

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

СВИНКИН ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**НАБЛЮДЕНИЯ КОРОТКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОНУС-ВИНД**

Специальность 01.03.02 —
«астрофизика и звездная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к. ф.-м. н.
Аптекарь Рафаил Львович

Санкт-Петербург — 2016

Содержание

Введение	5
Космические гамма-всплески	5
Мягкие гамма-репитеры	9
Актуальность темы диссертации	10
Цели работы	11
Научная новизна	12
Научная и практическая значимость	14
Основные положения, выносимые на защиту	14
Личный вклад	16
Структура диссертации	16
1 Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус-Винд	18
1.1 Функция отклика детектора	20
1.2 Калибровка спектров	21
1.3 Чувствительность детекторов	23
1.3.1 Фоновая скорость счёта	23
1.3.2 Расчёт минимального детектируемого потока	25
1.4 Заключение	28
2 Классификация гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд	30
2.1 Введение	30
2.2 Набор всплесков	35
2.3 Длительности	35
2.3.1 Автоматическая процедура определения длительности	36
2.3.2 Распределения по длительностям	37

2.3.3	Сравнение длительностей определенных по данным BATSE и KW	44
2.3.4	Набор коротких всплесков	45
2.4	Жесткости	46
2.5	Спектральные задержки	53
2.5.1	Методика вычисления спектральных задержек для кривых блеска KW	53
2.5.2	Спектральные задержки коротких всплесков	54
2.6	Сравнение классификаций на физические типы I и II всплесков KW с определенными красными смещениями	57
2.7	Заключение	58
3	Локализация источников гамма-всплесков методом триангуляции	62
3.1	Введение	62
3.2	Наблюдения	64
3.3	Методика триангуляции	66
3.4	Триангуляционные кольца	70
3.4.1	Кольца, полученные с использованием дальних КА	70
3.4.2	Кольца, полученные с использованием KW, <i>INTEGRAL</i> и околоземных КА	72
3.4.3	Проверка достоверности триангуляционных колец	85
3.4.4	Дополнительные ограничения локализаций	86
3.5	Результаты локализации	88
3.5.1	Пересечения колец	89
3.5.2	Сегменты	90
3.5.3	Полученные области локализации	90
3.6	Обсуждение особых событий	92
3.7	IPN локализация всплесков, наблюдаемых iPTF	94
3.8	Заключение	95
4	Поиск гигантских вспышек от мягких гамма-репитеров в ближайших галактиках среди коротких всплесков Конус-Винд	97

4.1	Введение	97
4.2	Чувствительность KW и IPN	100
4.3	Набор близких галактик	101
4.4	Поиск гигантских вспышек среди коротких гамма-всплесков, зарегистрированных Конус-Винд	105
4.5	Верхний предел на частоту гигантских вспышек	108
4.6	Заключение	110
5	Спектральный анализ коротких всплесков Конус-Винд	112
5.1	Введение	112
5.2	Методика	112
5.2.1	Многоканальные спектры	113
5.2.2	Трёхканальные спектры	114
5.3	Результаты	115
5.3.1	Спектральные параметры	115
5.3.2	Всплески с дополнительной спектральной компонентой	116
5.3.3	Интегральные и пиковые потоки	119
5.3.4	Короткие всплески с продлённым излучением	121
5.4	Обсуждение результатов	121
5.4.1	Сравнение коротких всплесков KW с BATSE и GBM	123
5.4.2	Короткие всплески с EE	125
5.4.3	Кандидаты в гигантские вспышки SGR	126
5.4.4	Неоднородность набора коротких всплесков	126
5.4.5	Короткие гамма-всплески от испарения первичных чёр- ных дыр	131
5.5	Заключение	132
	Заключение	133
	Литература	138

