избыток событий с длитель-

ностью 50 мс можно объяснить тем, что SPI-ACS INTEGRAL имеет временное разрешение 50 мс, и, поэтому минимальная длительность события в SPI-ACS INTEGRAL составляет 50 мс, даже если реальная длительность события меньше 50 мс. Возможно, что часть этих событий или имеет другую природу (в том числе события, имитированные заряженными частицами) или относится к другому подклассу гамма-всплесков. Вследствие этих причин при аппроксимации распределения гамма-всплесков по длительности, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL, не учитывались события с длительностью 50 мс. Определенное как интеграл лог-нормального распределения короткой моды, количество коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL с длительностью менее 100 мс составляет ~ 70 всплесков, что в пределах ошибки совпадает с количеством неподтвержденных коротких гамма-всплесков с длительностью 50 мс (67 всплесков), что также подтверждает наше предположение о возможной причине избытка данных событий.

Зависимость доли коротких гамма-всплесков от нижнего энергетического порога срабатываний E_{min} в различных экспериментах показана на Рис. 1.14. Из Рис. 1.14 следует, что доля коротких гамма-всплесков растет с увеличением нижнего энергетического порога срабатываний. Данный факт можно объяснить тем, что короткие гамма-всплески имеют более жесткий спектр по отношению к длинным, и поэтому они эффективней регистрируются в более жестком энергетическом диапазоне. На Рис. 1.14 также показана доля коротких гамма-всплесков в эксперименте BAT/Swift в предположении бимодального распределения гамма-всплесков по длительности (открытая точка) и доля коротких гамма-всплесков в эксперименте RHESSI с учетом промежуточной группы гамма-всплесков (закрашенная точка). Из Рис. 1.14 следует, что данные точки существенно не подчиняются обнаруженной зависимости доли коротких гамма-всплесков от нижнего энергетического порога срабатываний. Это свидетельствует в пользу существования третьей, промежуточной группы гамма-

всплесков в эксперименте BAT/Swift и о нецелесообразности введения данной группы в эксперименте RHESSI. Во всех остальных случаях, где для описания распределения T_{90} введение третьей группы не требуется, доля коротких гамма-всплесков подчиняется простой зависимости $\sim 22.4 \lg(E_{min})$. Вопрос о природе промежуточной группы остается открытым.

Как видно из Рис. 1.11, 1.12, 1.13 и таблицы 1.3, характерная длительность длинных всплесков уменьшается с увеличением нижней границы энергетического диапазона, в котором происходит вычисление параметра T_{90} . Зависимость наиболее вероятной длительности T_{90} распределения длинной моды гамма-всплесков от минимальной энергии диапазона регистрации E_{min} можно описать степенным законом $T_{90}^{max} \sim E_{min}^{-\alpha}$, с показателем $\alpha = 0.43 \pm 0.14$ (Рис. 1.15). Интересно, что данная зависимость в пределах ошибки совпадает с зависимостью длительности отдельных импульсов кривой блеска длинных гамма-всплесков от энергетического диапазона ($T_{peak} \sim E^{-0.4}$), найденной в работе [113]. Очевидно, что если кривая блеска состоит из одного единственного импульса, то эти зависимости описывают одно и то же явление. Однако, подавляющее большинство длинных всплесков все же состоит из нескольких импульсов (см. главу 3). В этом случае совпадение зависимостей длительности всего всплеска и отдельных импульсов от энергии говорит о том, что с увеличением количества импульсов, составляющих кривую блеска, длительность каждого импульса уменьшается. Действительно, уменьшение длительности импульса от количества импульсов, составляющих кривую блеска всплеска, была найдена другим методом в [114]. Физические причины уменьшения длительности всплесков с увеличением границ энергетических диапазонов пока не найдены.

С другой стороны, наиболее вероятное значение T_{90} для распределения короткой моды гамма-всплесков не проявляет значимой зависимости от энергетического диапазона (Рис. 1.15). Возможное отличие поведения зависимости от энергии может быть связано с менее выраженной спектральной эволюцией

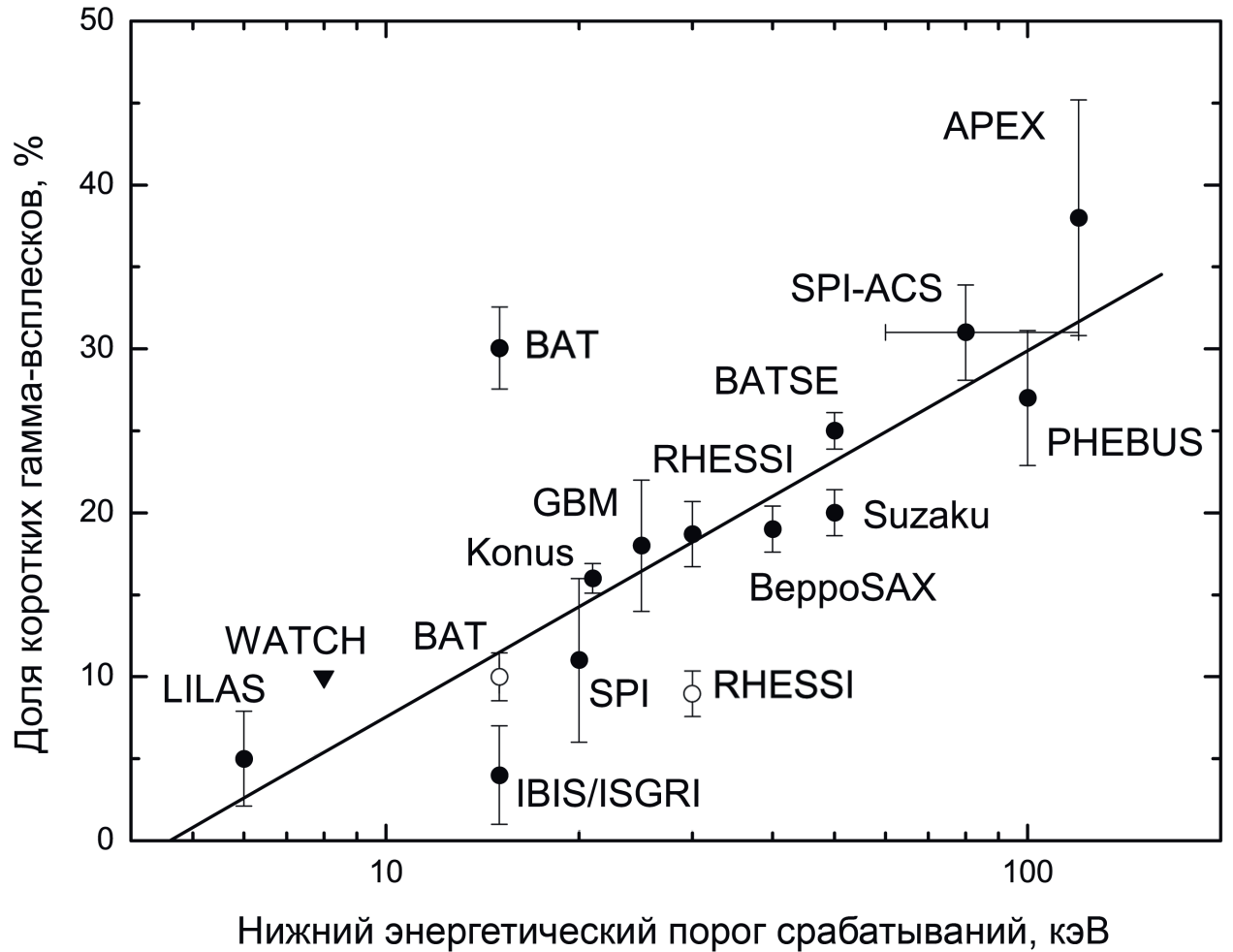


Рис. 1.14. Зависимость доли коротких гамма-всплесков от нижнего энергетического порога срабатываний в различных экспериментах. Закрашенными точками показана доля коротких гамма-всплесков в предположении бимодального распределения всплесков по длительности, открытыми точками — в предположении тримодального распределения для экспериментов BAT/Swift и RHESSI. Для эксперимента GRANAT/WATCH указан верхний предел доли коротких гамма-всплесков [112].

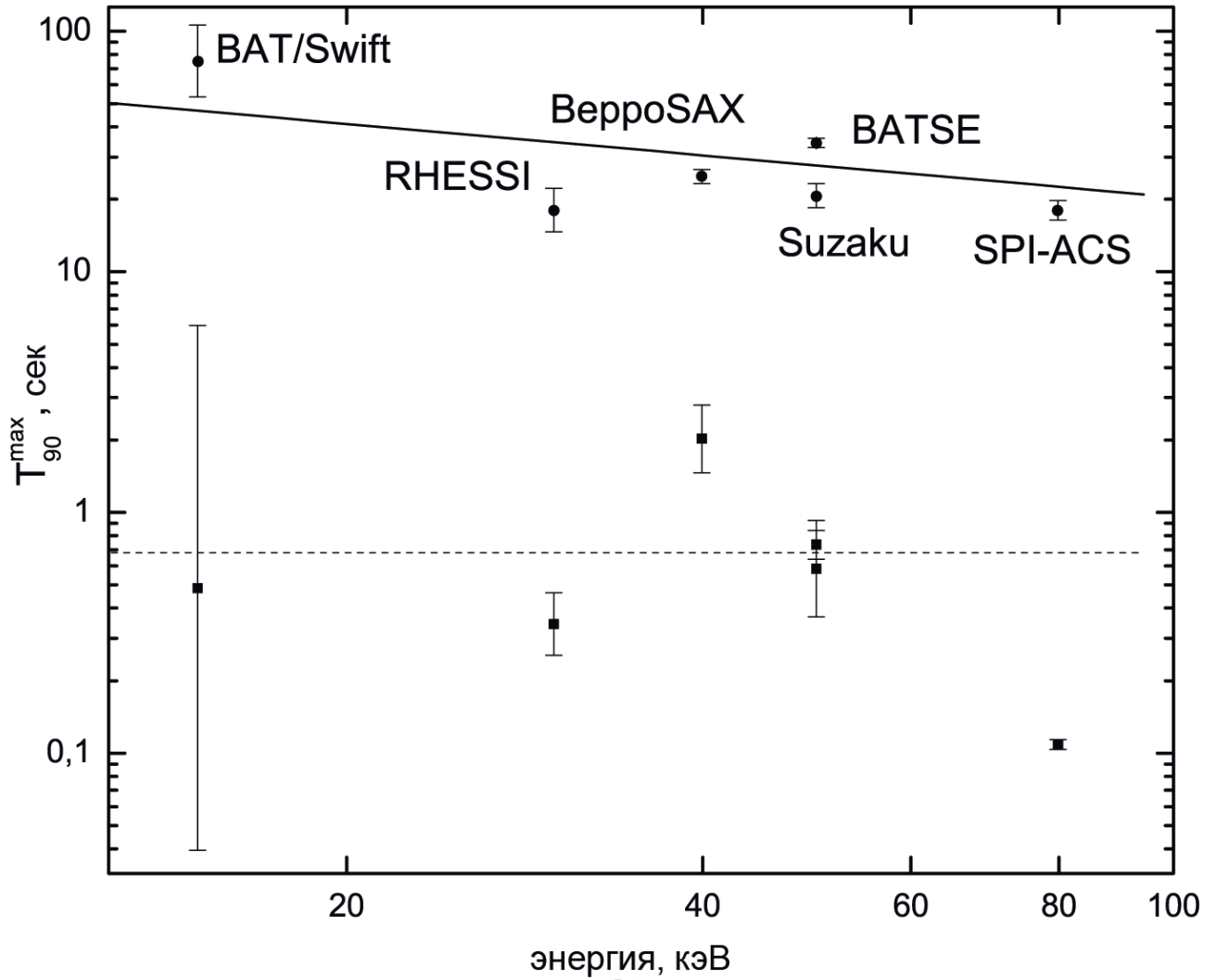


Рис. 1.15. Зависимость характерной длительности гамма-всплесков от нижней границы энергетического диапазона, в котором происходит вычисление параметра T_{90} , в различных экспериментах. Квадратами показаны значения T_{90}^{max} короткой моды, кружками - T_{90}^{max} длинной моды. Штриховой линией показано среднее значение T_{90}^{max} короткой моды. Точка, соответствующая T_{90}^{max} короткой моды эксперимента SPI-ACS, не используется при данной оценке, так как временное разрешение кривой блеска, составляющее 50 мс, не позволяет точно определить значение T_{90}^{max} . Ошибки длительности, приведенные на рисунке, соответствуют одному стандартному отклонению при определении максимумов лог-нормальных распределений при совместной подгонке экспериментальных данных.

коротких гамма-всплесков (см. главу 3).

1.7. „Сверхкороткие“ гамма-всплески

В усредненной кривой блеска третьей группы (неподтвержденные короткие события с длительностью $T_{90} \leq 0.05$ с) также найдено продленное излучение на интервале ~ 125 с и полной интенсивностью (213 ± 35) отс/с (Рис. 1.10). Поэтому можно предположить, что природа „сверхкоротких“ гамма-всплесков та же, что и „обычных“ коротких гамма-всплесков. Бо́льшая интенсивность продленного излучения сверхкоротких гамма-всплесков может быть связана с более близким их расположением, как это уже обсуждалось ранее. Однако существует предположение [46, 115], что „сверхкороткие“ гамма-всплески ($T_{90} \leq 0.1$ с) составляют отдельный класс событий, наряду с выделяемыми в настоящее время длинными и короткими гамма-всплесками, и что физический механизм их генерации имеет другую природу - эти события могут быть связаны с испарением гипотетических первичных черных дыр. „Сверхкороткие“ гамма-всплески согласно работам [46, 115] имеют следующие свойства:

- 1) более жесткий спектр по сравнению с „обычными“ короткими гамма-всплесками;
- 2) угловое распределение на небесной сфере неоднородно. Эти события концентрируются в направлении ($l \sim 120^\circ$, $b \sim 0^\circ$), т.е. примерно на антицентр Галактики;
- 3) они являются близкими (~ 300 пк) объектами Галактики.

Проверить эти утверждения на основе всплесков SPI-ACS нельзя (по крайней мере потому, что этот эксперимент не позволяет определить направление на источник всплеска и построить его энергетический спектр), однако можно рассмотреть сопоставимость продленного излучения с гамма-всплесками от первичных черных дыр. Теоретическая кривая блеска, соответствующая испа-

рению первичной черной дыры, состоит из очень короткого эпизода, длительность которого - доли секунды, поскольку после испарения исчезает источник энергии, см. например [46, 115, 116]. Продленное излучение у таких событий не должно наблюдаться в гамма-диапазоне. В то же время продленное излучение, обнаруженное для группы всплесков с $T_{90} \leq 0.1$ с, не совместимо с гипотезой о существовании отдельной группы сверхкоротких гамма-всплесков от испаряющихся первичных черных дыр.

1.8. Обсуждение и основные результаты

В усредненной кривой блеска первой группы коротких событий (подтвержденные гамма-всплески) найдено продленное излучение длительностью 25 с и интенсивностью (46 ± 15) отс/с (Рис. 1.9). Таким образом, можно считать, что продленное излучение является общим свойством всех коротких гамма-всплесков: оно найдено в усредненной кривой блеска коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в различных экспериментах (см. таблица 1.1). Найденное в усредненной кривой блеска неподтвержденных коротких событий (вторая группа), продленное излучение, говорит о том, что часть событий из этой группы также принадлежит классу реальных гамма-всплесков, а не к срабатываниям от заряженных частиц, а общая доля коротких гамма-всплесков значительно больше, чем считалось ранее. Если предположить, что интенсивность продленного излучения одинакова для всех коротких гамма-всплесков, то количество реальных коротких гамма-всплесков в группе неподтвержденных событий можно оценить исходя из интенсивности продленного излучения в усредненных кривых блеска. Таким образом, доля реальных гамма-всплесков в группе неподтвержденных событий составляет $(84 \pm 35)\%$.

Доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте BATSE, составляет 25% от всех зарегистрированных гамма-всплесков [7], в экспери-

менте APEx доля коротких гамма-всплесков составляет $\sim 38\%$ [106], а доля подтвержденных другими космическими обсерваториями коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL - 16% (таблица 1.3). Тогда, если относить все неподтвержденные короткие события (вторая группа) к классу реальных гамма-всплесков, то общая доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных SPI-ACS INTEGRAL, составит $\sim 45\%$, что является верхним пределом количества коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS. Нижний предел равен 30% в предположении, что доля реальных гамма-всплесков в группе неподтвержденных событий составляет 84% .

Можно оценить чувствительность SPI-ACS к коротким событиям и сравнить ее с соответствующей чувствительностью эксперимента BATSE. В работе [117] обсуждается пересчет отсчетов SPI-ACS в энергетические единицы: для нормального угла между источником и осью X обсерватории INTEGRAL 1 отсчет SPI-ACS соответствует 10^{-10} эрг/см². Учитывая среднее значение фона в SPI-ACS и алгоритм срабатывания, получим, что чувствительность SPI-ACS к коротким событиям на масштабе времени 50 мс составляет $\sim 6 \cdot 10^{-8}$ эрг/см², а на масштабе времени 1 с $\sim 1.7 \cdot 10^{-7}$ эрг/см². Чувствительность эксперимента BATSE на масштабе времени 1 с составляет $\sim 10^{-7}$ эрг/см² [118].

На Рис. 1.16 представлена кривая блеска объединенных 1-ой и 2-ой групп событий (подтвержденные всплески и кандидаты). Длительность продленного излучения составляет ~ 120 с, что согласуется с результатами работы [29], где проведено исследование коротких гамма-всплесков в эксперименте BATSE. Общая значимость продленного излучения в интервале (5, 140) с составляет 6.2σ . Поскольку продленное излучение обнаружено в жестком энергетическом диапазоне (≥ 80 кэВ), можно предположить, что найденное продленное излучение является продолжением активности „центральной“ машины гамма-всплеска, а не началом рентгеновского послесвечения.

В усредненной кривой блеска третьей группы событий (неподтвержденные

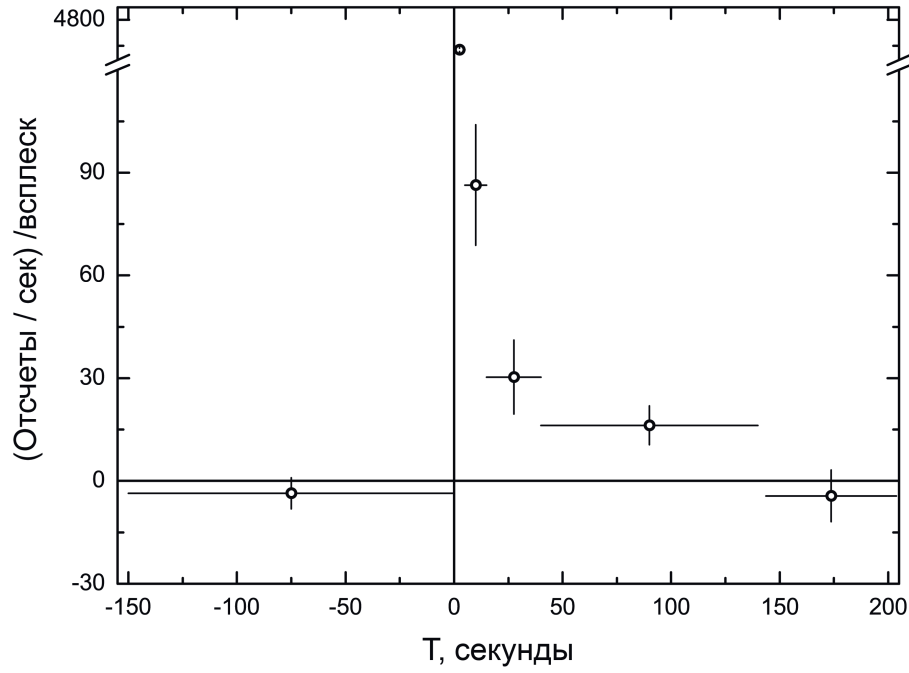


Рис. 1.16. Усредненная кривая блеска объединенных первой и второй групп событий. По горизонтальной оси - время относительно срабатывания T_0 . Ошибки приведены на уровне 1σ . По оси ординат представлено количество отсчетов в секунду в расчете на 1 событие.

короткие гамма-всплески с длительностью $T_{90} \leq 0.05$ с) также найдено продленное излучение с длительностью 125 с и полной интенсивностью (213 ± 35) отс/с (Рис. 1.10), что говорит о том, что природа „сверхкоротких“ гамма-всплесков, по-видимому, та же, что и „обычных“ коротких гамма-всплесков с длительностью $T_{90} \leq 2$ с. Однако, существует предположение [46], что „сверхкороткие“ гамма-всплески связаны с испарением гипотетических первичных черных дыр. Кривая блеска, соответствующая испарению первичной черной дыры, состоит из очень короткого эпизода, длительность которого - доли секунды [46, 116], и продленное излучение у таких событий не должно наблюдаться. Поэтому „сверхкороткие“ гамма-всплески, зарегистрированные SPI-ACS INTEGRAL, по-видимому, не следует относить к классу событий, связанных с испарениями первичных черных дыр. В усредненной кривой блеска контрольной, четвертой группы событий (срабатывания, вызванные заряженными частицами) продленное излучение отсутствует (Рис. 1.10).

Для исследуемых групп построено распределение $\log N - \log C_{max}$ (Рис. 1.17), где N – количество всплесков с темпом счета в максимуме кривой блеска, превышающим значение C_{max}). Завал кривой, соответствующий первой группе событий (подтвержденные короткие гамма-всплески из нашего каталога) в области малых значений C_{max} , вероятно, обусловлен эффектом селекции, который заключается в просчете событий с малой интенсивностью. Кривые, соответствующие выборкам 2 и 3 групп событий, наиболее близки к однородному распределению источников в евклидовом пространстве („закон $-3/2$ “). Поэтому, если предположить, что неподтвержденные короткие гамма-всплески имеют ту же природу, что и подтвержденные, то общее распределение $\log N - \log C_{max}$ будет удовлетворять закону $-3/2$, что подтверждает современные представления о пространственном распределении коротких гамма-всплесков как объектах локальной Вселенной ($z < 1$, [119]). Схожий вид распределения для 2-ой и 3-ей групп событий также указывает на единую природу этих событий и противоречит результатам работ [46, 115], в которых предполагается, что сверхкороткие гамма-всплески являются отдельным классом гамма-всплесков.

Темп регистраций гамма-всплесков в инструментах SPI-ACS и IBIS/ISGRI, находящихся на борту космической обсерватории INTEGRAL, представлены в таблице 1.4. За период с ноября 2002 года по октябрь 2008 в апертуре телескопа IBIS/ISGRI зарегистрировано 2 коротких и 54 длинных гамма-всплеска [108]. Таким образом, в среднем за год в расчете на всю сферу („эффективное“ поле зрения IBIS/ISGRI, в пределах которого зарегистрировано большинство событий, составляет $25^\circ \times 25^\circ$) регистрируется ~ 23 коротких и ~ 611 длинных гамма-всплесков. SPI-ACS регистрирует в среднем за год ~ 17 коротких и ~ 86 длинных подтвержденных гамма-всплесков (поле зрения SPI-ACS близко к 4π). Таким образом, по сравнению со SPI-ACS, IBIS/ISGRI регистрирует почти в 10 раз больше длинных событий. Вероятность того, что в поле зрения IBIS ($25^\circ \times 25^\circ$) будет зарегистрировано 2 события за период 5.83 года с темпом

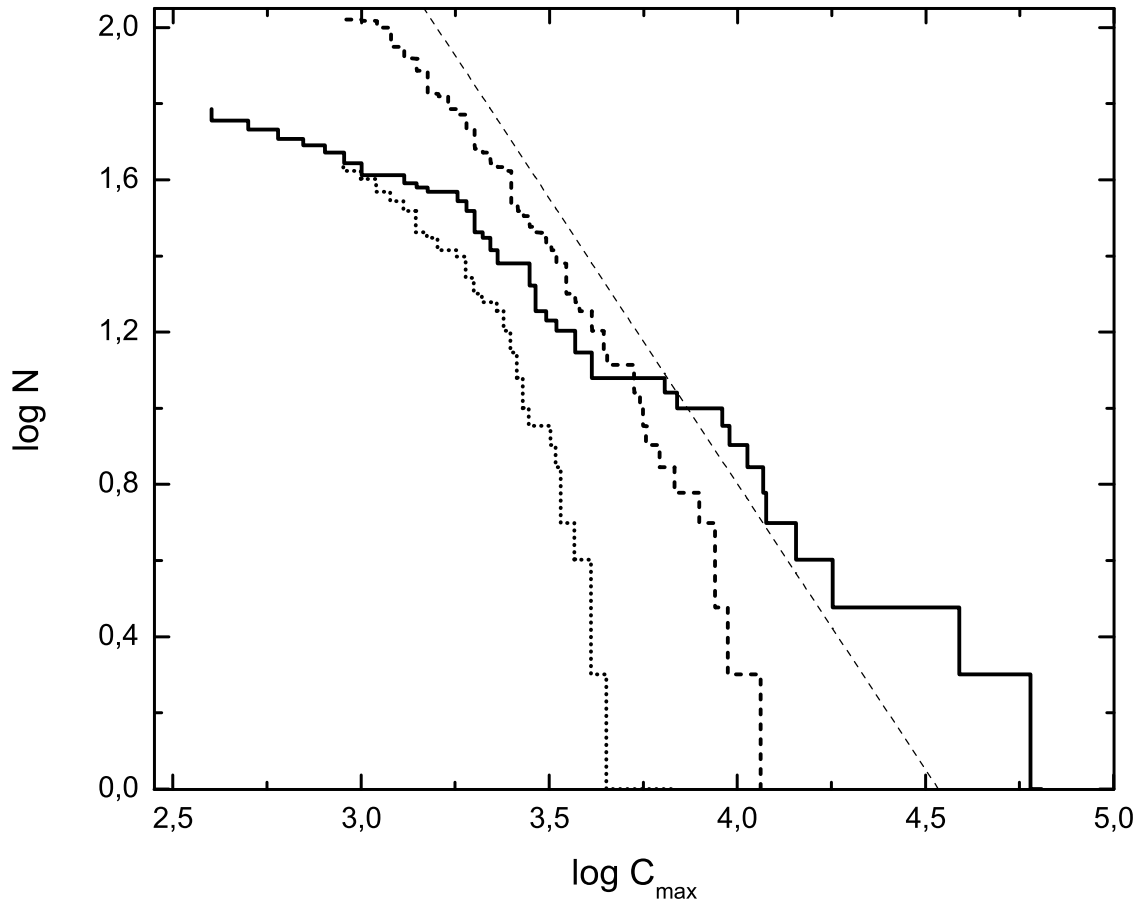


Рис. 1.17. Распределение $\log N$ - $\log C_{\max}$: сплошная линия - группа 1 (подтвержденных из нашего каталога), штриховая линия - группа 2 (неподтвержденных из каталога [67]), пунктирная линия - группа 3 (неподтвержденных сверхкоротких из каталога [67]). Тонкая штриховая ($\log N$ - $\log C_{\max} \sim -3/2$) соответствует однородному распределению источников в 3-мерном евклидовом пространстве.

регистрации, соответствующим темпу регистрации коротких подтвержденных гамма-всплесков в SPI-ACS, составляет 25%. В случае вместе взятых неподтвержденных и подтвержденных коротких событий в SPI-ACS аналогичная вероятность составляет 13%, а при сравнении темпов регистрации длинных всплесков аналогичная вероятность составляет всего 1.4%. Из этого можно сделать вывод, что IBIS/ISGRI более чувствителен к мягким длинным гамма-всплескам. Действительно, нижний энергетический порог у IBIS/ISGRI (15 кэВ) значительно ниже, чем у SPI-ACS (~ 80 кэВ). С другой стороны, это означает, что в данных IBIS/ISGRI могут присутствовать неотожествленные короткие гамма-всплески. Поиску и анализу коротких гамма-всплесков в экспериментах SPI и IBIS/ISGRI посвящена следующая глава диссертации.

Таблица 1.4. Темп регистрации гамма-всплесков в SPI-ACS и IBIS/ISGRI INTEGRAL

Детектор	Зарегистр. событий	Промежуток времени, годы	Темп регистр., событий/(год $\times 4\pi$)	Тип события
IBIS/ISGRI	2	5.83	22.64	ConfirmedShortGRB
IBIS/ISGRI	54	5.83	611.37	ConfirmedLongGRB
SPI-ACS	83	5.25	16.95	ConfirmedShortGRB
SPI-ACS	161	2.25	71.56	UnconfirmedShortGRB
SPI-ACS	194	2.25	86.22	ConfirmedLongGRB
SPI-ACS	105	2.25	46.67	UnconfirmedShortGRB
				in $\log N - \log C_{max}$
SPI-ACS	52	5.25	10.48	ConfirmedShortGRB
				in $\log N - \log C_{max}$

1.9. Выводы главы

В работе исследованы короткие гамма-всплески, зарегистрированные с помощью антисовпадательной защиты спектрометра SPI обсерватории INTEGRAL за период 2002-08гг.

В усредненных кривых блеска трех групп событий найдено значимое продленное излучение длительностью 25 с и более. Продленное излучение, найденное в усредненной кривой блеска коротких событий, не подтвержденных другими обсерваториями, может служить доказательством того, что часть событий в этой выборке принадлежит классу реальных гамма-всплесков. Таким образом, доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL, значительно больше, чем считалось до сих пор, и может составлять от 30 до 45% от всех гамма-всплесков, зарегистрированных в этом эксперименте.

Доля коротких, более жестких гамма-всплесков растет с увеличением нижнего энергетического порога срабатывания детекторов (таблица 1.3).

При исследовании распределения длительностей и продленного излучения коротких гамма-всплесков SPI-ACS INTEGRAL не получено убедительных свидетельств в пользу существования отдельного класса сверхкоротких гамма-всплесков.

Глава 2

Поиск коротких гамма-транзиентов в эксперименте SPI INTEGRAL

В этой Главе описываются:

алгоритм поиска коротких транзиентных событий в данных эксперимента SPI INTEGRAL, классификация обнаруженных событий, а также каталог гамма-всплесков и источников мягкого повторного гамма-излучения (SGR), проводятся их исследования и сравнение с другими экспериментами.

2.1. Обсерватория INTEGRAL

Обсерватория INTEGRAL была запущена 17 октября 2002 года на высоко-эллиптическую орбиту (перигей начальной орбиты - 9000 км, апогей - 153000 км) с периодом 72 часа [120]. Обсерватория состоит из телескопов IBIS/ISGRI, SPI, JEM-X, OMC, и антисовпадательной защиты SPI-ACS. Все апертурные телескопы (SPI, IBIS/ISGRI, JEM-X, OMC), размещенные на обсерватории, соосны.

2.1.1. Гамма-телескоп IBIS

IBIS - гамма-телескоп с кодирующей маской [121]. Рабочий диапазон энергий - от 15 кэВ до 10 МэВ. В диапазоне 15-300 кэВ фотоны регистрируются детектором ISGRI (состоит из CdTe-элементов), в диапазоне 300 кэВ - 10 МэВ - детектором PICsIT (CsI-элементы). Детекторы телескопа имеют полную площадь около 2500 см². Поле зрения составляет около 30° на пределе чувствительности.

2.1.2. Гамма-телескоп SPI

Гамма-спектрометр SPI состоит из 19 детекторов шестиугольной формы, изготовленных из сверхчистого германия, с общей геометрической площадью 508 см^2 [122] (Рис. 1.2). Детекторы охлаждаются до температуры 85-90 К, благодаря чему достигается спектральное разрешение 2.2 кэВ на 1.33 МэВ, которое является одним из лучших на момент запуска обсерватории (2002 г.). Энергетический диапазон чувствительности 20 кэВ - 8 МэВ. Для построения изображений используется метод кодирующей апертуры, изготовленной из вольфрама. Полное поле зрения телескопа составляет 30° , угловое разрешение - 2.5° , однако точность определения координат точечных источников может достигать 10 угловых минут в зависимости от интенсивности источника. Для определения небесных координат источника могут быть использованы данные, полученные с помощью телескопа IBIS, если он наблюдается также в мягком гамма-диапазоне $<200 \text{ кэВ}$. В этом случае точность определения координат может составлять 1 минуту дуги. Следует отметить, что поле зрения SPI несколько шире поля зрения IBIS/ISGRI и имеет другую форму (шестиугольную против квадратной). Поэтому большая часть событий, наблюдавшихся в эксперименте SPI, также присутствует в данных IBIS/ISGRI, за исключением некоторых событий, расположенных на краю поля зрения SPI.

Для устранения фона на 511 кэВ, связанного с взаимодействиями частиц космических лучей с кодирующей маской, под маской установлен пластиковый сцинтиллятор PSAC. Значительная часть наблюдаемого фона в SPI INTEGRAL связана с ядерными реакциями бета-распада в диапазоне 200 кэВ – 2 МэВ [123–125]. Данные взаимодействия можно исключить с помощью анализа формы импульса в детекторе, для этого используется система PSD (Pulse Shape Discrimination).

2.1.3. Антисовпадательная защита SPI-ACS телескопа SPI

Для увеличения чувствительности телескопа SPI за счет устранения фона, связанного с взаимодействием аппаратуры с космическими лучами, используется антисовпадательная защита SPI-ACS, состоящая из 91 кристалла германата висмута (BGO) с максимальной эффективной площадью около 0.3 м^2 [70] (см. раздел 1.2, а также рис. 1.2).

2.2. Постановка задачи

Известно, что гамма-всплески классифицируются на короткие и длинные, причем доля коротких всплесков в эксперименте BATSE составляет 25% [7]. Однако доля коротких всплесков в эксперименте IBIS/ISGRI составляет всего 4% [108] (таблица 1.3). Таким образом, в эксперименте IBIS/ISGRI наблюдается недостаток коротких гамма-всплесков, даже с учетом зависимости доли коротких гамма-всплесков от нижнего порога энергетической чувствительности детектора космического телескопа, описанной в разделе 1.6 (ожидаемое значение составляет около 10%, см. Рис. 1.14). Как было показано в Главе 1, доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью антисовпадательной защиты ACS спектрометра SPI, может достигать 45%, что значительно больше, чем считалось до сих пор. Однако доля неподтвержденных коротких событий в SPI-ACS составляет 30%. Таким образом, с одной стороны, в эксперименте IBIS/ISGRI наблюдается недостаток коротких гамма-всплесков, а с другой – в эксперименте SPI-ACS наблюдается избыток коротких неподтвержденных событий.

Как упоминалось в разделе 2.1.3, система автоматического отбора событий IBAS используется только для анализа данных инструментов IBIS/ISGRI и SPI-ACS. Таким образом, в данных эксперимента SPI INTEGRAL могут присутство-

вать неидентифицированные гамма-события. Спектрометр SPI более чувствителен к жесткому гамма-излучению (по сравнению с IBIS/ISGRI), которое наблюдается от коротких гамма-всплесков. Таким образом, основная цель данной работы - поиск коротких гамма-всплесков в данных эксперимента SPI INTEGRAL. Помимо коротких гамма-всплесков, в работе также проводился поиск других коротких транзиентных явлений, таких, как длинные гамма-всплески, источники мягкого повторного гамма-излучения, аномальные рентгеновские пульсары.

2.3. Алгоритм отбора событий

В работе анализировались данные, полученные в экспериментах SPI, SPI-ACS, IBIS/ISGRI за период с 12 июля 2003 года по 23 января 2010 года (91-888 витки обсерватории). Витки с 1-го по 90-ый были исключены из обработки, так как в начале миссии INTEGRAL проводились различные калибровки, модифицировались программы записи и обработки данных, происходила стабилизация фона в детекторах.

Основная цель работы - поиск коротких гамма-всплесков в данных эксперимента SPI. Данные антисовпадательной защиты SPI-ACS и телескопа IBIS/ISGRI использовались лишь для совместного исследования событий, обнаруженных первоначально в данных SPI.

В работе использован алгоритм обработки исходных данных телескопа SPI, отбирающий триггерные события на масштабах времени 0.001, 0.01, 0.1, 1 и 10 сек с порогами значимости 20, 6, 5, 5 и 4 σ , соответственно. Порог в 20 σ для интервала 0.001 сек выбран таким образом, чтобы за исследуемый период времени минимизировать количество флуктуаций, так, чтобы при начальном отборе получить только события большой интенсивности. Только такие короткие события длительностью 0.001 сек можно было бы подтвердить с помощью других экспериментов (с худшим временным разрешением). Подавляющее боль-

шинство таких триггерных событий составляют взаимодействие заряженных частиц с детектором. Пороги значимости для остальных временных масштабов подобраны таким образом, чтобы не потерять маломощные события. Несмотря на то, что оцениваемое количество флуктуаций за исследуемый период велико (500 шт и более), полное количество триггерных событий допускает дальнейший отбор по критериям 1-6 (см. ниже).

В анализе данных телескопа SPI использовалась сумма трех типов отсчетов. SGL - „обычный“ отсчет, зарегистрированный в одном детекторе. PSD - отсчет, зарегистрированный в одном детекторе, форма импульса которого подтверждает его фотонную природу. DBL - отсчеты, которые зарегистрированы одновременно в двух различных детекторах вследствие комптоновского рассеяния исходного фотона внутри одного из детекторов.

Значимость i -го события $N\sigma_i$ определялась в диапазоне энергий (20, 650) кэВ и вычислялась по формуле 2.1, где C_i - кол-во отсчетов в исследуемом i -ом бине кривой блеска (сумма отсчетов всех детекторов), F_k - уровень фона, определенный как среднее число отсчетов в k -ом интервале (-50, 0) сек относительно времени начала исследуемого i -го бина. Отсчеты с энергией выше 650 кэВ были исключены из данного этапа анализа вследствие того, что часть отсчетов в этом диапазоне связана с шумом электроники. За исследуемый промежуток времени (2003-2010 гг.) количество работающих детекторов телескопа SPI уменьшалось с 19 до 17.

$$N\sigma_i = \frac{C_i - F_k}{\sqrt{F_k}}. \quad (2.1)$$

Всего данным алгоритмом отобрано более ста тысяч событий на различных масштабах времени (от 1 мс до 10 сек). Для каждого обнаруженного события строилась кривая блеска, спектрально-временная диаграмма и анализировалось распределение фотонов по детекторам.

Сформировано три класса событий: флуктуации, кандидаты в „реальные“ гамма-события (например, гамма-всплески), и 3 типа инструментальных явлений, связанных с взаимодействием детектора с заряженными частицами (взаимодействия с пучками электронов, протонами, и галактическими космическими лучами высоких энергий). События типа „флуктуации“, как правило, обнаружены на пороге значимости, и отсутствуют в данных других космических телескопов (в первую очередь - в данных экспериментов IBIS/ISGR1 и SPI-ACS) и поэтому исключались из анализа.

Классификация обнаруженных событий построена на основе следующих критериев:

1. **длительность.** В качестве параметра, характеризующего длительность события, использовался параметр T_{90} [8]. Для гамма-всплесков значение этого параметра обычно лежит в пределах (0.1, 100) сек, для вспышек источников SGR и AXP - в интервале (0.01, 1) сек. События, связанные с взаимодействием детекторов с заряженными частицами, в зависимости от типа, имеют длительность от долей миллисекунд до долей секунды.
2. **жесткость энергетического спектра.** В качестве параметра, характеризующего жесткость энергетического спектра, использовалось отношение отсчетов в диапазоне (100, 1000) кэВ к отсчетам в диапазоне (20, 100) кэВ. Для вспышек источников SGR и AXP значение данного параметра значительно меньше единицы. Спектры гамма-всплесков отличаются большим разнообразием, поэтому значение параметра жесткости может меняться в широких пределах и составляет, в среднем, около единицы. Для первого типа взаимодействий детекторов с заряженными частицами значение этого параметра значительно меньше единицы, для двух других - значительно больше единицы.
3. **распределение отсчетов по детекторам.** Для количественной оцен-

ки распределения фотонов события по детекторам использовалось отношение максимальной скорости счета фотонов в одном детекторе к среднему значению скорости счета фотонов в одном детекторе. Для „реальных“ гамма-событий (гамма-всплесков, вспышек источников SGR и AXP), находящихся в поле зрения телескопа SPI (в том числе, для событий на краю поля зрения), значение этого параметра, как правило, лежит в интервале (1 - 3). Для событий второго типа взаимодействий детекторов с заряженными частицами значение этого критерия значительно превышает значение 3.

4. **характер спектральной эволюции** оценивался на данном этапе в большинстве случаев визуально и служил в качестве дополнительного критерия для отбора событий, связанных с взаимодействием детекторов с заряженными частицами. Для большинства „реальных“ событий характерна эволюция энергетического спектра от жесткого к мягкому (см. главу 3). Эволюция спектра событий, связанных с взаимодействием детекторов SPI с (предположительно) протонами, имеет, как правило, прямо противоположный характер. События, связанные с взаимодействием детекторов SPI с (предположительно) галактическими космическими лучами высоких энергий, наблюдаются в виде спектральных линий с энергиями 55, 64, и 198 кэВ, соответствующих ядерным реакциям захвата тепловых нейтронов ядрами Ge [126], когда нейтроны рождаются в результате каскадных реакций. Для отбора событий такого типа также введен параметр, представляющий собой отношение количества отсчетов в интервале (0, 50) мс к отсчетам в интервале (-50, 0) мс в узком диапазоне энергий (195, 201) кэВ. Данный критерий применялся лишь для отбора событий на масштабах времени 10 и 100 мс, поскольку события данного типа имеют длительность, в среднем, около 50 мс.

5. **особенности темпа регистрации событий** оценивались визуально. Большая часть вспышек источников SGR и AXP наблюдается в течение активности соответствующего источника, которая длится около месяца. Крайне неравномерный темп регистрации характерен для событий, связанных с взаимодействием детекторов SPI с протонами и пучками электронов. Темп регистрации гамма-всплесков - наоборот, имеет постоянную величину. Это связано с их космологической природой.

 6. **присутствие события в данных SPI-ACS, IBIS/ISGRI и других экспериментов.** Большая часть (более 90%) „реальных“ гамма-событий (подтвержденных другими космическими экспериментами) также обнаружены в данных IBIS/ISGRI, и около трети событий - в данных SPI-ACS. Присутствие и локализация события в данных IBIS/ISGRI является надежным признаком „реального“ гамма-события. Часть событий, связанных с взаимодействием детекторов SPI с пучками электронов (около 30% событий) и с галактическими космическими лучами высоких энергий (около 70% событий) обнаружены в данных SPI-ACS.
- Для событий-кандидатов в реальные гамма-события проведен поиск подтверждений в известных каталогах гамма-транзиентов:
- а. мастер-лист [78], представляющий собой список всех известных гамма-всплесков с 1991 года по настоящее время;
 - б. каталог рентгеновских всплесков эксперимента IBIS/ISGRI [127];
 - в. каталог всплесков источника SGR 1806-20 [128], зарегистрированных с помощью IBIS/ISGRI;
 - г. он-лайн каталог гамма-событий IBIS/ISGRI [129];
 - д. он-лайн каталог срабатываний SPI-ACS [72].

Также для всех событий-кандидатов проведен независимый поиск подтверждений в данных SPI-ACS и IBIS/ISGRI. Как было указано выше, поля зрений апертурных телескопов SPI, IBIS/ISGRI, JEM-X, OMC соосны, а антисовпадателная защита SPI-ACS регистрирует фотоны практически с любого направления. Поэтому одно событие может присутствовать в данных сразу нескольких телескопов. Размер поля зрения телескопа IBIS/ISGRI чуть меньше размера поля зрения SPI, а энергетические диапазоны чувствительности данных детекторов пересекаются в диапазоне (20, 200) кэВ, причем эффективность детектора ISGRI по отношению к SPI в этом диапазоне энергий выше. Из этого следует, что большинство „реальных“ гамма-событий, имеющих большую интенсивность в диапазоне (20, 200) кэВ, обнаруженных в данных спектрометра SPI, должны также присутствовать в данных IBIS/ISGRI. Исключение составляют события, зарегистрированные на краю поля зрения SPI. С другой стороны, эффективная площадь детектора SPI-ACS растет с увеличением угла между направлением на источник и осью апертурных телескопов. Энергетический диапазон чувствительности SPI-ACS (80, 10000) кэВ перекрывается с диапазонами чувствительности IBIS/ISGRI (20, 200) кэВ и SPI (20, 8000) кэВ. И „реальное“ событие, обнаруженное в данных SPI, зарегистрированное на краю, либо вне полей зрения телескопов IBIS/ISGRI и SPI, с большой вероятностью должно наблюдаться также в данных детектора SPI-ACS. Таким образом, гамма-событие, обнаруженное в данных телескопа SPI, с большой вероятностью должно присутствовать либо в данных IBIS/ISGRI (если источник события находится в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI и событие имеет мягкий спектр), либо в данных SPI-ACS (с ростом угла между направлением на источник всплеска и осью апертурных телескопов вероятность регистрации увеличивается). Можно отметить, что интенсивные события видны как в данных IBIS/ISGRI (при

условии, что источник события находится в поле зрения), так и в SPI-ACS. Поиск подтверждений в данных телескопов SPI-ACS и IBIS/ISGRI позволяет провести дополнительную проверку событий-кандидатов в реальные гамма-события, обнаруженных в данных спектрометра SPI. Поэтому если событие не было обнаружено ни в данных SPI-ACS, ни в данных IBIS/ISGRI (и при этом обладало необходимыми для регистрации в этих экспериментах свойствами, описанными выше), то оно исключалось из дальнейшего анализа и переносилось в первую группу событий - флуктуации.

При обнаружении события в кривой блеска, построенной по данным IBIS/ISGRI, производилась его локализация по этим данным. Некоторые события локализовать с помощью IBIS/ISGRI не удалось, несмотря на их высокую статистическую значимость. Как правило, это связано с тем, что событие было зарегистрировано на краю, либо вне поля зрения IBIS/ISGRI через антисовпадательную защиту. В одном случае локализация события проводилась по данным SPI. И, наконец, для локализации двух событий были использованы данные триангуляции IPN3 [130]. В этом случае удастся улучшить IPN локализацию до одного единственного пересечения триангуляционных колец IPN.

2.4. Классификация обнаруженных событий

2.4.1. Флуктуации

Для этого типа событий характерно равномерное распределение отсчетов по детекторам и по энергиям. Профиль кривой блеска также не выявляет каких-либо особенностей. В эту категорию входят также срабатывания, которые не удастся отнести к другому классу событий. Все события этого типа исклю-

чаются из дальнейшего анализа.

2.4.2. Взаимодействие детекторов SPI с высокоэнергичными протонами

Срабатывания данного типа легко идентифицировать, поскольку они обладают сразу несколькими наблюдательными особенностями. Пример такого события представлен на Рис. 2.1. Длительность событий составляет в среднем около 10 мс. Форма кривой блеска, как правило, несимметричная и характеризуется быстрым ростом и достаточно медленным экспоненциальным спадом. Но встречаются также события с практически симметричной кривой блеска, они обычно в несколько раз короче.

Главная особенность этого класса событий - крайне неравномерное распределение отсчетов по детекторам - практически все отсчеты регистрируются в одном или нескольких соседних детекторах. Следует отметить, что неравномерное распределение отсчетов по детекторам не характерно для „реальных“ космических гамма-событий (космических гамма-всплесков, солнечных вспышек и др.).