Введение

Космические гамма-всплески

Гамма-всплески (cosmic Gamma-Ray Bursts, далее — GRB) — кратковременные (от десятков миллисекунд до нескольких часов) импульсные потоки мягкого гамма-излучения (энергии от десятков до сотен кэВ) от космических источников, регистрируемые вне атмосферы Земли. Изучение GRB формируется при катастрофических процессах, связанных с разрушением исходного объекта. В связи с экстремальными пиковыми светимостями (до $\sim 10^{54}$ эрг с^{-1}) GRB наблюдаются на космологических расстояниях до ~ 13 млрд св. лет, что соответствует космологическому красному смещению до $z \sim 9$. Изучение этих уникальных явлений, которые содержат информацию об условиях в ранней Вселенной, является на протяжении нескольких последних десятилетий одной из важнейших и интереснейших задач астрофизики высоких энергий.

Впервые гамма-всплески были обнаружены в данных американских космических аппаратов (КА) *Vela* в 1967–1972 гг. [1]. Одно из первых независимых подтверждений открытия нового типа транзиентов было сделано приборами, изготовленными в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и установленными на советском КА Космос-461 [2]. В ходе экспериментов «Конус» на борту межпланетных миссий «Венера-11, -12, -13 и -14» в 1978–1983 гг. были выявлены основные наблюдательные свойства гамма-всплесков, которые в дальнейшем получили подтверждение в других экспериментах. Было изучено многообразие временных структур и обнаружено бимодальное распределение всплесков по длительности — наличие двух классов всплесков: длинных и коротких с границей по длительности около одной секунды [3]. Использование массивов детекторов с анизотропной угловой чувствительностью и триангуляционного метода локализации источников всплесков позволило установить, что распределение источников всплесков на небе является изотропным. Также было вы-

явлено, что спектр всплесков нетепловой и содержит фотоны с энергиями до ~ 1 МэВ и что жёсткость спектра (отношение скоростей счёта в двух различных энергетических диапазонах) и интенсивность излучения в ходе всплеска коррелируют [3, 4]. Позднее эти результаты были подтверждены экспериментом BATSE на борту *Compton Gamma Ray Observatory*, запущенной в 1991 г. Благодаря широкому спектральному диапазону BATSE (~ 30 кэВ–3 МэВ) было обнаружено, что спектр всплесков хорошо описывается двухстепенной функцией Банда [5] с изломом в области 100–1000 кэВ. При этом типичный спектр коротких всплесков более жесткий, чем у длинных [6]. Помимо функции Банда для описания гамма-всплесков широко используются две модели: степень с экспоненциальным завалом и простая степенная функция. В редких случаях для описания спектра необходима дополнительная компонента: степенная [см., например, 7] или чернотельная [см., например, 8].

В настоящее время также известно, что часть коротких всплесков сопровождается так называемым продлённым излучением в мягком гамма-диапазоне (*extended emission*, далее — ЕЕ), которое имеет меньшую интенсивность по сравнению с коротким начальным импульсом и значительную длительность (от десятков до сотен секунд) [9, 10, 11, 12].

В 1997 г. было установлено, что источники гамма-всплесков находятся на космологических расстояниях, благодаря обнаружению родительской галактики после детектирования рентгеновского и оптического послесвечения всплеска GRB 970228¹ инструментами на борту космической обсерватории *BeppoSAX* [13, 14].

Космологическое красное смещение обнаруженной галактики было оценено как $z = 0.2$ – 2.0 . Вскоре после этого для GRB 970508 было детектировано оптическое послесвечение [15] и определено красное смещение линий поглощения в его спектре $z = 0.835$ [16, 17], позднее было подтверждено, что они соответствуют родительской галактике всплеска [18]. Это впервые позволило

¹ Название гамма-всплеска обычно даётся в формате GRB YYMMDD, где YY — год, MM — месяц, DD — день регистрации всплеска. До начала 2010 г. второй и последующие гамма-всплески, зарегистрированные в один день, имели буквенные суффиксы «В», «С» и т.д. С 2010 г. первый зарегистрированный за текущие сутки всплеск имеет имя с суффиксом «А». Иногда всплеск с суффиксом «В» может предшествовать по времени детектирования всплеску «А», но быть обнаруженным в данных позже. В Главах 2, 3 и 5 также используется общепринятый формат GRBYYYYMMDD_Tsssss, где YYYYYMMDD — дата регистрации всплеска и sssss — время триггера Конус-Винд в секундах UT, округлённое до целых секунд.

точно оценить расстояние до источника всплеска ≈ 5 Гпк. У этого всплеска также впервые было зарегистрировано послесвечение в радио-диапазоне [19]. Следующее важное открытие произошло годом позже, когда в области локализации всплеска GRB 980425 была обнаружена сверхновая SN 1998bw типа Ic с красным смещением $z = 0.0085$, соответствующем расстоянию 35.6 Мпк, этот всплеск на текущий момент является наиболее близким из зарегистрированных. Пик оптической временной истории наблюдался на 10–20 день после гамма-всплеска. Обнаруженная сверхновая была необычной, моделирование показало, что она имела в ~ 10 раз большее энерговыделение чем обычная сверхновая (10^{51} эрг) и релятивистскую скорость расширения ~ 0.1 скорости света [20]. Энерговыделение GRB 980425, если он действительно связан с SN 1998bw, составило $\approx 7 \times 10^{47}$ эрг, что на несколько порядков меньше чем изотропное энерговыделение определенное для основной массы гамма-всплесков, зарегистрированных к настоящему времени ($\sim 10^{51}$ – 10^{54} эрг). На 2015 г. известно ≈ 30 сверхновых, ассоциированных с относительно близкими гамма-всплесками на $z = 0.0085$ –1.0. При этом красные смещения длинных всплесков распределены на существенно большем интервале $z = 0.0085$ –9.4 со средним $z \approx 2.3$.

Послесвечения гамма-всплесков имеют степенной закон спада интенсивности в различных диапазонах, от рентгена до радио. У части всплесков наблюдаются изломы в кривых блеска послесвечений, характер которых свидетельствует в пользу гипотезы о том, что регистрируемое излучение испускается узконаправленным ультрарелятивистским струйным выбросом (*jet*) с углом раскрытия ~ 3 – 10° [21]. Предсказание такого поведения послесвечений было сделано в работе [22] за два года до первого наблюдения излома у GRB 990510 [23]. С учётом фактора коллимации выделение электромагнитной энергии в длинных гамма-всплесках лежит в диапазоне 10^{48} – 10^{53} эрг.

В настоящее время известно, что источники длинных всплесков располагаются в галактиках с активным звездообразованием, причём проекции источников на родительские галактики сильно коррелирует с яркими областями в ультрафиолетовом диапазоне, а значительная часть близких ($z \leq 1$) всплесков была ассоциирована со сверхновыми, вызванными коллапсом ядра

массивной звезды [20]. Эти факты свидетельствуют о том, что прародителями длинных всплесков являются молодые массивные звёзды [см. обзор 24].

Послесвечения коротких гамма-всплесков оставались незарегистрированными вплоть до 2005 г., когда космической обсерваторией *Swift* было зарегистрировано рентгеновское послесвечение короткого всплеска GRB 050509B [25], всплеск был отождествлён с галактикой на $z = 0.225$. Трудность детектирования рентгеновских послесвечений коротких всплесков связана с тем, что их интенсивность, в среднем, примерно в семь раз меньше чем у длинных всплесков [24]. К настоящему времени, конец 2015 г., число коротких всплесков с отождествлёнными родительскими галактиками составляет около 40. Практически для всех этих всплесков красное смещение было определено на основе спектроскопии или фотометрии родительских галактик, за исключением GRB 090426 ($z = 2.609$) и GRB 130603B ($z = 0.356$), для которых z было получено на основе спектроскопии послесвечения. В отличие от длинных всплесков, ни у одного короткого всплеска не обнаружена сопровождающая его сверхновая. Источники коротких всплесков располагаются в галактиках с различной скоростью звездообразования и характеризуются большим разбросом расстояний от центра родительской галактики. В настоящее время считается, что короткие всплески происходят при слиянии компактных объектов: двух нейтронных звёзд или нейтронной звезды и чёрной дыры [24].