Спектр событий, как правило, жесткий, с резким обрывом на 2 МэВ, причем жесткость спектра растет со временем. Эти особенности также не характерны для „реальных“ событий. Иногда встречаются события с более мягким спектром, у них значимой спектральной эволюции нет, и профиль кривой блеска симметричен.

Следует отметить, что не все эти особенности могут проявляться в одном событии: например, профиль кривой блеска, длительность, спектральная эволюция соответствуют принятой феноменологической модели этого типа событий, но при этом распределение отсчетов по детекторам может быть равномерным.

Темп регистрации этих событий в данных SPI показан черной кривой на

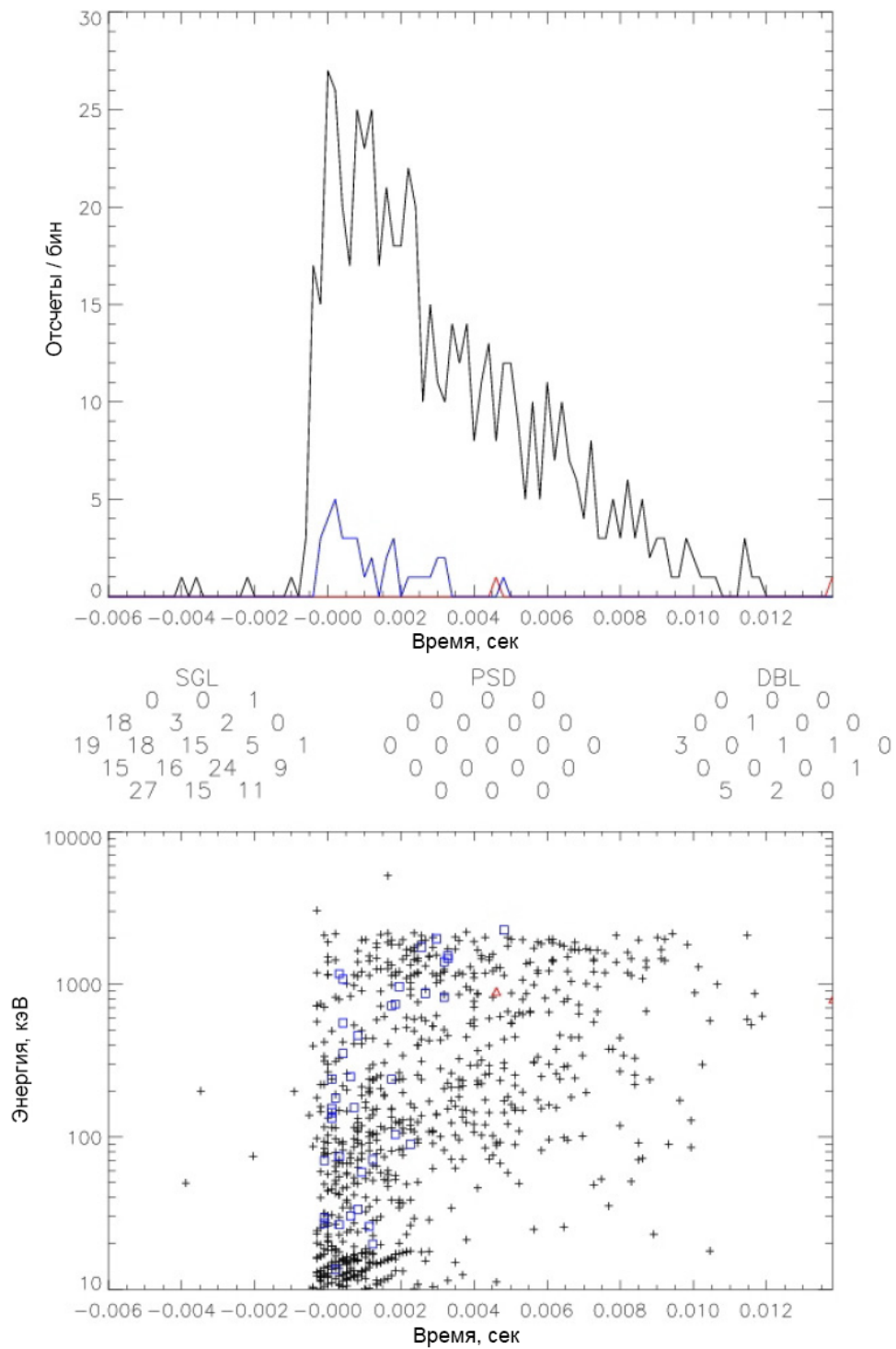


Рис. 2.1. Событие, связанное с взаимодействием детекторов SPI с протоном. В верхней части рисунка – кривая блеска в диапазоне 20 кэВ – 8 МэВ. Черным цветом показаны SGL-фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – кол-во отсчетов в бине кривой блеска. В средней части рисунка – распределение трех групп фотонов по детекторам SPI. В нижней части рисунка – соответствующая кривой блеска диаграмма энергия-время. Черным цветом показаны SGL- фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – энергия фотона в кэВ.

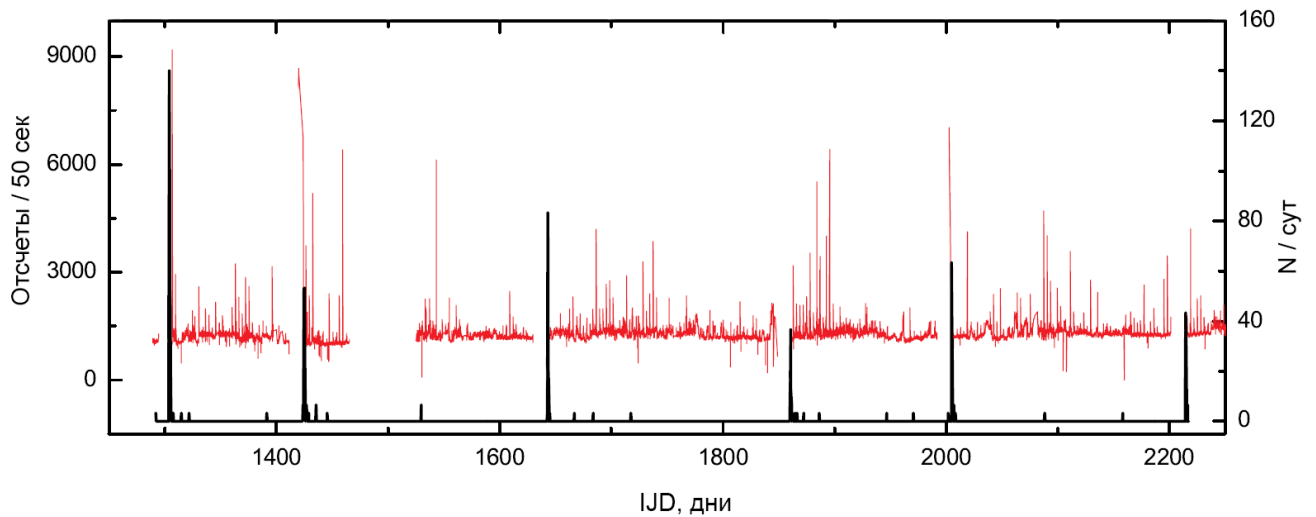


Рис. 2.2. Темп регистрации событий, вызванных взаимодействием детекторов SPI с протонами. По горизонтальной оси – время в единицах юлианской даты IJD, по правой вертикальной оси – количество событий, зарегистрированных за день. Красной кривой показано поведение фона в детекторах SPI в диапазоне 18-30 кэВ. По левой вертикальной оси – кол-во отсчетов за 50 с.

Рис. 2.2. Из Рис. 2.2 следует, что темп регистрации событий этого типа неравномерный - наблюдается несколько достаточно коротких эпизодов активной регистрации длительностью 1-2 дня каждый, в промежутках между которыми события не регистрируются (Рис. 2.2). Интересно отметить, что эти эпизоды наблюдаются после отжигов детекторов SPI, которые проводятся регулярно (раз в несколько месяцев) для восстановления структуры кристаллов Германия, которая разрушается под действием нейтронов космических лучей. Разрушение кристаллической структуры приводит к падению эффективной площади и энергетического разрешения детекторов. Красной кривой на нижней части Рис. 2.2 показана эволюция фона в спектрометре SPI в диапазоне энергий 18-30 кэВ. В трех случаях из шести повышение уровня фона коррелирует с периодом интенсивной регистрации событий данного класса.

В данных антисовпадательной защиты SPI-ACS телескопа SPI события данного класса не обнаружены, несмотря на их очень высокую интенсивность в экс-

перименте SPI. Мы предполагаем, что эти события связаны с взаимодействием детекторов с высокоэнергичными частицами космических лучей (вероятно, протонами), которые попадают в детекторы SPI через поле зрения, минуя таким образом антисовпадательную защиту, и генерируют ливень вторичных частиц в детекторе, которые им и регистрируются. Природа связи между темпом регистрации событий и моментами отжига детекторов не выяснена. Похожие события регистрируются в эксперименте GBM/Fermi [131]. В работе [131] высказано предположение о связи этих событий с взаимодействием детекторов с протонами высоких энергий.

2.4.3. Взаимодействие детекторов SPI с пучками электронов

Пример события данного типа приведен на Рис. 2.3. Длительность таких событий в большинстве случаев не превышает 1-2 мс, но есть и более длинные события с длительностью около 10 мс, которые состоят из отдельных миллисекундных импульсов. Форма импульсов в большинстве случаев симметричная. Спектр - мягкий, с завалом на 100 кэВ. Распределение отсчетов по детекторам - равномерное.

Около трети событий обнаружены в данных антисовпадательной защиты SPI-ACS и представляют собой короткие импульсы длительностью 50 мс (50 мс - временное разрешение SPI-ACS). Отсутствие событий в данных SPI-ACS в остальных случаях может быть связано с эффектами селекции: события достаточно слабые и очень короткие (длительность события примерно в 50 раз меньше временного разрешения SPI-ACS). Возможно, также, что интенсивность события в SPI-ACS (и, как следствие, детектирование) зависит от ориентации обсерватории относительно источника события.

Темп регистрации событий неравномерный и не коррелирует с темпом регистрации событий, обсуждаемых в предыдущем пункте (Рис. 2.4, Рис. 2.2).

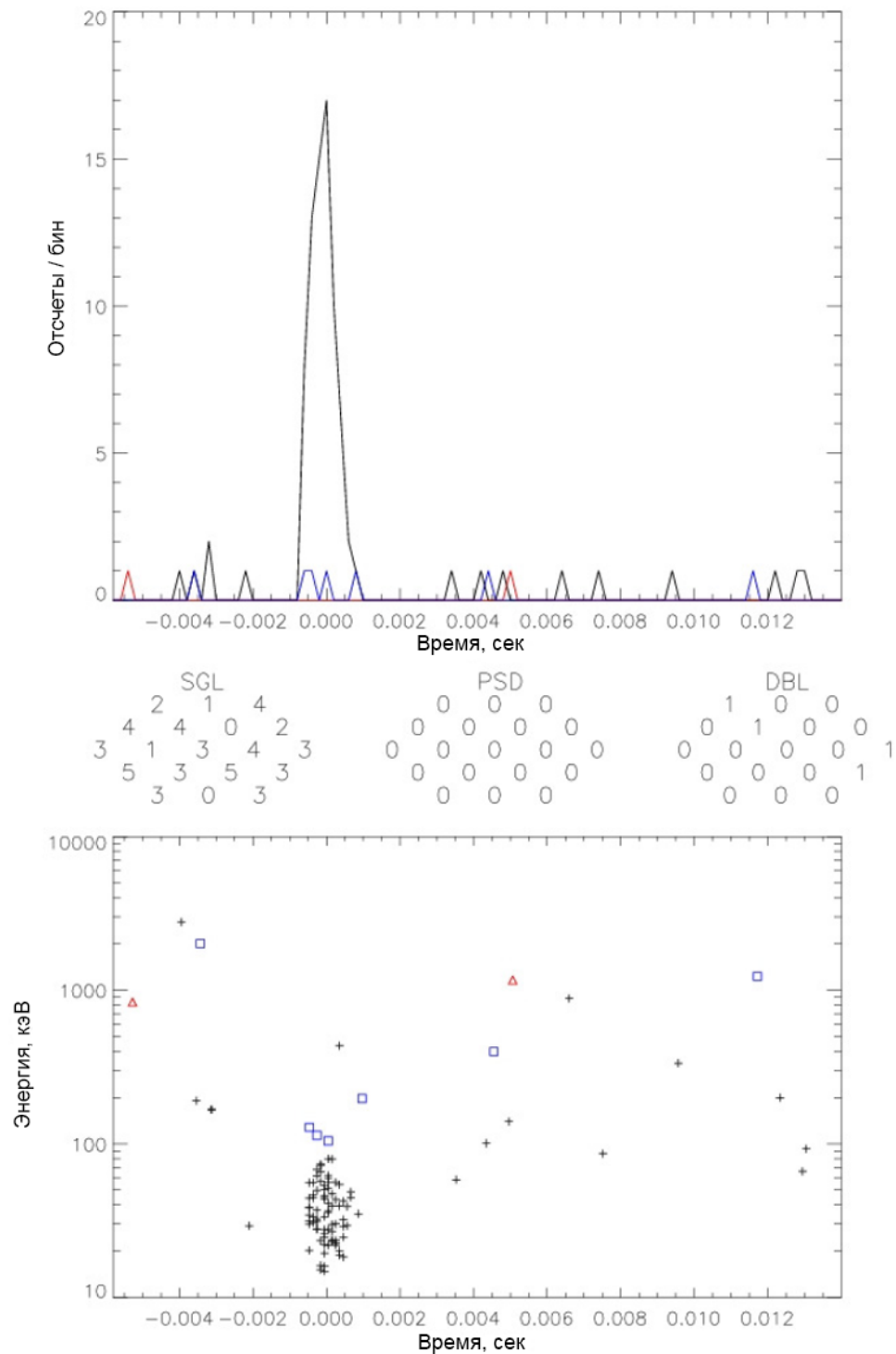


Рис. 2.3. Событие, связанное с взаимодействием детекторов SPI с пучком электронов. В верхней части рисунка – кривая блеска в диапазоне 20 кэВ – 8 МэВ. Черным цветом показаны SGL-фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – кол-во отсчетов в бине кривой блеска. В средней части рисунка – распределение трех групп фотонов по детекторам SPI. В нижней части рисунка – соответствующая кривой блеска диаграмма энергия-время. Черным цветом показаны SGL- фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – энергия фотона в кэВ.

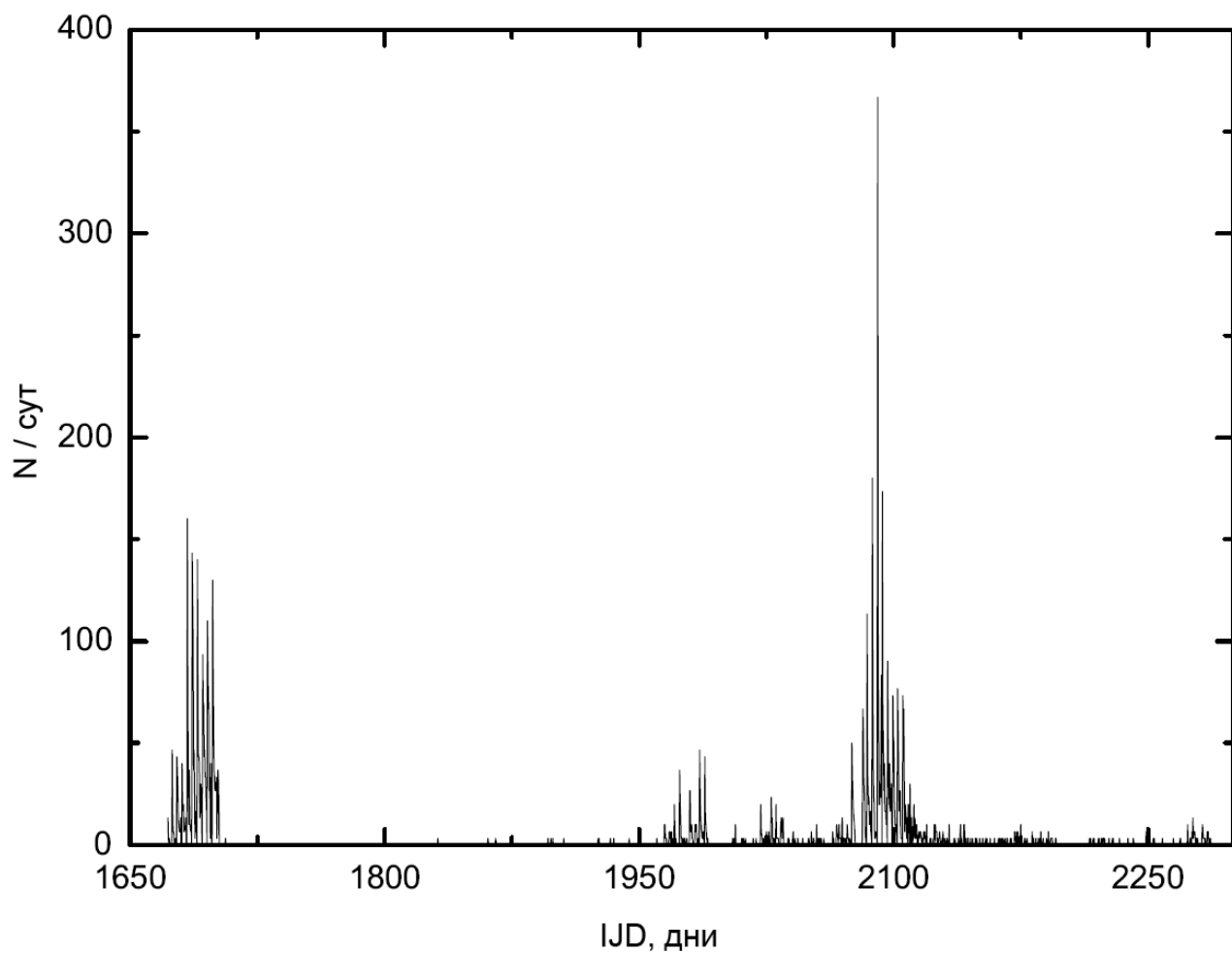


Рис. 2.4. Темп регистрации событий, вызванных взаимодействием детекторов SPI с пучками электронов. По горизонтальной оси – время в единицах юлианской даты IJD, по вертикальной оси – количество событий, зарегистрированных за день.

Наблюдается несколько периодов активной регистрации длительностью около месяца каждый. В промежутки времени между этими эпизодами события практически не регистрируются. На Рис. 2.5 более подробно рассмотрен второй эпизод. Фиолетовой кривой показан темп регистрации событий этого типа. Из Рис. 2.5 следует, что темп регистрации меняется периодически с периодом 3 сут., что соответствует периоду обращения обсерватории INTEGRAL вокруг Земли. Причем максимальное количество зарегистрированных событий наблюдается в то время, когда обсерватория находится вблизи перигея своей орбиты (аппаратура включается на высоте около 40 тыс. км после прохождения радиационных поясов). К концу витка число зарегистрированных событий постепенно уменьшается. На Рис. 2.5 также представлено поведение фона в детекторах SPI в четырех энергетических диапазонах. Уровень фона в мягком гамма-диапазоне 18-100 кэВ также периодически меняется с периодом 3 сут., причем подъем уровня фона наблюдается одновременно с увеличением темпа регистрации событий, т.е. в то время, когда космический аппарат находится вблизи Земли.

Из этого можно сделать вывод, что события связаны с влиянием магнитосферы Земли (т.е. внешнего, электронного, радиационного пояса). Неравномерный глобальный темп регистрации этих событий, который меняется в первом приближении на масштабах одного года, может быть связан с изменением ориентации орбиты обсерватории относительно магнитосферы Земли. Вероятно, эти события регистрируются в те моменты, когда орбита обсерватории пересекает хвост магнитосферы Земли. Мы предполагаем, что эти события могут быть связаны с взаимодействием детекторов с пучками электронов во внешнем радиационном поясе магнитосферы Земли.

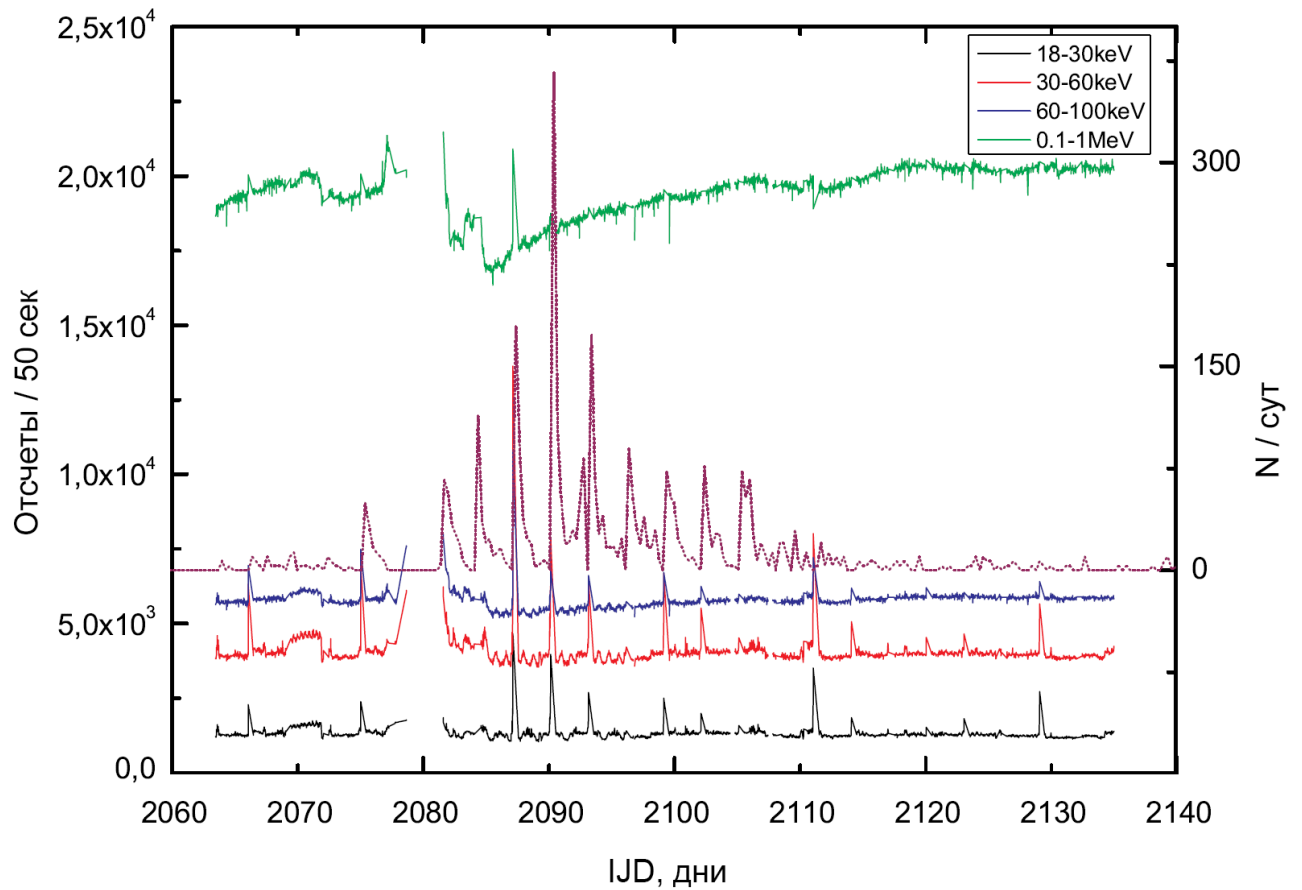


Рис. 2.5. Темп регистрации событий, связанных с взаимодействием обсерватории с пучками электронов. Фиолетовой кривой показан темп регистрации коротких событий, связанных с взаимодействием обсерватории с пучками электронов. По горизонтальной оси – время в единицах юлианской даты IJD, по правой вертикальной оси – количество событий, зарегистрированных за день. Черной кривой показан уровень фона в SPI в диапазоне 18-30 кэВ, красной – в диапазоне 30-60 кэВ, синей – в диапазоне 60-100 кэВ, зеленой – в диапазоне 100-1000 кэВ. По левой вертикальной оси – кол-во отсчетов в бине длительностью 50 с.

2.4.4. Спектральные линии 53 кэВ, 66 кэВ, 198 кэВ

Данный тип событий связан с излучением в спектральных линиях 198 кэВ, 53 кэВ и 66 кэВ. Спектральные линии 198 кэВ, 53 кэВ и 66 кэВ связаны со следующими ядерными реакциями (реакции захвата тепловых нейтронов):

$^{70}\text{Ge} + n > ^{71m}\text{Ge}$ (время жизни ≈ 20.4 мс) $> ^{71}\text{Ge} + \gamma$ двухступенчатое излучение с энергией $175+23=198$ кэВ [126, 132].

$^{72}\text{Ge} + n > ^{73m}\text{Ge}$ (время жизни ≈ 0.5 с) $> ^{72}\text{Ge} + \gamma$ с энергией 53 кэВ [126, 133].

$^{72}\text{Ge} + n > ^{73m}\text{Ge} > ^{72}\text{Ge} + \gamma$ двухступенчатое излучение с энергией $53+13=66$ кэВ [126].

Примеры событий данного класса представлены на Рис. 2.6, 2.7. Длительность излучения в линии 198 кэВ составляет несколько десятков миллисекунд. Интенсивное излучение в спектральных линиях 53 кэВ и 66 кэВ наблюдается не во всех случаях. Длительность интенсивного излучения в линиях 53 кэВ и 66 кэВ может составлять несколько секунд (Рис. 2.7). В некоторых случаях излучению в линии 198 кэВ предшествует короткое событие длительностью менее 1 мс. Для событий, связанных с излучением в спектральных линиях 198 кэВ, 53 кэВ и 66 кэВ, характерно так называемое „насыщение“ германиевых детекторов – отсутствие сигнала в одном или нескольких соседних детекторах в течение нескольких секунд [67] (см. также раздел 1.4 и Рис. 1.3). Начало насыщения соответствует началу интенсивного излучения в спектральных линиях. Насыщения наблюдаются у 25% событий данного класса. В случае события, изображенного на Рис. 2.6, насыщение наблюдается в 9-ом детекторе в течение 4 с, в 10-ом детекторе в течение 18 с. Кривая блеска в эксперименте SPI-ACS и в 9-ом, 10-ом детекторах SPI показана на Рис. 1.3. В случае события, изображенного на Рис. 2.7, насыщение обнаружено в 16-ом детекторе длительностью 2 с. Природа насыщений не ясна.

Более 70% событий наблюдаются также в данных SPI-ACS как короткие

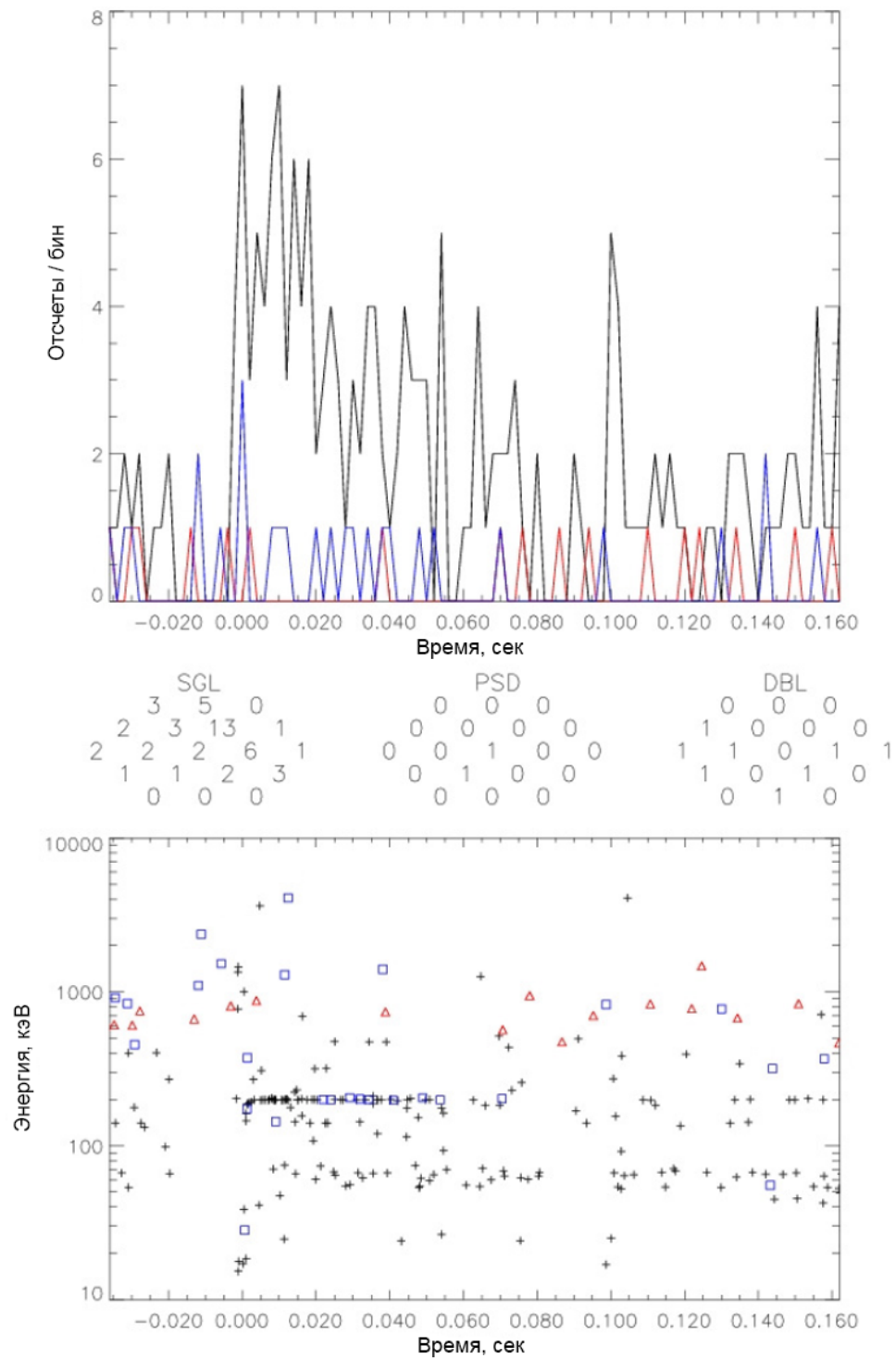


Рис. 2.6. Событие, связанное с излучением в спектральных линиях 53 кэВ, 66 кэВ, 198 кэВ. В верхней части рисунка – кривая блеска в диапазоне 20 кэВ – 8 МэВ. Черным цветом показаны SGL-фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – кол-во отсчетов в бине кривой блеска. В средней части рисунка – распределение трех групп фотонов по детекторам SPI. В нижней части рисунка – соответствующая кривой блеска диаграмма энергия-время. Черным цветом показаны SGL- фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – энергия фотона в кэВ.

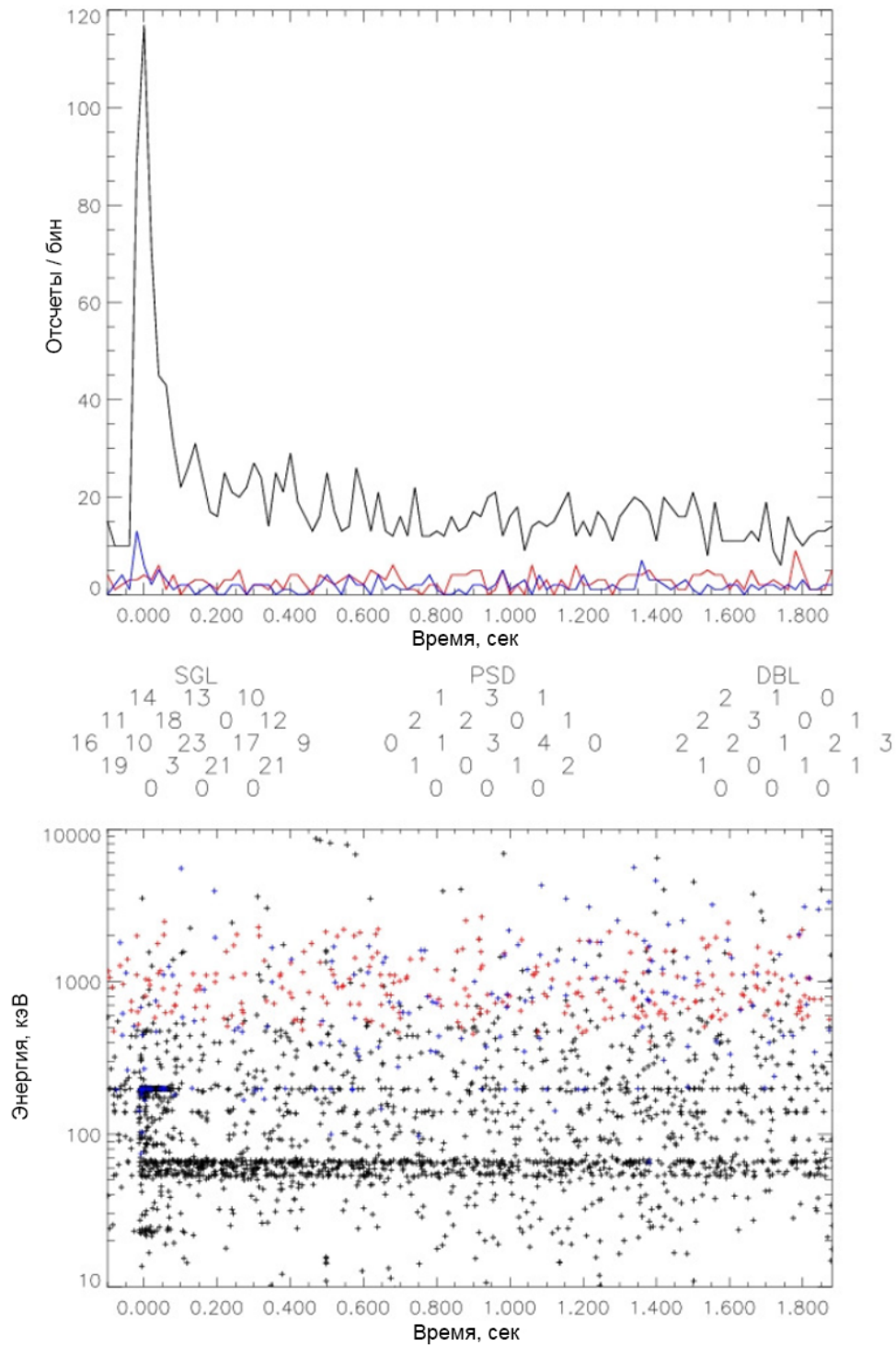


Рис. 2.7. Событие, связанное с излучением в спектральных линиях 53 кэВ, 66 кэВ, 198 кэВ. В верхней части рисунка – кривая блеска в диапазоне 20 кэВ – 8 МэВ. Черным цветом показаны SGL-фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – кол-во отсчетов в бине кривой блеска. В средней части рисунка – распределение трех групп фотонов по детекторам SPI. В нижней части рисунка – соответствующая кривой блеска диаграмма энергия-время. Черным цветом показаны SGL- фотоны, красным – PSD-фотоны, синим – DBL-фотоны. По горизонтальной оси – время в секундах относительно пика в кривой блеска, по вертикальной оси – энергия фотона в кэВ.

события с длительностью 50 мс (50 мс – временное разрешение SPI-ACS) и значимостью более 3σ . В качестве примера на Рис. 1.3 представлена кривая блеска события, изображенного на Рис. 2.6, в данных эксперимента SPIACS. В данном случае значимость события в SPI-ACS составляет 17.6σ . На Рис. 1.3 также изображены насыщения, наблюдаемые в 9-ом и 10-ом германиевых детекторах SPI.

На Рис. 2.8 показан темп регистрации событий этого типа, который монотонно падает со временем. Также показана аппроксимация темпа счета событий экспоненциальной функцией. Отсутствует корреляция с темпом регистрации коротких событий, связанных с взаимодействием обсерватории с протонами и пучками электронов магнитосферы Земли (Рис. 2.4, Рис. 2.2). Можно сделать предположение, что события, связанные с излучением в спектральных линиях 53 кэВ, 66 кэВ и 198 кэВ не связаны с заряженными частицами магнитосферы Земли, а могут быть связаны с заряженными частицами галактических космических лучей. В работе [134] показано, что кристаллы BGO, из которых состоит антисовпадательная защита SPI-ACS, в результате взаимодействия с космиче-

скими лучами (ядерные реакции скалывания) испускают вторичные нейтроны. Таким образом, заряженная частица космических лучей, провзаимодействовав с антисовпадательной защитой SPI-ACS, рождает каскад вторичных частиц, в том числе нейтронов, которые в свою очередь термализуются и захватываются ядрами германия, из которого состоят детекторы эксперимента SPI.

2.4.5. Вспышки источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408

В работе обнаружено 223 вспышки источника мягкого повторного гамма-излучения SGR 1806-20 (Таблица 2.1) и 23 вспышки аномального рентгеновского пульсара AXP 1E_1547.0-5408 (Таблица 2.2). В таблицах 2.1, 2.2 указаны дата, время и длительность события. Все события были подтверждены и локализованы в эксперименте IBIS/ISGRI. Часть событий также обнаружена в данных SPI-ACS.

Таблица 2.1. Список всплесков источника SGR 1806-20, зарегистрированных с помощью эксперимента SPI INTEGRAL

Дата	Время * UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)
2003.08.18	13:57:11.50	0.6	2004.08.23	08:56:29.69	0.1	2004.09.11	20:11:23.19	0.1
2003.08.24	15:30:44.23	0.06	2004.08.23	09:02:09.79	0.04	2004.09.15	00:40:05.53	0.04
2003.08.25	03:55:00.95	0.2	2004.08.23	09:27:49.94	0.04	2004.09.15	12:39:04.26	0.07
2003.09.20	13:57:54.89	0.1	2004.08.23	10:12:30.07	0.1	2004.09.19	16:38:25.92	0.04
2003.10.07	22:48:32.60	0.2	2004.08.23	10:38:25.09	0.4	2004.09.20	14:18:09.80	0.03
2003.10.08	03:27:04.09	0.1	2004.08.23	11:08:30.33	0.1	2004.09.22	20:12:16.90	0.06
2003.10.08	03:27:56.23	0.1	2004.08.23	11:23:10.47	0.2	2004.10.01	06:03:29.86	0.1
2003.10.08	20:22:06.56	0.1	2004.08.23	12:08:35.59	0.1	2004.10.01	18:45:53.22	0.1
2003.10.09	04:27:48.19	0.2	2004.08.23	13:21:10.16	0.8	2004.10.01	22:03:13.34	0.05
2003.10.14	14:31:45.45	0.1	2004.08.23	13:25:16.20	0.2	2004.10.02	10:10:27.06	0.1
2003.10.15	11:00:28.85	0.02	2004.08.23	13:26:03.72	0.2	2004.10.05	02:24:37.38	0.03
2003.10.15	12:08:26.07	0.2	2004.08.23	13:26:58.56	0.1	2004.10.05	12:57:20.14	0.1
2003.10.15	12:51:33.10	0.2	2004.08.23	16:17:58.00	0.2	2004.10.05	16:49:53.06	0.2

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)
2003.10.15	13:18:26.73	0.2	2004.08.23	18:58:51.45	1	2004.10.05	16:49:53.06	0.15
2003.10.15	15:55:12.84	0.04	2004.08.23	20:48:17.71	0.4	2004.10.05	19:18:27.35	0.4
2003.10.15	19:23:38.58	0.05	2004.08.23	21:44:00.29	0.15	2004.10.05	19:38:57.05	0.1
2004.03.09	10:24:08.47	0.2	2004.08.23	22:37:09.00	0.1	2004.10.05	20:04:14.03	0.03
2004.03.15	15:38:35.24	0.2	2004.08.23	23:01:40.34	0.05	2004.10.09	12:58:10.32	0.1
2004.03.30	20:37:14.45	0.04	2004.08.24	00:12:57.51	0.15	2004.10.14	06:06:35.35	0.02
2004.04.07	20:37:44.04	0.08	2004.08.24	02:35:22.37	0.05	2004.10.16	10:12:39.89	0.2
2004.04.07	21:27:11.28	0.2	2004.08.25	23:45:08.72	0.5	2004.10.16	10:51:33.98	0.15
2004.08.11	20:11:34.35	0.02	2004.08.30	12:03:31.32	0.05	2004.10.16	18:24:45.19	0.3
2004.08.17	15:05:31.63	0.02	2004.08.30	14:49:37.43	0.1	2004.10.17	06:36:13.39	2
2004.08.17	19:35:54.27	0.2	2004.08.30	18:18:46.39	0.25	2004.10.17	06:38:49.39	1
2004.08.18	00:07:18.71	0.1	2004.08.30	21:46:14.73	0.05	2004.10.17	06:45:07.76	0.03
2004.08.18	17:10:27.17	0.15	2004.08.31	13:45:58.60	0.2	2004.10.19	16:24:30.38	0.015
2004.08.18	20:30:10.12	0.2	2004.08.31	17:11:51.69	0.04	2004.10.19	19:02:25.94	0.1
2004.08.18	21:52:49.82	0.05	2004.08.31	18:32:17.89	0.15	2004.10.19	19:34:41.82	0.05
2004.08.18	21:57:04.23	0.1	2004.08.31	20:28:57.20	0.2	2004.10.19	22:50:20.90	0.1
2004.08.18	22:40:26.83	0.05	2004.08.31	22:44:40.48	0.2	2004.10.27	23:11:52.48	0.1
2004.08.19	03:32:10.91	0.1	2004.09.01	01:21:19.81	0.04	2005.02.16	23:09:17.10	0.1
2004.08.21	02:37:53.36	0.15	2004.09.01	07:37:02.12	0.1	2005.02.17	00:19:56.80	0.1
2004.08.21	03:38:26.78	0.1	2004.09.01	17:52:21.65	0.15	2005.03.02	07:47:25.87	0.05
2004.08.22	15:33:08.34	0.15	2004.09.01	17:57:38.96	0.2	2005.03.11	15:40:00.83	0.02
2004.08.22	21:32:16.68	0.2	2004.09.01	20:25:10.03	0.3	2005.03.20	11:06:04.83	0.3
2004.08.23	00:26:13.49	0.2	2004.09.02	07:46:46.65	0.2	2005.03.22	00:16:20.56	0.2
2004.08.23	01:09:46.59	0.1	2004.09.04	02:35:04.44	0.04	2005.03.22	07:23:08.24	0.05
2004.08.23	03:26:26.60	0.6	2004.09.04	08:42:10.45	0.05	2005.03.23	02:38:21.42	1
2004.08.23	05:13:15.66	0.15	2004.09.08	02:45:44.33	0.07	2005.03.23	22:49:24.28	0.15
2004.08.23	06:14:16.63	0.3	2004.09.09	21:18:15.38	0.2	2005.03.24	16:37:15.84	0.2
2005.03.25	03:12:57.70	0.5	2006.09.16	23:42:56.22	1.1	2007.09.19	20:45:10.08	1.75
2005.03.28	03:32:35.06	0.1	2006.09.17	03:09:49.40	0.2	2007.09.19	20:45:24.99	0.7
2005.04.14	18:56:01.24	1.1	2006.09.17	08:16:59.21	0.7	2007.09.19	20:45:29.79	0.1
2005.04.14	20:17:56.25	0.3	2006.09.19	20:27:02.03	0.25	2007.09.19	20:47:30.61	0.1
2005.04.16	22:57:22.60	0.2	2006.09.19	20:33:21.21	0.4	2007.09.19	20:48:56.87	0.4
2005.04.16	22:58:50.98	0.1	2006.09.20	05:38:29.63	0.2	2007.09.19	20:51:03.69	0.15
2005.04.17	20:55:33.14	0.25	2006.09.21	08:39:02.87	0.25	2007.09.19	21:02:22.82	0.1
2005.04.20	03:44:56.25	0.2	2006.09.22	01:15:40.20	0.15	2007.09.19	21:25:25.14	0.2
2005.04.20	11:55:04.63	0.2	2006.09.23	02:06:16.37	0.35	2007.09.20	06:21:03.04	0.17
2005.04.21	05:31:37.61	0.7	2006.09.23	08:43:18.98	0.4	2007.09.21	14:52:22.68	0.1

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)
2005.04.25	04:40:15.22	0.15	2006.09.24	04:48:03.55	0.2	2007.09.24	04:28:30.75	0.2
2005.04.25	11:03:55.84	0.1	2006.09.30	13:07:58.15	0.15	2007.09.24	07:22:56.18	0.05
2005.04.28	11:26:39.83	0.2	2006.10.04	08:59:13.11	0.15	2007.09.25	05:04:36.45	0.5
2005.08.11	13:35:48.07	1.5	2006.10.04	11:45:48.38	0.05	2007.09.25	05:10:23.49	0.07
2005.08.17	00:50:17.86	0.04	2006.11.02	06:38:12.16	0.1	2007.09.25	16:38:35.39	0.2
2005.08.21	08:31:54.59	0.4	2007.02.26	21:08:36.55	0.1	2007.09.26	11:20:34.03	0.1
2005.08.24	18:04:08.58	0.2	2007.02.27	07:27:48.63	0.1	2007.09.30	09:39:41.00	0.02
2005.08.28	12:40:19.74	0.1	2007.02.28	04:44:02.71	0.15	2007.10.02	06:31:49.62	0.08
2005.09.06	13:08:59.40	0.05	2007.03.15	00:54:21.74	0.03	2007.10.05	02:45:28.89	0.1
2005.09.15	18:42:18.36	0.1	2007.03.16	15:27:15.71	0.1	2007.10.29	08:23:36.94	0.15
2005.09.26	07:23:42.04	2	2007.03.18	20:29:12.99	0.04	2008.02.29	19:41:19.65	0.8
2005.10.22	07:25:36.62	0.3	2007.03.24	20:37:33.33	0.015	2008.03.19	15:12:23.16	0.07
2006.03.27	05:37:55.91	0.2	2007.04.03	19:12:13.29	0.15	2008.04.03	08:43:39.04	0.15
2006.04.22	15:59:12.27	0.3	2007.04.08	14:43:16.70	0.3			
2006.08.26	04:13:22.70	0.15	2007.08.29	14:03:27.83	0.7			
2006.08.26	04:25:25.46	1.2	2007.08.29	22:40:18.28	0.1			
2006.08.26	12:32:55.18	0.17	2007.08.29	23:22:21.48	0.1			
2006.08.26	18:48:46.13	0.4	2007.08.31	23:10:37.25	0.1			
2006.08.26	22:07:23.90	0.65	2007.09.10	05:31:06.64	0.02			
2006.08.29	21:57:43.66	2	2007.09.13	22:19:54.09	0.4			
2006.08.29	22:10:28.47	0.7	2007.09.14	10:46:01.32	0.45			
2006.08.30	16:37:40.60	0.1	2007.09.15	03:34:17.05	0.3			
2006.08.31	04:59:52.55	0.1	2007.09.15	13:25:35.63	0.03			
2006.09.04	15:58:43.43	0.2	2007.09.15	14:41:44.73	0.1			
2006.09.04	16:13:43.86	0.15	2007.09.15	21:34:07.41	0.05			
2006.09.07	10:36:09.99	0.4	2007.09.16	07:08:36.77	0.25			
2006.09.15	10:30:25.80	0.1	2007.09.16	09:48:03.62	0.35			
2006.09.15	17:00:01.63	0.3	2007.09.16	19:02:44.00	0.5			
2006.09.15	18:15:15.77	0.7	2007.09.19	10:01:51.91	0.65			
2006.09.15	18:58:33.19	0.4	2007.09.19	19:34:48.55	0.4			
2006.09.16	16:37:43.16	0.5	2007.09.19	19:37:29.57	0.3			

* - Время UTC срабатывания на обсерватории INTEGRAL

Таблица 2.2. Список всплесков источника AXP 1E_1547.0-5408, зарегистрированных с помощью эксперимента SPI INTEGRAL

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)
2009.01.25	04:17:16.38	0.1
2009.01.25	05:22:08.79	0.35
2009.01.25	05:35:08.45	0.02
2009.01.25	06:38:58.75	0.07
2009.01.25	10:57:27.53	0.04
2009.01.25	12:55:21.61	0.06
2009.01.25	17:01:54.00	0.01
2009.01.25	21:52:13.37	0.2
2009.01.29	16:51:40.80	0.05
2009.01.30	02:34:25.28	0.1
2009.01.30	06:58:16.97	0.15
2009.01.30	19:29:41.68	0.35
2009.01.30	19:29:43.46	0.05
2009.02.01	17:10:45.54	0.25
2009.02.01	21:12:56.57	0.35
2009.02.01	23:13:56.80	0.06
2009.02.05	19:35:40.12	0.04
2009.02.07	00:54:55.80	0.015
2009.02.07	20:01:20.35	0.03
2009.02.08	08:09:52.38	0.03
2009.02.08	11:06:28.30	0.02
2009.03.22	18:56:24.25	0.2
2009.03.22	22:39:16.20	>0.2

* - Время UTC срабатывания на обсерватории INTEGRAL

2.4.6. Кандидаты во вспышки источников SGR и AXP

В таблице 2.3 представлен список кандидатов во всплески источников повторного мягкого излучения (SGR и AXP). Кандидаты отбирались в соответствии с наблюдаемыми свойствами подтвержденных всплесков источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408, а именно:

- длительность отдельных импульсов события находится в пределах (0.01 - 3) сек;
- доля фотонов с энергией выше 200 кэВ пренебрежимо мала (мягкий спектр);
- распределение по детекторам близко к равномерному.