Прямым свидетельством в пользу модели слияния может служить обнаруженный избыток излучения на фоне степенного спада оптического послесвечения GRB 130603B, который был интерпретирован как распад обогащенного нейтронами вещества, выброшенного при слиянии нейтронных звёзд. На основе этого было сделано предположение, что короткие гамма-всплески могут являться основными источниками нуклеосинтеза в r -процессе [26].

Красные смещения коротких гамма-всплесков распределены в интервале $z = 0.1$ – 2.6 со средним $z \approx 0.5$. Изотропное энерговыделение коротких всплесков находится в диапазоне 10^{50} – 10^{52} эрг. Изломы кривых блеска послесвечения обнаружены только для нескольких коротких всплесков, при этом углы коллимации сопоставимы с полученными для длинных всплесков.

На декабрь 2015 г. красное смещение определено приблизительно для 400 гамма-всплесков, из них около 40 — короткие всплески.

Механизмы генерации гамма-излучения в источнике всплеска в настоящее время являются предметом дебатов. Наиболее популярная модель объясняет преобразование кинетической энергии релятивистской струи в гамма-излучение посредством внутренних ударных волн, образующихся в потоке из-за переменной активности источника. Подробное описание существующих моделей приведено в работе [27]. Помимо излучения электромагнитных волн гамма-всплески могут быть источниками космических лучей и нейтрино сверхвысоких энергий [28, 29].

Короткие гамма-всплески, вызванные слиянием компактных объектов, могут сопровождаться излучением гравитационных волн. Гравитационные волны от таких слияний предполагается регистрировать детекторами Advanced LIGO [30] и Advanced Virgo [31], которые будут способны зарегистрировать сигнал от слияния двух нейтронных звёзд на расстоянии в несколько сотен мегапарсек. В связи с регистрацией и локализацией источника гравитационных волн от слияния пары чёрных дыр [32], доказавшей работоспособность обсерватории Advanced LIGO, изучение свойств и получение локализаций коротких гамма-всплесков выходит на передний край астрофизики.

Мягкие гамма-репитеры (SGR)

Помимо коротких гамма-всплесков, источники которых находятся на космологических расстояниях, гамма-детекторы могут регистрировать гигантские вспышки мягких гамма-репитеров в близлежащих галактиках, которые по форме кривой блеска должны быть неотличимы от космологических коротких гамма-всплесков. Мягкие гамма-репитеры (SGRs) относятся к редкому классу нейтронных звёзд, проявляющих два типа активности в жестком рентгеновском диапазоне ($\sim 10\text{--}1000$ кэВ). Во время периода активности SGRs испускают короткие ($\sim 0.001\text{--}1$ с) жесткие рентгеновские всплески с пиковой светимостью $10^{38}\text{--}10^{42}$ эрг с^{-1} . Фаза активности может длиться от дней до года, после чего наступает длительная фаза затишья. Значительно

реже, возможно, один раз за время нахождения нейтронной звезды в стадии SGR, SGR может производить гигантские вспышки (GF), во время которых высвобождается значительная энергия $\sim (0.01-1) \times 10^{46}$ эрг [см. обзор 33]. На конец 2015 г. гигантские вспышки наблюдались только у трёх источников SGR 0526–66 в Большом Магеллановом Облаке, SGR 1900+14 и SGR 1806–20 в нашей Галактике. Идея о возможности наблюдения гигантских вспышек в ближайших галактиках впервые была высказана в работах [34, 35] обзор результатов поиска внегалактических GF приведён в работе [36].