Таблица 2.3. Список кандидатов во всплески источников мягкого повторного гамма-излучения, зарегистрированных с помощью эксперимента SPI INTEGRAL

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)
2003.08.24 ^S	05:57:55.74	0.1	2005.12.10 ^U	03:39:50.00	0.02	2008.11.14 ^U	06:28:38.23	0.01
2003.08.24 ^S	17:50:20.13	0.1	2006.04.06 ^U	23:52:54.95	0.01	2009.01.22 ^U	03:13:33.20	0.3
2003.08.26 ^S	02:38:10.54	0.1	2006.04.16 ^U	01:30:39.43	0.015	2009.01.22 ^U	03:50:38.12	1.8
2003.10.15 ^S	08:07:25.88	0.07	2006.04.16 ^U	09:31:07.23	0.02	2009.01.22 ^U	04:57:29.87	0.7
2003.10.15 ^S	08:12:25.14	0.09	2006.04.17 ^U	16:57:03.10	0.02	2009.01.22 ^U	04:58:02.97	0.15
2003.10.15 ^S	10:19:31.96	0.11	2006.04.20 ^U	10:38:56.09	0.02	2009.01.22 ^U	05:14:04.13	0.25
2004.08.05 ^S	01:53:46.65	0.25	2006.04.22 ^U	01:42:23.02	0.02	2009.01.22 ^U	05:17:44.04	0.15
2004.08.09 ^U	11:31:04.31	0.02	2006.04.22 ^U	11:27:16.82	0.15	2009.01.22 ^U	05:17:48.24	0.5
2004.08.09 ^U	22:33:20.67	0.015	2006.04.22 ^U	19:08:07.83	0.02	2009.01.22 ^U	05:17:51.68	0.4
2004.08.12 ^S	09:41:50.97	0.02	2006.05.05 ^U	21:00:34.93	0.015	2009.01.22 ^U	05:18:01.76	0.15
2004.08.12 ^S	20:19:07.01	0.01	2006.08.29 ^S	22:10:28.47	0.02	2009.01.22 ^U	05:18:32.88	0.1
2004.08.13 ^U	15:50:48.59	0.01	2006.09.01 ^S	11:52:22.67	0.15	2009.01.22 ^U	05:18:39.72	0.9
2004.08.16 ^U	14:20:53.24	0.01	2006.09.07 ^U	08:40:11.83	0.02	2009.01.22 ^U	05:26:52.88	0.2
2004.08.18 ^S	08:19:50.97	0.02	2006.09.15 ^U	09:53:32.69	0.5	2009.01.22 ^U	06:38:27.95	0.25
2004.08.23 ^S	05:26:47.57	0.015	2006.09.20 ^S	13:53:39.81	2.1	2009.01.22 ^U	06:41:02.33	0.9
2004.08.23 ^S	17:57:00.46	0.02	2006.09.21 ^S	15:37:39.06	0.8	2009.01.22 ^U	06:44:36.53	1.4
2004.08.23 ^S	18:03:09.17	0.2	2006.09.22 ^S	15:22:45.01	0.02	2009.01.22 ^U	06:45:12.37	0.15
2004.08.24 ^S	12:52:39.87	0.02	2007.01.17 ^U	15:58:42.59	0.02	2009.01.22 ^U	06:47:57.15	0.25
2004.09.08 ^S	21:40:52.33	0.3	2007.02.01 ^U	08:51:22.74	0.015	2009.01.22 ^U	06:48:15.19	0.45
2004.09.19 ^S	07:35:55.97	0.025	2007.02.27 ^S	19:28:26.79	0.45	2009.01.22 ^U	06:49:49.05	0.15
2004.10.19 ^S	17:26:27.41	0.15	2007.02.28 ^S	01:50:24.96	0.02	2009.01.22 ^U	07:05:56.85	0.25
2005.03.22 ^S	03:06:40.15	0.1	2007.02.28 ^S	17:52:50.61	0.015	2009.01.22 ^U	07:49:40.87	0.4
2005.04.21 ^S	09:39:57.54	0.1	2007.03.02 ^U	15:39:01.13	0.015	2009.01.22 ^U	08:17:29.93	5.5
2005.08.24 ^S	17:05:58.00	0.7	2007.03.07 ^S	15:43:04.94	0.45	2009.01.25 ^A	00:12:48.92	0.1
2005.09.13 ^S	05:57:51.40	0.5	2007.03.16 ^S	01:23:07.22	0.02	2009.01.25 ^A	05:25:05.50	0.025
2005.09.26 ^S	21:25:43.88	0.1	2007.03.24 ^S	22:01:46.56	0.03	2009.01.25 ^A	23:00:36.49	0.07

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)
2005.10.22 ^S	02:40:56.68	0.1	2007.04.04 ^S	18:42:14.41	0.025	2009.01.29 ^A	22:27:27.08	0.07
2005.10.22 ^S	23:10:44.11	0.01	2007.09.18 ^S	17:08:49.16	2.7	2009.02.21 ^U	15:27:34.76	0.1
2005.11.16 ^U	02:38:19.26	0.02	2007.09.19 ^S	20:45:24.99	0.7	2009.02.23 ^U	03:04:41.26	0.15
2005.12.09 ^U	01:39:46.14	0.03	2007.09.21 ^S	07:12:01.97	0.45	2009.02.27 ^U	13:43:35.37	0.35

^S - кандидат во всплеск источника SGR 1806-20

^A - кандидат во всплеск источника AXP 1E_1547.0-5408

^U - кандидат во всплеск неизвестного источника

Некоторые события были также идентифицированы в данных IBIS/ISGRI и SPI-ACS, но локализовать их источники на небесной сфере по данным IBIS/ISGRI не удалось. Это может быть связано с тем, что источники всплесков находились на краю поля зрения телескопа IBIS/ISGRI. Часть событий зарегистрирована в период активности источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408, когда эти источники находились в поле зрения телескопа SPI, что не исключает возможной связи обнаруженных событий с активностью известных источников. В таблице 2.3 для таких событий указана возможная связь с активностью известного источника.

2.4.7. Гамма-всплески, подтвержденные другими космическими экспериментами

В работе обнаружено 48 гамма-всплесков, подтвержденных другими космическими экспериментами (Таблица 2.4). В Таблице 2.4 указаны основные наблюдательные свойства этой группы событий. В первой колонке указано название всплеска, во второй - время UTC срабатывания триггера, сгенерированного алгоритмом поиска событий в данных SPI. В третьей колонке указан параметр длительности T_{90} гамма-всплеска. T_{90} представляет собой время, за которое регистрируется 95% отсчетов относительно полного количества отсчетов, зарегистрированного в течение всего всплеска [8]. В данной работе длительность

всплесков вычислялась, в основном, по данным IBIS/ISGRI в энергетическом диапазоне (20, 200) кэВ, поскольку этот детектор имеет гораздо большую чувствительность в данном диапазоне энергий по сравнению с детектором SPI, что позволяет определить длительность гамма-всплесков с большей точностью. Данные телескопа SPI использовались для определения длительности лишь тех событий, которые не были зарегистрированы в эксперименте IBIS/ISGRI. В четвертой колонке указан статус наблюдений послесвечения гамма-всплеска в рентгеновском, оптическом, и радио- диапазонах, которые обозначаются символами X, O, и R, соответственно, в случае регистрации соответствующей компоненты излучения. В пятой и шестой колонках указаны небесные экваториальные координаты R_α , Dec источника всплеска в случае, если источник всплеска локализован. В седьмой колонке указана точность локализации источника всплеска. В восьмой колонке указан угол между направлением на источник всплеска и центром поля зрения телескопа SPI.

Мы проводили локализацию источника всплеска по данным IBIS/ISGRI и SPI в том случае, если исследуемый всплеск не был локализован ранее в других работах, либо точность нашей локализации выше, чем точность известной локализации. Всего нами было локализовано восемь гамма-всплесков по данным IBIS/ISGRI. Часть событий локализовать не удалось, вероятно, вследствие того, что источник всплеска находился на краю или вне поля зрения телескопов SPI и IBIS/ISGRI. Гамма-всплески GRB031111A, GRB081110C были локализованы методом триангуляции IPN3 (описание метода см., напр., в работе [135]). Интересно отметить, что полученные этим методом координаты источника всплеска GRB031111A находятся вне полей зрения телескопов SPI, IBIS/ISGRI в момент регистрации всплеска. Это означает, что данный всплеск был зарегистрирован детектором SPI вне поля зрения, сквозь антисовпадетельную защиту SPI-ACS. Это подтверждается высокой значимостью этого всплеска в данных SPI-ACS. Помимо GRB031111A вне поля зрения был зарегистрирован

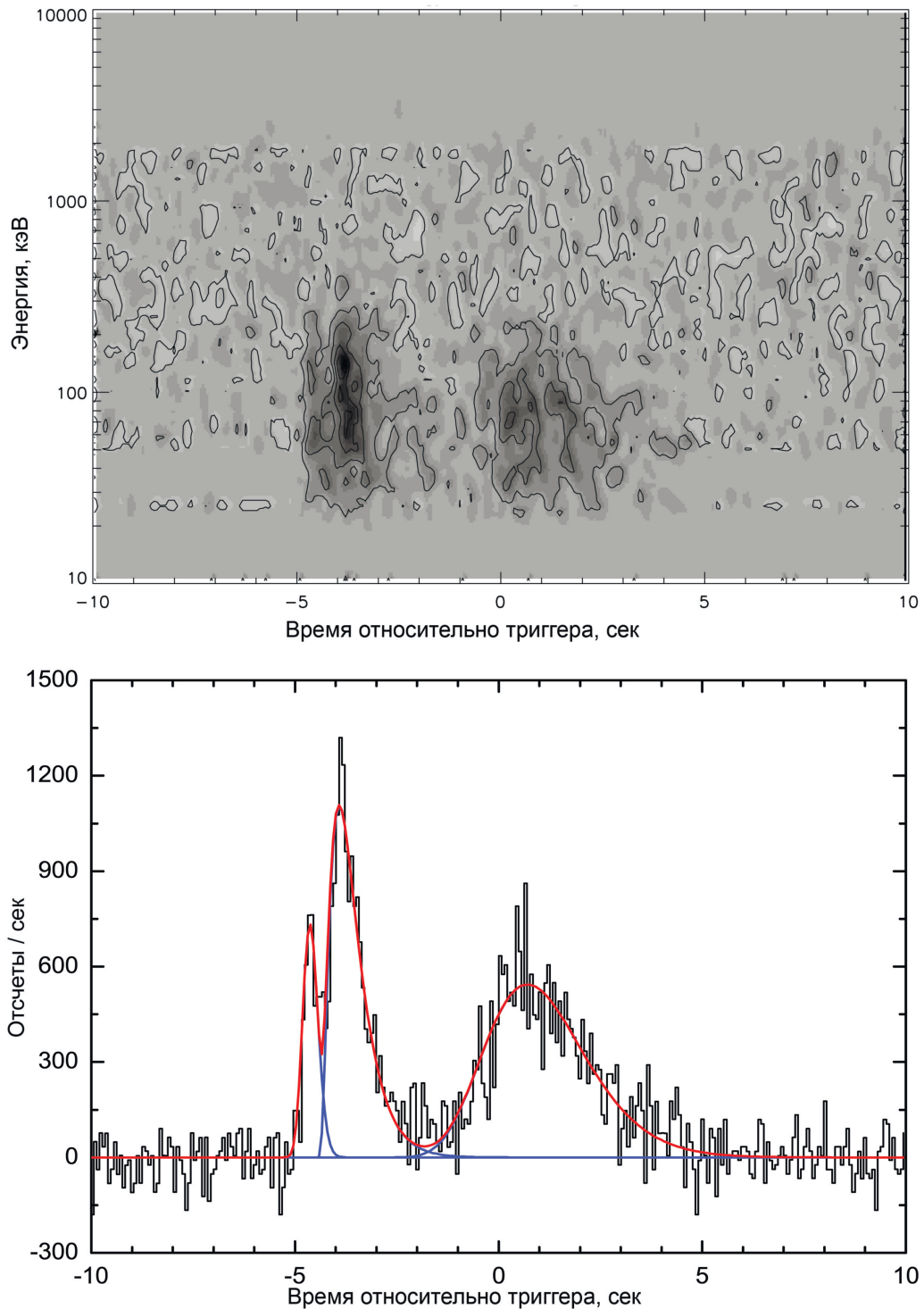


Рис. 2.9. Гамма-всплеск GRB050525A. На верхней картинке - спектрально-временная диаграмма, построенная по данным SPI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - энергия фотонов в кэВ. Яркость цвета на картинке обратно пропорциональна количеству зарегистрированных отсчетов в соответствующей области: чем темнее область, тем больше количество отсчетов в ней. На нижней картинке - кривая блеска в энергетическом диапазоне (20, 2000) кэВ, построенная по данным SPI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - количество отсчетов за секунду в бине кривой блеска. Гладкой кривой показана аппроксимация кривой блеска суммой экспоненциальных импульсов (формула 3.1).

GRB090902B. Оба всплеска обнаружены также в данных IBIS/ISGRI, но не были локализованы, поскольку зарегистрированы вне поля зрения. Оказалось, что для гамма-всплесков GRB081110C и GRB070418B одна из двух областей пересечения колец триангуляции имеет пересечение с полем зрения телескопа SPI, причем центр области находится на угловом расстоянии 13° и 15° от центра поля зрения, соответственно. Координаты центра этой области локализации, а также координаты вершин области локализации указаны в Таблице 2.4. Таким образом, гамма-всплеск GRB081110C мог быть зарегистрирован на краю поля зрения телескопа SPI, но не попасть в поле зрения IBIS/ISGRI. А гамма-всплеск GRB070418B не был локализован в экспериментах SPI и IBIS/ISGRI вследствие того, что находился на самом краю поля зрения.

Таблица 2.4. Наблюдаемые свойства гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью эксперимента SPI INTEGRAL

GRB	Время UTC	T_{90} (сек.)	После- свечение ¹	RA (град.)	DEC (град.)	Радиус (угл. мин)	offset (град.)
030227A	08:42:06.08	33.33 ± 2.75	X O	74.387711	20.484694	0.0005^8	8.6
031111A ²	16:45:20.96	8.2 ± 4.4	-	72.43	17.46	120^{28}	53.5
031203B	22:01:28.96	34.21 ± 3.51	X O R	120.62579	-39.85112	0.012^9	11.3
031219A ³	04:14:42.74	7.8 ± 5.1	-	-	-	-	-
040223A	13:28:13.59	235 ± 3	X	249.87571	-41.93325	0.025^{10}	9.0
040323A	13:03:05.99	29 ± 1.93	-	208.469	-52.354	1.26^{11}	11.7
040421A	02:30:27.70	8.7 ± 4.6	-	-	-	-	-
040422A	06:58:04.70	9.09 ± 2.73	-	280.505	1.981	0.95^{11}	9.4
040730A	02:12:20.95	56.25 ± 4.45	-	238.302	-56.47	1.35^{11}	5.7
040827A	11:51:06.19	40.25 ± 3.51	X O	229.25558	-16.14142	0.003^{12}	12.1
041211D ²	23:57:42.26	6.2 ± 1.5	-	353.9	23.0	- ²⁹	28.5
041212A	18:34:24.71	40.5 ± 4	-	-	-	-	-
041218A	15:45:59.17	41.4 ± 1.2	O	24.78167	71.34167	0.025^{13}	13.5
041226A	17:22:29.10	14.6 ± 8.4	-	-	-	-	-
050213B	19:34:46.05	11.1 ± 9.4	-	-	-	-	-

GRB	Время UTC	T_{90} (сек.)	После- свечение	RA (град.)	DEC (град.)	Радиус (угл. мин)	offset (град.)
050502A	02:14:13.52	10.9 ± 0.16	O	202.44292	42.674362	$<0.62^{14}$	4.0
050504A	08:00:57.79	76 ± 5.2	X	201.0054	40.70333	0.11^{15}	4.1
050520A	00:06:38.93	52.95 ± 0.15	X	192.52583	30.450556	0.08^{16}	4.3
050525A	00:02:58.32	8.9 ± 0.3	X O R	278.13571	26.339582	0.002^{17}	14.9
051105A	11:05:43.05	24.5 ± 4.5	-	9.468	-40.479	1.1^{11}	2.8
051220A ³	13:04:15.36	54.9 ± 2.3	-	350.622	70.116	2	11.0
060221C ⁴	15:40:33.36	0.29 ± 0.04	-	255.053	-24.214	2	11.3
060306C ³	15:22:38.94	0.9 ± 0.2	-	-	-	-	
060428C	02:30:43.72	12.7 ± 1.1	-	285.227	-9.556	0.72^{11}	8.6
060901A	18:43:57.68	16.3 ± 2.1	X	287.15805	-6.639444	0.07^{18}	14.1
061025A	18:36:03.22	14 ± 0.8	X O	300.91177	-48.242981	0.008^{19}	8.5
061122A	07:56:53.88	14.3 ± 0.5	X O	303.83267	15.517361	0.008^{20}	7.4
070311A	01:52:44.25	35 ± 2	X O	87.53421	3.37508	0.02^{21}	12.2
070418B ⁷	17:16:23.72	21 ± 8	-	302.13	7.37	- ⁷	15.0
070707B	16:08:38.63	0.7 ± 0.09	X O	267.74396	-68.924225	0.008^{22}	12.0
070912A ³	07:32:23.42	62.5 ± 2.3	X	264.608	-28.706	2	3.6
070925C	15:52:47.11	26.6 ± 4	X	253.21699	-22.028561	0.1^{23}	9.1
071003A	07:40:56.20	19.15 ± 1.55	X O R	301.853	10.948	2	13.5
071108B	21:41:20.40	7.2 ± 4.2	-	-	-	-	
080223A ³	19:39:29.20	20.85 ± 5.25	-	265.137	-12.827	2	15.2
080303C	21:34:51.51	23.5 ± 7.6	-	-	-	-	
080413A ⁵	02:54:20.39	4.3 ± 3.1	X O	287.2978	-27.6779	0.08^{24}	14.9
080414B	22:33:26.51	10.64 ± 0.82	-	272.133	-18.829	2^{11}	11.5
080613A	09:35:40.72	27 ± 2.01	X O	213.2709	5.1732	0.01^{25}	3.9
080723B	13:22:34.10	82.77 ± 0.67	X	176.833	-60.245	1.5^{11}	7.9
081003C	20:48:14.55	23.9 ± 1.85	X	285.026	16.691	2	11.2
081016A	06:51:55.47	33.33 ± 1.56	X	255.5724	-23.3301	1.5	4.9
081110C ³	16:18:50.80	0.15 ± 0.1	-	289.1	35.0	- ⁶	13.4
081226B	12:13:11.20	0.27 ± 0.05	-	25.495	-47.439	2.5	7.6
090107B	16:20:49.09	20.2 ± 2.11	X	284.8075	59.5924	1.5^{26}	6.7
090625B	13:26:25.73	8.4 ± 0.6	X	2.2626	-65.7816	1.7^{27}	11.4
090820A	00:38:47.51	14.3 ± 3.8	-	-	-	-	
090902B ²	11:05:17.40	22.1 ± 7.4	X O R	264.93859	27.32448	0.035^{28}	38.1

¹ - X - рентгеновское, O - оптическое, R - радио- послесвечение

² - зарегистрирован вне поля зрения телескопов SPI и IBIS/ISGRI

GRB	Время UTC	T_{90} (сек.)	После- свечение	RA (град.)	DEC (град.)	Радиус (угл. мин)	offset (град.)
³ - гамма-всплеск, зарегистрированный также другими космическими обсерваториями, впервые обнаружен в данных SPI и/или IBIS/ISGRI							
⁴ - новый, ранее не известный гамма-всплеск, обнаруженный в данных SPI							
⁵ - зарегистрирован на краю поля зрения телескопа SPI							
⁶ - локализация источника всплеска проведена методом триангуляции по данным работы [136], координаты вершин области ошибок (Ra, Dec): (290.2, 32.1), (287.9, 37.8), (290.3, 32.0), (288.0, 37.8).							
⁷ - локализация источника всплеска проведена методом триангуляции по данным работы [136], координаты вершин области ошибок (Ra, Dec): (302.16, 6.95), (302.10, 7.78), (302.31, 7.31), (301.95, 7.43).							
—							
Источник всплеска локализован в работе: ⁸ - [137], ⁹ - [138], ¹⁰ - [139], ¹¹ - [108], ¹² - [140], ¹³ - [141], ¹⁴ - [142], ¹⁵ - [143], ¹⁶ - [144], ¹⁷ - [145], ¹⁸ - [146], ¹⁹ - [147], ²⁰ - [148], ²¹ - [149], ²² - [150], ²³ - [151], ²⁴ - [152], ²⁵ - [153], ²⁶ - [154], ²⁷ - [155], ²⁸ - [156], ²⁹ - [136]							

В Таблице 2.5 представлена статистика наблюдений исследуемых гамма-всплесков другими космическими гамма-телескопами. В первой колонке указано название гамма-всплеска, во второй - название космической обсерватории/телескопа, зарегистрировавшего данное событие помимо обсерватории INTEGRAL. В третьей колонке указано, проводилась ли когда-либо локализация данного события методом триангуляции IPN3 [135]. В четвертой и пятой колонках указано, наблюдается ли гамма-всплеск в данных телескопов SPI-ACS или IBIS/ISGRI, соответственно. Гамма-всплески GRB031219A, GRB050213B, GRB081110C в данных телескопа IBIS/ISGRI не обнаружены. Гамма-всплеск GRB081110C является коротким всплеском и обладает жестким спектром. Этот всплеск не был зарегистрирован детектором ISGRI, хотя и мог находиться в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI. Гамма-всплески GRB031219A и GRB050213B не были локализованы и, вероятно, находятся вне поля зрения IBIS/ISGRI. В шестой колонке указано, локализован ли гамма-всплеск с помощью эксперимента IBIS/ISGRI. Двенадцать всплесков (из сорока пяти зарегистрированных

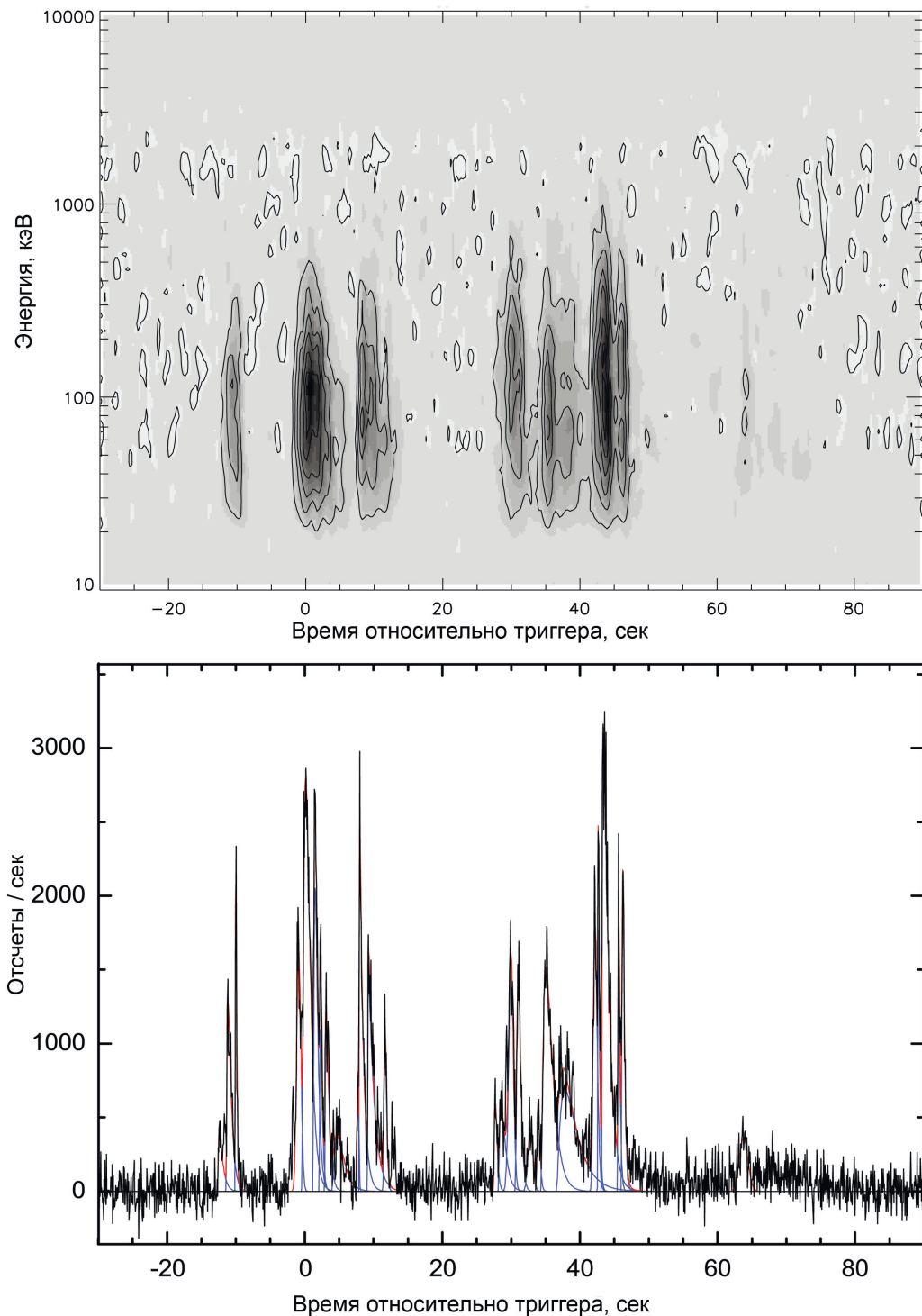


Рис. 2.10. Гамма-всплеск GRB080723B. На верхней картинке - спектрально-временная диаграмма, построенная по данным SPI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - энергия фотонов в кэВ. Яркость цвета на картинке обратно пропорциональна количеству зарегистрированных отсчетов в соответствующей области: чем темнее область, тем больше количество отсчетов в ней. На нижней картинке - кривая блеска в энергетическом диапазоне (20, 2000) кэВ, построенная по данным SPI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - количество отсчетов за секунду в бине кривой блеска. Гладкой кривой показана аппроксимация кривой блеска суммой экспоненциальных импульсов (формула 3.1).

с помощью IBIS/ISGRI) не были локализованы в эксперименте IBIS/ISGRI, хотя обнаружены в кривой блеска. Вероятно, данные события зарегистрированы на краю/вне поля зрения телескопа IBIS/ISGRI, что затрудняет локализацию. В седьмой колонке указано, содержится ли данный всплеск в каталоге гамма-всплесков эксперимента IBIS/ISGRI [108], содержащего 56 событий, зарегистрированных до сентября 2008 года. В данных спектрометра SPI за этот период нами было обнаружено 40 гамма-всплесков, причем 17 из них не содержатся в каталоге IBIS/ISGRI [108].

Таблица 2.5. Статистика наблюдений гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI INTEGRAL и другими космическими экспериментами

GRB	подтверждение другими КО	IPN	ACS	ISGRI	ISGRI локал.	Каталог IBIS/ISGRI [108]
030227A	RHE, Uly (RI) ¹	-	-	+	+	+
031111A	Kon, Uly, HET	+	+	+	-	-
031203B	Kon (RI)	-	+	+	+	+
031219A	Kon (RI)	-	+	-	-	-
040223A	-	-	-	+	+	+
040323A	Kon (RI)	-	+	+	+	+
040421A	Kon, RHE (RI)	+	+	+	-	-
040422A	Kon, MO	-	-	+	+	+
040730A	-	-	-	+	+	+
040827A	-	-	-	+	+	+
041211D	MO, Kon, HET, RHE, Swi	+	+	+	-	-
041212A	MO, RXTE	-	+	+	-	-
041218A	RHE, Kon	-	+	+	+	+
041226A	Kon, MO	+	+	+	-	-
050213B	HET (RI)	-	+	-	-	-
050502A	-	-	-	+	+	+
050504A	-	-	-	+	+	+
050520A	-	-	-	+	+	+
050525A	-	-	+	+	+	+

GRB	подтверждение другими КО	IPN	ACS	ISGRI	ISGRI локал.	Каталог IBIS/ISGRI [108]
051105A	-	-	+	+	+	+
051220A	MO, Kon, RHE	+	+	+	+	-
060221C	-	-	+	+	+	-
060306C	Swi, Kon, RHE	+	+	+	-	-
060428C	Kon, RHE	+	+	+	+	+
060901A	Uly, MO, Kon, Suz	+	+	+	+	+
061025A	Kon, Suz	-	-	+	+	+
061122A	Swi, Kon	+	+	+	+	+
070311A	Kon (RI)	-	-	+	+	+
070418B	Suz, Mes, Kon, MO	+	+	+	-	-
070707B	MO, Kon, RHE, Swi, Mes, Suz	+	+	+	+	+
070912A	Kon (RI)	-	-	+	+	-
070925C	Kon, RHE, Mes	-	+	+	+	+
071003A	Kon, MO, Swi, Suz	+	+	+	+	-
071108B	Kon, RHE, Swi, Suz, Agi	+	+	+	-	-
080223A	MO, Kon, Mes, Suz	+	+	+	+	-
080303C	MO, Kon, Swi, Suz, Agi	+	+	+	-	-
080413A	Kon, Swi, Mes, Suz	+	+	+	-	-
080414B	-	-	-	+	+	+
080613A	Kon (RI)	-	-	+	+	+
080723B	Kon, Mes, Agi	+	+	+	+	+
081003C	Kon, RHE	-	+	+	+	-
081016A	Kon, Suz	-	+	+	+	-
081110C	Swi, Kon, Mes, Suz	+	+	-	-	-
081226B	Swi, Suz, Fer	+	+	+	+	-
090107B	Suz, Fer, Kon	+	-	+	+	-
090625B	Suz, Fer, Kon	+	-	+	+	-
090820A	RHE, Kon, Swi, Suz, Agi, Fer	-	+	+	-	-
090902B	RHE, Swi, Suz, LAT	+	+	+	-	-

¹ - повышение уровня фона в детекторах, вероятно связанное с гамма-всплеском

Используемые сокращения: RHE - RHESSI, Uly - Ulysses, Kon - Konus, HET - HETE-2, Swi - Swift, MO - Mars Observer, Suz - Suzaku, Mes - Messenger, Agi - Agile, LAT - Fermi/LAT, Fer - Fermi/GBM

В Таблице 2.6 представлены результаты спектрального исследования гамма-всплесков по данным спектрометра SPI. В первой колонке указано название

гамма-всплеска. Во второй колонке указан фотонный спектральный индекс (показатель степени в степенной модели спектра). Для аппроксимации спектра гамма-всплеска GRB071003A использовалась модель Бэнда (формула 2.4, см. также [157]); во второй колонке для этого всплеска указаны два значения - фотонные индексы α и β . В третьей колонке указано положение экспоненциального завала, если использовалась степенная модель с экспоненциальным завалом (формула 2.3), либо положение излома в модели Бэнда [157]. В четвертой колонке указан полный наблюдаемый поток в энергетическом диапазоне (20, 200) кэВ, вычисленный в рамках используемой спектральной модели. В пятой колонке указаны приведенное значение критерия хи-квадрат и соответствующее количество степеней свободы. В шестой колонке указан исследуемый компонент гамма-всплеска. Для трех ярких гамма-всплесков (GRB041218A, GRB050525A, GRB080723B) построены спектры как для всего события, так и для отдельных, хорошо разделенных по времени компонентов. Кривая блеска и спектрально-временная диаграмма всплесков GRB050525A и GRB080723B представлены на Рис. 2.9 и Рис. 2.10, соответственно. Спектры всплесков GRB050525A и GRB080723B представлены на Рис. 2.11 и Рис. 2.12, соответственно. Для построения спектров использовались модули `spi_science_analysis` и `spi_grb_analysis` стандартного пакета программ OSAv10.0 [158], предназначенного для обработки данных обсерватории INTEGRAL. Спектральное моделирование выполнялось с помощью программы XSPEC. Всего было построено и исследовано 39 спектров для тех событий, где статистическая значимость позволяет это сделать. Для аппроксимации спектров 22 событий использовалась простая степенная модель с двумя независимыми параметрами A и α (формула 2.2). В 17 случаях степенная модель неудовлетворительно описывает наблюдаемый спектр. В качестве альтернативной модели использовалась степенная модель с экспоненциальным завалом с тремя независимыми параметрами A , α , и E_c (формула 2.3). Данная модель хорошо описывает 16 спектров из 17 (см. Рис. 2.11, 2.12, 2.13). Для ап-

проксимации спектра гамма-всплеска GRB071003A была использована модель Бэнда (формула 2.4, см. также [157]) с 4-мя независимыми параметрами A , α , β , и E_c (2.14).

$$N(E) = AE^{-\alpha}. \quad (2.2)$$

$$N(E) = AE^{-\alpha} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right). \quad (2.3)$$

$$N(E) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100keV}\right)^{\alpha} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right), & (\alpha-\beta)E_c \geq E \\ A \left(\frac{(\alpha-\beta)E_c}{100keV}\right)^{\alpha-\beta} \exp(\beta - \alpha) \left(\frac{E}{100keV}\right)^{\beta}, & (\alpha-\beta)E_c \leq E \end{cases}. \quad (2.4)$$

Таблица 2.6. Результаты спектрального моделирования подтвержденных гамма-всплесков

GRB	Фотонный индекс	E_c кэВ	Интегральный Поток (20-200 кэВ) 10^{-6} эрг/см ²	χ^2_{red} / dof	Компонент
030227A	$2.05^{+0.42}_{-0.34}$	$75.8^{+52.4}_{-25.5}$	$1.0^{+0.2}_{-0.4}$	1.60/11	full
031203B	$1.38^{+0.24}_{-0.21}$		$1.7^{+0.3}_{-0.5}$	0.85/13	full
040223A	$2.55^{+1.28}_{-0.76}$		$0.4^{+0.3}_{-0.3}$	1.15/8	intense part
040323A	$1.32^{+0.16}_{-0.15}$		$1.9^{+0.3}_{-0.5}$	0.66/13	full
040422A	$1.84^{+0.23}_{-0.22}$		$0.95^{+0.05}_{-0.11}$	1.01/13	full
040730A	$1.16^{+0.36}_{-0.32}$		$1.2^{+0.4}_{-0.6}$	0.61/11	full
040827A	$1.87^{+0.50}_{-0.41}$		$1.1^{+0.4}_{-0.7}$	0.96/8	full
041218A	$0.73^{+0.42}_{-0.48}$		$5.9^{+0.1}_{-0.3}$	1.5/21	full
041218A	$1.07^{+0.54}_{-0.68}$		$2.0^{+0.3}_{-0.7}$	1.09/18	1st
041218A	$1.59^{+0.17}_{-0.16}$		$2.1^{+0.4}_{-0.7}$	0.5/12	2nd
041218A	$1.77^{+0.27}_{-0.24}$		$1.9^{+0.3}_{-0.6}$	1.4/10	3rd
050502A	$1.54^{+0.21}_{-0.19}$	$138.4^{+72.4}_{-35.6}$	$1.3^{+0.1}_{-0.3}$	0.88/12	full
050504A	$1.33^{+0.35}_{-0.31}$		$1.2^{+0.2}_{-0.4}$	1.32/5	full

GRB	Фотонный индекс	E_c кэВ	Интегральный Поток (20-200 кэВ) 10^{-6} эрг/см ²	χ^2_{red} / dof	Компонент
050520A	$1.37^{+0.18}_{-0.16}$		$2.2^{+0.1}_{-0.3}$	1.08/13	full
050525A	$1.58^{+0.18}_{-0.19}$	$166.6^{+83.2}_{-44.8}$	$16.5^{+0.4}_{-0.6}$	0.95/31	full
050525A	$1.25^{+0.32}_{-0.34}$	$123.9^{+94.5}_{-40.9}$	$6.3^{+0.4}_{-0.7}$	0.98/28	1st
050525A	$1.66^{+0.30}_{-0.32}$	$145.0^{+177.9}_{-55.4}$	$9.5^{+0.4}_{-0.6}$	0.83/26	2nd
060428C	$0.74^{+0.51}_{-0.61}$	$84.83^{+97.14}_{-35.21}$	$2.2^{+0.5}_{-0.8}$	0.97/22	full
060901A	$1.07^{+0.27}_{-0.32}$	$244.4^{+135.2}_{-106.1}$	$6.7^{+0.6}_{-0.9}$	0.93/17	full
061025A	$1.51^{+0.27}_{-0.23}$		$0.9^{+0.2}_{-0.3}$	1.02/12	full
061122A	$1.07^{+0.10}_{-0.10}$	$188.0^{+42.3}_{-31.4}$	$14.8^{+0.2}_{-0.4}$	1.15/42	full
070311A	$1.67^{+0.33}_{-0.29}$		$1.7^{+0.3}_{-0.5}$	0.64/10	full
070418B	$2.23^{+0.31}_{-0.29}$		$46.1^{+1.0}_{-1.4}$	0.70/18	full
070707B	$1.37^{+0.32}_{-0.29}$		$0.3^{+0.1}_{-0.2}$	0.81/13	full
070912A	$1.36^{+0.14}_{-0.13}$		$1.8^{+0.1}_{-0.2}$	1.35/12	full
070925C	$0.63^{+0.45}_{-0.58}$	$98.1^{+98.1}_{-42.2}$	$2.9^{+0.5}_{-0.8}$	0.78/9	full
071003A	$\alpha = -0.99^{+0.13}_{-0.10}$ $\beta = -2.34^{+0.53}_{-0.84}$	$775.0^{+707.9}_{-287.7}$	$10.9^{+0.2}_{-0.4}$	0.92/26	full
080223A	$2.30^{+0.52}_{-0.44}$		$2.1^{+0.3}_{-0.7}$	0.77/9	full
080413A	$2.06^{+0.67}_{-0.52}$		$1.9^{+0.5}_{-0.8}$	1.46/7	full
080414B	$2.55^{+1.48}_{-0.74}$		$0.3^{+0.4}_{-0.3}$	1.72/11	full
080723B	$1.03^{+0.06}_{-0.07}$	$308.6^{+62.6}_{-47.3}$	$26.2^{+0.3}_{-0.6}$	1.12/42	full
080723B	$1.11^{+0.21}_{-0.34}$	$290.9^{+173.2}_{-149.4}$	$2.2^{+0.3}_{-0.5}$	1.40/27	1st
080723B	$0.84^{+0.14}_{-0.14}$	$175.1^{+43.0}_{-34.2}$	$8.4^{+0.2}_{-0.4}$	1.74/37	2nd
080723B	$0.97^{+0.21}_{-0.22}$	$224.8^{+183.4}_{-77.2}$	$4.1^{+0.2}_{-0.5}$	1.42/27	3rd
080723B	$0.78^{+0.19}_{-0.21}$	$302.7^{+167.2}_{-103.7}$	$3.5^{+0.3}_{-0.5}$	1.52/27	4th
080723B	$1.18^{+0.15}_{-0.18}$	$315.9^{+193.4}_{-114.6}$	$5.2^{+0.3}_{-0.6}$	1.18/27	5th
080723B	$0.89^{+0.07}_{-0.09}$	$442.7^{+184.1}_{-93.8}$	$7.6^{+0.2}_{-0.4}$	1.11/37	6th
081003C	$1.61^{+0.18}_{-0.16}$		$2.1^{+0.2}_{-0.4}$	1.53/13	full
090107A	$1.67^{+0.32}_{-0.29}$		$1.6^{+0.3}_{-0.5}$	0.54/10	full

На Рис. 2.15 представлено распределение подтвержденных гамма-всплесков по длительности. Распределение имеет бимодальный характер: в группе коротких всплесков 5 событий, в группе длинных - 43. Кривая аппроксимирована суммой двух лог-нормальных распределений. Центры лог-нормальных распределений имеют следующие координаты: $T_{90}^{short} = 0.39^{+0.12}_{-0.09}$ сек, $T_{90}^{long} =$

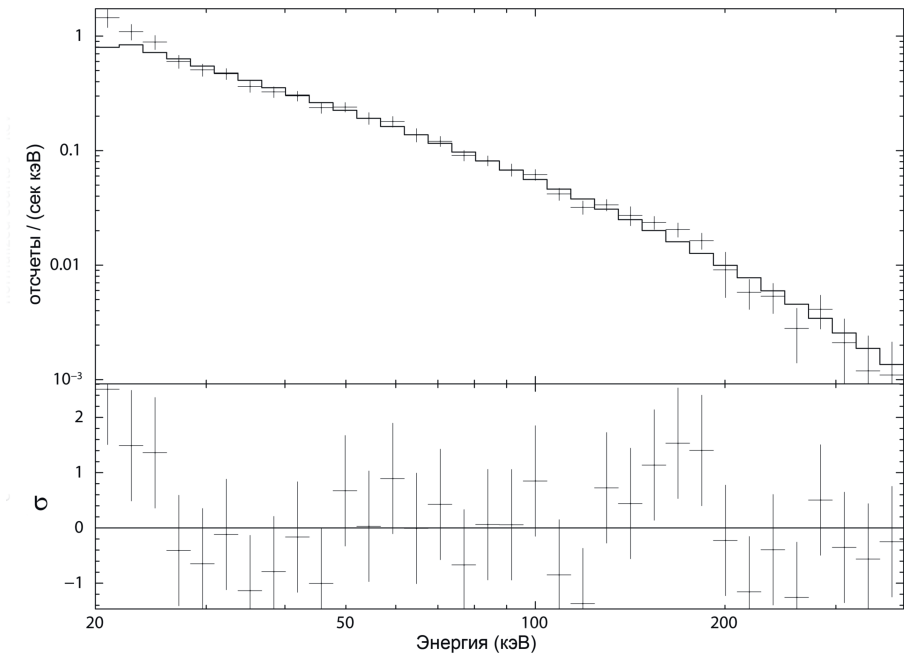


Рис. 2.11. Энергетический спектр гамма-всплеска GRB050525A. По горизонтальной оси - энергия фотонов, выраженная в кэВ. По вертикальной - количество отсчетов за секунду на кэВ. Сплошной линией показана степенная модель спектра с экспоненциальным завалом (формула 2.3). На нижней картинке - отклонение использованной спектральной модели от наблюдательных данных в зависимости от энергии фотонов. По вертикальной оси - отклонение модели от наблюдательных данных в единицах стандартных отклонений.

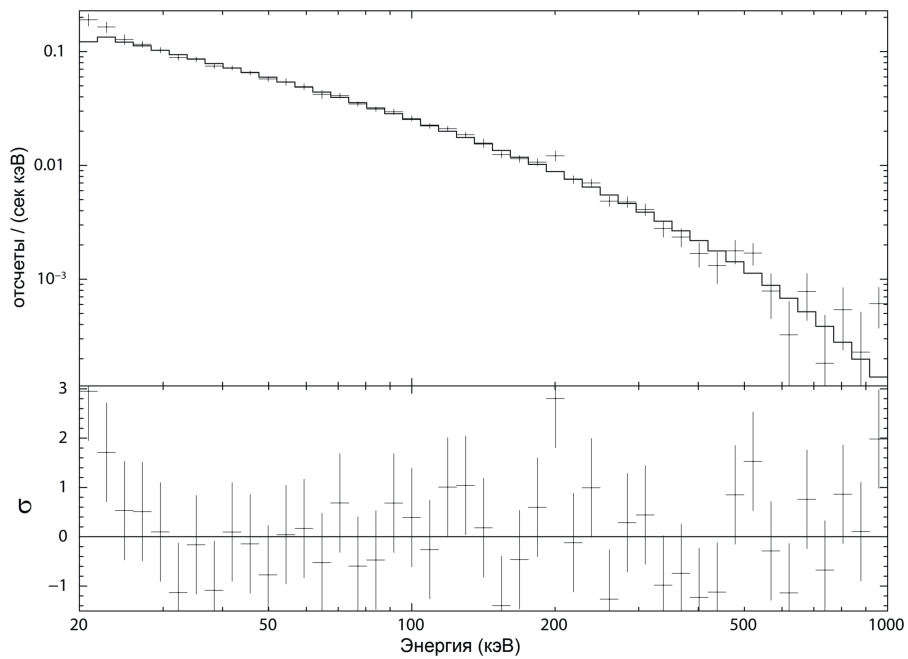


Рис. 2.12. Энергетический спектр гамма-всплеска GRB080723B. То же, что и на Рис. 2.11

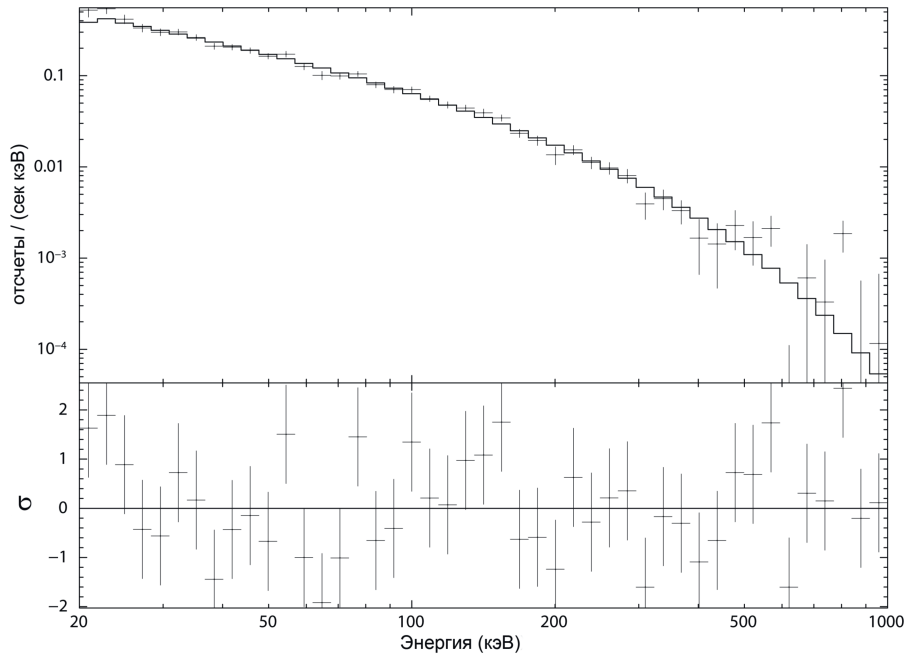


Рис. 2.13. Энергетический спектр гамма-всплеска GRB061122A. То же, что и на Рис. 2.11

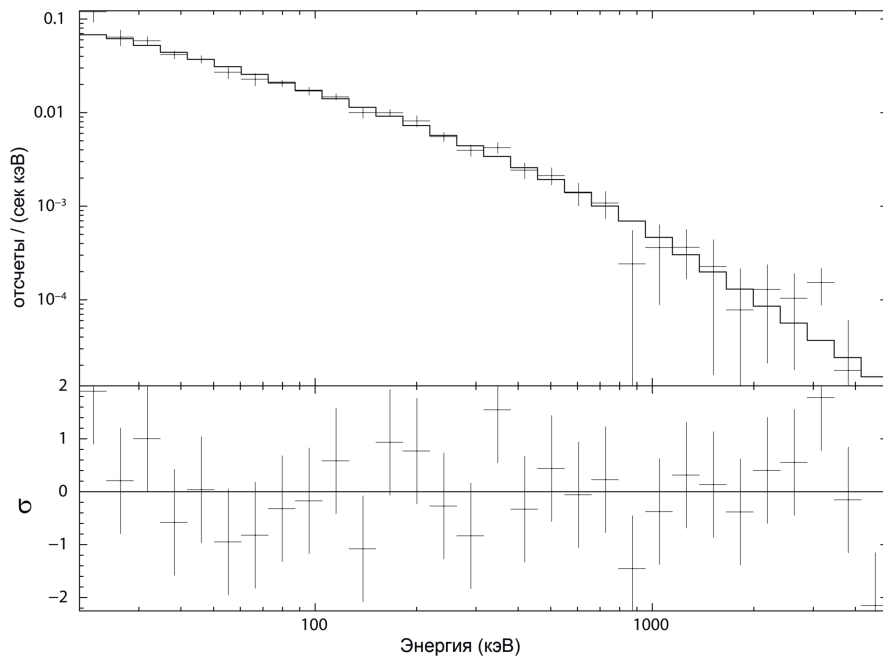


Рис. 2.14. Энергетический спектр гамма-всплеска GRB071003A. По горизонтальной оси - энергия фотонов, выраженная в кэВ. По вертикальной - количество отсчетов за секунду на кэВ. Сплошной линией показана спектральная модель Бэнда (формула 2.4). На нижней картинке - отклонение использованной спектральной модели от наблюдательных данных в зависимости от энергии фотонов. По вертикальной оси - отклонение модели от наблюдательных данных в единицах стандартных отклонений.

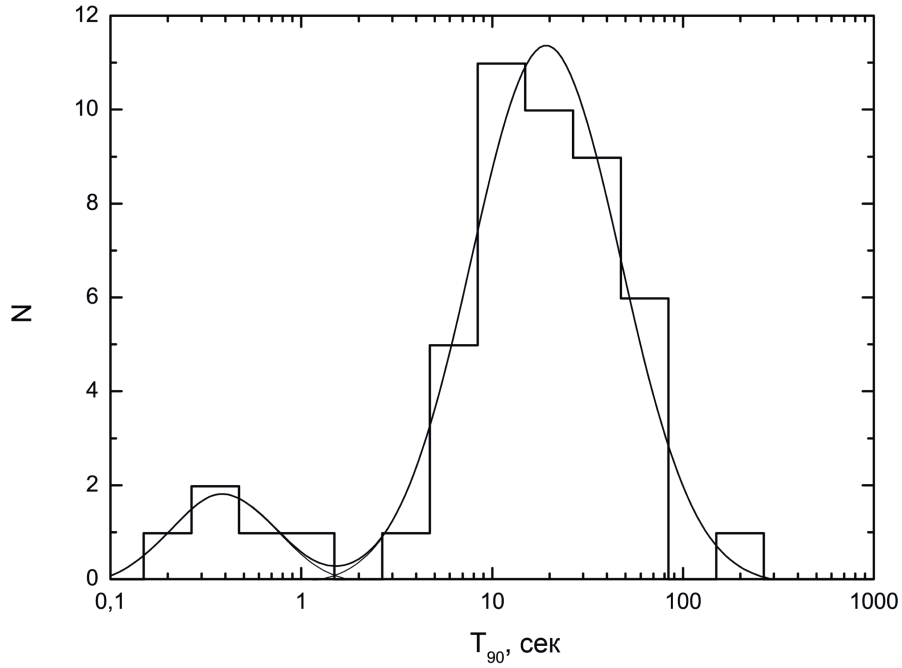


Рис. 2.15. Распределение подтвержденных другими космическими телескопами гамма-всплесков по длительности T_{90} . По горизонтальной оси - длительность гамма-всплесков в секундах, по вертикальной - количество всплесков. Гладкой кривой показана аппроксимация наблюдаемой зависимости двумя лог-нормальными распределениями. Положение центров лог-нормальных распределений: $T_{90}^{short} = 0.39^{+0.12}_{-0.09}$ сек, $T_{90}^{long} = 19.23^{+1.09}_{-1.04}$ сек.

$19.23^{+1.09}_{-1.04}$ сек. Минимум модельной бимодальной кривой находится в точке ~ 1.5 сек. Доля коротких гамма-всплесков от общего числа всплесков составляет 10%, что формально в 2.5 раза превышает долю коротких всплесков в эксперименте IBIS/ISGRI, но меньше доли подтвержденных коротких всплесков в эксперименте SPI-ACS, которая составляет 16% (см. главу 1).

2.4.8. Кандидаты в гамма-всплески

В Таблице 2.7 представлен список кандидатов в гамма-всплески, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL, который содержит данные о 160 событиях. В таблице указаны дата и время срабатывания UTC, длительность и значимость события в единицах стандартных отклонений.

Кандидаты отбирались в соответствии с наблюдаемыми свойствами под-

твержденных другими космическими телескопами гамма-всплесков, а именно:

- длительность отдельных импульсов события - более 5 мс;
- жесткий энергетический спектр у событий с длительностью менее 2 сек (данный критерий также позволяет отсеивать события, связанные с активностью источников повторного мягкого гамма-излучения SGR);
- распределение по детекторам близко к равномерному.

Подавляющая часть отобранных событий (94% всех кандидатов в гамма-всплески) имеет длительность менее 2 сек. Из них 94 события имеют длительность менее 0.1 сек и невысокую значимость (в среднем, 6.5σ). Некоторые из этих кандидатов были также идентифицированы в данных IBIS/ISGRI и SPI-ACS, но локализовать их источники на небесной сфере по данным IBIS/ISGRI не удалось. Поскольку одним из критериев отбора событий в группу кандидатов в короткие гамма-всплески был жесткий энергетический спектр, шансы на успешную регистрацию этих событий в эксперименте IBIS/ISGRI невелики. Также был проведен поиск подтверждений в данных экспериментов Конус и GBM/Fermi. Ни одного соответствующего события в данных этих экспериментов не обнаружено.

Таблица 2.7. Список кандидатов в гамма-всплески, зарегистрированных с помощью эксперимента SPI INTEGRAL

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Значи- мость	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Значи- мость
2003.02.17	02:29:03.90	0.2	5.6	2005.04.11	02:20:41.03	0.15	5.1
2003.02.19	19:14:37.97	0.005	6.5	2005.04.16	09:50:45.47	0.1	5.1
2003.02.23	22:14:14.83	0.01	6.1	2005.04.22	05:04:01.58	0.1	5.2
2003.02.25	05:29:36.21	1.3	5.1	2005.07.18	05:37:38.47	0.1	5.4
2003.05.30	17:35:10.80	0.01	6.1	2005.07.19	15:50:56.85	0.1	5.3
2003.06.25	09:24:04.58	0.02	6.6	2005.09.13	19:23:22.29	12	8
2003.07.14	01:46:37.29	0.01	6.2	2005.10.03	18:33:12.73	0.005	6.4

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Значи- мость	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Значи- мость
2003.07.15	17:21:33.13	0.15	5.1	2005.10.15	12:33:59.98	7.5	5
2003.07.16	12:45:40.85	0.15	5.3	2005.12.13	08:33:57.54	9	4.9
2003.08.01	09:42:34.91	0.01	6.6	2006.02.12	14:30:27.22	0.15	5
2003.08.11	17:37:21.05	0.015	7.4	2006.02.27	08:31:43.70	0.1	5.5
2003.08.18	13:57:11.50	0.8	7.7	2006.03.03	12:09:31.41	0.2	5
2003.08.31	19:56:25.40	0.01	6.4	2006.03.14	10:51:17.24	0.15	5.3
2003.10.11	16:07:10.19	0.15	5	2006.03.20	09:33:09.18	0.15	5.2
2003.10.15	17:13:51.90	0.001	7.7	2006.04.04	00:26:33.58	0.25	5.2
2003.10.24	21:57:27.78	0.01	6.5	2006.04.06	18:39:16.26	0.01	6.6
2003.10.24	23:41:38.81	0.01	6.5	2006.04.20	01:28:26.83	0.1	5.3
2003.11.11	12:38:29.32	0.01	6.2	2006.05.16	08:03:04.28	9	4.1
2003.12.02	11:14:24.17	0.02	6.8	2006.09.09	14:57:28.35	0.01	6.6
2004.01.11	21:31:39.70	0.005	6.5	2006.09.20	13:53:39.81	1.9	11.3
2004.02.03	11:07:15.19	0.015	6.2	2006.09.21	14:46:12.70	0.15	5.1
2004.02.14	08:06:14.71	0.1	6.1	2006.10.28	21:07:51.46	0.5	5.7
2004.03.17	02:13:43.09	0.2	5.1	2007.01.17	22:50:42.54	15	7.1
2004.03.19	07:23:22.11	0.01	6.2	2007.01.25	14:52:18.42	0.015	6.4
2004.03.20	07:18:39.46	0.15	5.9	2007.03.02	01:48:55.43	0.01	7.2
2004.04.14	17:46:41.42	0.015	6.5	2007.03.08	19:17:56.92	0.15	5.9
2004.04.18	11:48:08.95	0.1	5.4	2007.03.15	22:33:54.91	0.2	5.3
2004.06.03	07:31:40.61	0.02	6.1	2007.06.23	09:58:18.97	0.015	6.3
2004.06.10	23:56:16.81	0.005	6.1	2007.07.05	21:25:15.50	0.01	6.2
2004.07.10	08:38:34.98	0.01	7.1	2007.08.07	04:33:55.41	7.5	4.7
2004.07.23	18:02:03.13	0.2	5.2	2007.09.15	12:05:36.20	0.02	6.9
2004.08.22	00:09:03.94	0.02	6.6	2007.09.17	08:58:08.22	0.01	6.9
2004.08.26	03:01:44.96	0.01	6.1	2007.09.19	21:20:32.48	0.02	5.3
2004.10.17	06:38:49.39	1.1	5.3	2007.09.24	01:49:20.51	0.005	6.2
2004.11.19	05:48:28.67	0.005	6.1	2007.10.01	01:27:53.33	0.1	5.8
2004.12.21	01:40:04.92	0.3	5.1	2007.10.01	03:52:04.94	0.005	6.3
2004.12.27	21:30:26.95	0.4	8.8	2007.10.21	05:34:58.21	0.01	6.6
2005.01.13	09:32:22.92	0.1	5.3	2007.11.02	03:39:09.38	0.01	6.6
2005.03.12	07:49:36.90	0.15	5.5	2007.11.03	01:11:20.07	0.01	6.6
2005.03.21	16:07:18.41	0.005	6.1	2007.12.05	12:44:19.70	0.005	6
2007.12.17	05:10:35.64	0.02	6.5	2008.10.27	22:59:54.53	0.05	6.5
2007.12.25	05:12:22.79	0.02	6.5	2008.11.04	03:32:48.82	1.9	5.1
2007.12.30	07:32:05.45	0.01	6.2	2008.11.09	00:36:16.55	0.005	6
2007.12.31	18:53:28.50	0.005	6.1	2008.11.16	16:54:50.48	5	4.1

Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Значи- мость	Дата	Время UTC	T_{90} (сек.)	Значи- мость
2008.02.23	14:05:58.06	0.005	6.6	2008.11.19	01:39:21.59	0.1	5.5
2008.02.24	13:06:46.28	0.01	6.6	2008.12.01	19:13:22.04	0.005	6.5
2008.03.13	14:54:48.26	0.01	6.2	2008.12.11	13:49:31.73	0.02	7.2
2008.03.27	13:29:29.92	1.1	5.8	2008.12.12	17:58:51.40	0.005	6.4
2008.04.08	15:34:42.88	50	44	2008.12.12	17:59:41.91	0.015	6.5
2008.04.10	14:08:37.39	0.05	6.3	2008.12.14	08:55:36.28	0.005	6.1
2008.04.24	00:58:47.19	0.005	6.7	2008.12.15	04:56:19.88	0.025	6.3
2008.04.27	21:30:07.39	0.02	6.3	2008.12.19	14:56:28.66	0.02	6.4
2008.04.28	07:48:40.79	0.01	6.3	2008.12.23	22:00:27.60	1.3	5.8
2008.04.30	22:28:16.60	8	4.2	2008.12.28	16:37:26.37	0.02	7.2
2008.05.15	18:51:33.99	0.03	7.1	2009.01.07	10:50:03.68	0.01	7.2
2008.05.23	15:33:10.43	0.02	6.3	2009.01.12	06:27:43.99	0.3	5.7
2008.05.27	21:27:30.56	0.01	6.2	2009.01.21	07:42:19.29	0.02	6.4
2008.06.05	07:27:31.81	0.015	6.3	2009.01.27	04:46:14.86	0.25	5
2008.06.06	03:12:30.02	0.01	6.3	2009.03.08	10:40:23.59	0.02	6.5
2008.06.06	03:34:29.66	0.01	7	2009.03.13	17:10:41.48	0.007	7.3
2008.06.09	02:53:14.45	0.02	6.3	2009.05.24	16:07:26.03	0.005	6.9
2008.06.09	10:03:19.56	0.2	5.6	2009.06.09	06:26:01.28	0.01	6.5
2008.06.18	09:52:20.43	0.015	6.3	2009.06.14	02:15:08.81	0.2	5.1
2008.06.24	15:45:30.81	0.15	5.1	2009.07.03	00:52:34.88	0.15	5.5
2008.07.14	03:11:37.75	7	4.2	2009.07.03	14:22:27.83	0.005	7.6
2008.08.03	05:25:24.93	0.01	6.9	2009.07.07	09:55:01.31	0.02	6.5
2008.08.03	06:23:56.84	7	4.1	2009.07.10	19:38:39.98	0.7	5.4
2008.08.07	17:17:25.78	0.015	6.1	2009.07.14	08:32:22.24	0.015	6
2008.08.08	03:54:20.00	10	4.5	2009.07.15	07:27:04.22	1.5	5.3
2008.09.16	09:26:24.74	0.01	6.8	2009.07.18	17:06:03.30	0.005	6.5
2008.09.23	16:48:41.70	0.005	6.3	2009.08.14	09:12:40.63	0.15	5.2
2008.09.28	05:20:23.10	0.01	6.7	2009.08.22	18:30:26.96	0.1	5.4
2008.09.30	22:39:45.07	0.1	6.3	2009.08.27	14:59:49.84	0.1	5.1
2008.10.03	16:23:00.26	0.01	9.6	2009.09.05	06:26:26.22	0.01	6.5
2008.10.03	19:23:41.18	0.01	6.6	2009.09.14	12:56:56.88	1.2	5
2008.10.08	18:23:33.34	0.01	6.5	2009.09.18	01:34:03.62	0.01	6
2008.10.10	07:21:18.65	8	4.1	2009.09.22	02:49:17.22	0.01	6
2008.10.23	03:20:11.98	0.01	6.4	2009.10.08	01:53:38.54	0.1	5.4
2008.10.23	07:32:53.36	0.01	6.3	2009.11.28	06:44:37.75	0.25	5
2008.10.26	00:30:44.97	0.01	6.8	2009.11.29	22:17:21.46	0.01	6.8

2.5. Обсуждение и основные результаты главы

В данных эксперимента SPI INTEGRAL найдено 48 гамма-всплесков, подтвержденных другими космическими телескопами, из них 7 всплесков были впервые обнаружены в данных SPI и/или IBIS/ISGRI, причем, GRB060221C и GRB070912A являются „новыми“, ранее не известными гамма-всплесками. Исследованию гамма-всплеска GRB070912A по данным обсерваторий INTEGRAL и Конус посвящен раздел 4.1. GRB060221C является типичным коротким всплеском ($T_{90} = 0.3$ сек, Рис. 2.16). Таким образом, в данных SPI действительно присутствуют гамма-всплески, не выделенные автоматической системой обнаружения событий IBAS.

На Рис. 1.14 показана зависимость доли коротких гамма-всплесков в различных экспериментах от нижнего энергетического порога срабатываний детектора (более подробно см. раздел 1.6). Из Рис. 1.14 следует, что доля коротких всплесков растет с увеличением нижнего энергетического порога срабатываний. Это может быть связано с тем, что короткие всплески обладают, в среднем, более жестким энергетическим спектром. Точка, соответствующая эксперименту SPI, хорошо соответствует наблюдаемой зависимости. Доля подтвержденных другими космическими телескопами коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS составляет 16% (см. раздел 1.6), что значительно меньше ожидаемого в рамках зависимости значения, составляющего около 30%. В Главе 1 показано, что доля коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS может достигать 45%, если учитывать также кандидаты в короткие гамма-всплески, не подтвержденные другими экспериментами. Оценка доли коротких всплесков с учетом неподтвержденных событий, сделанная в Главе 1, составляет 31%, что хорошо согласуется с зависимостью доли коротких всплесков от нижнего порога срабатываний. Для эксперимента GRANAT/WATCH указан верхний предел доли коротких гамма-всплесков [112]. Доля коротких всплесков в эксперименте

GBM/Fermi составляет 18% [159].

В данной работе было отобрано 160 кандидатов в гамма-всплески, из них 151 событие относится к коротким всплескам, причем 94 события имеют длительность менее 0.1 сек и невысокую значимость (в среднем, 6.5σ). Не исключено, что часть событий является случайными флуктуациями фона. Общее количество обнаруженных в данных SPI событий намного превышает предполагаемое количество случайных статистических срабатываний. Это может означать, что в данных действительно присутствуют события, не связанные со случайными вариациями фона. Однако определить, какое именно событие является флуктуацией, не представляется возможным без надежного подтверждения природы события (например, локализации источника или одновременной регистрации другим экспериментом). В данном случае можно говорить лишь о статистической вероятности присутствия в данной группе определенного количества событий, связанных с флуктуациями.

С помощью разработанного в работе алгоритма проведен поиск и классификация событий в данных телескопа SPI INTEGRAL, зарегистрированных за период 2003-2009 гг.

Составлен каталог подтвержденных другими космическими телескопами гамма-всплесков и всплесков источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408 за 2003-2009 гг, содержащий 48, 223 и 23 события, соответственно.

Составлен каталог кандидатов в гамма-всплески и во вспышки источников повторных мягких гамма-всплесков, содержащий 160 и 90 событий, соответственно.

В данных телескопа SPI обнаружено 6 новых гамма-всплесков, в том числе два ранее не исследованных.

Впервые локализовано 7 гамма-всплесков с точностью 2 угл.мин по данным эксперимента IBIS/ISGRI. Для GRB081110C и GRB070418B локализация проведена с точностью до одного пересечения колец IPN3.

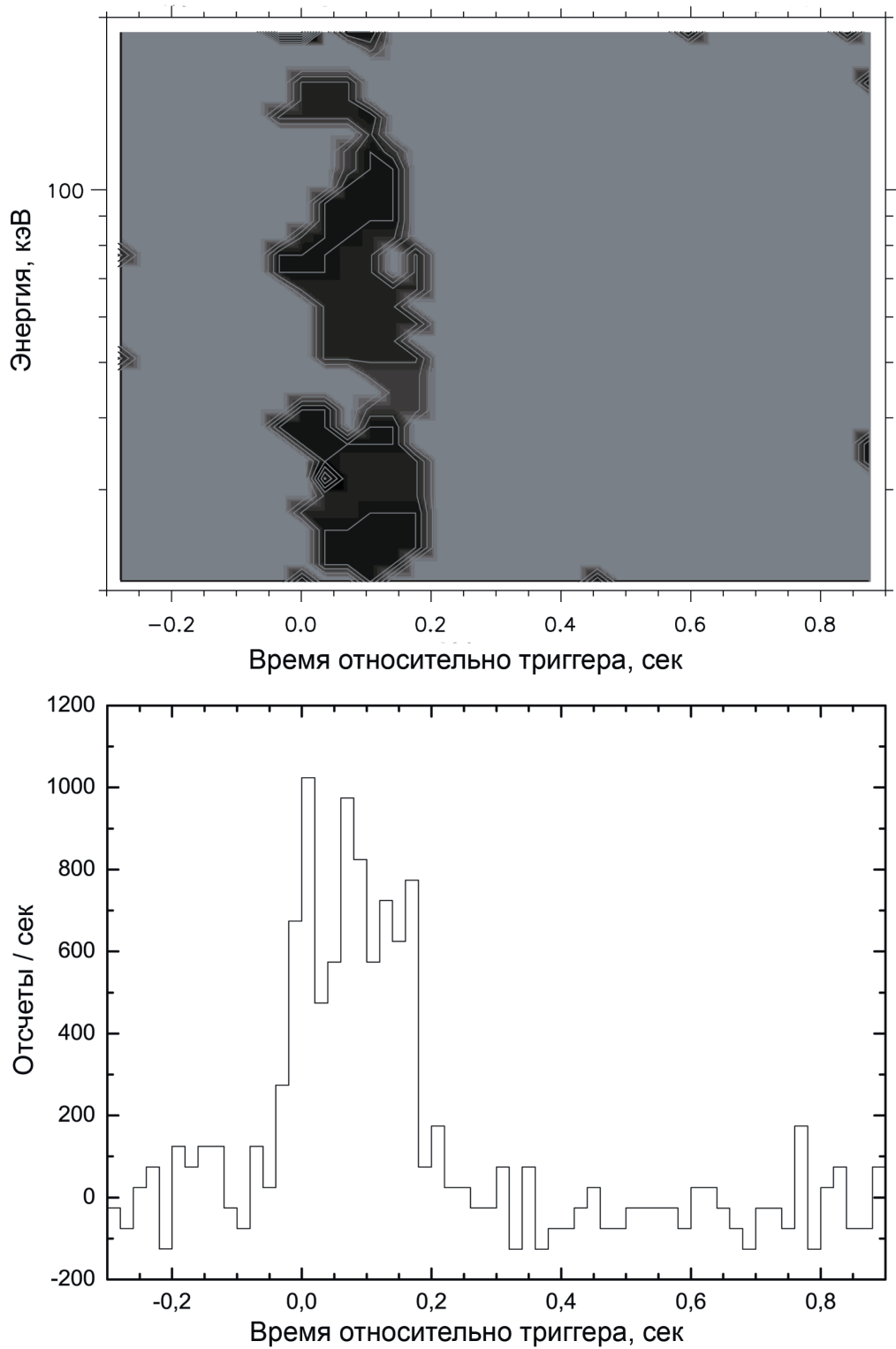


Рис. 2.16. Гамма-всплеск GRB060221C. На верхней картинке - спектрально-временная диаграмма, построенная по данным IBIS/ISGRI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - энергия фотонов в кэВ. Яркость цвета на картинке обратно пропорциональна количеству зарегистрированных отсчетов в соответствующей области: чем темнее область, тем больше количество отсчетов в ней. На нижней картинке - кривая блеска в энергетическом диапазоне (20, 200) кэВ, построенная по данным IBIS/ISGRI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах.

Для 39 событий построены энергетические спектры с использованием различных моделей (формулы 2.2, 2.3, 2.4), причем для всплесков GRB041218, GRB070925 впервые определен параметр E_c , который позволяет определить параметр E_{peak} .

Глава 3

Спектральная эволюция гамма-всплесков

В этой Главе исследована спектральная эволюция 28 ярких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL. Усовершенствован метод исследования спектральной эволюции. Показано, что для всплесков с простой структурой кривой блеска и для отдельных импульсов многоимпульсных событий зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывается логарифмической функцией $lag \sim A \log(E)$. Установлено, что параметр A зависит от длительности импульса, причем зависимость универсальна для всех исследованных гамма-всплесков. Отрицательные значения спектрально-временной задержки для всплесков с простой структурой кривой блеска не обнаружены.

3.1. Постановка задачи

Помимо длительности и жесткости спектра в исследованиях гамма-всплесков применяется параметр, характеризующий эволюцию спектра - спектрально-временная задержка (лаг). Лаг представляет собой смещение по времени профилей кривых блеска в различных энергетических каналах и считается положительным, если временной профиль в более мягких энергетических каналах „запаздывает“ относительно профиля в жестких каналах. Для коротких гамма-всплесков характерно малое положительное значение лага, а в части всплесков лаг отсутствует в пределах статистической ошибки [69, 160]. Для длинных гамма-всплесков характерны большие положительные значения спектрально-временной задержки. Обнаружена эмпирическая зависимость величины лага от светимости для класса длинных гамма-всплесков [35, 161–165].

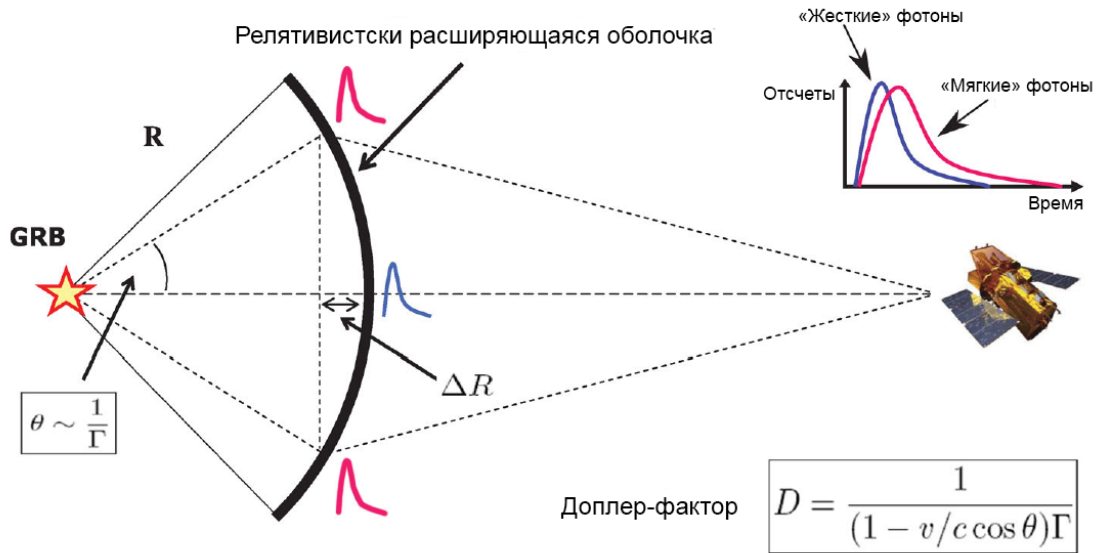


Рис. 3.1. Модель спектральной эволюции гамма-всплесков, основанная на релятивистском кинематическом эффекте (см. текст). Из работы [165].

Существует несколько теоретических моделей, объясняющих природу спектрально-временной задержки. Одна из моделей, обсуждаемая в работах [166–168], предполагает спектральную эволюцию в течение активности центральной машины всплеска (prompt emission), связанную с изменением свойств самого источника всплеска. В работе [66] высказано предположение, что спектральная эволюция центральной машины всплеска может объяснить как положительные, так и отрицательные лаги при определенных условиях.

Другая модель, объясняющая природу лагов, основана на релятивистском кинематическом эффекте (curvature effect) и обсуждается в работах [165, 169–173]. Если предположить, что фотоны излучаются изотропно со сферически симметричной релятивистски расширяющейся оболочки одновременно в сопутствующей системе отсчета, то наблюдатель, находящийся на бесконечности, зарегистрирует фотоны, излученные вдоль оси источник - наблюдатель, раньше, чем остальные, внеосевые фотоны (Рис. 3.1). При этом наблюдаемая энергия фотонов зависит от величины угла между направлением движения фотона и осью источник-наблюдатель: чем больше угол, тем „мягче“ фотон. Т.е. фотоны,

излучаемые вдоль оси источник-наблюдатель, регистрируются раньше и имеют наибольшую энергию. Таким образом, кинематическая модель объясняет лишь положительные лаги. Также возможна ситуация, когда за возникновение лагов ответственны как кинематические эффекты, так и изменение свойств центральной машины [66]. Кинематические эффекты всегда увеличивают значение лага, тогда как второй механизм может объяснять как отрицательные лаги, так и положительные.

Существует еще одна возможная модель, описывающая отрицательные лаги, которая предложена нами и рассмотрена в этой Главе. Согласно этой модели отрицательные лаги могут быть следствием наложения (суперпозиции) отдельных импульсов, причем значение лага для каждого импульса положительное, а спектральная жесткость импульсов возрастает со временем (при переходе от импульса к импульсу).

В работе [11] показано, что наблюдаемые свойства коротких импульсов в длинных гамма-всплесках со сложной многоимпульсной структурой аналогичны свойствам коротких гамма-всплесков. Это может означать, что, несмотря на различия во многих наблюдаемых свойствах коротких и длинных всплесков, физический механизм излучения един для обоих типов.

В данной главе исследована спектральная эволюция гамма-всплесков по данным телескопов SPI и IBIS/ISGRI. В работе описан усовершенствованный метод исследования спектральной эволюции, предложен параметр, характеризующий спектральную эволюцию, и обнаружены некоторые особенности спектральной эволюции событий со сложной многоимпульсной структурой кривой блеска.

3.2. Методы исследования

Традиционный метод исследования спектральной эволюции гамма-всплесков состоит в определении спектрально-временной задержки между профилями кривых блеска в различных энергетических каналах с помощью кросс-корреляционного анализа [174]. Например, в эксперименте BATSE использовались четыре канала: (25, 50), (50, 100), (100, 300) и (300, 1000) кэВ (далее в тексте - каналы 1, 2, 3 и 4, соответственно). С помощью этого метода можно определить лишь три величины - задержку (лаг) между каналами 2 и 1, 3 и 1, 4 и 1. У большинства гамма-всплесков доля излучения в 4 канале очень мала, и он часто исключается из рассмотрения. Таким образом, установить вид зависимости задержки от энергетического канала, используя этот метод, невозможно. Можно получить представление лишь об общем характере спектральной эволюции гамма-всплеска, т.е. определить, наблюдается ли спектральная эволюция в данном событии, и выяснить, каков ее характер - эволюция от жесткого излучения к мягкому (положительный лаг), или - от мягкого к жесткому.

В данной работе предложена модификация традиционного метода исследования спектральной эволюции гамма-всплесков, которая позволяет исследовать спектральную эволюцию более детально в том случае, если есть возможность многоканальной регистрации, и имеется достаточная статистика. Важно отметить, что эта методика предложена в данной работе впервые.

В основе предложенного метода также лежит кросс-корреляционный анализ кривых блеска в различных энергетических каналах. Отличие от традиционного метода состоит в том, что используется большее число узких энергетических каналов. Ширина канала выбирается произвольно, и ее выбор зависит лишь от интенсивности события - ширина меньше для более интенсивных событий. В анализе самых ярких событий применяется до 25 каналов, что означает, что можно вычислить до 24 значений спектрально-временной задержки. Ес-

ли зависимость спектрально-временной задержки от энергии имеет сложный вид, то предложенный нами метод позволит обнаружить этот факт, а также установить тип этой зависимости. Исследование спектральной эволюции в узких спектральных каналах также проводилось в работе [175], где исследовался гамма-всплеск GRB130427A.

3.3. Обработка данных

Обработка данных состоит из следующих этапов:

(1) *Построение спектрально-временной диаграммы.* По виду спектрально-временной диаграммы оцениваются основные свойства гамма-всплеска: интенсивность, длительность и количество импульсов/эпизодов активности, жесткость спектра и „энергетический диапазон“, в котором наблюдается всплеск. Если всплеск состоит из нескольких эпизодов активности - отдельных импульсов или групп импульсов, между которыми уровень сигнала падает до фонового значения, каждый такой эпизод считался отдельным событием и исследовался индивидуально. Следующие этапы обработки применяются в исследовании именно таких отдельных событий, а не только в исследовании гамма-всплеска в целом.

Благодаря пофотонной регистрации событий и высокому спектральному разрешению телескопов SPI и IBIS/ISGRI можно исследовать спектральную эволюцию события с высоким временным и энергетическим разрешением, зависящим лишь от свойств самого события.

(2) *Формирование кривой блеска в широком энергетическом канале и выделение в ней отдельных импульсов.* В качестве модели импульса использовалась FRED-модель 3.1, обсуждаемая, например, в работе [9, 11], где A - амплитуда импульса, t_s - время начала импульса, τ_1 и τ_2 - параметры, определяющие длительность и форму импульса. Параметр τ_1 определяет форму импульса на

стадии роста (промежуток времени $t_s < t < t_{peak}$), а τ_2 - форму импульса на стадии падения (промежуток времени $t_{peak} < t$). Параметр τ_2 коррелирует с длительностью импульса и поэтому может использоваться в качестве параметра длительности.

$$I(t) = A\lambda \exp\left(-\frac{\tau_1}{t - t_s} - \frac{t - t_s}{\tau_2}\right), \quad \lambda = \exp\left(2\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{\frac{1}{2}}\right), \quad t - t_s > 0. \quad (3.1)$$

Методика определения количества отдельных импульсов следующая. Поскольку кривые блеска гамма-всплесков обычно состоят из импульсов различной длительности и интенсивности, выделение импульсов проводилось на различных временных масштабах. Сначала строилась кривая блеска с высоким временным разрешением, в которой выделялись наиболее значимые (обычно, наиболее короткие) импульсы, которые незначительно перекрываются. В части всплесков импульсы сильно перекрываются друг с другом, и даже в кривой блеска с высоким временным разрешением их выделить не удастся. В этом случае количество импульсов оценивалось визуально и количество импульсов является оценкой снизу. В других исследованиях количества импульсов используется непараметрические методы [114, 176].

Для всплесков с достаточно хорошо разделенными импульсами в случае успешного выделения наиболее интенсивного импульса, а именно, после подгонки этого импульса модельной зависимостью 3.1, процедура повторялась для кривой блеска, полученной путем вычитания из исходной кривой блеска модели успешно выделенного импульса. Данная процедура повторялась до тех пор, пока в кривой блеска остатка значимые (более 5 стандартных отклонений) превышения на масштабах времени порядка длительности бина не будут отсутствовать. В случае отсутствия значимых превышений на этих масштабах, проводилась группировка бинов данной кривой блеска для поиска и выделения более длительных импульсов.

Количество импульсов, выделенных в кривых блеска исследуемых гамма-всплесков, указано в Таблице 3.1. Для всплесков со сложной структурой кривой блеска, состоящей из большого числа сильно перекрывающихся импульсов, которые невозможно разделить, указано минимальное количество импульсов, оцененное визуально (эти события отмечены буквой v), либо количество импульсов, которые удалось выделить (эти события отмечены f). Пометка s у всплеска GRB041212 означает, что выделение импульсов в кривой блеска этого всплеска было произведено по данным SPI-ACS. Эффективность апертурных телескопов SPI и IBIS/ISGRI падает с увеличением угла между осью телескопов и направлением на источник всплеска, в то время как эффективность SPI-ACS растет с ростом этого угла. GRB041212 (Рис. 3.2) был зарегистрирован на краю или вовсе вне поля зрения телескопов SPI и IBIS/ISGRI, поскольку попытка локализовать этот всплеск с помощью инструментов SPI и IBIS/ISGRI оказалась безуспешной. Поэтому значимость этого всплеска значительно выше в эксперименте SPI-ACS, и обработка GRB041212 проведена по данным SPI-ACS.

(3) *Формирование кривых блеска с учетом наблюдаемых свойств события, определенных в пункте (1), в узких энергетических каналах с высоким временным разрешением.*

(4) *Вычисление массива спектрально-временных задержек между сформированными кривыми блеска с помощью кросс-корреляционного анализа.* Подробное описание применения кросс-корреляционного анализа для определения спектрально-временной задержки см., например, в работе [174]. Здесь отметим, что метод основан на построении кросс-корреляционной функции двух кривых блеска в различных энергетических каналах. Положение максимума кросс-корреляционной функции определяет величину смещения профилей кривых блеска по времени друг относительно друга, т.е. спектрально-временную задержку.

Ошибка определения спектрально-временной задержки вычисляется с использованием метода Монте-Карло. Производится моделирование кривых блес-

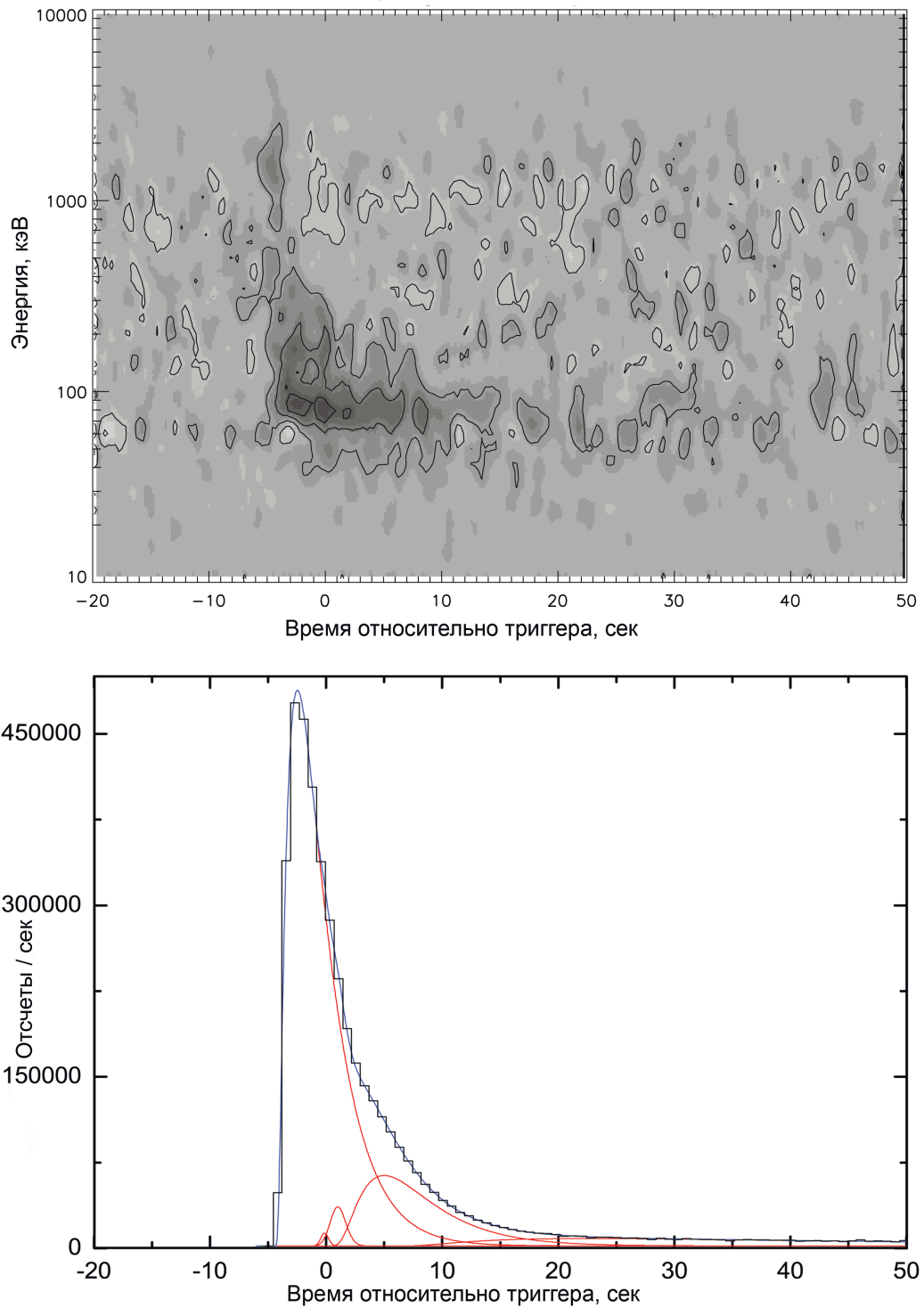


Рис. 3.2. Гамма-всплеск GRB041212A. На верхней картинке - спектрально-временная диаграмма, построенная по данным SPI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - энергия фотонов в кэВ. Яркость цвета на картинке обратно пропорциональна количеству зарегистрированных отсчетов в соответствующей области: чем темнее область, тем больше количество отсчетов в ней. На нижней картинке - кривая блеска в энергетическом диапазоне (80, 10000) кэВ, построенная по данным SPI-ACS. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - количество отсчетов за секунду в бине кривой блеска. Гладкой кривой показана аппроксимация кривой блеска суммой экспоненциальных импульсов (формула 3.1).

ка в двух энергетических каналах на основе статистических свойств сигнала исходных наблюдаемых кривых блеска. Количество отсчетов в каждом бине моделируемой кривой блеска определяется как случайная величина, распределенная по Пуассоновскому закону с математическим ожиданием, равным количеству отсчетов в бине исходной кривой блеска. После того, как моделирование кривых блеска в двух энергетических каналах произведено, выполняется кросс-корреляционный анализ этих кривых блеска, и вычисляется задержка между ними. Эта процедура повторяется тысячу раз (производится моделирование тысячи пар кривых блеска), и строится распределение полученных значений задержки. Распределение аппроксимируется гауссианой, полуширина на полувысоте которой отражает разброс полученных значений задержки. Эта величина и используется в дальнейшем как ошибка определения спектрально-временной задержки.

В этой работе в качестве опорного канала, относительно которого вычисляется массив задержек, выбран первый, самый „мягкий“ канал, т.е. вычисляются спектрально-временные задержки между самым мягким каналом и остальными. Результаты обработки не зависят от выбора опорного канала.

(5) Построение и аппроксимация зависимости спектрально-временной задержки от энергии.

На Рис. 3.3 показана зависимость спектрально-временной задержки от энергии для гамма-всплеска GRB040323, построенная по данным IBIS/ISGRI. Увеличение задержки с ростом энергии (положительный наклон) соответствует положительной задержке - излучение в мягких энергетических каналах „запаздывает“ относительно излучения в жестких каналах. Горизонтальная прямая зависимости (нулевой наклон) означает отсутствие спектральной задержки - временные профили в различных энергетических каналах не смещены по времени друг относительно друга.

В большинстве (37 из 43) случаев зависимость спектральной задержки от

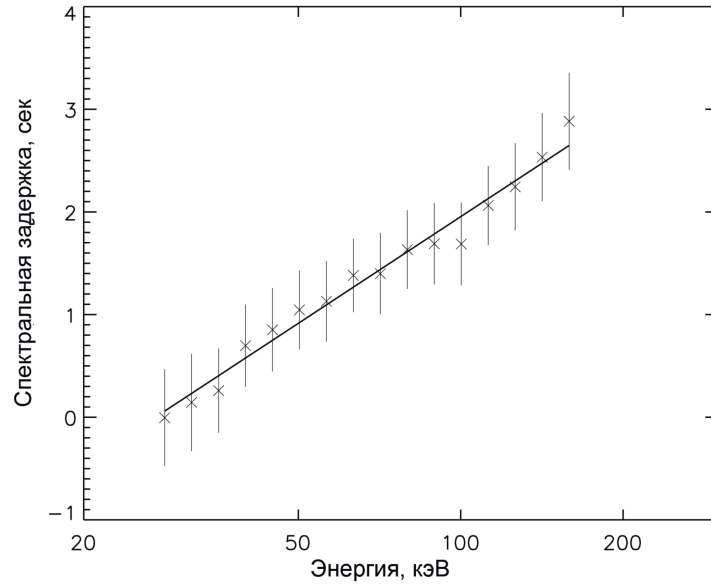


Рис. 3.3. Зависимость спектрально-временной задержки от энергии для гамма-всплеска GRB040323A, построенная по данным IBIS/ISGRI. Показана аппроксимация зависимости логарифмической функцией (формула 3.2). По горизонтальной оси отложена энергия в кэВ, по вертикальной - спектрально-временная задержка в секундах.

энергии аппроксимируется логарифмическим законом (формула 3.2, Рис. 3.3) во всем исследованном энергетическом диапазоне.

$$lag = A \log(E) + B. \quad (3.2)$$

Параметр A является параметром, характеризующим спектральную эволюцию гамма-всплесков. Знак этого параметра отражает тип спектральной эволюции - положительное значение означает положительную спектральную задержку, т.е. эволюцию спектра от жесткого к мягкому. Его абсолютное значение отражает „скорость“ спектральной эволюции - чем оно выше, тем быстрее эволюционирует спектр; нулевое значение означает отсутствие спектральной эволюции. Далее в тексте мы будем называть параметр A „индексом задержки“.

В остальных шести случаях зависимость значительно лучше описывается логарифмическим законом с изломом, т.е. на одном участке гамма-спектра вы-

полняется соотношение $lag \sim A \log(E)$, а на другом $lag \sim B \log(E)$, где $A \neq B$. В качестве функции, описывающей такую зависимость, мы используем сумму двух логарифмических функций с экспоненциальным завалом (формула 3.3), где E_{cut} - энергия излома, а C - „острота“ излома. Чем больше значение C , тем резче переход от одной зависимости к другой. При аппроксимации значение C фиксировалось для всех событий и полагалось равным 100. Коэффициент B_2 не является независимым и выражается через остальные параметры модели по формуле 3.4. Примеры зависимости лага от энергии, которая аппроксимируется формулой 3.3, представлены на Рис. 3.4, 3.5, 3.6.

$$lag = (A_1 \log(E) + B_1) \exp \left[\left[-\frac{\log(E)}{\log(E_{cut})} \right]^C \right] + \\ + (A_2 \log(E) + B_2) \left[1 - \exp \left[\left[-\frac{\log(E)}{\log(E_{cut})} \right]^C \right] \right]. \quad (3.3)$$

$$B_2 = E_{cut}(A_1 - A_2) + B_1. \quad (3.4)$$

Очевидно, что модель с изломом (формула 3.3), т.е. модель с бóльшим числом подгоняемых параметров, будет лучше описывать наблюдаемую зависимость для всех событий. Однако в большинстве случаев предпочтительнее использовать более простую модель с меньшим числом параметров (формула 3.2). Мы использовали статистические критерии AIC_c и BIC [177]. Они позволяют оценить целесообразность использования более сложной модели с бóльшим числом параметров. Их можно вычислить по формулам 3.5 и 3.6; где χ^2 - значение функционала, k - число параметров модели, N - число точек, использованных для аппроксимации зависимости. Если параметр AIC_c или BIC, вычисленный для простой модели 3.2, больше, чем соответствующий параметр модели 3.3, то это означает, что в данном случае целесообразно использовать более сложную

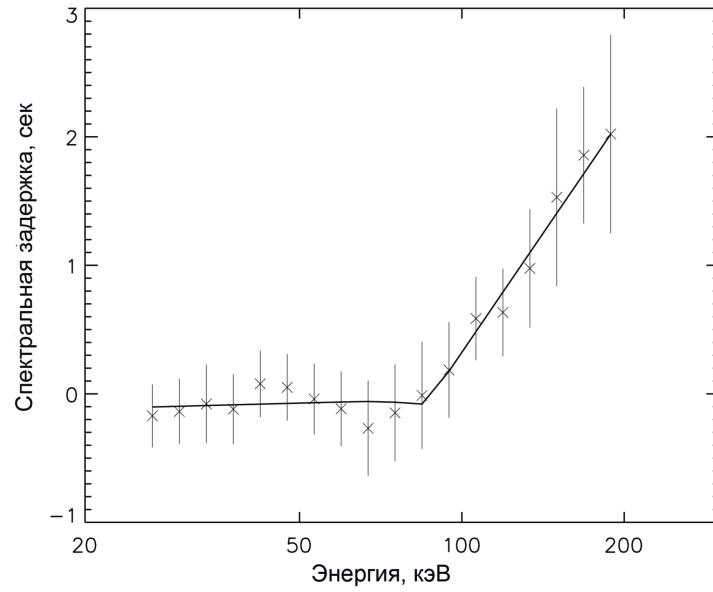


Рис. 3.4. Зависимость спектрально-временной задержки от энергии для гамма-всплеска GRB031203B, построенная по данным IBIS/ISGRI. Показана аппроксимация зависимости логарифмической функцией с изломом (формула 3.3). По горизонтальной оси отложена энергия в кэВ, по вертикальной - спектрально-временная задержка в секундах.

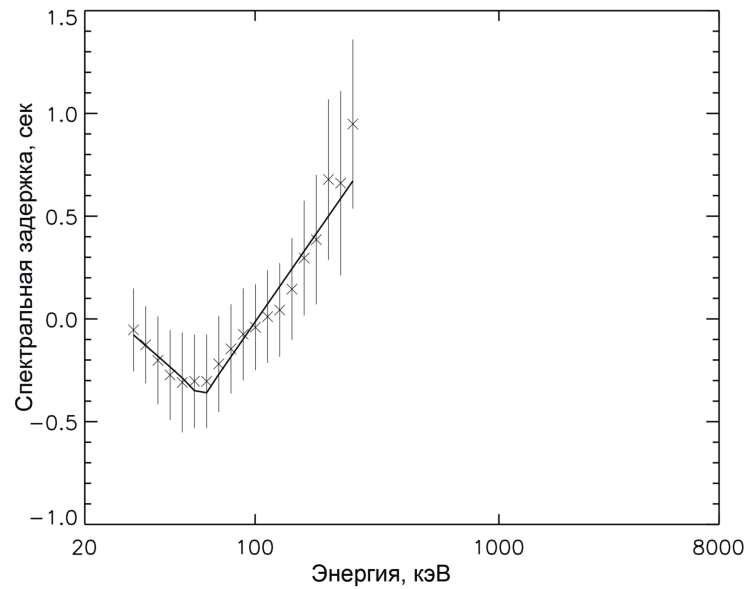


Рис. 3.5. Зависимость спектрально-временной задержки от энергии для гамма-всплеска GRB060428C, построенная по данным SPI. То же, что и на Рис. 3.4

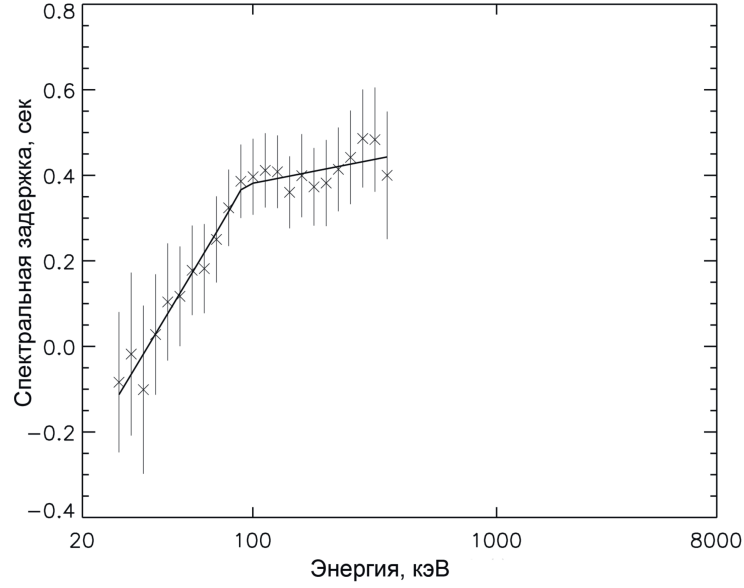


Рис. 3.6. Зависимость спектрально-временной задержки от энергии для гамма-всплеска GRB080723A, построенная по данным SPI. То же, что и на Рис. 3.4

модель 3.3.

$$AIC_c = \chi^2 + 2k + \frac{2k(k+1)}{N-k-1}. \quad (3.5)$$

$$BIC = \chi^2 + k \ln(N). \quad (3.6)$$

Результаты обработки представлены в Таблице 3.1. В первой колонке указано название гамма-всплеска; во второй - название телескопа, данные которого использовались в анализе; в третьей - число компонентов в кривой блеска гамма-всплеска, которое определялось в результате выделения и фитирования импульсов, либо оценивалось визуально для всплесков с сильно перекрывающимися импульсами (см. пункт 2 алгоритма обработки); в четвертой указан компонент в кривой блеска, который использовался в анализе (full означает, что исследовался гамма-всплеск в целом, 1st - исследовался первый компонент, 2nd - второй, и т.д., пометка ^g означает, что анализируется несколько импульсов, а ^p - один импульс); в пятой и шестой колонках указаны значения наклонов в аппроксимации зависимости лаг - энергия (если выбрана простая логарифми-

ческая модель (формула 3.2), то указано значение лишь одного наклона); в седьмой - значение энергии, при которой наблюдается излом в зависимости лаг - энергия (актуально для модели с изломом, формула 3.3); в восьмой - значение χ^2 с указанием количества степеней свободы для модели зависимости лаг - энергия.

Все события, исследованные с помощью описанного выше метода, для сравнения были исследованы классическим методом - получены значения задержек между каналами (25, 50), (50, 100), (100, 300) и (300, 1000) кэВ (эквивалентные энергетические каналы детекторов LAD/BATSE). Результаты представлены в Таблице 3.2. В первой колонке указано название гамма-всплеска (год, месяц и день регистрации); во второй - название телескопа, данные которого использовались в анализе; в третьей - компонент в кривой блеска, который использовался в анализе (full означает, что исследовался гамма-всплеск в целом, 1st - исследовался первый компонент, 2nd - второй, и т.д.).

Результаты, полученные при исследовании спектральной эволюции в четырех эквивалентных каналах LAD/BATSE, не противоречат результатам, полученным при исследовании новым методом (см. Таблицы 3.1, 3.2).

Таблица 3.1. Спектрально-временная задержка гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью эксперимента SPI INTEGRAL, определенная новым методом

GRB	Телескоп	N	Комп.	1 индекс	2 индекс	Излом (кэВ)	χ^2 / dof
031203B	ISGRI	5	full ^g	0.11 ± 0.60	6.15 ± 1.87	87.1 ± 1.2	1.66 / 13
040223A	ISGRI	$>3^f$	full ^g	4.66 ± 2.60	-	-	2.82 / 10
			main ^g	6.71 ± 2.12	-	-	4.34 / 9
040323A	ISGRI	$>3^f$	full ^g	3.45 ± 0.47	-	-	1.38 / 13
040422A	ISGRI	$>8^f$	full ^g	0.32 ± 0.12	-	-	1.17 / 7
040730A	ISGRI	2	full ^g	5.11 ± 1.29	-	-	4.43 / 13
040827A	ISGRI	1	full ^p	8.51 ± 2.07	-	-	1.34 / 9

GRB	Телескоп	N	Комп.	1 индекс	2 индекс	Излом (кэВ)	χ^2 / dof
041211D	SPI	1	full ^P	0.59 ± 0.55	-	-	0.97 / 8
041212A	SPI	5 ^s	full ^g	5.78 ± 1.97	18.41 ± 3.83	194.3±1.2	1.84 / 10
041218A	ISGRI	>9 ^v	full ^g	0.21 ± 0.42	-	-	2.61 / 12
			3rd ^g	0.09 ± 0.50	-	-	2.30 / 10
050504A	ISGRI	1	full ^P	9.83 ± 2.04	-	-	3.34 / 11
050520A	ISGRI	>7 ^v	full ^g	0.10 ± 0.54	-	-	1.41 / 11
050525A	ISGRI	3	1st ^{g*}	0.37 ± 0.17	-0.36 ± 0.22	69.7±1.2	5.85 / 13
			2nd ^{P*}	-0.19 ± 0.09	-	-	1.82 / 13
050525A	SPI	3	1st ^g	0.07 ± 0.13	-	-	0.36 / 7
			2nd ^P	0.52 ± 0.17	-	-	1.06 / 7
			full ^g	0.27 ± 0.12	-	-	0.26 / 7
060221C	ISGRI	>2 ^v	full ^g	0.015 ± 0.023	-	-	0.84 / 10
060428C	ISGRI	>6 ^v	full ^{g*}	-0.34 ± 0.13	-	-	1.94 / 10
060428C	SPI	>6 ^v	full ^g	-1.04 ± 0.97	1.71 ± 0.44	61.4±1.2	1.47 / 14
060901A	ISGRI	>4 ^v	full ^{g*}	0.31 ± 0.18	-	-	2.42 / 13
060901A	SPI	>4 ^v	full ^g	0.11 ± 0.51	-	-	3.29 / 8
061025A	ISGRI	>2 ^f	full ^g	1.89 ± 0.67	-2.77 ± 2.15	78.3±1.3	1.02 / 9
061122A	SPI	>3 ^f	full ^g	0.52 ± 0.05	-	-	5.48 / 19
070311A	ISGRI	1	full ^P	6.02 ± 1.25	-	-	4.00 / 13
070707B	ISGRI	3	full ^g	-0.057 ± 0.032	-	-	1.96 / 10
070912A	SPI	2	full ^g	2.40 ± 1.32	-	-	4.53 / 6
070912A	SPI+JEM-X	2	full ^g	3.12 ± 1.11	-	-	5.54 / 7
070925C	SPI	>2 ^v	full ^g	1.63 ± 0.22	-	-	2.35 / 8
071003A	SPI	>4 ^v	full ^g	-0.20 ± 0.39	-	-	1.65 / 9
080223A	ISGRI	2	full ^g	0.60 ± 0.72	-	-	1.76 / 10
080414B	ISGRI	2	1st ^P	0.07 ± 0.18	-	-	1.26 / 12
			full ^g	0.14 ± 0.15	-	-	2.71 / 12
			2nd ^P	0.49 ± 0.16	-	-	8.67 / 13
080723B	SPI	>28 ^f	1st ^g	0.44 ± 0.07	-	-	6.58 / 20
			2nd ^g	0.40 ± 0.08	-	-	6.66 / 20
			full ^g	0.95 ± 0.24	0.11 ± 0.17	93.0±1.3	1.63 / 16
081016A	SPI	5	1st ^g	0.32 ± 0.10	-	-	1.67 / 13
			2nd ^g	0.48 ± 0.24	-	-	2.46 / 12
			full ^g	0.22 ± 0.18	-	-	2.54 / 13
081226D	ISGRI	1	full ^P	0.002 ± 0.002	-	-	3.20 / 15
090625B	ISGRI	3	full ^g	1.74 ± 0.37	-	-	2.07 / 11

GRB	Телескоп	N	Комп.	1 индекс	2 индекс	Излом (кэВ)	χ^2 / dof
* - исследование проводилось для части события вследствие отсутствия телеметрии							
f - количество выделенных и отфитированных импульсов							
v - минимальное количество импульсов, оцененное визуально							
s - выделение импульсов произведено по данным SPI-ACS							
g - анализируется несколько импульсов одновременно							
p - анализируется один импульс							

Таблица 3.2. Спектрально-временная задержка гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью эксперимента SPI INTEGRAL, между энергетическими каналами (25, 50), (50, 100), (100, 300) и (300, 1000) кэВ

GRB	Телескоп	Компонент	лаг 2-1 (сек.)	лаг 3-1 (сек.)	лаг 4-1 (сек.)
031203B	IBIS/ISGRI	full	-0.34±0.21	0.60±0.26	-
040223A	IBIS/ISGRI	full	1.64±1.43	4.31±1.93	-
		main peak	1.77±1.18	3.37±1.90	-
040323A	IBIS/ISGRI	full	1.02±0.26	2.26±0.32	-
040422A	IBIS/ISGRI	full	0.06±0.04	0.04±0.04	-
040730A	IBIS/ISGRI	full	2.31±0.65	2.86±0.89	-
040827A	IBIS/ISGRI	full	3.15±0.70	-	-
041218A	IBIS/ISGRI	3rd peak	0.29±0.22	0.79±0.33	-
041218A	IBIS/ISGRI	full	0.19±0.14	0.34±0.18	-
050502A	SPI	full	-0.23±0.64	0.86±0.47	-
050504A	IBIS/ISGRI	full	2.34±0.77	5.64±1.17	-
050520A	IBIS/ISGRI	full	-0.01±0.30	0.67±0.61	-
050525A	SPI	1st peak	0.04±0.06	0.05±0.07	-
050525A	IBIS/ISGRI	1st peak*	0.074±0.040	0.003±0.053	-
050525A	SPI	2nd peak	0.18±0.12	0.25±0.14	-
050525A	IBIS/ISGRI	2nd peak*	0.13±0.07	0.10±0.07	-
050525A	SPI	full	0.10±0.06	0.11±0.06	-
051105A	ISGRI	full	-1.84±0.79	0.32±0.74	-
060221C	IBIS/ISGRI	full	0.008±0.014	0.014±0.016	-
060306C	SPI	full	-0.01±0.09	0.14±0.43	-
060428A	SPI	full	-0.18±0.19	0.22±0.21	-

GRB	Телескоп	Компонент	лаг 2-1 (сек.)	лаг 3-1 (сек.)	лаг 4-1 (сек.)
060428C	IBIS/ISGRI	full*	-0.12±0.06	0.005±0.077	-
060901A	SPI	full	-0.22±0.30	-0.21±0.31	-
060901A	IBIS/ISGRI	full*	-0.09±0.10	0.19±0.11	-
061025A	IBIS/ISGRI	full	0.38±0.19	0.87±0.28	-
061122A	SPI	full	0.11±0.04	0.30±0.04	-
070311A	IBIS/ISGRI	full	1.22±0.77	4.02±1.18	-
070707B	IBIS/ISGRI	full	0.002±0.018	-0.05±0.02	-
070912A	SPI	full	0.84±0.71	1.33±0.80	-
070925C	SPI	full	0.25±0.35	0.78±0.41	-
071003A	SPI	full	-0.24±0.30	-0.33±0.48	-0.55±0.80
080223A	IBIS/ISGRI	full	0.19±0.31	0.14±0.60	-
080414B	IBIS/ISGRI	1st peak	0.05±0.10	0.25±0.19	-
		2nd peak	0.12±0.12	0.10±0.24	-
		full	0.08±0.06	0.17±0.15	-
080723B	SPI	1st peak	0.21±0.05	0.32±0.05	-
		2nd peak	0.22±0.07	0.27±0.06	0.30±0.09
		full	0.22±0.05	0.35±0.04	0.33±0.10
081003C	SPI	full	0.14±0.60	0.25±0.28	-1.77±1.33
081016A	SPI	full	0.07±0.11	0.16±0.2	-
		1st peak	0.06±0.05	0.08±0.06	-
		2nd peak	0.07±0.13	0.36±0.24	-
081226D	IBIS/ISGRI	full	0.006±0.019	0.015±0.019	-
090625B	IBIS/ISGRI	full	0.36±0.17	0.61±0.26	-
GRB	Телескоп	Компонент	лаг 3-2 (сек.)	лаг 4-2 (сек.)	лаг 4-3 (сек.)
041211D	SPI	full	-	-	0.59±0.48
041212A	SPI	full	2.59±0.61	7.54±0.84	-
051220A	SPI	full	0.23±0.49	0.36±0.39	-
081110C	SPI	full	-	-	-0.05±0.06

* - данные для части события отсутствуют вследствие сбоя телеметрии

3.4. Обсуждение

В работе исследована спектральная эволюция наиболее ярких гамма-всплесков, содержащихся в каталоге. Всего было исследовано 43 события. Для каждого события построена зависимость спектрально-временной задержки от энергии. Данная зависимость аппроксимировалась двумя функциями - простой логарифмической (формула 3.2) и логарифмической с изломом (формула 3.3). Выбор модели в каждом конкретном случае зависел от значений статистических критериев AIC_c и BIC [177]. Результаты обработки представлены в Таблице 3.1.

В 6 случаях из 43 зависимость спектрально-временной задержки от энергии не описывается простым логарифмическим законом (формула 3.2) - в зависимости наблюдается излом (Рис. 3.4, 3.5, 3.6). Для всех событий этой группы характерна сложная, многоимпульсная структура кривых блеска (см. Таблицу 3.1 и Рис. 2.10). Свойства отдельных импульсов (жесткость спектра, длительность, лаг) одного гамма-всплеска могут различаться [11]. Рассмотрим, например, гипотетическую ситуацию: исследуемое событие состоит из двух импульсов. Первый импульс имеет мягкий спектр и большую интенсивность в мягком энергетическом канале. Второй импульс - наоборот, имеет жесткий спектр и большую интенсивность в жестком канале. В случае двухимпульсного события кросс-корреляционная функция кривых блеска в различных энергетических каналах будет иметь три пика - один главный и два побочных. Главный, самый высокий пик соответствует ситуации, когда оба импульса в кривых блеска накладываются друг на друга, т.е. главный пик показывает истинное значение относительного смещения по времени (задержки) профилей кривых блеска. Побочные пики связаны с наложением первого импульса первой кривой блеска на второй импульс второй кривой блеска и с наложением второго импульса первой кривой блеска на первый импульс второй кривой блеска. Высота пиков в кросс-корреляционной функции зависит от относительной интенсивности импульсов

в кривой блеска. Поэтому, если мы подвергнем кросс-корреляционному анализу наш гипотетический двухимпульсный гамма-всплеск, то в кросс-корреляционной функции мы обнаружим лишь один побочный пик - пик, соответствующий наложению первого, мягкого импульса в кривой блеска в мягком энергетическом канале со вторым, жестким импульсом в кривой блеска в жестком канале. В результате мы получим ложное, **отрицательное значение** спектрально-временной задержки, которое не отражает реальную картину спектральной эволюции. Истинное же значение спектрально-временной задержки получить в данном случае невозможно. **Поэтому при исследовании многоимпульсных событий вид зависимости задержки от энергии может усложняться, что может приводить к появлению изломов, а также к отрицательной задержке.**

Например, гамма-всплеск GRB080723 состоит из 7 отдельных компонентов, между которыми уровень сигнала падает до фонового значения (Рис. 2.10). Причем каждый из компонентов в свою очередь состоит из нескольких импульсов, сильно перекрывающихся друг с другом. При исследовании гамма-всплеска GRB080723 целиком, в зависимости лаг - энергия наблюдается значимый излом. Зависимость лаг - энергия, построенная для отдельных компонентов, также имеет сложную форму. К сожалению, отдельные компоненты невозможно исследовать индивидуально вследствие сильного наложения импульсов в них друг на друга.

Короткий гамма-всплеск GRB070707 состоит из трех импульсов (Рис. 3.7), причем спектр первого импульса - самый мягкий, а последнего - самый жесткий. Вспомним модель гипотетического гамма-всплеска, описанную ранее. Исходя из наших рассуждений, при исследовании события такого типа мы должны получить ложную отрицательную спектрально-временную задержку, что и подтверждается при анализе гамма-всплеска GRB070707 (см. Таблицу 3.1 и Рис. 3.7) - мы получили отрицательное значение индекса задержки со значимостью 2σ . От-

рицательное значение спектрально-временной задержки было также получено при исследовании традиционным методом (задержка между первым и третьим каналами, Таблица 3.2).

Нами обнаружено, что зависимость спектрально-временной задержки от энергии хорошо аппроксимируется простым логарифмическим законом для событий, состоящих из одного импульса. В случае многоимпульсных событий зависимость задержки от энергии может усложняться, что может привести к появлению излома в зависимости (напр., GRB031203) и даже к отрицательному значению индекса задержки (GRB070707).

Для 8 событий, состоящих из одного импульса (таблица 3.1) обнаружена корреляция между индексом задержки и длительностью импульса (Рис. 3.8). В качестве параметра длительности используется значение τ_2 , т.е. постоянная времени задней части импульса (см. формулу 3.1 и, напр., [9]). Зависимость имеет степенной вид с показателем 1.07 ± 0.10 . Корреляция между спектрально-временной задержкой и длительностью импульса была обнаружена ранее при исследовании спектральной эволюции гамма-всплесков другим методом анализа с использованием данных эксперимента BATSE [11]. В работе [11] в качестве параметра лага использовалось расстояние между максимумами импульсов в кривых блеска 3 и 1 каналов эксперимента BATSE.

В выборке событий с одним импульсом присутствует короткий гамма-всплеск GRB081226, который также следует зависимости, построенной для длинных всплесков. Кроме того, ложатся на ту же зависимость и отдельные импульсы двухимпульсного гамма-всплеска GRB080414. На основе полученных результатов **можно сделать предположение о том, что механизм излучения импульсов коротких и длинных гамма-всплесков один и тот же.**

Если гамма-всплеск состоит из нескольких импульсов, то при исследовании его в целом, значение индекса задержки не будет коррелировать с длительностью всплеска, поскольку индекс задержки не является аддитивной величиной

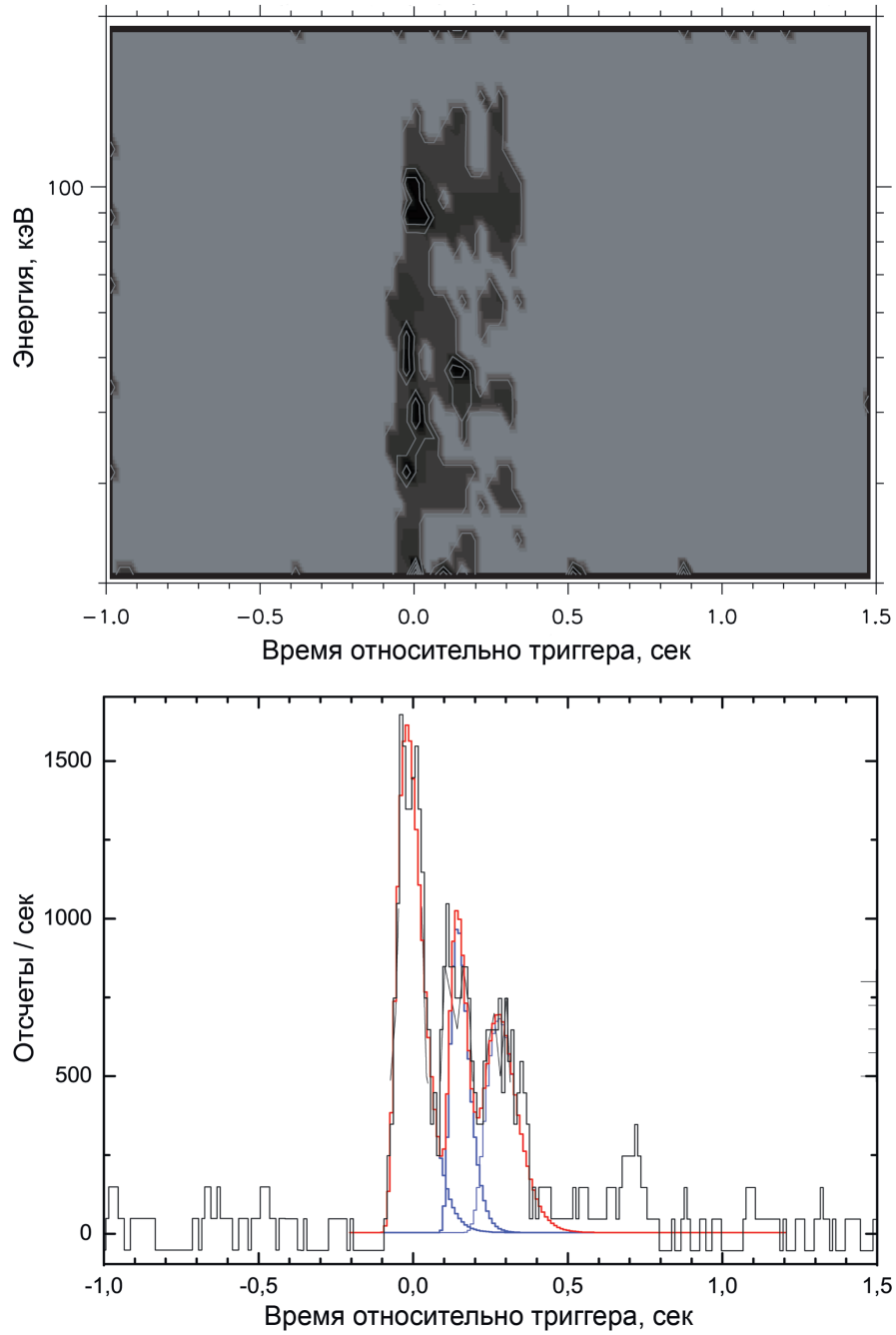


Рис. 3.7. Гамма-всплеск GRB070707B. На верхней картинке - спектрально-временная диаграмма, построенная по данным SPI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - энергия фотонов в кэВ. Яркость цвета на картинке обратно пропорциональна количеству зарегистрированных отсчетов в соответствующей области: чем темнее область, тем больше количество отсчетов в ней. На нижней картинке - кривая блеска в энергетическом диапазоне (20, 200) кэВ, построенная по данным IBIS/ISGRI. По горизонтальной оси - время относительно триггера в секундах. По вертикальной оси - количество отсчетов за секунду в бине кривой блеска. Гладкой кривой показана аппроксимация кривой блеска суммой экспоненциальных импульсов (формула 3.1).

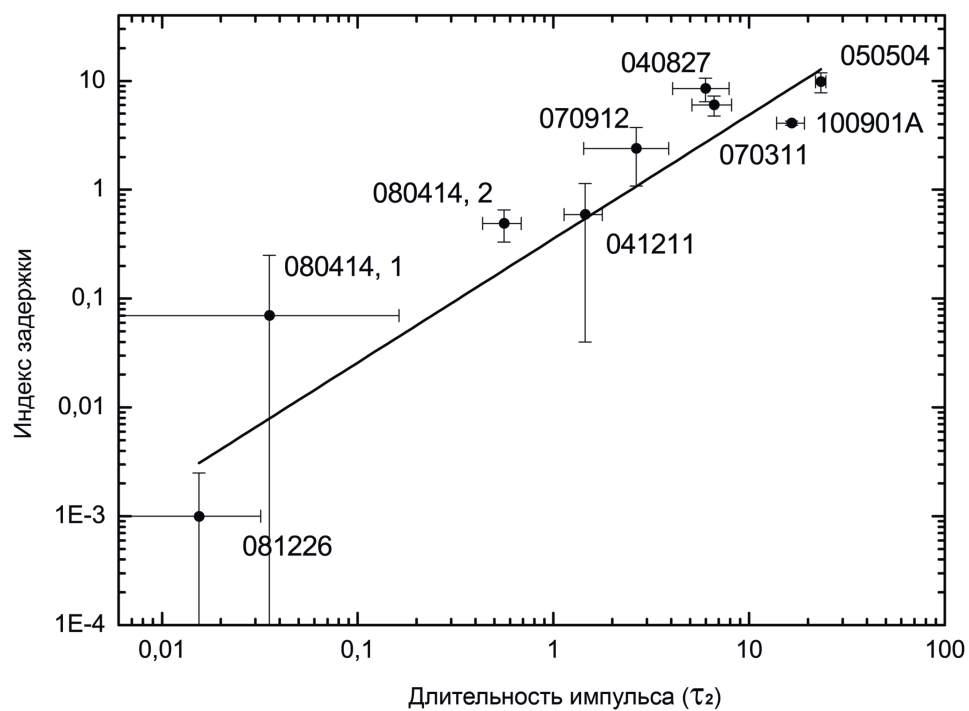


Рис. 3.8. Зависимость индекса задержки от длительности импульса. По горизонтальной оси - длительность импульса в единицах параметра τ_2 . По вертикальной оси - индекс задержки. Для каждой точки указано, какому гамма-всплеску она соответствует. Прямой линией показана аппроксимация данной зависимости степенной функцией с показателем степени 1.07 ± 0.10 .

в отличие от длительности. Поэтому зависимость длительности импульса от спектрально-временной задержки можно использовать для выявления гамма-всплесков со сложной, многоимпульсной кривой блеска в том случае, когда отдельные импульсы значительно перекрываются, и в кривой блеска выделяется лишь огибающая кривая.

3.5. Выводы главы

Обнаружено, что для гамма-всплесков, а также частей гамма-всплесков, состоящих из одного импульса, зависимость величины спектральной задержки от энергии описывается логарифмическим законом 3.2.

Введен новый параметр, характеризующий спектральную эволюцию гамма-всплесков, - индекс задержки A (формула 3.2).

Обнаружена корреляция между индексом задержки и длительностью импульса, причем зависимость одинакова для коротких и длинных гамма-всплесков, что может говорить о едином механизме излучения. Однако для подтверждения последнего предположения требуется исследование большего числа коротких всплесков.

Отрицательное значение индекса задержки для событий, состоящих из одного импульса, не обнаружено. Отрицательное значение может быть связано с различием в свойствах отдельных импульсов многоимпульсных событий.

Глава 4

Индивидуальные исследования гамма-всплесков по данным различных экспериментов

4.1. Гамма-всплеск GRB070912

Космический гамма-всплеск GRB070912 был обнаружен в данных эксперимента SPI INTEGRAL (см. главу 2) и зарегистрирован в поле зрения телескопов SPI, IBIS/ISGRI и JEM-X 12 сентября 2007 г. в $07^{\text{h}}32^{\text{m}}19^{\text{s}}$ (UT). Всплеск является одним из самых близких к направлению на галактический центр (менее 1.6° от источника Sgr A*) хорошо локализованных событий за всю историю наблюдения всплесков. Он не был своевременно выявлен системой раннего обнаружения гамма-всплесков IBAS, поэтому информация о его координатах не распространялась и поиска оптического и мягкого рентгеновского послесвечения не проводилось. Интегральный по времени поток энергии в диапазоне (3, 200) кэВ составил 2.8×10^{-6} эрг см^{-2} , максимальный поток 1.8×10^{-7} эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (1.9 фот $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$). Всплеск также наблюдался в эксперименте KONUS/WIND в фоновом режиме, хотя и не был включен в список зарегистрированных всплесков. GRB070912 входит в небольшое число событий, для которых удалось получить широкополосный (3 кэВ - 8 МэВ) спектр рентгеновского и гамма-излучения и проследить его эволюцию от первых мгновений до полного затухания. В первые секунды после начала всплеска его спектр имел степенной вид с фотонным индексом 0.8, но отличался заметным дефицитом фотонов на энергиях ниже 20 кэВ. Такой исходный дефицит (задержка в появлении) рентгеновских фотонов может быть объяснен их „высокоширотным“ происхождением относительно луча зрения. Спектр быстро смягчался и на затухающей стадии хорошо описывался чернотельным (или виновским) законом, что позволяет оценить расстояние

(красное смещение) до источника всплеска.

4.1.1. Введение

За девять лет работы на орбите в поле зрения основных телескопов обсерватории INTEGRAL были зарегистрированы ~ 80 космических гамма-всплесков. Большинство из них были выявлены и оперативно (на масштабе 30–200 с) локализованы с помощью автоматической системы IBAS [71], что позволило быстро переориентировать рентгеновские и оптические телескопы в направлении источников всплесков и во многих случаях обнаружить их послесвечение (см. [108, 178] и постоянно обновляемый каталог зарегистрированных всплесков на сайте <http://ibas.iasf-milano.inaf.it>).

В системе IBAS используются данные жесткого рентгеновского детектора ISGRI гамма-телескопа IBIS. Менее 10% зарегистрированных всплесков попали также в поле зрения рентгеновского монитора JEM-X обсерватории INTEGRAL, более узкое, чем поле зрения телескопа IBIS. Лишь для 3 всплесков, GRB040812, GRB050626 и GRB051105B, монитор JEM-X смог дать представляющие интерес результаты [108], что связано с падением потока излучения всплесков в рентгеновском диапазоне и меньшей эффективной площадью монитора JEM-X по сравнению с площадью детектора IBIS/ISGRI. Из-за меньшей эффективной площади детекторов лишь $\sim 50\%$ всплесков, выявленных системой IBAS, были также зарегистрированы гамма-спектрометром SPI обсерватории INTEGRAL. Очевидно, что система IBAS также имеет предел чувствительности и может регистрировать далеко не все гамма-всплески, даже если они попали в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI. Неожиданным оказалось обнаружение в архивных данных обсерватории INTEGRAL гамма-всплеска GRB060428C [179], показавшее, что отдельные мощные всплески, оказавшиеся в поле зрения основных телескопов обсерватории, также могут оставаться незарегистрированными системой

IBAS.

В данной главе сообщается об обнаружении в архивных данных обсерватории INTEGRAL еще одного гамма-всплеска, пропущенного системой IBAS. Этот всплеск, GRB070912, был зарегистрирован 12 сентября 2007 г. в $07^{\text{h}}32^{\text{m}}19^{\text{s}}$ (UT) гамма-телескопом IBIS/ISGRI и гамма-спектрометром SPI. Всплеск продолжался более 60 с, интегральный поток в диапазоне (20, 200) кэВ составил 2.3×10^{-6} эрг см⁻². Всплеск попал в поле зрения рентгеновского монитора JEM-X и был им обнаружен на пределе чувствительности. Анализ показал, что этот всплеск наблюдался также в эксперименте KONUS/WIND в фоновом режиме.

Интересен всплеск GRB070912 не только тем, что оказался пропущенным системой IBAS. Во-первых, он попал в поле зрения всех трех основных телескопов обсерватории INTEGRAL, поэтому для него удалось исследовать широкополосный спектр (3 кэВ - 8 МэВ) рентгеновского и гамма-излучения и проследить его эволюцию от первых мгновений до полного затухания. Во-вторых, этот всплеск оказался одним из двух самых близких к направлению на центр Галактики (менее 1.6°) из всех когда-либо наблюдававшихся гамма-всплесков. В-третьих, он оказался всплеском с относительно большим запаздыванием рентгеновского излучения относительно жесткого рентгеновского и гамма-излучения и одним из самых ярких всплесков из событий с запаздыванием, обнаруженных обсерваторией INTEGRAL.

Результаты подробного временного и спектрального анализа данных наблюдений всплеска GRB070912 обсерваторией INTEGRAL и их сравнение с результатами, полученными спутником WIND (эксперимент KONUS), представлены ниже.

4.1.2. Обработка данных

В настоящей работе используются данные, полученные детектором ISGRI [180] гамма-телескопа IBIS [121], гамма-спектрометром SPI [122], рентгеновским монитором JEM-X [181], размещенных на обсерватории INTEGRAL, и гамма-спектрометром KONUS [182]. Описание экспериментов IBIS/ISGRI, SPI можно найти в разделах 2.1, 1.2, и на Рис. 1.2). Здесь рассмотрим основные характеристики инструментов JEM-X и KONUS.

Монитор JEM-X чувствителен в стандартном рентгеновском диапазоне (3, 35) кэВ. Поле зрения диаметром 13.2° (диаметр области полного кодирования 4.8°) ограничено коллиматором. Хорошее угловое разрешение 3.35° (FWHM) позволяет проводить более точную локализацию ярких источников по сравнению с телескопом IBIS. В качестве детектора используется газовая камера с площадью входного окна 490 см^2 и энергетическим разрешением $\Delta E/E \sim 16\%$ (FWHM) на 6 кэВ. Эффективная площадь для источников в центре поля зрения равна лишь $\sim 75 \text{ см}^2$, т.к. более 80% детектора затеняется непрозрачными элементами маски и стенками коллиматора.

Гамма-спектрометр KONUS работает на борту спутника WIND с ноября 1994 г. В его составе два сцинтилляционных детектора NaI(Tl) диаметром 130 и высотой 75 мм. Спутник стабилизирован вращением вокруг оси, перпендикулярной плоскости эклиптики, и входные окна детекторов S1 и S2 направлены на южный и северный полюс эклиптики соответственно, что обеспечивает обзор всей небесной сферы, хотя и с разной эффективностью. В фоновом режиме детекторы измеряют скорости счета с разрешением 2.9 с в энергетических диапазонах (24, 92), (92, 370) и (370, 1400) кэВ. При обнаружении всплеска вырабатывается триггерный сигнал, запускающий всплесковый режим, при котором для события регистрируются временные истории высокого разрешения и многоканальные энергетические спектры. В случае GRB070912 триггерная ячейка

не сработала, поэтому имеются лишь ограниченные данные фонового режима.

Анализ данных телескопа IBIS/ISGRI был выполнен с помощью процедур, разработанных для него в ИКИ РАН (см., например, [183, 184]). Данные телескопов JEM-X и SPI обрабатывались с помощью стандартного пакета процедур для научного анализа данных обсерватории ИНТЕГРАЛ (OSA). При построении широкополосных спектров нормировка данных монитора JEM-X относительно данных телескопа IBIS/ISGRI полагалась равной 1, относительная нормировка данных спектрометра SPI вначале определялась вместе с другими параметрами модели (диапазоны SPI и IBIS/ISGRI частично перекрываются), а затем была зафиксирована на полученном значении. Спектральный анализ был проведен с помощью пакета процедур NASA/HEASARC/XSPEC [185].

4.1.3. Результаты

Всплеск GRB070912 был впервые обнаружен в архивных данных гамма-спектрометра SPI в процессе подготовки каталога зарегистрированных в его поле зрения коротких (0.01 - 10 с) транзиентных событий (Глава 2). Анализ таких событий проводился для выявления гамма-всплесков, не вошедших в список системы IBAS, и являлся естественным продолжением проведенного в Главе 1 исследования событий, зарегистрированных защитой прибора SPI (ACS). Результаты этого исследования позволяли предположить существование в данных SPI достаточно большого числа коротких гамма-всплесков, имеющих более жесткий чем у длинных всплесков спектр, а потому остающихся незамеченными чувствительной к фотонам с $h\nu \lesssim 200$ кэВ системой IBAS. Всплеск GRB070912 к подобным событиям, конечно, не относится. После его открытия в данных SPI он был обнаружен в данных других приборов обсерватории и прежде всего - в данных IBIS/ISGRI.

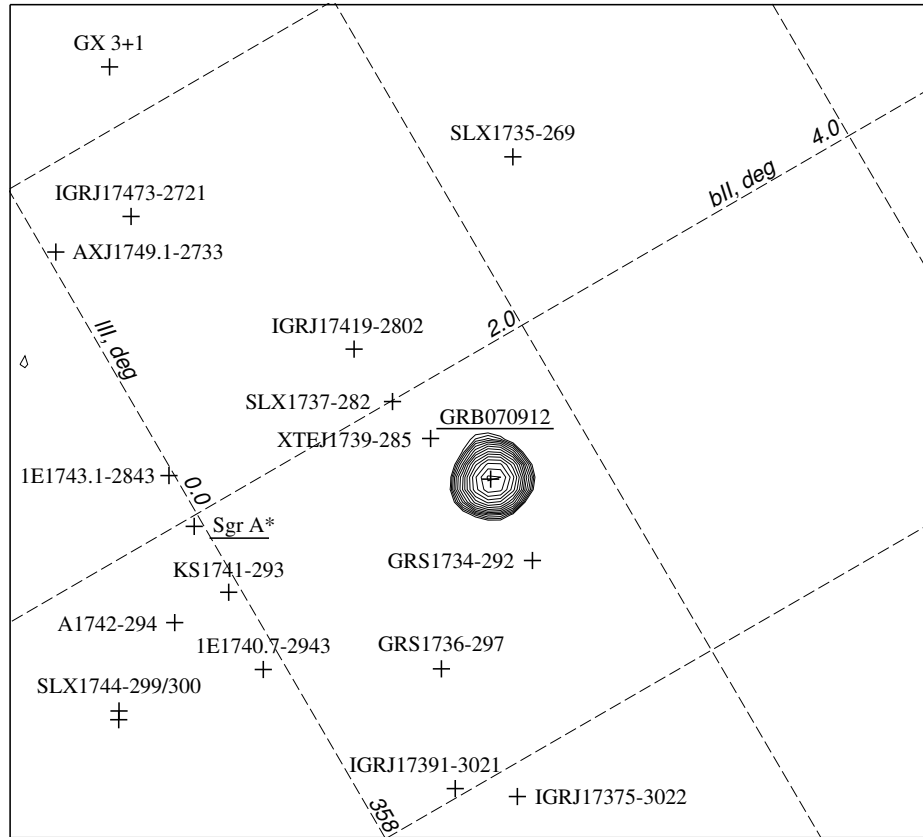


Рис. 4.1. Изображение участка неба размером $5^0 \times 5^0$ в поле зрения телескопа IBIS/ISGRI, полученное во время гамма-всплеска GRB070912 (диапазон энергий (20, 60) кэВ, экспозиция 65 с). Контурами на рисунке показаны области достоверной регистрации источников на уровне отношения сигнала к шуму $S/N = 4.0, 5.2, 6.7, 8.6, 11.1, 24.0$. Показано положение известных рентгеновских источников в этом поле, в том числе - источника Sgr A* (ядра Галактики).

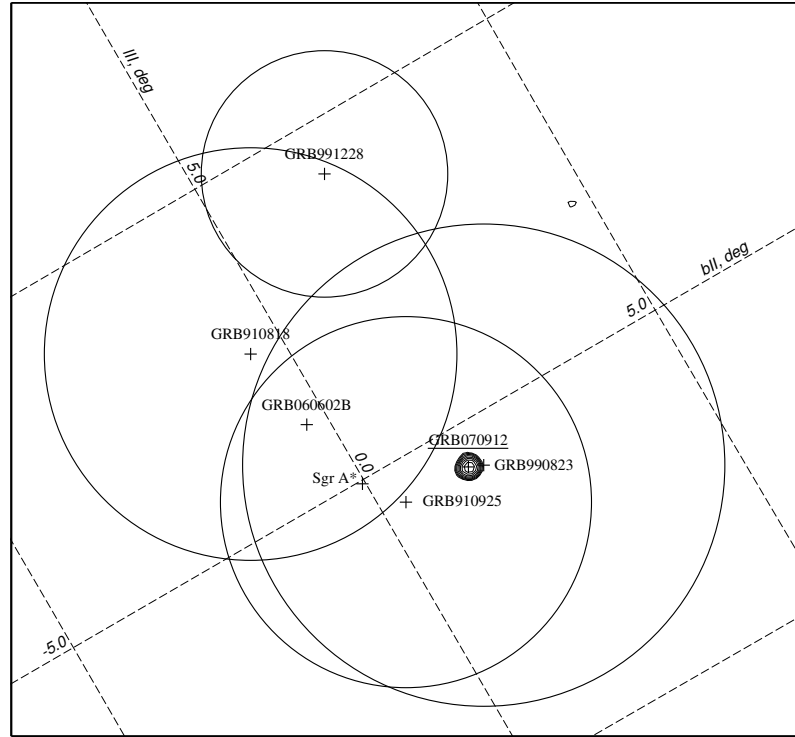


Рис. 4.2. То же, что на Рис. 4.1, но большего размера $14^\circ \times 14^\circ$. Нанесены положения и области локализации гамма-всплесков, когда-либо зарегистрированных из этой области неба.

Локализация

На Рис. 4.1 приведено изображение (карта отношения сигнала к шуму S/N), полученное телескопом IBIS/ISGRI в диапазоне (20, 60) кэВ за все время всплеска (~ 65 с). Хотя в этой области неба находятся многие известные источники жесткого рентгеновского и гамма-излучения, ни один из них за столь короткий интервал времени на значимом уровне зарегистрирован не был. Величина отношения сигнала к шуму для GRB070912 составила $S/N \simeq 24.6$. Положение источника всплеска, R.A. = $17^{\text{h}}38^{\text{m}}28^{\text{s}}$, Decl. = $-28^\circ42'36''$ (J2000), определено телескопом IBIS с точностью лучше $2'$ (галактические координаты источника $l = 359^\circ37'$, $b = 1^\circ46'$, что соответствует расстоянию $1^\circ58'$ от направления на центр Галактики - источник Sgr A*).

Анализ показал, что за всю историю наблюдения гамма-всплесков лишь один всплеск, GRB060602B, зарегистрированный телескопом BAT обсервато-

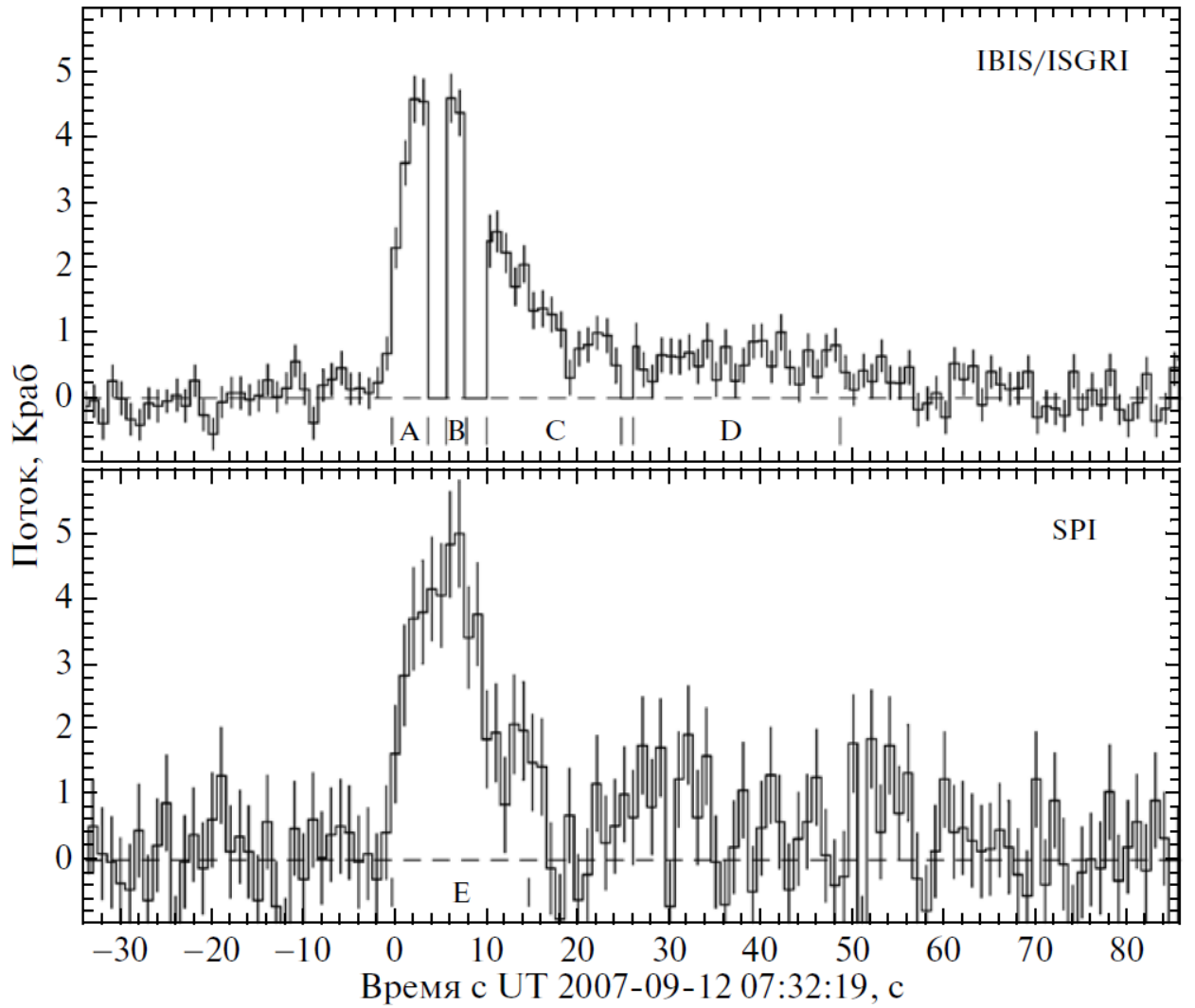


Рис. 4.3. Временной профиль всплеска GRB070912, полученный телескопами IBIS/ISGRI и SPI в диапазоне энергий (20, 200) кэВ. По оси X отложено время в секундах от 07^h32^m19^s (UT), шаг по времени равен 1 с. Отмечены интервалы времени A, B, C, D и E, использовавшиеся при анализе эволюции спектра.

рии SWIFT и локализованный телескопом XRT обсерватории с точностью $3''3$, наблюдался столь же близко от центра Галактики. Положение этого всплеска, а также положения (и соответствующие области локализации) других близких всплесков, GRB030320 [186], GRB910818, GRB910925, GRB990823 и GRB981228 [187] приведены на Рис. 4.2. Последние четыре всплеска были зарегистрированы в эксперименте BATSE обсерватории CGRO и локализованы с большой неопределенностью: статистический радиус области локализации $\sim 2^\circ$, систематический радиус $1^\circ7$. Поэтому, хотя всплески GRB910925 и GRB990823 формально расположены близко к источнику Sgr A*, уверенно говорить о них, как о всплесках из направления на центр Галактики, нельзя. По этой же причине, хотя GRB070912 попадает в область локализации этих двух всплесков, а от GRB990823 его отделяют всего несколько минут, оснований для реального обсуждения рекуррентного источника всплесков нет. При существующей статистике всплесков, зарегистрированных за всю историю их наблюдений ($\sim 5 \times 10^3$ всплесков), в любой круг на небе радиусом $(2.0^2 + 1.7^2)^{1/2} \simeq 2.6$ в среднем попадают $\simeq 4$ всплеска, что согласуется с числом всплесков, наблюдавшихся из данной области.

Временной профиль

На Рис. 4.3 приведен профиль всплеска, измеренный телескопами IBIS/IS-GRI и SPI в широком диапазоне энергий (20, 200) кэВ с временным разрешением 1 с. Каждая точка в верхней части рисунка получена прямым восстановлением изображения неба в поле зрения телескопа IBIS с вычитанием фона и последующим измерением потока от источника всплеска. Значение потока скорректировано на „мертвое“ время детектора и падение чувствительности телескопа к краю поля зрения. Провалы в интервалах 4-6, 8-10 и 25-27 с связаны с переполнением телеметрического буфера прибора. Кривая блеска по данным

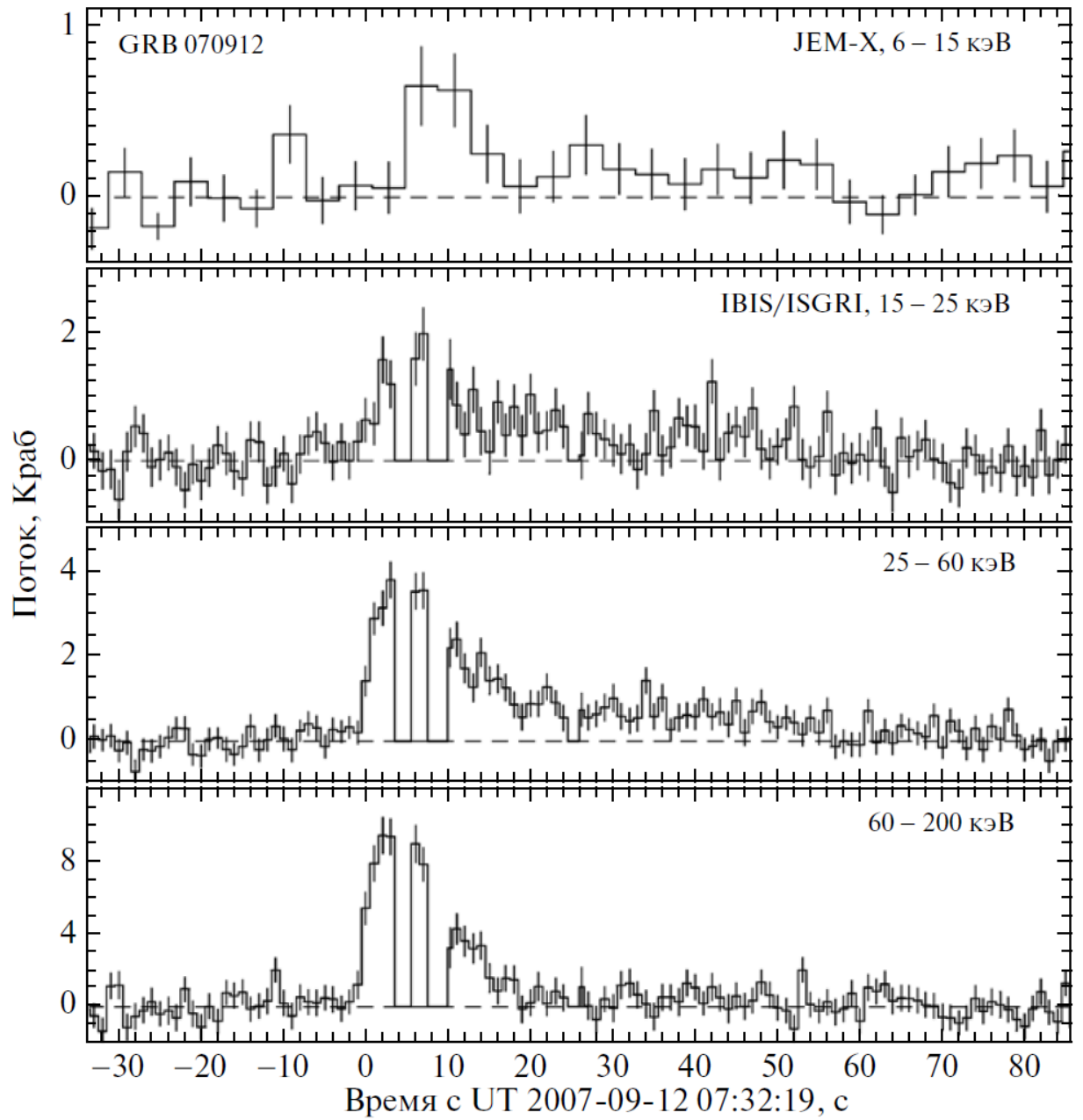


Рис. 4.4. Сравнение временных профилей всплеска GRB070912 в разных диапазонах энергий. Данные телескопов JEM-X и IBIS/ISGRI. По оси X отложено время в секундах от $07^{\text{h}}32^{\text{m}}19^{\text{s}}$ (UT), шаг по времени на верхнем рисунке равен 4 с, на нижних - 1 с.

спектрометра SPI получена по записи скорости счета событий его Ge детекторами (после вычитания фоновой скорости счета и необходимых коррекций). Эта кривая блеска измерена с большими статистическими ошибками, чем кривая по данным телескопа IBIS, с другой стороны - в ней нет провалов из-за переполнения телеметрии. Данные SPI показывают, что кривая блеска всплеска GRB070912 не содержит выбросов или провалов в те интервалы времени, для которых данные телескопа IBIS отсутствуют, кривая блеска остается плавной и меняется медленно. Небольшое различие профилей, полученных телескопом IBIS и гамма-спектрометром SPI, связано с разной зависимостью чувствительности от энергии в этих экспериментах.

Поиск увеличения скорости счета в BGO защите спектрометра SPI (ACS) оказался безрезультатным - на момент всплеска превышения сигнала над фоном на уровне $> 2\sigma$ найдено не было. Это легко объяснимо, так как геометрическая площадь ACS минимальна для угла 3.7° между нормалью к плоскости детектора и направлением на источник всплеска GRB070912.

Как видно из рисунка, всплеск начался в $T_0=07^h32^m19^s$ (UT). Он отличался достаточно гладким профилем, состоящим из единственного пика, имеющего в первом приближении форму FRED („быстрый подъем - экспоненциальный спад“). Максимум потока в диапазоне (20, 200) кэВ, $(1.66 \pm 0.09) \times 10^{-7}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (или ~ 1.26 фот $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$), был достигнут уже через ~ 3 с. Затем в течение ~ 60 с наблюдалось уменьшение потока до нулевого уровня. Длительность всплеска на уровне потока 10% от максимального $T_{90} = 59 \pm 3$ с была определена по профилю, полученному телескопом IBIS/ISGRI, с восстановленными с помощью данных спектрометра SPI участками в местах переполнения телеметрии путем нормировки профиля SPI к профилю IBIS/ISGRI в интервалах времени, для которых есть данные обоих приборов.

Временные профили всплеска, полученные прибором IBIS/ISGRI в диапазонах энергий (15, 25), (25, 60) и (60, 200) кэВ, и телескопом JEM-X в диапазоне

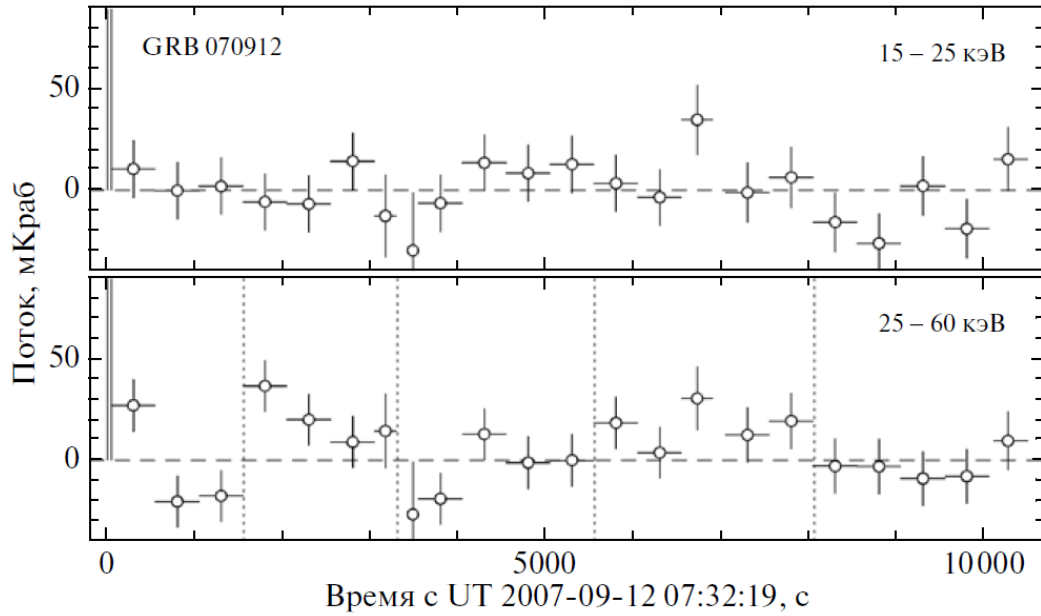


Рис. 4.5. Кривая блеска источника всплеска GRB070912 в двух диапазонах энергий после окончания основного события (показано вертикальными сплошными линиями). Данные телескопа IBIS/ISGRI. По оси X отложено время в секундах от $07^{\text{h}}32^{\text{m}}19^{\text{s}}$ (UT), шаг по времени равен 500 с.

(6, 15) кэВ, приведены на Рис. 4.4. Видно, что в мягких (рентгеновских) диапазонах максимум потока излучения наблюдался позже, чем в жестких. В то же время жесткое ($\gtrsim 60$ кэВ) излучение быстро затухло и уже через ~ 20 с после начала всплеска значимо не регистрировалось. В более мягких диапазонах (6-15 и 15-25 кэВ) поток упав до уровня $\sim 25\%$ от максимального оставался, почти неизменным до ~ 55 с после начала всплеска.

На Рис. 4.5 приведена кривая блеска источника всплеска после окончания основного события (до ~ 10000 с с момента T_0), позволяющая проверить наличие продленного излучения всплеска. Кривая приведена с разрешением 500 с в двух диапазонах энергий (15, 25) и (25, 60) кэВ. В интервалах (1500, 3300) с и (5500, 8000) с (отмечены на рисунке вертикальными пунктирными линиями) в диапазоне (25, 60) кэВ действительно наблюдается превышение потока над уровнем фона, но статистическая достоверность его не велика: 3.0σ и 2.7σ , соответственно. В диапазоне (15, 25) кэВ заметного превышения зарегистрировано

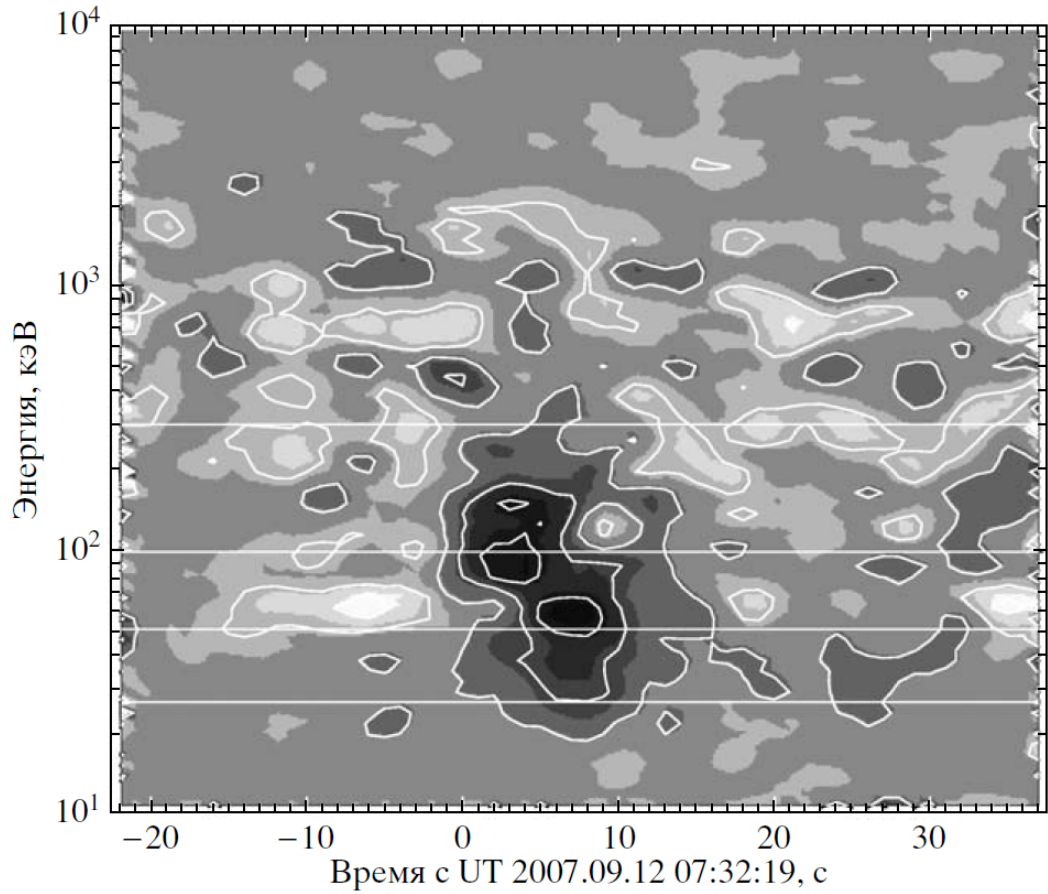


Рис. 4.6. Спектрально-временная карта всплеска GRB070912, построенная по данным спектрометра SPI. Градациями серого отмечены уровни потока (отсчеты в секунду) в логарифмически расположенных энергетических каналах. Границы энергетических каналов, используемых при вычислении спектральной задержки в Таблице 4.1, отмечены горизонтальными линиями.

не было. Можно предположить, что в этих интервалах времени наблюдалась продленная активность центрального источника гамма-всплеска, а не начало послесвечения [37]. Ранее продленное излучение до ~ 1000 с было обнаружено у всплеска GRB 920723 [188, 189] и еще нескольких всплесков [190] телескопом SIGMA обсерватории ГРАНАТ и у группы длинных гамма-всплесков эксперимента BATSE [29].

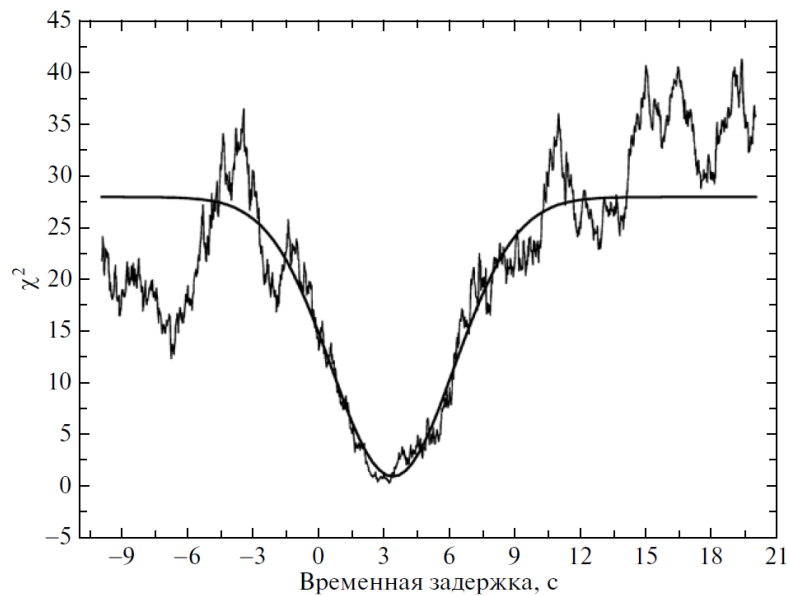


Рис. 4.7. Распределение величины функционала χ^2 в зависимости от задержки между профилями кривых блеска экспериментов SPI (20, 30) кэВ и JEM-X (6, 15) кэВ. По оси X отложены значения задержки в секундах, по оси Y - значение χ^2 . Показана также аппроксимация зависимости гауссианой. Центр гауссианы определяет значение задержки.

Спектрально-временная задержка

Для проверки реальности запаздывания рентгеновского излучения всплеска относительно его более жесткого излучения и определения величины задержки был проведен кросс-корреляционный анализ временного профиля всплеска в разных диапазонах энергий. Использовались данные телескопов SPI и JEM-X, в которых нет телеметрических провалов. Результаты анализа профилей, полученных телескопом SPI в диапазонах (20, 50), (50, 100) и (100, 300) кэВ и телескопом JEM-X в диапазоне (6, 15) кэВ, приведены в Таблице 4.1. Они подтверждают впечатление, остающееся от просмотра Рис. 4.4, о том, что мягкое излучение всплеска появляется позже жесткого.

Временное разрешение профиля всплеска, полученного телескопом JEM-X, составляет 4 с, что намного хуже, чем у профилей, полученных SPI. Задержка между этими профилями определялась путем построения тестового профиля SPI, сдвинутого относительно исходного на разные интервалы времени (с шагом

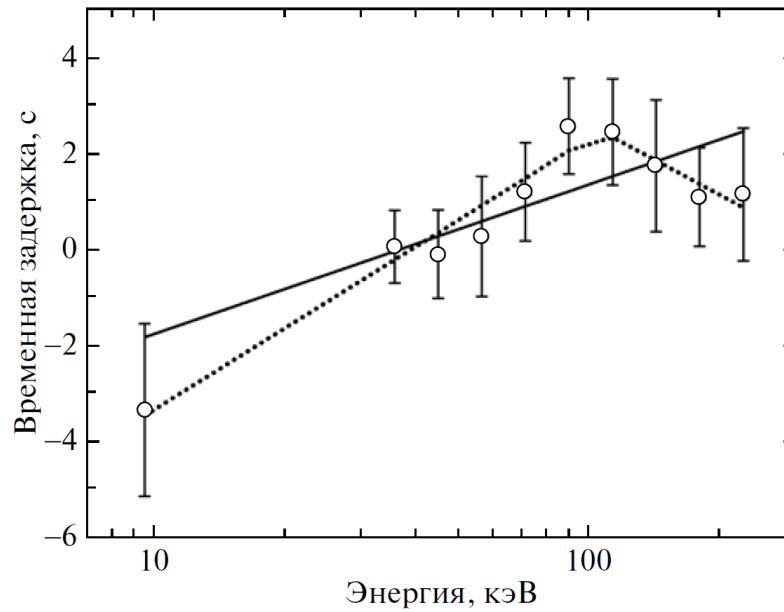


Рис. 4.8. Временная задержка профиля всплеска GRB070912 в зависимости от энергетического диапазона (по данным SPI и JEM-X). Приведены аппроксимация зависимости задержки τ логарифмическим законом $\tau \sim A \log(E)$, где $A = 3.12 \pm 1.11$ (сплошная кривая) и законом с изломом (штриховая кривая, см. текст) $A = 5.66 \pm 1.83$

0.1 с), в последующем перегруппированного в тестовый профиль с 4-с бинами. Затем проводилась минимизация величины χ^2 для разницы между тестовым профилем и реальным профилем JEM-X (Рис. 4.7). Статистическая ошибка была определена при моделировании профиля методом Монте-Карло, как описано в работе [178].

Разбив рабочий диапазон гамма-спектрометра SPI на узкие каналы, мы вычислили относительно них временную задержку профиля в самом мягком („опорном“) канале (20, 30) кэВ. Полученная таким образом зависимость задержки от энергии показана на Рис. 4.8. Приведена также точка, соответствующая задержке профиля, полученного телескопом JEM-X, относительно „опорного“ канала. Увеличение задержки с ростом энергии означает, что излучение в мягких энергетических каналах запаздывает относительно излучения в жестких каналах. Для аппроксимации полученных зависимостей использовались две модели: 1) логарифмический закон $\tau \sim A \log(E)$ и 2) дважды логарифмиче-

ский закон. В последнем случае на энергиях ниже E_0 выполнялось соотношение $\tau \sim A \log(E)$, а выше $\tau \sim B \log(E)$, где $A \neq B$ (подробнее см. главу 3). Большая часть зависимости на Рис. 4.8 хорошо ($\chi^2 \simeq 5.5$ при семи степенях свободы) описывается простым логарифмическим законом (с $A = 3.12 \pm 1.11$) вплоть до диапазона JEM-X, что предполагает единый механизм излучения на энергиях от 6 до 100 кэВ [191]. Дважды логарифмический закон ($A = 5.7 \pm 1.8$, $B = -4.9 \pm 5.2$, $E_0 = 104.7 \pm 1.3$) улучшает аппроксимацию ($\chi^2 \simeq 1.1$ при пяти степенях свободы), хотя необходимость этого статистически не вполне оправдана.

Диапазоны кэВ	Временная шкала (с)	τ_{lag}^a (с)
6–15 / 20–30	4.0	3.3 ± 1.8^b
25–50 / 50–100	0.3	0.84 ± 0.71
25–50 / 100–300	0.3	1.33 ± 0.80
25–100 / 100–300	0.3	0.35 ± 0.68

^a Положительное значение соответствует эволюции спектра от жесткого к мягкому.

^b Ошибки 1σ .

Таблица 4.1. Спектрально-временная задержка профиля GRB070912 в разных диапазонах энергий (по данным SPI и JEM-X). Для исследования задержки использовался интервал $(-10, 20)$ с относительно T_0

Увидеть всю сложность процесса изменения жесткости спектра излучения во время всплеска можно из Рис. 4.6, на котором приведена спектрально-временная карта всплеска (см., например, [111]), построенная по данным телескопа SPI. Видно, что положение максимума потока смещается со временем от жестких энергий к более мягким. Естественно, изменение жесткости излучения всплеска отражает его спектральную эволюцию и может быть понято из анализа спектров.

Спектр излучения

Рис. 4.9 показывает широкополосный спектр излучения, измеренный телескопами JEM-X, IBIS/ISGRI и SPI в течение первых 15 с всплеска (во временном интервале „Е“, см. Рис. 4.3). Данные SPI позволяют проследить спектр излучения вплоть до ~ 1 МэВ, хотя на энергиях ниже ~ 120 кэВ данные IBIS/ISGRI имеют меньшую статистическую ошибку. Результаты аппроксимации спектра в диапазоне (3, 1000) кэВ разными моделями: степенным законом с фотонным индексом α (PL), степенным законом с экспоненциальным завалом, определяемым энергией E_0 , (CPL) и двухстепенной моделью Бэнда [157] с гладким изломом (BM) приведены в Таблице 4.2. Модели CPL и BM для лучших значений параметров показаны на рисунке сплошной и штриховой (длинные штрихи) линиями. Для модели Бэнда отдельно короткими штрихами показан случай с показателем степени на высоких энергиях, зафиксированным на значении $\beta = -2$. Для модели PL пунктирной линией показан результат аппроксимации данных в диапазоне ниже 100 кэВ (в таблице приведены соответствующие параметры). Во всех моделях было учтено межзвездное поглощение в Галактике на луче зрения по направлению на источник всплеска GRB070912, которое согласно [192] характеризуется величиной $N_H \simeq 7 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Отметим, что для моделей CPL и BM легко найти максимум энергетического спектра (спектра в единицах $E^2 dN/dE$), положение которого определяет пиковую энергию всплеска $E_p = (2 - \alpha)E_0 \simeq 168 \pm 15$ и 175 ± 8 кэВ, соответственно.

Из Таблицы 4.2 видно, что модель PL не позволяет удовлетворительно аппроксимировать широкополосный интегральный (0, 15) с спектр всплеска. Модели CPL и BM делают это значительно лучше, хотя и в этих случаях значение $\chi^2(N)$, нормированное на степень свободы N , заметно превышает единицу. Причина плохой аппроксимации заключается в сложной форме самого спектра (Рис. 4.9), содержащего особенности (или изломы), которые невозмож-

Модель	E_0 , кэВ	α^a	β^a	F_X^b , 10^{-8} эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$	$\chi^2(N)^c$
PL		1.40 ± 0.03		19.04 ± 0.3	4.06 (45)
PL d		0.85 ± 0.04		7.29 ± 0.3^d	1.23 (22)
CPL	101 ± 9	0.33 ± 0.02		18.42 ± 1.2	1.21 (43)
BM	109 ± 5	0.39 ± 0.04	9.3 ± 0.6	18.80 ± 1.1	1.21 (43)
BM e	79 ± 5	0.20 ± 0.05	2	18.60 ± 1.3	1.50 (44)

a Фотонный индекс на низких α и высоких β энергиях.

b Поток в диапазоне (3, 400) кэВ.

c Значение χ^2 наилучшей аппроксимации, нормированное на число степеней свободы N).

d Фит и поток в диапазоне (3, 100) кэВ.

e При фиксированном значении β .

Таблица 4.2. Результаты аппроксимации широкополосного (3, 1000) кэВ спектра излучения, измеренного телескопами JEM-X, IBIS/ISGRI и SPI в течение первых 15 с всплеска GRB070912.

но описать сколько-нибудь плавными функциями. Включение в модель CPL гауссовой линии поглощения (функция `gabs` в XSPEC) с центральной энергией $E_a \simeq 90.8 \pm 2.9$ кэВ и шириной $\text{FWHM} \simeq 8.1 \pm 3.6$ кэВ приводит к улучшению значения $\chi^2(N)$ до 0.97. Данная особенность в поглощении присутствует как в данных прибора IBIS/ISGRI, так и прибора SPI. Подобные особенности наблюдались ранее и у других гамма-всплесков (например, [193]) и были предметом оживленной дискуссии. Прежде чем пытаться связать найденную особенность с линией циклотронного поглощения, интересно посмотреть как эволюционировал спектр излучения всплеска в течение этих 15 или даже всех 65 с его длительности.

Такая эволюция показана на Рис. 4.10. Спектры А, В, С и D получены телескопами JEM-X ($h\nu < 18$ кэВ) и IBIS/ISGRI ($h\nu > 18$ кэВ) на разных

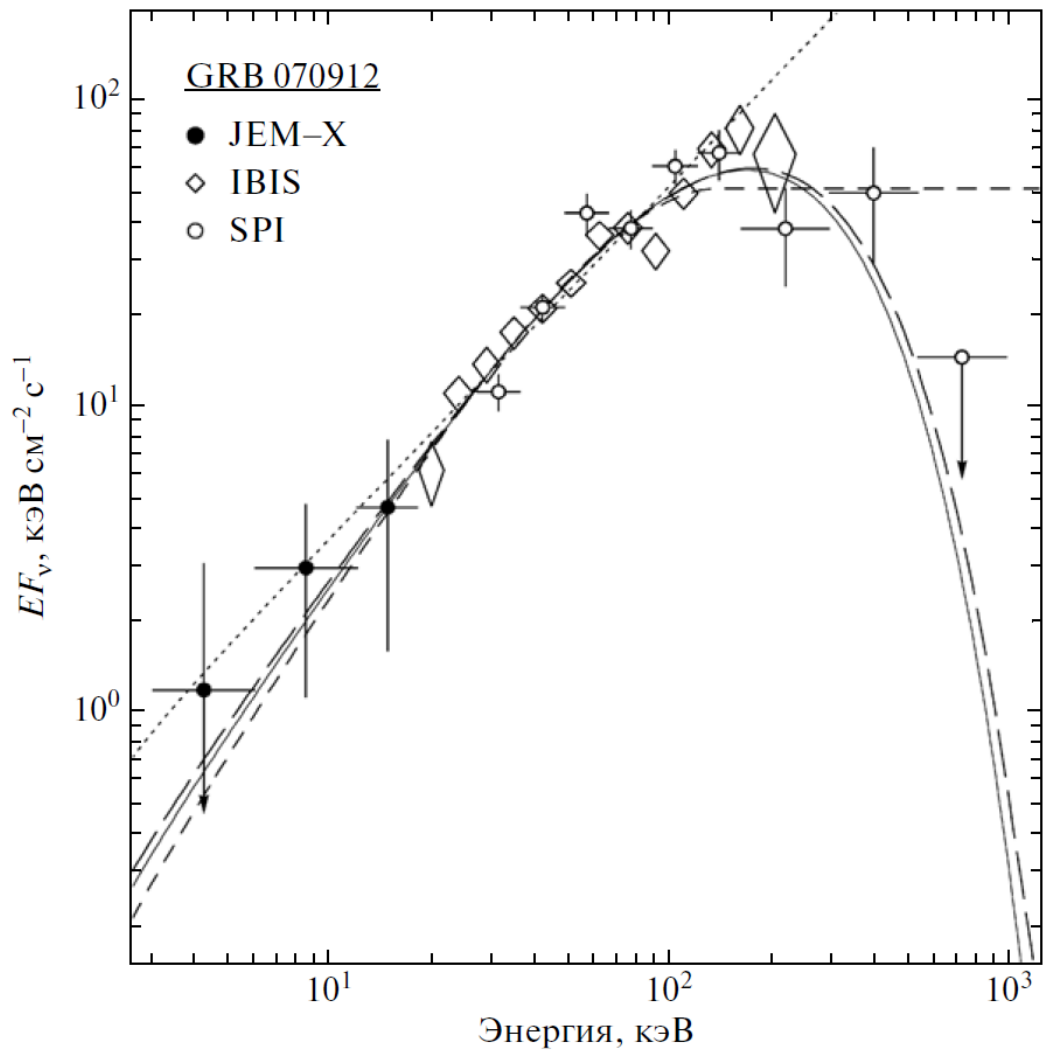


Рис. 4.9. Широкополосный спектр излучения GRB070912, полученный по данным приборов JEM-X, IBIS/ISGR1 и SPI обсерватории INTEGRAL в первые 15 с всплеска (в течение интервала времени E , указанного на нижней панели Рис. 4.3).

этапах развития всплеска (соответствующие этим этапам интервалы времени указаны на Рис. 4.3). Штриховыми линиями показан результат их наилучшей аппроксимации моделью CPL. Параметры аппроксимации даны в Таблице ??, в этой же таблице приведены результаты аппроксимации спектров моделями PL и BM. Видно, что вначале очень жесткий степенной спектр без признаков завала на высоких энергиях, но с явным дефицитом фотонов в области ниже 20 кэВ, трансформируется в характерный тепловой спектр с быстро падающей температурой (энергией, характеризующей экспоненциальный завал в жесткой области). Видно, что дефицит фотонов в рентгеновском диапазоне исчез через несколько секунд после начала всплеска, и далее рентгеновский спектр казался естественным продолжением спектра в более жестком диапазоне. Такое поведение спектра приводило к уже обсужденной выше задержке профиля всплеска в рентгеновском (6, 20) кэВ диапазоне по сравнению с профилем в гамма-диапазоне.

Отметим, что мгновенные спектры излучения в целом являются плавными и не содержат особенности на энергиях (60, 100) кэВ, столь явно выраженной в интегральном спектре всплеска. Очевидно, что сама эта особенность появляется вследствие усреднения по времени такого быстро эволюционирующего спектра излучения: на энергиях $h\nu \lesssim 100$ кэВ спектральный поток меняется медленно, приблизительно сохраняя форму, а в области $h\nu \gtrsim 100$ кэВ он быстро падает. В этой области излучение было мощным лишь первые несколько секунд, поэтому при усреднении по времени спектр на этих энергиях просто проседает, также сохраняя начальную форму. В усредненном спектре появляется своеобразная „ступенька“ или особенность.

Особого внимания заслуживает спектр D, соответствующий заключительному этапу развития основного события. Он не просто самый мягкий из спектров, представленных на Рис. 4.10. Как видно из Таблицы ??, при аппроксимации моделью CPL фотонный индекс оказался равным $\alpha = -1.82 \pm 0.03$,

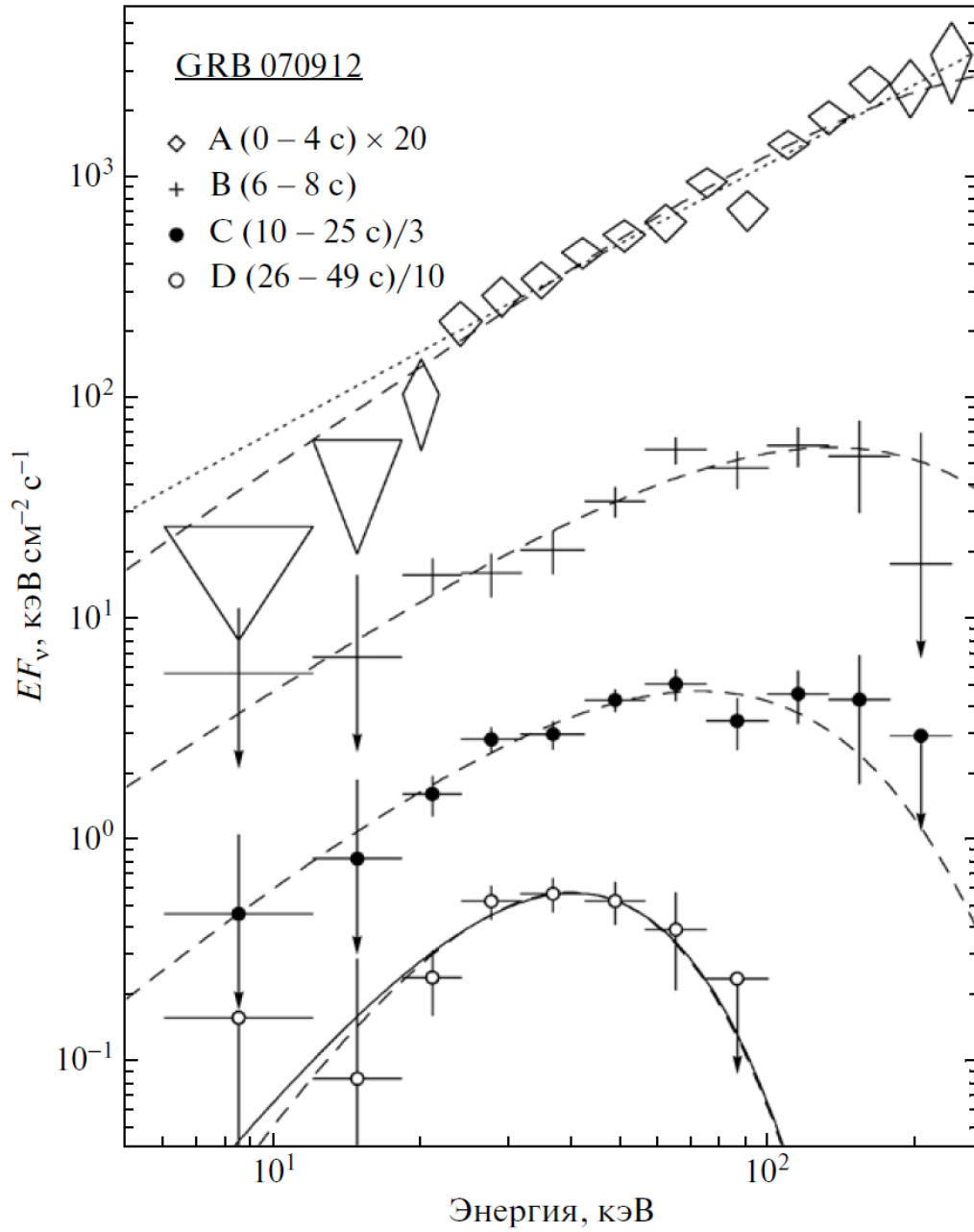


Рис. 4.10. Эволюция спектра излучения GRB070912 по данным прибора IBIS/ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ (спектры А, В, С и D получены в течение интервалов времени, указанных на верхней панели Рис. 4.3). Для удобства восприятия спектры А, С и В смещены вверх или вниз умножением потока на 20, 1/3 и 1/10.

максимально приближая эту модель к закону Вина $N_E \sim E^2 \exp(-E/kT)$ - виду спектра, который принимает излучение, формирующееся в оптически толстой горячей среде, в которой доминирует комптоновское рассеяние на электронах. Результат прямой аппроксимации спектра D законом Вина (WM), а также спектром чернотельного излучения (BB) представлены в таблице, соответствующий спектр BB показан на Рис. 4.10 сплошной линией. Отметим, что оптически толстая модель гамма-всплесков естественно возникает при рассмотрении релятивистского разлета плазмы с множественным рождением электрон-позитронов при взрыве большой мощности в малом объеме [22], нетепловые спектры всплесков, наблюдаемые на начальном этапе их развития, формируются путем комбинации тепловых (чернотельных) при релятивистском движении [194–197].

Результаты эксперимента KONUS/WIND

Всплеск GRB070912 не был автоматически зарегистрирован в эксперименте KONUS/WIND. Углы падения его излучения на детекторы S1 и S2: $84^\circ.5$ и $85^\circ.5$, были крайне неудачными - лишь небольшая доля фотонов попадала через входное окно в детектор S1. В указанных условиях всплеск оказался недостаточно сильным для срабатывания триггерной ячейки. Пиковая скорость счета в диапазоне (24, 92) кэВ детектора S1 составила 87 ± 12 отсч/с за вычетом фона (превышение $\sim 7\sigma$, при необходимых для запуска всплескового режима $\sim 9\sigma$). Полученные в фоновом режиме кривые блеска всплеска приведены на Рис. 4.11. Шкала времени здесь поправлена на время распространения фронта излучения между спутниками WIND и INTEGRAL, составлявшее 1.032 с. Интегральный по интервалу времени $T_0 + 2 < T < T_0 + 82$ с и пиковый потоки в разных энергетических диапазонах представлены в Таблице 4.4.

По соотношению скоростей счета в трех диапазонах можно оценить спектральные параметры падающего излучения для двух простейших моделей, опи-

Этап	Модель	E_0/kT , кэВ	α^a	$F_S,^b$	$F_H,^c$	$\chi^2(N)^d$
				$10^{-8} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$		
A	PL		0.79 ± 0.01	0.88 ± 0.05	16.82 ± 0.90	1.01 (33)
	CPL	235 ± 29	0.43 ± 0.03	0.60 ± 0.07	17.25 ± 1.89	0.91 (32)
	BM	231 ± 28	0.42 ± 0.08	0.61 ± 0.07	17.23 ± 1.94	0.92 (32)
B	PL		1.22 ± 0.02	2.21 ± 0.15	15.73 ± 1.09	1.08 (33)
	CPL	89 ± 21	0.49 ± 0.05	1.14 ± 0.17	15.06 ± 2.23	0.99 (32)
	BM	97 ± 10	0.55 ± 0.09	1.24 ± 0.19	15.16 ± 2.34	0.99 (32)
C	PL		1.48 ± 0.02	1.16 ± 0.07	4.63 ± 0.29	0.99 (33)
	CPL	39.8 ± 5.6	0.17 ± 0.05	0.43 ± 0.03	3.83 ± 0.23	0.61 (32)
	BM	46.7 ± 0.6	0.41 ± 0.11	0.53 ± 0.03	4.32 ± 0.26	0.66 (32)
D	PL		1.69 ± 0.03	0.77 ± 0.08	1.89 ± 0.20	1.33 (22)
	CP	10.5 ± 1.4	-1.82 ± 0.03	0.15 ± 0.01	1.08 ± 0.11	0.92 (21)
	BM	51.2 ± 2.2	0.97 ± 0.11	0.53 ± 0.05	1.75 ± 0.18	1.20 (21)
	WM	10.0 ± 0.3		0.13 ± 0.03	1.07 ± 0.21	0.87 (22)
	BB	10.3 ± 1.0		0.16 ± 0.02	1.09 ± 0.11	0.87 (22)

^a Фотонный индекс.

^b Поток излучения в диапазоне (3, 18) кэВ.

^c Поток в диапазоне (18, 200) кэВ.

^d Значение χ^2 наилучшей аппроксимации, нормированное на число степеней свободы N

Таблица 4.3. Результаты аппроксимации спектра излучения, измеренного телескопами JEM-X и IBIS на разных этапах развития всплеска GRB070912.

сывающих интегральный спектр GRB070912. В частности, для степенного закона (PL) фотонный индекс $\alpha = 1.47 \pm 0.17$, что близко к величине, полученной по данным телескопа IBIS/ISGRI (Таблица 4.2, правда, для более короткого временного интервала), для степенного закона с экспоненциальным завалом в жесткой области (CPL) $\alpha = 0.5 \pm 0.6$, энергия завала $E_0 = (380 \pm 167)$ кэВ, что также не противоречит измерению IBIS/ISGRI. Интегральный поток в диапазоне энергий (20, 1400) кэВ составляет $(6.9 \pm 1.0) \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$.

Диапазон, кэВ	Интегральный поток ^a , отсч.	Пиковый поток, отсч./с
(24, 92)	660±280	62±19
(92, 370)	1180±140	87±12
(370, 1400)	220±130	19±9

^a В интервале $T_0 + 2 < T < T_0 + 82$ с

Таблица 4.4. Наблюдения всплеска GRB070912 в эксперименте KONUS/WIND.

4.1.4. Обсуждение

Хотя событие GRB 070912 во многом напоминает типичный длинный гамма-всплеск, некоторые его свойства необычны и должны быть упомянуты.

1). Событие GRB070912 было зарегистрировано близко к направлению на галактический центр ($l = 359.4$, $b = 1.5$), а потому могло быть вовсе и не гамма-всплеском. Это событие могло бы быть гигантской вспышкой от ранее неизвестного источника повторных мягких гамма-всплесков (SGR), аналогичной вспышке 27 декабря 2004 г. от SGR1806-20, - известно, что галактические SGR концентрируются к плоскости Галактики. Если бы источник GRB070912 находился на расстоянии ~ 10 кпк, энерговыделение во вспышке в диапазоне

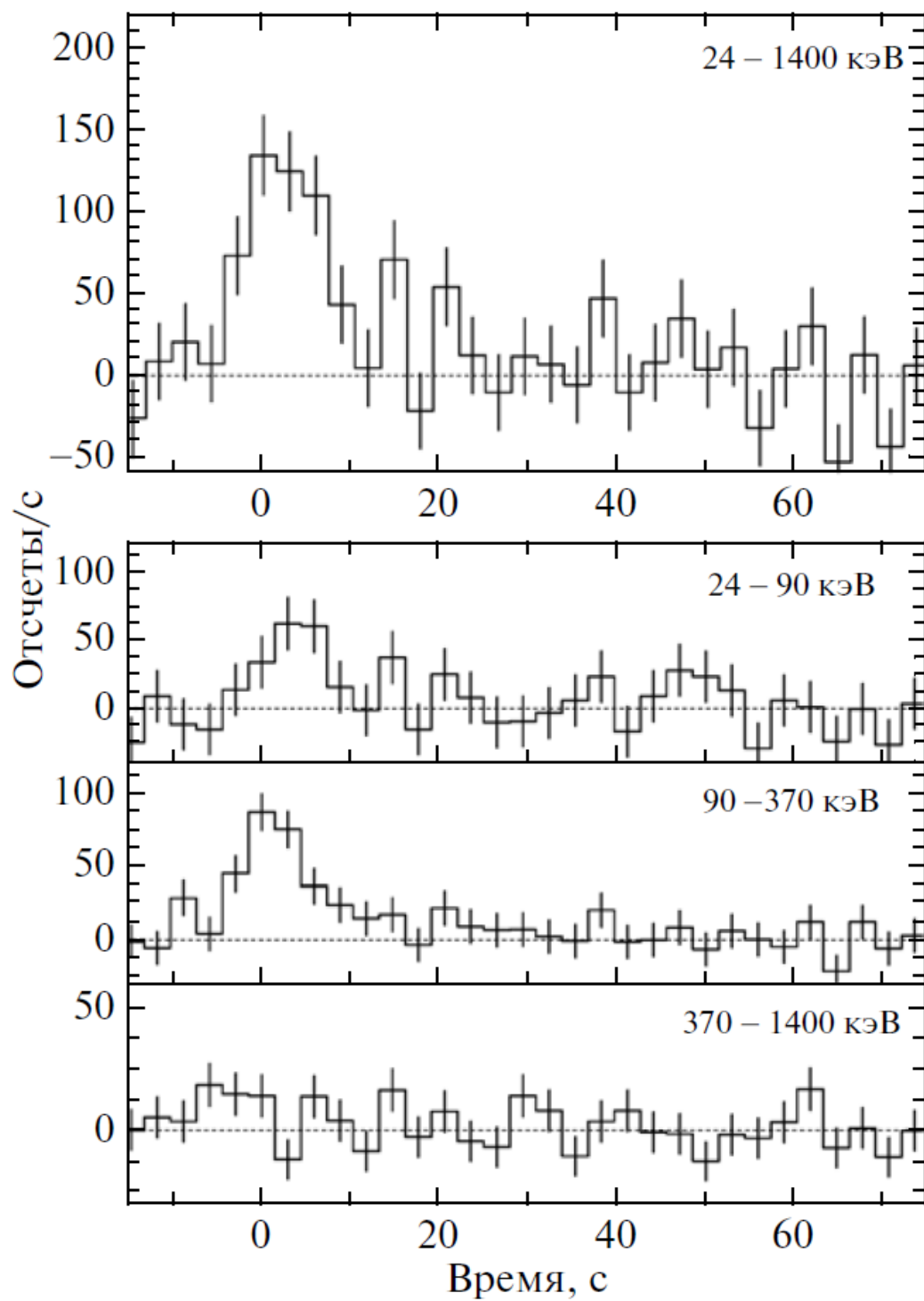


Рис. 4.11. Скорость счета прибора KONUS/WIND во время всплеска GRB070912. По оси X отложено время в секундах от $07^{\text{h}}32^{\text{m}}23^{\text{s}}$ (UT), шаг по времени равен 2.944 с. Фоновая скорость счета не вычтена.

(3, 200) кэВ составило бы 3×10^{40} эрг, что сравнимо с энергосвечением во время гигантских вспышек известных SGR.

Однако, ряд свойств не позволяют считать GRB070912 событием от SGR. Во-первых, во временном профиле GRB070912 нет периодических пульсаций, характерных для SGR (с периодами в диапазоне 1-10 с). Поиск пульсаций, проведенный по данным детектора IBIS/ISGRI в энергетическом диапазоне (20, 200) кэВ, не дал положительных результатов.

Во-вторых, известно, что во время гигантских вспышек SGR не наблюдается существенной спектрально-временной задержки. В то же время у GRB070912 она обнаружена, а это более типично для длинных гамма-всплесков.

В-третьих, события от SGR вообще не дают заметного вклада в выборку гамма-всплесков, зарегистрированных обсерваторией INTEGRAL. На Рис. 4.12 приведены интегральные (кумулятивные) частоты регистрации гамма-всплесков обсерваторией внутри радиуса 15° от галактического центра (12 всплесков) и в остальной части неба (69 всплесков), скорректированные на экспозиции, приходящиеся на соответствующие области неба в интервале времени с 10 февраля 2003 по 19 января 2011 гг., а именно, ~ 27.6 Мс и ~ 184.1 Мс. Видно, что кривые совпадают как по нормировке, так и по форме, что позволяет исключить существенную примесь событий от SGR в выборке гамма-всплесков из этой области. Отметим, что наклон аналогичной кривой для всплесков от SGR1806-20 и SGR1900+14 составляет $\sim -5/2$ [198, 199], в то время как наклон кривых на Рис. 4.12 приблизительно равен -1.0 . Приведенные аргументы, конечно, не исключают возможности, что именно в данном случае имело место событие от SGR, они лишь понижают такую вероятность.

2). Учитывая, что прибором BATSE было зарегистрировано несколько гамма-всплесков из области галактического центра, интересно сравнить реальную чувствительность регистрации гамма-всплесков в экспериментах IBIS/ISGRI и BATSE. Прямое сравнение не совсем корректно, поскольку используемые детекторы

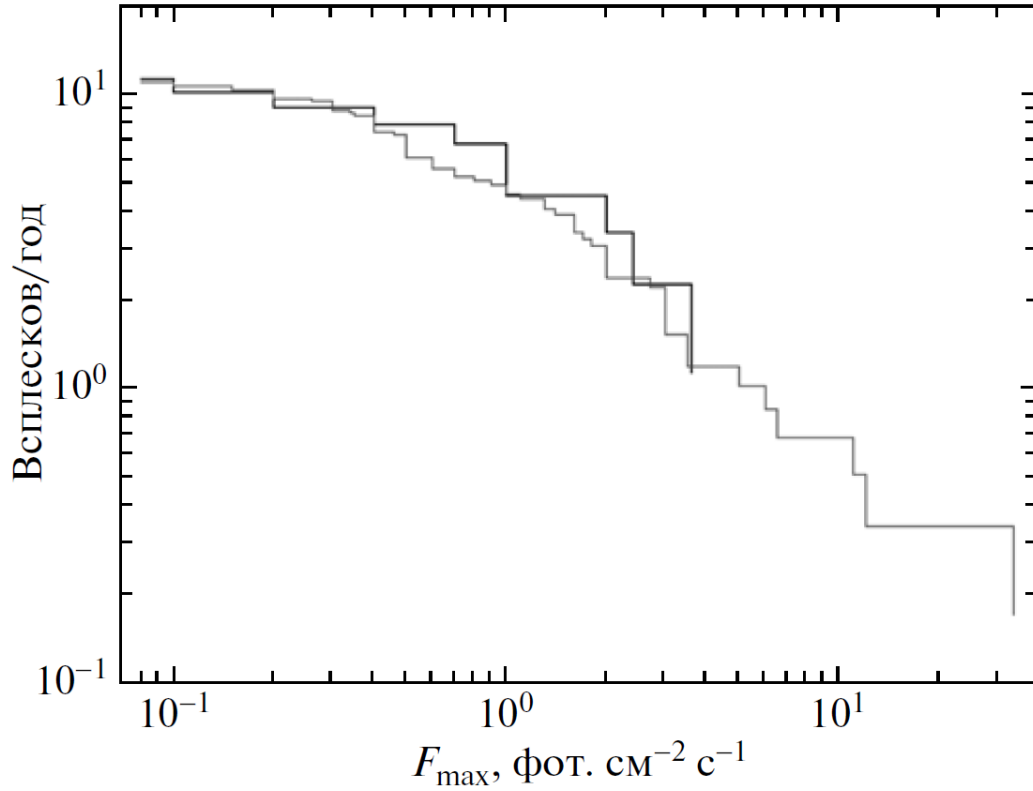


Рис. 4.12. Интегральное распределение частоты всплесков в зависимости от пикового потока по данным прибора IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. Использованы данные о всплесках из каталога [108] и данные опубликованных циркуляров сети GCN до января 2011 г. включительно. Жирная кривая - гамма-всплески из области радиусом 15° вблизи галактического центра, тонкая - всплески из остальной части неба. Кривые нормированы на время экспозиции соответствующих областей.

имеют разные временные и энергетические диапазоны обнаружения всплесков (BATSE (50, 300) кэВ). Однако, можно сравнить частоту регистрации всплесков в одной той же площадке. За 9 лет работы BATSE из области радиусом 15° вокруг галактического центра было зарегистрировано 52 гамма-всплеска, что при перенормировке дает 5.7 и 13.7 всплесков в год для BATSE и IBIS/ISGRI, соответственно. При наклоне ~ -1.0 кривой интегральной частоты регистрации всплесков (см. Рис. 4.12) отношение порогов чувствительности составляет $5.7/13.7 = 0.4$.

3). Одним из интересных феноменологических соотношений для гамма-

всплесков является диаграмма Амати (Рис. 4.13) - зависимость эквивалентной изотропной энергии, излученной в гамма-диапазоне, $E_{iso}(z)$ от параметра $E_p(1+z)$ в системе отсчета источника [102, 200]. Длинные всплески хорошо подчиняются данному закону. Тогда можно оценить красное смещение z гамма-всплеска GRB070912, предположив, что он попадает на эту диаграмму (см., например, [201]). Используя оценки интегрального потока и значения $E_p(1+z)$ полученные ранее, построим траекторию GRB070912 на диаграмме (см. Рис. 4.13). Оценка показывает, что источник GRB070912 никак не может быть ближе, чем $z = 1.0$. В этом случае мы также можем дать оценку снизу на $E_{iso} > 2 \cdot 10^{52}$ эрг.

4). Еще одна предполагаемая феноменологическая зависимость - зависимость эквивалентной пиковой светимости от значения спектральной задержки в системе отсчета источника [161]. При $L_{iso}(z > 1) > 1.2 \cdot 10^{52}$ эрг s^{-1} и $\tau_{lag}(z > 1) < 1.1$ с положение GRB070912 данной зависимости не противоречит (см., например, рис. 2 из работы [165]).

5). Излучение гамма-всплесков в начальной фазе активности, как правило, характеризуется спектрами нетеплового вида (см., например, [202]). В большинстве случаев такие спектры в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах описываются двухстепенной моделью, предложенной Бэндом [157]. Крайне редко удается синхронно зарегистрировать спектр в широком диапазоне энергий, включающем стандартный рентгеновский диапазон. Исключая чисто рентгеновские наблюдения отдельных всплесков мониторами всего неба, такие спектры удалось получить лишь для несколько длинных ($T_{90} > 100 - 150$ с) гамма-всплесков, зарегистрированных в поле зрения рентгеновского телескопа XRT обсерватории SWIFT во время продолжения активной фазы всплеска (в первые секунды рентгеновских наблюдений, как правило, не было). К таким всплескам относятся, например, GRB100901A и GRB110205A. Случай GRB070912 - один из очень немногих, когда удалось зарегистрировать излучение в диапазоне (3, 20) кэВ в самом начале всплеска.

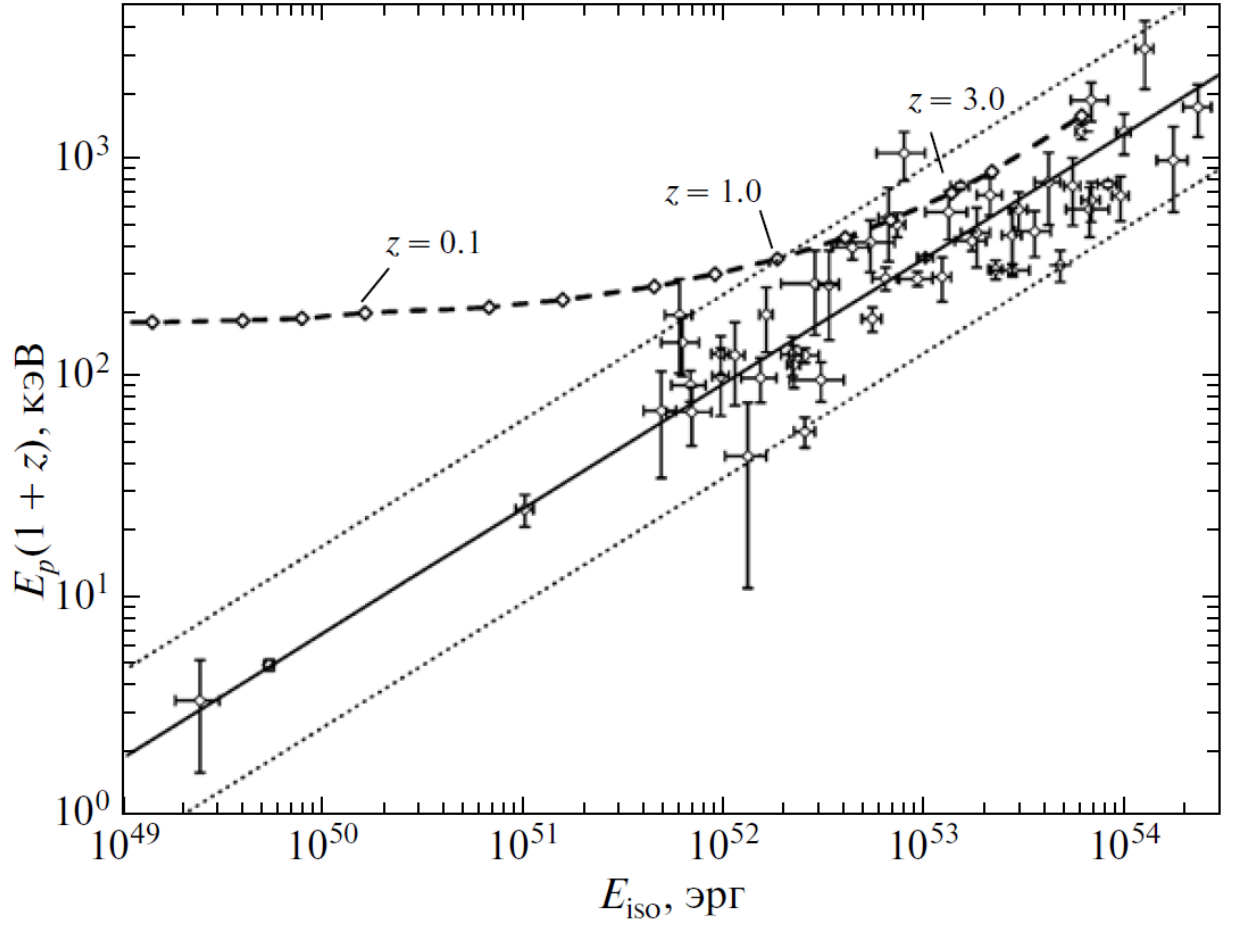


Рис. 4.13. Диаграмма Аматти - зависимость эквивалентной изотропной энергии, излученной в гамма-диапазоне, E_{iso} от параметра $E_p(1+z)$ в системе отсчета источника [102]. Нанесена траектория GRB070912 как функция предполагаемого красного смещения z . Диаграмма позволяет оценить минимально возможное красное смещение $z_{min} \gtrsim 1.0$, удовлетворяющее положению GRB070912 на диаграмме.

Спектр А этого всплеска, полученный в первые 4 с (Рис. 4.10), имеет нетепловой вид и характеризуется отсутствием излучения в мягком спектральном диапазоне, точнее - содержит низкочастотный завал на энергиях ниже ~ 20 кэВ. Таким образом, спектр содержит два характерных излома: в низкоэнергетичной ($\lesssim 20$ кэВ) и высокоэнергетичной ($\gtrsim 200$ кэВ) частях спектра. Такие спектры ранее регистрировались крайне редко, можно отметить лишь гамма-всплески GRB080928 [203] и GRB110205A [204].

6). Нетепловые спектры могут быть следствием синхротронного излучения и/или комптоновского рассеяния вперед тепловых фотонов поля на релятивистских электронах. Например, в модели внутренних ударных волн [205], где доминирует синхротронное излучение, возможно получение спектров с двумя особенностями, аналогичных наблюдавшимся нами в спектре А всплеска GRB070912.

Отметим однако, что плавная эволюция спектра излучения GRB070912 с постепенным переходом от почти степенного вида (спектр А) к чернотельному или виновскому (через 30–50 с, спектр D) удивительно хорошо совпадает с предсказаниями модели теплового фотосферного излучения релятивистски разлетающегося огненного шара [22, 196, 197, 206, 207]. Согласно этой модели начальный спектр всплеска формируется в результате комбинации чернотельных спектров разных участков фотосферы, движущихся с релятивистскими скоростями под разными углами к лучу зрения и имеющих разные видимые температуры [195, 197]. Более поздние спектры могут формироваться уже после выключения центрального источника энергии всплеска - как задержанное излучение, приходящее из областей фотосферы, видимых под „достаточно большими“ ($\theta > 1/\gamma = 0.01\gamma_* - 1$) углами к лучу зрения. Здесь $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \sim 200\gamma_*$ - лоренцовский фактор, характеризующий скорость разлета оболочки вблизи фотосферы.

В такой картине излом на мягких ($h\nu < 20$ кэВ) энергиях в начальном спек-

тре всплеска (спектр А) можно объяснить рэлей-джинсовской частью наиболее мягкого чернотельного спектра из спектров, образующих многоцветную (степенную) комбинацию. Очевидно, что это спектр излучения наиболее дальней $\theta \gtrsim 10/\gamma$ области видимой нам в это время части фотосферы (здесь принято, что $\nu_\gamma/\nu_X = D(0)/D(\theta) \simeq [1 + \gamma^2\theta^2] \sim 100$), где $D(\theta) = 2\gamma/(1 - \gamma^2\theta^2)$ - релятивистский доплеровский фактор. Это излучение приходит с временной задержкой $\Delta t \sim (R_d/3\pi c)(\theta^2/2)^2 \lesssim 1.1L_{52}\gamma_*^{-5}$ с [196], которая и объясняет наблюдаемое запаздывание появления рентгеновского излучения (с характерной энергией $h\nu_X$) относительно жесткого рентгеновского и гамма-излучения (с энергией $h\nu_\gamma$). Здесь $R_d = L\sigma_T/(4\gamma m_p c^3)$ - характерный радиус фотосферы в картинной плоскости и $L = 10^{52}L_{52}$ эрг с⁻¹ = $\dot{M}c^2\gamma$, где $\dot{M}$ - темп релятивистского истечения вещества оболочки, приведенный к случаю сферической симметрии, σ_T - томсоновское сечение, m_p - масса протона и c - скорость света.

7). Наблюдение почти чернотельного спектра D на спадающей ($\Delta t \simeq 37$ с) части кривой блеска GRB070912 позволяет сделать простую оценку расстояния d_L до источника всплеска. В самом деле, болометрический поток излучения от всплеска в этот момент времени $F_b = R_a^2 \sigma T_a^4/d_L^2 \simeq 1.2 \times 10^{-8}$ эрг см⁻² с⁻¹, где T_a - наблюдаемая чернотельная температура, $R_a = (R_d/6\gamma\pi)\theta^2(1+z)^2(2\theta\Delta\theta)^{1/2} = (c\Delta t R_d/12\pi)^{1/4}(2cdt)^{1/2}/\gamma(1+z)^2 = 5.7 \times 10^9(1+z)^2 L_{52}^{1/4} \gamma_*^{-5/4}$ см - радиус фотосферы для наблюдателя, σ - постоянная Стефана-Больцмана. Подставляя параметры аппроксимации спектра моделью черного тела, находим $d_L \lesssim (16.3 \pm 0.9)(\gamma/200)^{-5/2}$ Гпк, что соответствует $z \simeq 2.1 \pm 0.2$ в предположении $H_0 = 70$ км/с/Мпк. Эта оценка согласуется с полученным ранее ограничением $z \gtrsim 1.0$.

8). Быстрая эволюция формы спектра всплеска, подобная наблюдавшейся у GRB070912, при которой почти степенной начальный спектр суммируется с мягким тепловым, сохраняющимся в течение десятков секунд, может приводить к появлению особенностей в интегральном спектре всплеска – в поглощении (на

энергиях ~ 100 кэВ) или в излучении (на энергиях 300 - 500 кэВ). К анализу интегрального спектра гамма-всплесков следует подходить с большой осторожностью, учитывая быстроту протекаемых процессов.

4.2. Гамма-всплеск GRB051008

Всестороннему исследованию гамма-всплеска GRB051008 посвящена работа [208], где были собраны ранее неопубликованные наблюдения гамма-всплеска GRB051008 в гамма- и рентгеновском диапазоне, полученные с помощью телескопов BAT/Swift, XRT/Swift, KONUS/WIND, SPI-ACS INTEGRAL, и в оптическом и инфракрасном диапазоне, полученные с помощью телескопов ЗТШ (КрАО), UVOT/Swift, 2-м телескоп (Тюрингская обсерватория в Таутенбурге), Нордик Оптикал телескоп (NOT, Ла-Пальма), Джемини Северный и Кек I (Gemini N, Kesk I, Мауна-Кеа). Сам всплеск был зарегистрирован только в гамма- и рентгеновском диапазоне и не имел ни оптического, ни радиопослесвечения при быстрых и глубоких наблюдениях (оптический компонент не был обнаружен вплоть до 23.3 зв. вел. через полчаса после начала всплеска), что позволило отнести этот гамма-всплеск к классу оптически тёмных гамма-всплесков. Дальнейшие глубокие наблюдения на телескопе Кек I позволили найти родительскую галактику этого всплеска (блеск в фильтре R составляет 24.06 ± 0.10 зв. вел.) и определить фотометрическим методом её красное смещение, которое составило $z = 2.77^{+0.15}_{-0.20}$. Уверенному определению красного смещения способствовало наличие ярко выраженного завала в синтетическом спектре, соответствующего пределу Лаймана. Родительская галактика представляет собой маленькую галактику со вспышкой звездообразования с умеренным внутренним поглощением ($A_V = 0.3$ зв. вел.) и темпом звездообразования примерно 60 масс Солнца в год, что характерно для средней галактики типа LBG. Это один из немногих случаев, когда гамма-всплеск зарегистрирован в галактике

типа LBG. Оценка красного смещения позволила оценить эквивалентную изотропную энергию всплеска, которая составила $E_{iso} = (1.15 \pm 0.20) \times 10^{54}$ эрг. В статье [208] также приводятся аргументы в пользу гипотезы о том, что гамма-всплеск GRB051008 является тёмным из-за локального поглощения излучения в плотной среде, окружающей источник всплеска. В данном разделе остановимся лишь на исследовании этого гамма-всплеска в гамма-диапазоне.

4.2.1. Исследование всплеска GRB051008 в гамма-диапазоне

Космический гамма-всплеск GRB051008 был обнаружен в эксперименте BAT/Swift 8 октября 2005 года в $16^{\text{h}}33^{\text{m}}21^{\text{s}}$ (UT) [209]. Всплеск вспыхнул в момент передачи данных спутника на Землю, поэтому соответствующий всплеску алерт был получен сетью гамма-алертов BACODINE [210] только через 10 минут после срабатывания триггера. Обсерватория Swift не смогла сразу переориентироваться для наблюдения этого всплеска, поскольку в тот момент в поле зрения телескопов попадал лимб Земли. Вследствие этого телескоп BAT не получил полные данные в гамма-диапазоне, охватывающие весь всплеск. GRB051008 был также зарегистрирован в $16^{\text{h}}33^{\text{m}}18^{\text{s}}$ (UT) экспериментом WAM/Suzaku и имел длительность 48 с в энергетическом диапазоне (0.1, 2) МэВ. Энергетический спектр всплеска в этом диапазоне был аппроксимирован степенной моделью с экспоненциальным завалом (формула 2.3) с фотонным индексом $\Gamma = -1.24 \pm 0.15$, и энергией завала $E_c = 1535_{-561}^{+1419}$ keV [211]. GRB051008 был также зарегистрирован в экспериментах KONUS/WIND, SPI-ACS INTEGRAL и Mars Observer [78].

Система автоматического отбора событий IBAS обсерватории INTEGRAL обнаружила всплеск GRB051008 в данных эксперимента SPI-ACS в $16^{\text{h}}33^{\text{m}}12^{\text{s}}$ (UT) [212]. Источник всплеска находился в $\theta = 86^\circ$ от оси апертурных телескопов, что обеспечило наилучшие условия для наблюдения детектором SPI-

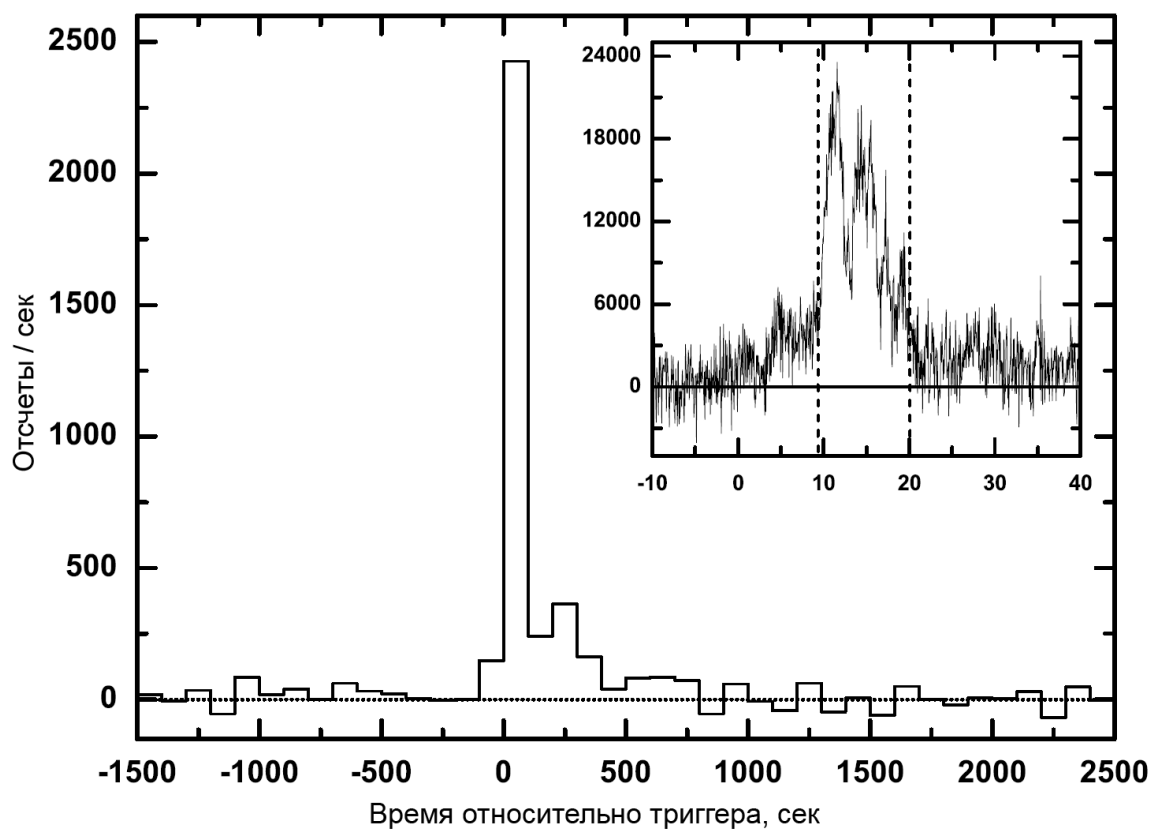


Рис. 4.14. Кривая блеска GRB051008 за вычетом фона по данным SPI-ACS INTEGRAL в энергетическом диапазоне (0.08, 10) МэВ с временным разрешением 100 с. На врезке - кривая блеска главного эпизода всплеска, вертикальными линиями показан временной интервал, в котором вычислялся спектр мощности (PDS).

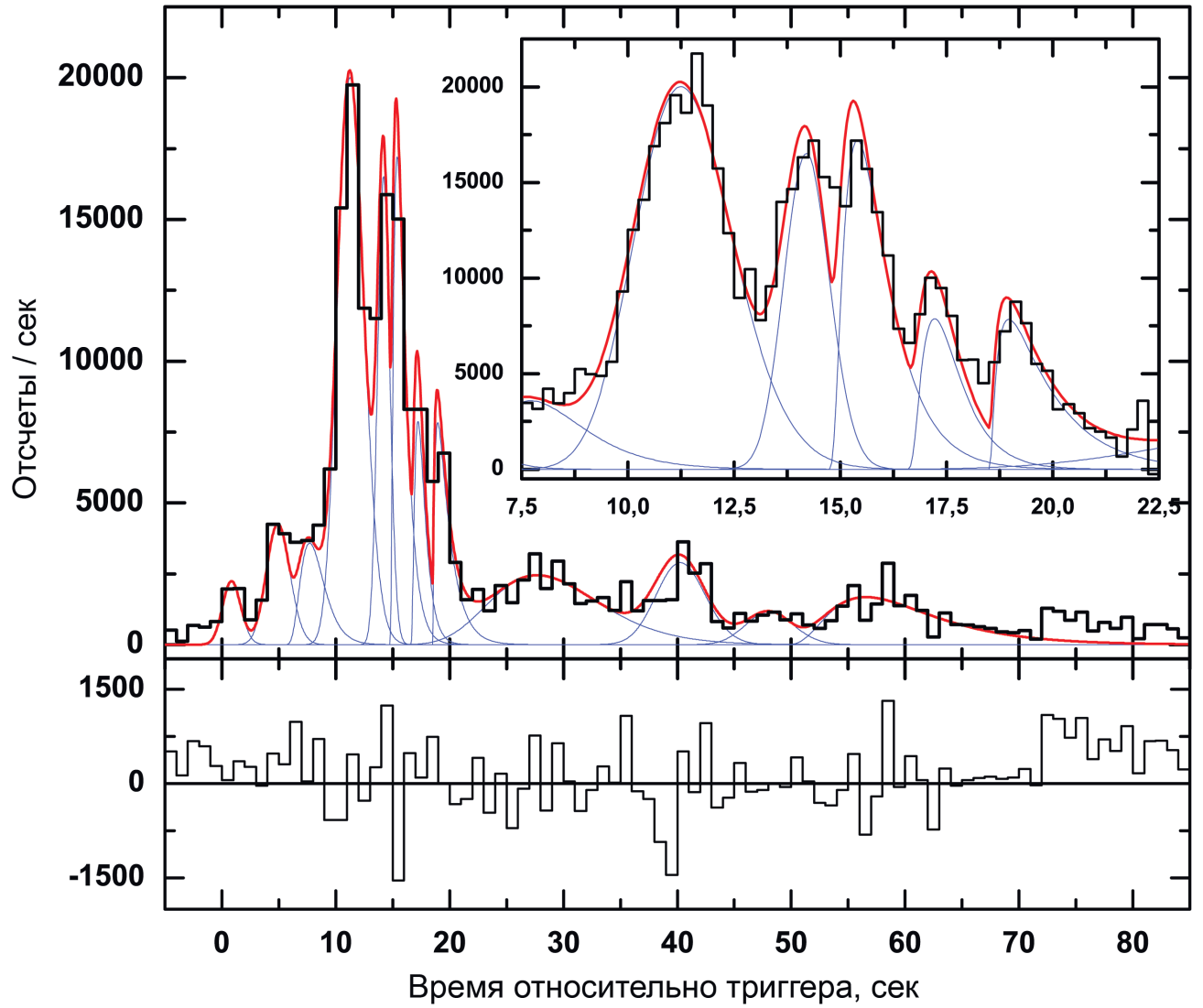


Рис. 4.15. Кривая блеска GRB051008 за вычетом фона по данным SPI-ACS INTEGRAL в энергетическом диапазоне (0.08, 10) МэВ с временным разрешением 1 с. На врезке - кривая блеска главного эпизода всплеска. Показана аппроксимация кривой блеска набором экспоненциальных импульсов (формула 3.1).

ACS, поскольку в такой конфигурации достигается максимальное значение его эффективной площади. SPI-ACS регистрирует отсчеты в энергетическом диапазоне (0.08 - 10) МэВ в едином канале с временным разрешением 50 мс (см. раздел 1.2 и Рис. 1.2). Благодаря значительной эффективности детектора в направлении всплеска GRB051008 (геометрическая площадь детекторов составляет 5250 см^2 при $\theta = 90^\circ$) мы обнаружили значимое (3σ) продленное излучение этого всплеска длительностью 800 сек (Рис. 4.14). Был также проведен поиск предвсплеска (прекурсора) в интервале $(-1500, 0)$ с относительно триггера, который не выявил значимого превышения сигнала над фоном в этом временном интервале. Длительность всплеска T_{90} в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL составляет 535 ± 40 с.

Используя данные эксперимента SPI-ACS в исходном временном разрешении 50 мс, мы провели поиск возможной периодичности сигнала в кривой блеска всего всплеска. Значимой периодичности на масштабах времени (0.1, 20) с найдено не было. Мы также исследовали спектр мощности главного эпизода всплеска в интервале (10, 20) с относительно триггера (см. врезку Рис. 4.14). Спектр мощности (PDS) главного эпизода всплеска можно аппроксимировать степенным законом с показателем -2.06 ± 0.09 до 7 Гц. Этот показатель степени значительно отличается от показателя усредненного спектра мощности длинных гамма-всплесков, который составляет ~ 1.6 [213, 214].

GRB051008 - хороший пример события со сложной структурой кривой блеска, состоящей из нескольких перекрывающихся импульсов. Используя данные SPI-ACS и метод, описанный в Главе 3, мы обнаружили, что гамма-всплеск GRB051008 состоит, как минимум, из 10 импульсов (Рис. 4.15). Для аппроксимации кривой блеска использовалась экспоненциальная модель импульса ([9], формула 3.1). В Главе 3 была обнаружена корреляция между длительностью импульса и спектрально-временной задержкой - чем длиннее импульс, тем больше задержка (Рис. 3.8). Более того, в Главе 3 также показано, что в случае

гамма-всплесков со сложной структурой кривой блеска, состоящей из нескольких импульсов, спектрально-временная задержка может не подчиняться данной зависимости. Поскольку она является неаддитивной величиной, в отличие от длительности, в случае таких событий задержка может как отсутствовать, так и вовсе быть отрицательной. В случае гамма-всплеска GRB051008 она отсутствует в пределах ошибки [208], что подтверждает результаты, полученные в Главе 3.

Рентгеновский телескоп XRT [215], размещенный на борту обсерватории Swift, начал наблюдения всплеска в $17^{\text{h}}23^{\text{m}}52^{\text{s}}$ (UT), т.е. через 50 минут после срабатывания триггера и обнаружил затухающий источник [216], который был идентифицирован как рентгеновское послесвечение всплеска GRB051008. Более точные координаты источника всплеска получены в работе [217] с точностью $1''2$ (на уровне значимости 90%) и составляют R.A. = $13^{\text{h}}31^{\text{m}}29^{\text{s}}55$, Decl. = $+42^{\circ}05'53''3$. Более подробную информацию о исследовании рентгеновских послесвечений гамма-всплесков можно найти в работе [218].

На Рис. 4.16 представлена кривая блеска всплеска в диапазоне (15, 50) кэВ в энергетических единицах по данным экспериментов BAT/Swift, XRT/Swift, SPI-ACS INTEGRAL. Для пересчета отсчетов в энергетические единицы необходимо использовать спектральные и абсорбционные модели, а также матрицу отклика детекторов. Данную процедуру можно применять в случае, когда фотонный индекс (Γ) меняется со временем монотонно (детали см. в работе [219]). Действительно, фотонный индекс всплеска GRB051008 (Рис. 4.16, нижняя панель) монотонно падает со временем.

Поскольку эксперимент SPI-ACS регистрирует фотоны в едином канале (0.08, 10) МэВ, мы сделали пересчет отсчетов эксперимента SPI-ACS в энергетический диапазон (15, 50) кэВ следующим образом:

- 1). Используя спектральную модель всплеска, полученную по данным эксперимента KONUS/WIND, мы оценили поток от главного эпизода всплеска (вре-

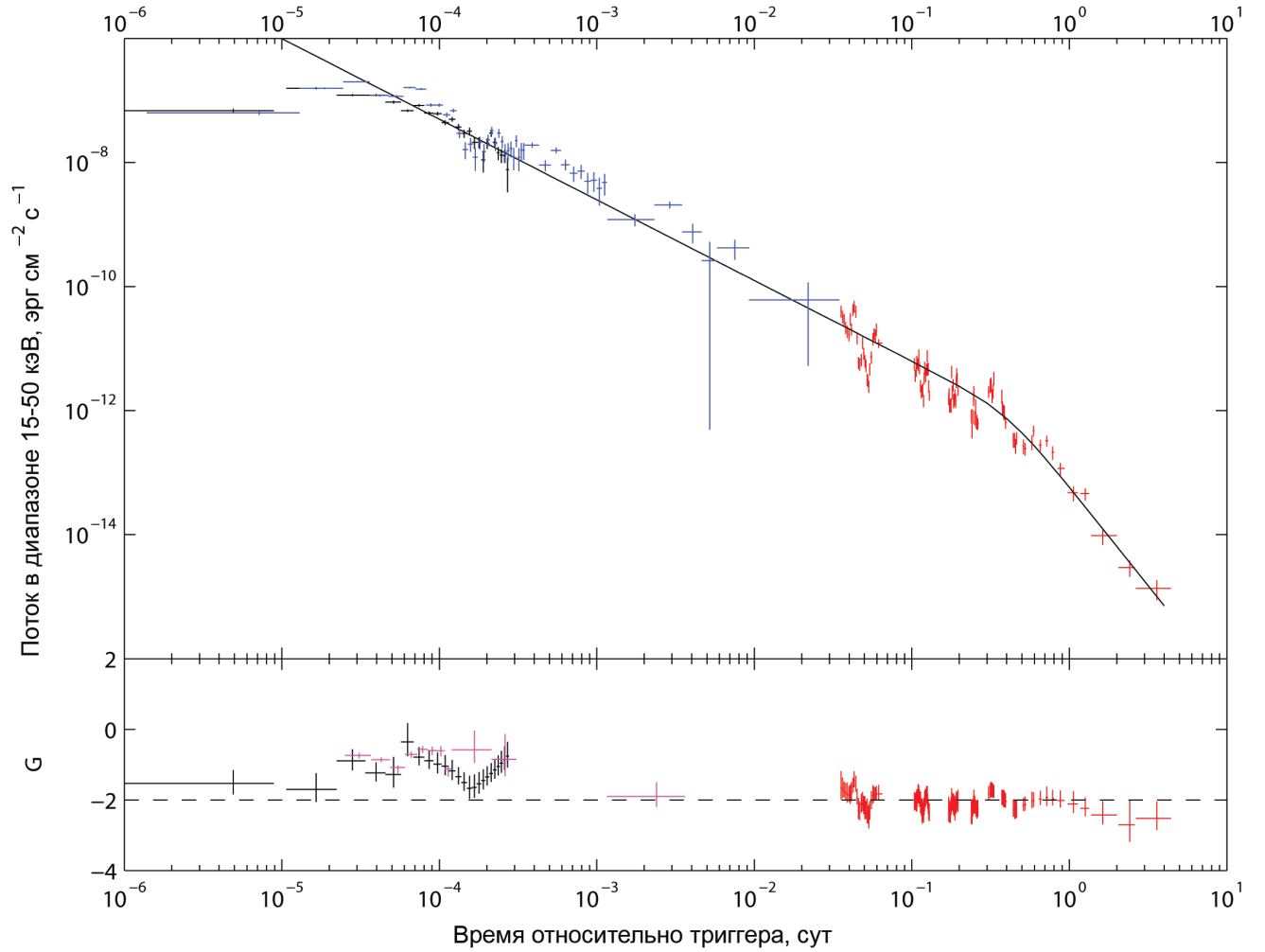


Рис. 4.16. Вверху: Кривая блеска GRB051008 в энергетическом диапазоне (15, 50) кэВ по данным BAT/Swift (черные точки), XRT/Swift (красные точки), SPI-ACS INTEGRAL (синие точки). Черной прямой показана аппроксимация кривой блеска степенным законом с изломом (формула 4.1). Внизу: фотонный индекс Γ рентгеновского спектра по данным BAT/Swift (черные точки) XRT/Swift (красные точки), KONUS/WIND (розовые точки).

менной интервал (-25, 98) сек) в энергетическом диапазоне (0.08, 10) МэВ, соответствующем энергетическому диапазону SPI-ACS, и сравнили его с потоком в том же временном интервале по данным SPI-ACS, выраженном в отсчетах. Полученный таким образом коэффициент пересчета составил $(2.5 \pm 0.7) \times 10^{-10}$ эрг/см² на 1 отсчет SPI-ACS.

2). Используя ту же спектральную модель всплеска, что и в предыдущем пункте, мы сделали пересчет потока всплеска по данным SPI-ACS в диапазоне (0.08, 10) МэВ в поток в диапазоне (15, 50) кэВ.

Полученная таким образом кривая блеска представлена на Рис. 4.16 и аппроксимирована степенным законом с изломом (Формула 4.1, [220]), где α_1 и α_2 - начальный и конечный степенные индексы наклона кривой блеска, t_b - момент времени, соответствующий излому в кривой блеска, w - параметр, определяющий остроту изгиба в точке излома, F_0 - нормировочный коэффициент.

$$F = F_0 \left[\left(\frac{t}{t_b} \right)^{\alpha_1 w} + \left(\frac{t}{t_b} \right)^{\alpha_2 w} \right]^{-1/w}. \quad (4.1)$$

Параметры данной модели для всплеска GRB051008 следующие: $t_b = 0.41 \pm 0.14$ сут, $\alpha_1 = 1.30 \pm 0.18$, и $\alpha_2 = 3.18 \pm 0.20$. Наилучшее согласие модели с наблюдательными данными достигается при значении параметра остроты излома $w = 2$. Значение параметра $t_b = 0.41 \pm 0.14$ сут значительно отличается от полученного ранее $t_b = 0.19 \pm 0.04$ сут [221]. Это может быть связано с использованием другой модели кривой блеска, но наиболее вероятная причина - использование нами данных экспериментов BAT/Swift и SPI-ACS INTEGRAL, охватывающих больший временной интервал. В самом деле, если мы будем использовать лишь данные эксперимента XRT/Swift [222], значение данного параметра будет близко к полученному в работе [221]. Это свидетельствует также о том, что кривая блеска послесвечения всплеска GRB051008 принадлежит относительно редкому классу послесвечений без плато и может отражать только III и IV стадии

канонической модели рентгеновских послесвечений [221, 223–225].

Заключение

Одной из актуальных задач современной астрофизики является исследование космических гамма-всплесков. Несмотря на то, что с момента их открытия прошло более 50 лет, их природа до сих пор не выяснена.

Существует феноменологическая проблема классификации гамма-всплесков, основанная на их длительности. У части коротких гамма-всплесков наблюдается продленное излучение длительностью десятки секунд, природа которого не известна. Первая глава диссертации посвящена исследованию коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL и поиску продленного излучения. Эксперимент SPI-ACS INTEGRAL является одним из рекорсменов по эффективной площади детекторов в диапазоне энергий >100 кэВ. Благодаря высокоэллиптической орбите обсерватория INTEGRAL имеет стабильный уровень фона. Это делает эксперимент SPI-ACS эффективным инструментом для исследования продленного излучения. В этой главе составлен каталог подтвержденных другими космическими обсерваториями коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL за период 2002-08гг. Помимо подтвержденных всплесков исследовались кандидаты в гамма-всплески. У нескольких коротких всплесков (GRB 031214 и GRB 060221) обнаружено значимое продленное излучение. Продленное излучение также найдено в суммарных кривых блеска групп подтвержденных всплесков и кандидатов в гамма-всплески, что может свидетельствовать о том, что продленное излучение является общим свойством всех коротких гамма-всплесков, и что часть кандидатов в гамма-всплески - реальные гамма-всплески. Доля коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL, значительно больше, чем считалось до сих пор, и может составлять от 30 до 45% от всех гамма-всплесков, зарегистрированных в этом эксперименте. В данной главе также проведено исследование распределений гамма-всплесков по длительности в различных

экспериментах (SPI-ACS INTEGRAL, Swift, BATSE, и других). Оказалось, что доля коротких, более жестких гамма-всплесков растет с увеличением нижнего энергетического порога срабатывания детекторов.

На обсерватории INTEGRAL размещено два гамма-телескопа: IBIS/ISGRI, SPI, и антисовпадательная защита SPI-ACS. Но система автоматического отбора событий IBAS используется только для анализа данных инструментов IBIS/ISGRI и SPI-ACS. При этом спектрометр SPI более чувствителен к жесткому гамма-излучению (по сравнению с IBIS/ISGRI), которое наблюдается от коротких гамма-всплесков. Таким образом, в данных эксперимента SPI INTEGRAL могут присутствовать неидентифицированные гамма-события. Основная цель второй главы диссертации - поиск коротких гамма-всплесков в данных эксперимента SPI INTEGRAL. Помимо коротких гамма-всплесков, в работе также проводился поиск других коротких транзиентных явлений, таких, как длинные гамма-всплески, источники мягкого повторного гамма-излучения, аномальные рентгеновские пульсары. Разработан алгоритм поиска коротких транзиентных событий в архивных данных эксперимента SPI INTEGRAL, проведена классификация обнаруженных событий, составлен каталог гамма-всплесков и источников мягкого повторного гамма-излучения (SGR), а также проведены их исследования и сравнение с другими экспериментами. В работе обнаружено несколько ранее не известных всплесков, подробному исследованию одного из них (GRB 070912) посвящена четвертая глава диссертации.

В третьей главе исследована спектральная эволюция 28 ярких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL. Усовершенствован метод исследования спектральной эволюции. Показано, что для всплесков с простой структурой кривой блеска, состоящей из одного импульса, и для отдельных импульсов многоимпульсных событий зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывается логарифмической функцией $\text{lag} \sim A \log(E)$. Установлено, что параметр A зависит от длительности импульса, при-

чем зависимость универсальна для всех исследованных гамма-всплесков, что может говорить о едином механизме излучения. Отрицательные значения спектрально-временной задержки для всплесков с простой структурой кривой блеска не обнаружены. Подобный характер спектральной эволюции можно объяснить простым релятивистским кинематическим эффектом.

Четвертая глава диссертации посвящена индивидуальным исследованиям гамма-всплесков GRB070912 и GRB051008. Гамма-всплеск GRB070912 был обнаружен в данных эксперимента SPI INTEGRAL, и зарегистрирован также в поле зрения телескопов IBIS/ISGRI и JEM-X. Всплеск является одним из самых близких к направлению на галактический центр (менее 1.6° от источника Sgr A*) хорошо локализованных событий за всю историю наблюдения всплесков. GRB070912 - одно из немногих событий, для которых удалось получить широкополосный (3 кэВ - 8 МэВ) спектр рентгеновского и гамма-излучения во время активной фазы вспышки и проследить его эволюцию. В первые секунды после начала всплеска его спектр имел степенной вид с фотонным индексом 0.8, но отличался заметным дефицитом фотонов на энергиях ниже 20 кэВ. Такой исходный дефицит (задержка в появлении) рентгеновских фотонов может быть объяснен их „высокоширотным“ происхождением относительно луча зрения. Спектральная эволюция этого всплеска также подчиняется закону $\text{lag} \sim A \log(E)$. Спектр на затухающей стадии хорошо описывался чернотельным (или виновским) законом, что позволяет оценить расстояние (красное смещение) до источника всплеска. Гамма-всплеск GRB051008 был обнаружен в данных эксперимента BAT/Swift и зарегистрирован также в экспериментах XRT/Swift, KONUS/WIND, SPI-ACS INTEGRAL в рентгеновском и гамма-диапазоне. Сам всплеск был зарегистрирован только в гамма- и рентгеновском диапазонах и не имел ни оптического, ни радио послесвечения при быстрых и глубоких наблюдениях (оптический компонент не был обнаружен вплоть до 23.3 зв. вел. через полчаса после начала всплеска), что позволило отнести этот гамма-всплеск к

классу оптически тёмных гамма-всплесков. В данной главе описаны исследования этого гамма-всплеска в гамма-диапазоне. В данных эксперимента SPI-ACS INTEGRAL обнаружено продленное излучение длительностью 800 сек, что делает этот всплеск одним из самых длительных за всю историю наблюдений гамма-всплесков. Сделан пересчет данных эксперимента SPI-ACS в энергетические единицы, что позволило построить максимально полную кривую блеска этого всплеска в энергетическом диапазоне (15, 50) кэВ и аппроксимировать ее степенным законом с изломом. Положение излома кривой блеска на временной шкале позволило оценить угол раствора конуса джета источника гамма-всплеска, полная ширина которого составляет $\sim 4^\circ$. По данным эксперимента SPI-ACS INTEGRAL также исследовалась кривая блеска главного эпизода всплеска GRB051008. Показано, что она состоит как минимум из 10 импульсов. Сложная структура кривой блеска может быть причиной незначительной спектральной эволюции этого события.

Благодарности

В первую очередь автор настоящей работы выражает глубокую благодарность своему научному руководителю - к.ф.-м.н. Алексею Степановичу Позаненко за предложенную очень интересную тему исследований, за поддержку в работе, терпение и чуткое руководство. Автор благодарит К.А. Постнова, В.М. Лозникова, А.А. Вольнову, С.А. Гребеневу, С.В. Молькова, И.В. Человекова, и всех сотрудников 64 отдела ИКИ РАН за помощь в работе, содержательные научные обсуждения, советы и поддержку. Особая признательность автора рецензентам статей, опубликованных по теме диссертационной работы.

Павел Минаев

Москва, 2014 год

Литература

1. Klebesadel R. W., Strong I. B., Olson R. A. Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin // *Astrophys. J. Let.* 1973. — June. Vol. 182. P. L85.
2. Mazets E. P., Golenetskii S. V., Ilinskii V. N. et al. Catalog of cosmic gamma-ray bursts from the KONUS experiment data. I. // *Astron. Space Sci.* 1981. — November. Vol. 80. P. 3–83.
3. BATSE homepage. <http://f64.nsstc.nasa.gov/batse/>.
4. Howard S. Gamma Ray Observatory/BATSE status. // Bulletin of the American Astronomical Society. Vol. 23 of Bulletin of the American Astronomical Society. 1991. — June. P. 1257.
5. BATSE GRB catalog. <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/misc/triggers.html/>.
6. Briggs M. S., Paciesas W. S., Pendleton G. N. et al. BATSE Observations of the Large-Scale Isotropy of Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J.* 1996. — March. Vol. 459. P. 40. [astro-ph/9509078](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9509078).
7. Kouveliotou C., Meegan C. A., Fishman G. J. et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts // *Astrophys. J. Let.* 1993. — August. Vol. 413. P. L101–L104.
8. Koshut T. M., Paciesas W. S., Kouveliotou C. et al. Systematic Effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J.* 1996. — June. Vol. 463. P. 570.
9. Norris J. P., Bonnell J. T., Kazanas D. et al. Long-Lag, Wide-Pulse Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J.* 2005. — July. Vol. 627. P. 324–345. [astro-ph/0503383](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503383).

10. Norris J. P., Nemiroff R. J., Bonnell J. T. et al. Attributes of Pulses in Long Bright Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J.](#) 1996. — March. Vol. 459. P. 393.
11. Hakkila J., Preece R. D. Unification of Pulses in Long and Short Gamma-Ray Bursts: Evidence from Pulse Properties and Their Correlations // [Astrophys. J.](#) 2011. — October. Vol. 740. P. 104. [arXiv:astro-ph.HE/1103.5434](#).
12. Fishman G. J., Meegan C. A. Gamma-Ray Bursts // [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#). 1995. Vol. 33. P. 415–458.
13. Nemiroff R. J. A Century of Gamma-Ray Burst Models // Gamma-Ray Bursts / Ed. by G. J. Fishman. Vol. 307 of American Institute of Physics Conference Series. 1994. — January. P. 730.
14. Bisnovatyi-Kogan G. S., Chechetkin V. M. Nuclear fission in the neutron stars and gamma-ray bursts // [Astron. Space Sci.](#) 1983. — January. Vol. 89. P. 447–451.
15. Costa E., Frontera F., Heise J. et al. Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997 // [Nature](#). 1997. — June. Vol. 387. P. 783–785. [astro-ph/9706065](#).
16. van Paradijs J., Groot P. J., Galama T. et al. Transient optical emission from the error box of the γ -ray burst of 28 February 1997 // [Nature](#). 1997. — April. Vol. 386. P. 686–689.
17. Costa E., Feroci M., Piro L. et al. GRB 970508 // [IAU Circ.](#) 1997. — May. Vol. 6649. P. 1.
18. Piro L., Costa E., Feroci M. et al. GRB 970508 // [IAU Circ.](#) 1997. — May. Vol. 6656. P. 1.

19. Heise J., in 't Zand J., Costa E. et al. GRB 970508 // IAU Circ.. 1997. — May. Vol. 6654. P. 2.
20. Galama T. J., Wijers R. A. M. J., Bremer M. et al. The Radio-to-X-Ray Spectrum of GRB 970508 on 1997 May 21.0 UT // [Astrophys. J. Let.](#) 1998. — June. Vol. 500. P. L97–L100. [astro-ph/9804191](#).
21. Bloom J. S., Djorgovski S. G., Kulkarni S. R., Frail D. A. The Host Galaxy of GRB 970508 // [Astrophys. J. Let.](#) 1998. — November. Vol. 507. P. L25–L28. [astro-ph/9807315](#).
22. Paczynski B. Gamma-ray bursters at cosmological distances // [Astrophys. J. Let.](#) 1986. — September. Vol. 308. P. L43–L46.
23. Meszaros P., Rees M. J. Tidal heating and mass loss in neutron star binaries - Implications for gamma-ray burst models // [Astrophys. J.](#) 1992. — October. Vol. 397. P. 570–575.
24. Mészáros P., Rees M. J. Poynting Jets from Black Holes and Cosmological Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J. Let.](#) 1997. — June. Vol. 482. P. L29–L32. [astro-ph/9609065](#).
25. Rosswog S., Ramirez-Ruiz E. On the diversity of short gamma-ray bursts // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2003. — August. Vol. 343. P. L36–L40. [astro-ph/0306172](#).
26. Rosswog S., Ramirez-Ruiz E., Davies M. B. High-resolution calculations of merging neutron stars - III. Gamma-ray bursts // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2003. — November. Vol. 345. P. 1077–1090. [astro-ph/0110180](#).

27. Minaev P. Y., Pozanenko A. S., Loznikov V. M. Short gamma-ray bursts in the SPI-ACS INTEGRAL experiment // [Astrophysical Bulletin](#). 2010. — October. Vol. 65. P. 326–333.
28. Donaghy T. Q., Lamb D. Q., Sakamoto T. et al. HETE-2 Localizations and Observations of Four Short Gamma-Ray Bursts: GRBs 010326B, 040802, 051211 and 060121 // [ArXiv Astrophysics e-prints](#). 2006. — May. [astro-ph/0605570](#).
29. Connaughton V. BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Tails // [Astrophys. J.](#) 2002. — March. Vol. 567. P. 1028–1036. [astro-ph/0111564](#).
30. Lazzati D., Ramirez-Ruiz E., Ghisellini G. Possible detection of hard X-ray afterglows of short gamma -ray bursts // [Astron. and Astrophys.](#) 2001. — December. Vol. 379. P. L39–L43. [astro-ph/0110215](#).
31. Frederiks D. D., Aptekar R. L., Golenetskii S. V. et al. Early Hard X-ray Afterglows of Short GRBs with Konus Experiments // [Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era](#) / Ed. by M. Feroci, F. Frontera, N. Masetti, L. Piro. Vol. 312 of [Astronomical Society of the Pacific Conference Series](#). 2004. — June. P. 197. [astro-ph/0301318](#).
32. Montanari E., Frontera F., Guidorzi C., Rapisarda M. Evidence of a Long-Duration Component in the Prompt Emission of Short Gamma-Ray Bursts Detected with BeppoSAX // [Astrophys. J. Let.](#) 2005. — May. Vol. 625. P. L17–L21. [astro-ph/0504199](#).
33. Minaev P. Y., Pozanenko A. S., Loznikov V. M. [Searching for signature of extended emission in short GRBs registered by the SPI-ACS of INTEGRAL Observatory](#) // [American Institute of Physics Conference Series](#) / Ed. by C. Meegan, C. Kouveliotou, N. Gehrels. Vol. 1133 of [American Institute of Physics Conference Series](#). 2009. — May. P. 418–421.

34. Minaev P. Y., Pozanenko A. S., Loznikov V. M. Extended emission from short gamma-ray bursts detected with SPI-ACS/INTEGRAL // [Astronomy Letters](#). 2010. — October. Vol. 36. P. 707–720. [arXiv:astro-ph.HE/1009.2685](#).
35. Gehrels N., Norris J. P., Barthelmy S. D. et al. A new γ -ray burst classification scheme from GRB060614 // [Nature](#). 2006. — December. Vol. 444. P. 1044–1046. [astro-ph/0610635](#).
36. Metzger B. D., Quataert E., Thompson T. A. Short-duration gamma-ray bursts with extended emission from protomagnetar spin-down // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2008. — April. Vol. 385. P. 1455–1460. [0712.1233](#).
37. Barkov M. V., Pozanenko A. S. Model of the extended emission of short gamma-ray bursts // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — November. Vol. 417. P. 2161–2165. [arXiv:astro-ph.HE/1103.4246](#).
38. Woosley S. E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes // [Astrophys. J.](#) 1993. — March. Vol. 405. P. 273–277.
39. Paczynski B. Are Gamma-Ray Bursts in Star-Forming Regions? // [Astrophys. J. Let.](#) 1998. — February. Vol. 494. P. L45. [astro-ph/9710086](#).
40. Fryer C. L., Woosley S. E., Hartmann D. H. Formation Rates of Black Hole Accretion Disk Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J.](#) 1999. — November. Vol. 526. P. 152–177. [astro-ph/9904122](#).
41. Mészáros P. Gamma-ray bursts // [Reports on Progress in Physics](#). 2006. — August. Vol. 69. P. 2259–2321. [astro-ph/0605208](#).
42. Galama T. J., Vreeswijk P. M., van Paradijs J. et al. An unusual supernova in the error box of the γ -ray burst of 25 April 1998 // [Nature](#). 1998. — October. Vol. 395. P. 670–672. [astro-ph/9806175](#).

43. Hjorth J., Sollerman J., Møller P. et al. A very energetic supernova associated with the γ -ray burst of 29 March 2003 // [Nature](#). 2003. — June. Vol. 423. P. 847–850. [astro-ph/0306347](#).
44. Kulkarni S. R., Frail D. A., Wieringa M. H. et al. Radio emission from the unusual supernova 1998bw and its association with the γ -ray burst of 25 April 1998 // [Nature](#). 1998. — October. Vol. 395. P. 663–669.
45. Page D. N., Hawking S. W. Gamma rays from primordial black holes // [Astrophys. J.](#) 1976. — May. Vol. 206. P. 1–7.
46. Cline D. B., Matthey C., Otwinowski S. et al. Comparison of VSB from BATSE, KONUS and SWIFT // [Nuovo Cimento B Serie](#). 2006. — December. Vol. 121. P. 1443–1448. [astro-ph/0608158](#).
47. Piran T. The physics of gamma-ray bursts // [Reviews of Modern Physics](#). 2004. — October. Vol. 76. P. 1143–1210. [astro-ph/0405503](#).
48. Bisnovatyi-Kogan G. S. Cosmic γ -ray bursts: Observations and modeling // [Physics of Particles and Nuclei](#). 2006. — October. Vol. 37. P. 647–676. [astro-ph/0701461](#).
49. Mazets E. P., Golentskii S. V., Ilinskii V. N. et al. Observations of a flaring X-ray pulsar in Dorado // [Nature](#). 1979. — December. Vol. 282. P. 587–589.
50. Evans D., Kiebesadel R., Baros J. et al. Gamma-ray Burst 79-03-05 // IAU Circ.. 1979. — May. Vol. 3356. P. 1.
51. Thompson C., Duncan R. C. The Giant Flare of 1998 August 27 from SGR 1900+14. II. Radiative Mechanism and Physical Constraints on the Source // [Astrophys. J.](#) 2001. — November. Vol. 561. P. 980–1005. [astro-ph/0110675](#).

52. Feroci M., Frontera F., Costa E. et al. A Giant Outburst from SGR 1900+14 Observed with the BeppoSAX Gamma-Ray Burst Monitor // [Astrophys. J. Let.](#) 1999. — April. Vol. 515. P. L9–L12. [astro-ph/9902096](#).
53. Hurley K., Li P., Kouveliotou C. et al. ASCA Discovery of an X-Ray Pulsar in the Error Box of SGR 1900+14 // [Astrophys. J. Let.](#) 1999. — January. Vol. 510. P. L111–L114. [astro-ph/9811388](#).
54. Kouveliotou C., Strohmayer T., Hurley K. et al. Discovery of a Magnetar Associated with the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14 // [Astrophys. J. Let.](#) 1999. — January. Vol. 510. P. L115–L118. [astro-ph/9809140](#).
55. Woods P. M., Kouveliotou C., van Paradijs J. et al. Variable Spin-Down in the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14 and Correlations with Burst Activity // [Astrophys. J. Let.](#) 1999. — October. Vol. 524. P. L55–L58. [astro-ph/9907173](#).
56. Palmer D. M., Barthelmy S., Gehrels N. et al. A giant γ -ray flare from the magnetar SGR 1806 - 20 // [Nature](#). 2005. — April. Vol. 434. P. 1107–1109. [astro-ph/0503030](#).
57. Israel G. L., Belloni T., Stella L. et al. The Discovery of Rapid X-Ray Oscillations in the Tail of the SGR 1806-20 Hyperflare // [Astrophys. J. Let.](#) 2005. — July. Vol. 628. P. L53–L56. [astro-ph/0505255](#).
58. Gaensler B. M., Kouveliotou C., Gelfand J. D. et al. An expanding radio nebula produced by a giant flare from the magnetar SGR 1806-20 // [Nature](#). 2005. — April. Vol. 434. P. 1104–1106. [astro-ph/0502393](#).
59. Mazets E. P., Aptekar R. L., Cline T. L. et al. A Giant Flare from a Soft Gamma Repeater in the Andromeda Galaxy (M31) // [Astrophys. J.](#) 2008. — June. Vol. 680. P. 545–549. [0712.1502](#).

60. McGill Online Magnetar Catalog. <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>.
61. Duncan R. C., Thompson C. Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts // *Astrophys. J. Let.* 1992. — June. Vol. 392. P. L9–L13.
62. Rea N., Esposito P., Turolla R. et al. A Low-Magnetic-Field Soft Gamma Repeater // *Science*. 2010. — November. Vol. 330. P. 944–. [arXiv:astro-ph.HE/1010.2781](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1010.2781).
63. Thompson C., Duncan R. C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1995. — July. Vol. 275. P. 255–300.
64. Bisnovatyi-Kogan G. S., Ikhsanov N. R. A new look at anomalous X-ray Pulsars // *Astronomy Reports*. 2014. — April. Vol. 58. P. 217–227. [arXiv:astro-ph.HE/1401.2634](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1401.2634).
65. Gavriil F. P., Kaspi V. M., Woods P. M. Magnetar-like X-ray bursts from an anomalous X-ray pulsar // *Nature*. 2002. — September. Vol. 419. P. 142–144. [astro-ph/0209202](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0209202).
66. Peng Z. Y., Yin Y., Bi X. W. et al. Spectral lag of gamma-ray bursts caused by the intrinsic spectral evolution and the curvature effect // *Astronomische Nachrichten*. 2011. — January. Vol. 332. P. 92. [arXiv:astro-ph.HE/1101.4062](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1101.4062).
67. Rau A., Kienlin A. V., Hurley K., Lichti G. G. The 1st INTEGRAL SPI-ACS gamma-ray burst catalogue // *Astron. and Astrophys.* 2005. — August. Vol. 438. P. 1175–1183. [astro-ph/0504357](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504357).

68. Burenin R. A. Early Afterglows of Short Gamma-Ray Bursts // [Astronomy Letters](#). 2000. — May. Vol. 26. P. 269–276.
69. Norris J. P., Bonnell J. T. Short Gamma-Ray Bursts with Extended Emission // [Astrophys. J.](#) 2006. — May. Vol. 643. P. 266–275. [astro-ph/0601190](#).
70. von Kienlin A., Beckmann V., Rau A. et al. INTEGRAL Spectrometer SPI's GRB detection capabilities. GRBs detected inside SPI's FoV and with the anticoincidence system ACS // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. — November. Vol. 411. P. L299–L305. [astro-ph/0308346](#).
71. Mereghetti S., Götz D., Borkowski J. et al. The INTEGRAL Burst Alert System // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. — November. Vol. 411. P. L291–L297. [astro-ph/0308173](#).
72. IBAS SPI-ACS triggers. http://www.isdc.unige.ch/integral/ibas/cgi-bin/ibas_acs_web.cgi.
73. Schmidt M. Space Distribution and Luminosity Functions of Quasi-Stellar Radio Sources // [Astrophys. J.](#) 1968. — February. Vol. 151. P. 393.
74. Hajdas W., Bühler P., Eggel C. et al. Radiation environment along the INTEGRAL orbit measured with the IREM monitor // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. — November. Vol. 411. P. L43–L47. [astro-ph/0308269](#).
75. Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES). <http://www.sec.noaa.gov>.
76. GRBlog catalog. <http://grad40.as.utexas.edu/grblog.php>.
77. GCN circulars archive. <http://gcn.gsfc.nasa.gov/>.
78. Hurley K. <http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/masterli.html>. 2010.

79. Hurley K., Mazets E., Golenetskii S. et al. IPN triangulation of GRB030101 (two large error boxes). // GRB Coordinates Network. 2003. Vol. 1783. P. 1.
80. Hurley K., Cline T., Mitrofanov I. et al. IPN triangulation of GRB030325 (two small error boxes). // GRB Coordinates Network. 2003. Vol. 1962. P. 1.
81. Hurley K., Cline T., von Kienlin A. et al. IPN triangulation of GRB030717 (annulus). // GRB Coordinates Network. 2003. Vol. 2307. P. 1.
82. Golenetskii S., Mazets E., Pal'Shin V. et al. GRB030921 triangulation (annulus). // GRB Coordinates Network. 2003. Vol. 2487. P. 1.
83. Golenetskii S., Mazets E., Pal'Shin V., Frederiks D. short hard GRB 040322. // GRB Coordinates Network. 2004. Vol. 2552. P. 1.
84. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. Triangulation of short hard GRB050112 (large error box). // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 2949. P. 1.
85. Covino S., Antonelli L. A., Romano P. et al. GRB050724: a short-burst detected by swift. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 3665. P. 1.
86. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. IPN triangulation and Konus spectrum of the short/soft GRB051107. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 4234. P. 1.
87. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. Konus-wind observation of GRB 060313. // GRB Coordinates Network. 2006. Vol. 4881. P. 1.
88. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. GRB 060427B: IPN localization of a short hard burst. // GRB Coordinates Network. 2006. Vol. 5030. P. 1.

89. Perri M., Barthelmy S. D., Cummings J. R. et al. GRB 071112B: Swift detection of a short hard burst. // GRB Coordinates Network. 2007. Vol. 7058. P. 1.
90. Sato G., Barbier L., Barthelmy S. D. et al. Swift-BAT refined analysis of short GRB 071227. // GRB Coordinates Network. 2007. Vol. 7148. P. 1.
91. Cummings J. R., Palmer D. M. GRB 080121: Swift-BAT detection of a very weak, short burst. // GRB Coordinates Network. 2008. Vol. 7209. P. 1.
92. Uehara T., Ohno M., Takahashi T. et al. GRB 080123 : suzaku WAM observation of the prompt emission. // GRB Coordinates Network. 2008. Vol. 7223. P. 1.
93. Ryde F., Borgonovo L., Larsson S. et al. Gamma-ray bursts observed by the INTEGRAL-SPI anticoincidence shield: A study of individual pulses and temporal variability // *Astron. and Astrophys.* 2003. — November. Vol. 411. P. L331–L342.
94. Řípa J., Mészáros A., Wigger C. et al. Search for gamma-ray burst classes with the RHESSI satellite // *Astron. and Astrophys.* 2009. — May. Vol. 498. P. 399–406. [arXiv:astro-ph.HE/0902.1644](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/0902.1644).
95. Suzaku WAM GRB catalog. <http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/HXD-WAM/WAM-GRB/>.
96. Sakamoto T., Barthelmy S. D., Barbier L. et al. The First Swift BAT Gamma-Ray Burst Catalog // *Astrophys. J. Suppl.* 2008. — March. Vol. 175. P. 179–190. [0707.4626](https://arxiv.org/abs/0707.4626).
97. Lin L., Liang E.-W., Zhang B.-B., Zhang S. N. *Extended Emission of Short Gamma-Ray Bursts* // American Institute of Physics Conference Series / Ed.

- by Y.-F. Huang, Z.-G. Dai, B. Zhang. Vol. 1065 of American Institute of Physics Conference Series. 2008. — October. P. 39–42. [0809.1796](#).
98. Krimm H., Barbier L., Barthelmy S. et al. GRB 061006: Swift-BAT refined analysis of the short-hard burst. // GRB Coordinates Network. 2006. Vol. 5704. P. 1.
 99. Mitrofanov I. G., Chernenko A. M., Pozanenko A. S. et al. The Average Intensity and Spectral Evolution of BATSE Cosmic Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J.](#) 1996. — March. Vol. 459. P. 570.
 100. Bisnovaty-Kogan G. S., Pozanenko A. S. About the measurements of the hard X-ray background // [Astron. Space Sci.](#) 2011. — March. Vol. 332. P. 57–63. [arXiv:astro-ph.HE/1009.5564](#).
 101. Oleinic P. private communication. 2008.
 102. Amati L. The $E_{p,i}$ - Eiso correlation and Fermi Gamma-Ray Bursts // ArXiv e-prints. 2010. — February. [arXiv:astro-ph.HE/1002.2232](#).
 103. Horváth I., Balázs L. G., Veres P. [Gamma-Ray Burst Groups Observed by Different Satellites](#) // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by C. Meegan, C. Kouveliotou, N. Gehrels. Vol. 1133 of American Institute of Physics Conference Series. 2009. — May. P. 412–414. [arXiv:astro-ph.CO/0910.0088](#).
 104. Horváth I. A Third Class of Gamma-Ray Bursts? // [Astrophys. J.](#) 1998. — December. Vol. 508. P. 757–759. [astro-ph/9803077](#).
 105. Gehrels N., Ramirez-Ruiz E., Fox D. B. Gamma-Ray Bursts in the Swift Era // [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#). 2009. — September. Vol. 47. P. 567–617. [arXiv:astro-ph.HE/0909.1531](#).

106. Kozyrev A. S., Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Barat C. Search for Short Cosmic Gamma-Ray Bursts Using Data from the APEX and LILAS Experiments Onboard the PHOBOS-2 Interplanetary Spacecraft // [Astronomy Letters](#). 2004. — July. Vol. 30. P. 435–443.
107. Swift GRB catalog. <http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/>.
108. Vianello G., Götz D., Mereghetti S. The updated spectral catalogue of INTEGRAL gamma-ray bursts // [Astron. and Astrophys.](#) 2009. — March. Vol. 495. P. 1005–1032. [0812.3349](#).
109. Frontera F., Guidorzi C., Montanari E. et al. The Gamma-Ray Burst Catalog Obtained with the Gamma-Ray Burst Monitor Aboard BeppoSAX // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2009. — January. Vol. 180. P. 192–223. [0809.5174](#).
110. Barat C. private communication. 2007.
111. Mitrofanov I., Pozanenko A., Atteia J.-L. et al. Statistical properties of cosmic gamma-ray bursts recorded in the APEX experiment of the PHOBOS mission // *Gamma-Ray Bursts - Observations, Analyses and Theories*, Ed. by C. Ho, R. I. Epstein, E. E. Fenimore. 1992. P. 203–208.
112. Sazonov S. Y., Sunyaev R. A., Terekhov O. V. et al. GRANAT/WATCH catalogue of cosmic gamma-ray bursts: December 1989 to September 1994 // [Astr. and Astroph. Suppl. Ser.](#) 1998. — April. Vol. 129. P. 1–8. [astro-ph/9708156](#).
113. Fenimore E. E., in 't Zand J. J. M., Norris J. P. et al. Gamma-Ray Burst Peak Duration as a Function of Energy // [Astrophys. J. Let.](#) 1995. — August. Vol. 448. P. L101. [astro-ph/9504075](#).

114. Mitrofanov I. G., Pozanenko A. S., Briggs M. S. et al. Generic Signatures of the Time Profiles of BATSE Cosmic Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J.](#) 1998. — September. Vol. 504. P. 925–934.
115. Cline D. B., Czerny B., Matthey C. et al. Study of Very Short Gamma-Ray Bursts: New Results from BATSE and Konus // [Astrophys. J. Let.](#) 2005. — November. Vol. 633. P. L73–L76. [astro-ph/0510309](#).
116. Petkov V. B., Bugaev E. V., Klimai P. A. et al. Searching for very-high-energy gamma-ray bursts from evaporating primordial black holes // [Astronomy Letters](#). 2008. — August. Vol. 34. P. 509–514. [0808.3093](#).
117. Viganò D., Mereghetti S. Calibration of the INTEGRAL SPI Anti Coincidence Shield with Gamma Ray Bursts observations // The Extreme Sky: Sampling the Universe above 10 keV. 2009. [arXiv:astro-ph.IM/0912.5329](#).
118. Fishman G. J., Meegan C. A., Wilson R. B. et al. The first BATSE gamma-ray burst catalog // [Astrophys. J. Suppl.](#) 1994. — May. Vol. 92. P. 229–283.
119. Gehrels N. [Status of Swift GRB Observations](#) // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by M. Galassi, D. Palmer, E. Fenimore. Vol. 1000 of American Institute of Physics Conference Series. 2008. — May. P. 3–8.
120. Jensen P. L., Clausen K., Cassi C. et al. The INTEGRAL spacecraft - in-orbit performance // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. — November. Vol. 411. P. L7–L17.
121. Ubertini P., Lebrun F., Di Cocco G. et al. IBIS: The Imager on-board INTEGRAL // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. — November. Vol. 411. P. L131–L139.

122. Vedrenne G., Roques J.-P., Schönfelder V. et al. SPI: The spectrometer aboard INTEGRAL // *Astron. and Astrophys.* 2003. — November. Vol. 411. P. L63–L70.
123. Gehrels N. Instrumental background in balloon-borne gamma-ray spectrometers and techniques for its reduction // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 1985. — September. Vol. 239. P. 324–349.
124. Gehrels N. Instrumental background in gamma-ray spectrometers flown in low Earth orbit // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 1992. — March. Vol. 313. P. 513–528.
125. Naya J. E., Jean P., Bockholt J. et al. The neutron spectrum inside the shielding of balloon-borne Ge spectrometers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 1996. — February. Vol. 368. P. 832–846.
126. Weidenspointner G., Harris M. J., Stürner S. et al. MGGPOD: a Monte Carlo Suite for Modeling Instrumental Line and Continuum Backgrounds in Gamma-Ray Astronomy // *Astrophys. J. Suppl.* 2005. — January. Vol. 156. P. 69–91. [astro-ph/0408399](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0408399).
127. Chelovekov I. V., Grebenev S. A. Hard X-ray bursts recorded by the IBIS telescope of the INTEGRAL observatory in 2003-2009 // *Astronomy Letters*. 2011. — September. Vol. 37. P. 597–620. [arXiv:astro-ph.HE/1108.2421](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1108.2421).
128. Molkov S. private communication. 2010.
129. IBAS IBIS/ISGRI triggers. <http://ibas.iasf-milano.inaf.it/>.
130. Hurley K. <http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/chronological.txt>. 2011.

131. Briggs M. S., Fishman G. J., Connaughton V. et al. First results on terrestrial gamma ray flashes from the Fermi Gamma-ray Burst Monitor // [Journal of Geophysical Research \(Space Physics\)](#). 2010. — July. Vol. 115. P. 7323.
132. Meyer R. A., Nagle R. J., Brant S. et al. Interacting boson fermion model description for the levels of $^{71}\text{Ge}_{39}$ populated in the beta decay of 65.30-h ^{71}As // [Physical Review C](#). 1990. — February. Vol. 41. P. 686–696.
133. Forssten K., Brenner M. On the decay of ^{73}Ga to levels in ^{73}Ge // [Zeitschrift fur Physik A Hadrons and Nuclei](#). 1976. — March. Vol. 278. P. 27–33.
134. Jean P., von Ballmoos P., Vedrenne G., Naya J. E. Performance of advanced Ge-spectrometer for nuclear astrophysics // *Gamma-Ray and Cosmic-Ray Detectors, Techniques, and Missions* / Ed. by B. D. Ramsey, T. A. Parnell. Vol. 2806 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 1996. — October. P. 457–471.
135. Hurley K., Stern B., Kommers J. et al. The Interplanetary Network Supplement to the BATSE Catalogs of Untriggered Cosmic Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2005. — February. Vol. 156. P. 217–226. [astro-ph/0409053](#).
136. Hurley K., Atteia J.-L., Barraud C. et al. The Interplanetary Network Supplement to the HETE-2 Gamma-Ray Burst Catalog // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2011. — December. Vol. 197. P. 34.
137. Soderberg A. M., Fox D., Kulkarni S., Berger E. GRB 030227: fading of candidate optical afterglow 'S1-A'. // *GRB Coordinates Network*. 2003. Vol. 1907. P. 1.
138. Tedds J. A., Watson D., Watson M. G. et al. GRB031203, improved XMM position. // *GRB Coordinates Network*. 2003. Vol. 2490. P. 1.

139. de Luca A., Mereghetti S., Tiengo A., Campana S. GRB040223, improved XMM position. // GRB Coordinates Network. 2004. Vol. 2547. P. 1.
140. de Luca A., Melandri A., Caraveo P. A. et al. XMM-Newton and VLT observations of the afterglow of GRB 040827 // *Astron. and Astrophys.* 2005.— September. Vol. 440. P. 85–92. [astro-ph/0505261](#).
141. Gorosabel J., de Ugarte A., Castro-Tirado A. J. et al. GRB 041218: optical candidate. // GRB Coordinates Network. 2004. Vol. 2861. P. 1.
142. Yost S. A., Swan H., Schaefer B. A., Alatalo K. GRB 050502: ROTSE-III detection of possible counterpart. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 3322. P. 1.
143. Kennea J. A., Burrows D. N., Page K. et al. GRB 050504: swift XRT position. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 3359. P. 1.
144. Kennea J. A., Burrows D. N., Perri M. et al. GRB 050520: swift XRT position. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 3434. P. 1.
145. Aslan Z., Khamitov I., Ozisik T. et al. GRB 050525: RTT150, optical observations. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 3493. P. 1.
146. Racusin J. GRB 060901: Swift/XRT refined analysis. // GRB Coordinates Network. 2006. Vol. 5496. P. 1.
147. Berger E. GRB 061025: gemini-s observations. // GRB Coordinates Network. 2006. Vol. 5754. P. 1.
148. Halpern J. P., Armstrong E. GRB 061122: candidate optical afterglow. // GRB Coordinates Network. 2006. Vol. 5849. P. 1.
149. Covino S., Antonelli L. A., Calzoletti L. et al. GRB 070311: REM candidate afterglow. // GRB Coordinates Network. 2007. Vol. 6190. P. 1.

150. Piranomonte S., Vergani S., D’Avanzo P., Tagliaferri G. GRB 070707: object inside XRT error circle. // GRB Coordinates Network. 2007. Vol. 6612. P. 1.
151. Vetere L., Racusin J. L. GRB070925: Swift-XRT position. // GRB Coordinates Network. 2007. Vol. 6826. P. 1.
152. Beardmore A. P., Burrows D. N., Evans P. A. et al. GRB 080413: Swift detection of a burst with an optical afterglow. // GRB Coordinates Network. 2008. Vol. 7594. P. 1.
153. Guidorzi C., Rol E., Steele I. et al. GRB 080613: Faulkes telescope north optical candidate. // GRB Coordinates Network. 2008. Vol. 7872. P. 1.
154. Gotz D., Mereghetti S., Paizis A. et al. GRB 090107B: a long GRB localized by INTEGRAL. // GRB Coordinates Network. 2009. Vol. 8786. P. 1.
155. Gotz D., Mereghetti S., Paizis A. et al. GRB 090625B: a long GRB localized by INTEGRAL. // GRB Coordinates Network. 2009. Vol. 9572. P. 1.
156. Evans P. A. GRB 090902B: enhanced Swift-XRT position. // GRB Coordinates Network. 2009. Vol. 9871. P. 1.
157. Band D., Matteson J., Ford L. et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I - Spectral diversity // *Astrophys. J.* 1993. — August. Vol. 413. P. 281–292.
158. INTEGRAL software. <http://isdc.unige.ch/integral/analysis#Software>.
159. Paciesas W. S., Meegan C. A., von Kienlin A. et al. The Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Two Years // *Astrophys. J. Suppl.* 2012. — March. Vol. 199. P. 18. [arXiv:astro-ph.HE/1201.3099](https://arxiv.org/abs/1201.3099).

160. Zhang Z., Xie G. Z., Deng J. G., Jin W. Revisiting the characteristics of the spectral lags in short gamma-ray bursts // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2006. — December. Vol. 373. P. 729–732. [astro-ph/0604349](#).
161. Norris J. P., Marani G. F., Bonnell J. T. Connection between Energy-dependent Lags and Peak Luminosity in Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J.](#) 2000. — May. Vol. 534. P. 248–257. [astro-ph/9903233](#).
162. Norris J. P. Implications of the Lag-Luminosity Relationship for Unified Gamma-Ray Burst Paradigms // [Astrophys. J.](#) 2002. — November. Vol. 579. P. 386–403. [astro-ph/0201503](#).
163. Schaefer B. E. The Hubble Diagram to Redshift >6 from 69 Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J.](#) 2007. — May. Vol. 660. P. 16–46. [astro-ph/0612285](#).
164. Hakkila J., Giblin T. W., Norris J. P. et al. Correlations between Lag, Luminosity, and Duration in Gamma-Ray Burst Pulses // [Astrophys. J. Let.](#) 2008. — April. Vol. 677. P. L81–L84. [0803.1655](#).
165. Ukwatta T. N., Dhuga K. S., Stamatikos M. et al. The lag-luminosity relation in the GRB source frame: an investigation with Swift BAT bursts // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2012. — January. Vol. 419. P. 614–623. [arXiv:astro-ph.HE/1109.0666](#).
166. Dermer C. D. On Spectral and Temporal Variability in Blazars and Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J. Let.](#) 1998. — July. Vol. 501. P. L157–L161. [astro-ph/9805289](#).
167. Kocevski D., Liang E. The Connection between Spectral Evolution and Gamma-Ray Burst Lag // [Astrophys. J.](#) 2003. — September. Vol. 594. P. 385–389. [astro-ph/0207052](#).

168. Ryde F. Interpretations of gamma-ray burst spectroscopy. I. Analytical and numerical study of spectral lags // [Astron. and Astrophys.](#) 2005. — January. Vol. 429. P. 869–879. [astro-ph/0411206](#).
169. Salmonson J. D. On the Kinematic Origin of the Luminosity-Pulse Lag Relationship in Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J. Let.](#) 2000. — December. Vol. 544. P. L115–L117. [astro-ph/0005264](#).
170. Ioka K., Nakamura T. Peak Luminosity-Spectral Lag Relation Caused by the Viewing Angle of the Collimated Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J. Let.](#) 2001. — June. Vol. 554. P. L163–L167. [astro-ph/0105321](#).
171. Dermer C. D. Curvature Effects in Gamma-Ray Burst Colliding Shells // [Astrophys. J.](#) 2004. — October. Vol. 614. P. 284–292. [astro-ph/0403508](#).
172. Shen R.-F., Song L.-M., Li Z. Spectral lags and the energy dependence of pulse width in gamma-ray bursts: contributions from the relativistic curvature effect // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2005. — September. Vol. 362. P. 59–65. [astro-ph/0505276](#).
173. Lu R.-J., Qin Y.-P., Zhang Z.-B., Yi T.-F. Spectral lags caused by the curvature effect of fireballs // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2006. — March. Vol. 367. P. 275–289. [astro-ph/0509287](#).
174. Band D. L. Gamma-Ray Burst Spectral Evolution through Cross-Correlations of Discriminator Light Curves // [Astrophys. J.](#) 1997. — September. Vol. 486. P. 928–937. [astro-ph/9704206](#).
175. Preece R., Burgess J. M., von Kienlin A. et al. The First Pulse of the Extremely Bright GRB 130427A: A Test Lab for Synchrotron Shocks // [Science](#). 2014. — January. Vol. 343. P. 51–54. [arXiv:astro-ph.HE/1311.5581](#).

176. Scargle J. D. Studies in Astronomical Time Series Analysis. V. Bayesian Blocks, a New Method to Analyze Structure in Photon Counting Data // [Astrophys. J.](#) 1998. — September. Vol. 504. P. 405–418. [astro-ph/9711233](#).
177. Liddle A. R. Information criteria for astrophysical model selection // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2007. — May. Vol. 377. P. L74–L78. [astro-ph/0701113](#).
178. Foley S., McGlynn S., Hanlon L. et al. Global characteristics of GRBs observed with INTEGRAL and the inferred large population of low-luminosity GRBs // [Astron. and Astrophys.](#) 2008. — June. Vol. 484. P. 143–157. [0803.1821](#).
179. Grebenev S. A., Chelovekov I. V. Cosmic GRB 060428C detected in the field of view of the IBIS and SPI telescopes onboard the INTEGRAL observatory and its early afterglow // [Astronomy Letters](#). 2007. — December. Vol. 33. P. 789–796. [0710.0598](#).
180. Lebrun F., Leray J. P., Lavocat P. et al. ISGRI: The INTEGRAL Soft Gamma-Ray Imager // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. — November. Vol. 411. P. L141–L148. [astro-ph/0310362](#).
181. Lund N., Budtz-Jørgensen C., Westergaard N. J. et al. JEM-X: The X-ray monitor aboard INTEGRAL // [Astron. and Astrophys.](#) 2003. — November. Vol. 411. P. L231–L238.
182. Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V. et al. Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft // [Space Science Reviews](#). 1995. — February. Vol. 71. P. 265–272.
183. Revnivtsev M. G., Sunyaev R. A., Varshalovich D. A. et al. A Hard X-ray Survey of the Galactic-Center Region with the IBIS Telescope of the INTE-

- GRAL Observatory: A Catalog of Sources // *Astronomy Letters*. 2004. — June. Vol. 30. P. 382–389. [astro-ph/0402027](#).
184. Krivonos R., Revnivitsev M., Tsygankov S. et al. INTEGRAL/IBIS 7-year All-Sky Hard X-ray Survey. I. Image reconstruction // *Astron. and Astrophys.* 2010. — September. Vol. 519. P. A107. [arXiv:astro-ph.IM/1006.2463](#).
 185. Arnaud K. A. XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / Ed. by G. H. Jacoby, J. Barnes. Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 1996. P. 17.
 186. Mereghetti S., Gotz D., Borkowski J. et al. Possible GRB 030320 localized by INTEGRAL. // *GRB Coordinates Network*. 2003. Vol. 1941. P. 1.
 187. Paciesas W. S., Meegan C. A., Pendleton G. N. et al. The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog (Revised) // *Astrophys. J. Suppl.* 1999. — June. Vol. 122. P. 465–495. [astro-ph/9903205](#).
 188. Burenin R. A., Vikhlinin A. A., Gilfanov M. R. et al. GRANAT/SIGMA observation of the early afterglow from GRB 920723 in soft gamma-rays // *Astron. and Astrophys.* 1999. — April. Vol. 344. P. L53–L56. [astro-ph/9902006](#).
 189. Burenin R. A., Vikhlinin A. A., Terekhov O. V. et al. Afterglow of the gamma-ray burst of July 23, 1992, as observed by the SIGMA/Granat telescope // *Astronomy Letters*. 1999. — July. Vol. 25. P. 411–416.
 190. Tkachenko A. Y., Terekhov O. V., Sunyaev R. A. et al. Observations of the soft gamma-ray early afterglow emission from two bright gamma-ray bursts // *Astron. and Astrophys.* 2000. — June. Vol. 358. P. L41–L44. [astro-ph/0005293](#).

191. Arimoto M., Kawai N., Asano K. et al. Spectral-Lag Relations in GRB Pulses Detected with HETE-2 // [Publications of the Astronomical Society of Japan](#). 2010. — April. Vol. 62. P. 487–. [arXiv:astro-ph.HE/1002.3849](#).
192. Kalberla P. M. W., Burton W. B., Hartmann D. et al. The Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic HI. Final data release of the combined LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections // [Astron. and Astrophys.](#) 2005. — September. Vol. 440. P. 775–782. [astro-ph/0504140](#).
193. Mazets E. P., Golenetskii S. V., Aptekar R. L. et al. Cyclotron and annihilation lines in gamma-ray burst // [Nature](#). 1981. — April. Vol. 290. P. 378–382.
194. Goodman J. Are gamma-ray bursts optically thick? // [Astrophys. J. Let.](#) 1986. — September. Vol. 308. P. L47–L50.
195. Blinnikov S. I., Kozyreva A. V., Panchenko I. E. Gamma-ray bursts: When does a blackbody spectrum look non-thermal? // [Astronomy Reports](#). 1999. — November. Vol. 43. P. 739–747. [astro-ph/9902378](#).
196. Pe’er A. Temporal Evolution of Thermal Emission from Relativistically Expanding Plasma // [Astrophys. J.](#) 2008. — July. Vol. 682. P. 463–473. [0802.0725](#).
197. Pe’er A., Ryde F. A Theory of Multicolor Blackbody Emission from Relativistically Expanding Plasmas // [Astrophys. J.](#) 2011. — May. Vol. 732. P. 49. [arXiv:astro-ph.HE/1008.4590](#).
198. Göğüş E., Kouveliotou C., Woods P. M. et al. Temporal and Spectral Characteristics of Short Bursts from the Soft Gamma Repeaters 1806-20 and 1900+14 // [Astrophys. J.](#) 2001. — September. Vol. 558. P. 228–236. [astro-ph/0105110](#).

199. Götz D., Mereghetti S., Molkov S. et al. Two years of INTEGRAL monitoring of the soft gamma-ray repeater SGR 1806-20: from quiescence to frenzy // [Astron. and Astrophys.](#) 2006. — January. Vol. 445. P. 313–321. [astro-ph/0508615](#).
200. Amati L., Frontera F., Tavani M. et al. Intrinsic spectra and energetics of BeppoSAX Gamma-Ray Bursts with known redshifts // [Astron. and Astrophys.](#) 2002. — July. Vol. 390. P. 81–89. [astro-ph/0205230](#).
201. Stratta G., Pozanenko A., Atteia J.-L. et al. A multiwavelength study of Swift GRB060111B constraining the origin of its prompt optical emission // [Astron. and Astrophys.](#) 2009. — September. Vol. 503. P. 783–795. [arXiv:astro-ph.HE/0907.0087](#).
202. Kaneko Y., Preece R. D., Briggs M. S. et al. The Complete Spectral Catalog of Bright BATSE Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J. Suppl.](#) 2006. — September. Vol. 166. P. 298–340. [astro-ph/0601188](#).
203. Rossi A., Schulze S., Klose S. et al. The Swift/Fermi GRB 080928 from 1 eV to 150 keV // [Astron. and Astrophys.](#) 2011. — May. Vol. 529. P. A142. [arXiv:astro-ph.HE/1007.0383](#).
204. Zheng W., Shen R. F., Sakamoto T. et al. Panchromatic Observations of the Textbook GRB 110205A: Constraining Physical Mechanisms of Prompt Emission and Afterglow // [Astrophys. J.](#) 2012. — June. Vol. 751. P. 90. [arXiv:astro-ph.HE/1111.0283](#).
205. Rees M. J., Meszaros P. Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursts // [Astrophys. J. Let.](#) 1994. — August. Vol. 430. P. L93–L96. [astro-ph/9404038](#).
206. Pe’er A., Ryde F., Wijers R. A. M. J. et al. A New Method of Determining the Initial Size and Lorentz Factor of Gamma-Ray Burst Fireballs Using a

- Thermal Emission Component // [Astrophys. J. Let.](#) 2007. — July. Vol. 664. P. L1–L4. [astro-ph/0703734](#).
207. Ryde F., Pe’Er A., Nymark T. et al. Observational evidence of dissipative photospheres in gamma-ray bursts // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2011. — August. Vol. 415. P. 3693–3705. [arXiv:astro-ph.HE/1103.0708](#).
208. Volnova A. A., Pozanenko A. S., Gorosabel J. et al. GRB 051008: a long, spectrally hard dust-obscured GRB in a Lyman-break galaxy at $z \approx 2.8$ // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2014. — August. Vol. 442. P. 2586–2599. [arXiv:astro-ph.HE/1405.4139](#).
209. Marshall F., Barthelmy S., Cummings J. et al. GRB051008: Swift-BAT detection of a bright burst. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 4069. P. 1.
210. Barthelmy S. <http://gcn.gsfc.nasa.gov/>.
211. Ohno M., Takahashi T., Fukazawa Y. et al. GRB051008: Suzaku WAM observation of the prompt emission. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 4297. P. 1.
212. GRB051008 IBAS trigger. http://www.isdc.unige.ch/integral/ibas/cgi-bin/ibas_acc
213. Beloborodov A. M., Stern B. E., Svensson R. Power Density Spectra of Gamma-Ray Bursts // [Astrophys. J.](#) 2000. — May. Vol. 535. P. 158–166.
214. Pozanenko A. S., Loznikov V. M. [Aperiodic properties of Gamma-Ray Bursts](#) // Gamma-ray Bursts, 5th Huntsville Symposium / Ed. by R. M. Kippen, R. S. Mallozzi, G. J. Fishman. Vol. 526 of American Institute of Physics Conference Series. 2000. — September. P. 220–224.

215. Burrows D. N., Hill J. E., Nousek J. A. et al. The Swift X-Ray Telescope // [Space Science Reviews](#). 2005. — October. Vol. 120. P. 165–195. [astro-ph/0508071](#).
216. Perri M., Capalbi M., Burrows D. N. GRB 051008: early swift XRT analysis. // GRB Coordinates Network. 2005. Vol. 4071. P. 1.
217. Butler N. R. Refined Astrometry and Positions for 179 Swift X-Ray Afterglows // [Astrophys. J.](#) 2007. — March. Vol. 133. P. 1027–1033. [astro-ph/0611031](#).
218. Margutti R., Zaninoni E., Bernardini M. G. et al. The prompt-afterglow connection in gamma-ray bursts: a comprehensive statistical analysis of Swift X-ray light curves // [Monthly Notices Roy. Astron. Soc.](#) 2013. — January. Vol. 428. P. 729–742. [arXiv:astro-ph.HE/1203.1059](#).
219. Evans P. A., Willingale R., Osborne J. P. et al. The Swift Burst Analyser. I. BAT and XRT spectral and flux evolution of gamma ray bursts // [Astron. and Astrophys.](#) 2010. — September. Vol. 519. P. A102. [arXiv:astro-ph.IM/1004.3208](#).
220. Beuermann K., Hessman F. V., Reinsch K. et al. VLT observations of GRB 990510 and its environment // [Astron. and Astrophys.](#) 1999. — December. Vol. 352. P. L26–L30. [astro-ph/9909043](#).
221. Racusin J. L., Liang E. W., Burrows D. N. et al. Jet Breaks and Energetics of Swift Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglows // [Astrophys. J.](#) 2009. — June. Vol. 698. P. 43–74. [0812.4780](#).
222. Vol’Nova A. A., Pozanenko A. S., Rumyantsev V. V. et al. Host galaxy of the dark gamma-ray burst GRB 051008 // [Astrophysical Bulletin](#). 2010. — October. Vol. 65. P. 334–346.

223. Zhang B., Fan Y. Z., Dyks J. et al. Physical Processes Shaping Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglow Light Curves: Theoretical Implications from the Swift X-Ray Telescope Observations // *Astrophys. J.* 2006. — May. Vol. 642. P. 354–370. [astro-ph/0508321](#).
224. Nousek J. A., Kouveliotou C., Grupe D. et al. Evidence for a Canonical Gamma-Ray Burst Afterglow Light Curve in the Swift XRT Data // *Astrophys. J.* 2006. — May. Vol. 642. P. 389–400. [astro-ph/0508332](#).
225. Liang E.-W., Lü H.-J., Hou S.-J. et al. A Comprehensive Analysis of Swift/X-Ray Telescope Data. IV. Single Power-Law Decaying Light Curves Versus Canonical Light Curves and Implications for a Unified Origin of X-Rays // *Astrophys. J.* 2009. — December. Vol. 707. P. 328–342. [arXiv:astro-ph.HE/0902.3504](#).