Актуальность темы диссертации

К настоящему времени зарегистрировано несколько тысяч GRB, которые Феноменологически можно разделить на короткие и длинные с условной границей по длительности ~ 2 с. Количество коротких GRB составляет примерно 10–20% от полного наблюдаемого числа GRB. На основании параметров послесвечений GRB и их родительских галактик в работах [37, 38] была предложена схема классификации GRB на два физических типа: I (слияние компактных объектов) и II (коллапс ядра массивной звезды). В работе [38] показано, что на плоскости жёсткость-длительность GRB типа II располагаются в области длинных/мягких всплесков, а всплески типа I, в основном, расположены в области коротких/жестких событий и обладают незначительной спектральной задержкой, которая характеризует запаздывание излучения в более мягком диапазоне по отношению к излучению в более жестком диапазоне. Часть всплесков типа I представляет собой короткие GRB, сопровождающиеся так называемым продлённым излучением в мягком гамма-диапазоне. Число зарегистрированных подобных событий составляет около двух десятков. Таким образом, классификация GRB на основании характеристик излучения всплеска в мягком гамма-диапазоне может пролить свет на физическую природу источника излучения.

Короткие GRB, вызванные слиянием компактных объектов, могут сопровождаться излучением гравитационных волн и нейтрино. Определение максимально точных локализаций источников коротких GRB на небесной сфере

помогает сузить область поиска источников сопутствующего им неэлектромагнитного излучения и также является актуальной задачей. В настоящее время локализации с точностью лучше нескольких угловых минут получены всего для нескольких десятков коротких всплесков в основном благодаря возможностям рентгеновских телескопов космической обсерватории *Swift*. При отсутствии точной локализации направление на источник GRB можно получить путем анализа времени его регистрации далеко разнесенными космическими аппаратами (методом триангуляции).

В настоящее время зарегистрированы три гигантские вспышки SGR, при этом только для одной определены параметры начального импульса [39]. Поиск и изучение внегалактических GF важно для верификации физических моделей SGR.

В настоящее время число коротких GRB, зарегистрированных обсерваторией *Fermi* в широком диапазоне энергий (10 кэВ–40 МэВ, диапазон инструмента GBM), составляет около 150 событий, в спектрах только двух из них обнаружена дополнительная степенная компонента. Также было обнаружено 14 коротких гамма-всплесков с ЕЕ. Детальный анализ независимого набора данных необходим для уточнения спектральных характеристик коротких GRB, выявление новых коротких GRB с ЕЕ и обнаружение всплесков с дополнительными спектральными компонентами.

Эксперимент Конус-Винд [40] проводится ФТИ им. А.Ф. Иоффе на протяжении более 20 лет, см. Главу 1 с подробным описанием эксперимента. С 1994 по 2015 гг. в нем было зарегистрировано ~ 2500 гамма-всплесков в широком спектральном диапазоне ~ 20 кэВ–20 МэВ, из них ~ 400 коротких, что на 2015 год является одним из наиболее обширных наборов коротких всплесков, зарегистрированных одним экспериментом. Подробный анализ данного набора позволяет значительно расширить имеющийся объем наблюдательных данных по коротким GRB, что является крайне актуальной задачей в контексте исследования процессов генерации излучения в коротких GRB и построения моделей их источников.

Цели работы

Цель настоящей работы заключается в изучении локализаций, временных и спектральных характеристик коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, и выявлении связи этих характеристик с физической природой источника всплеска (коллапс массивной звезды, слияние двух компактных объектов или гигантская вспышка гамма-репитера).

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. исследование чувствительности детекторов Конус-Винд, анализ изменения их характеристик и фоновой обстановки со временем;
2. классификация зарегистрированных гамма-всплесков на основании параметров кривых блеска и спектральной жесткости в мягком гамма-диапазоне и выделение набора коротких гамма-всплесков;
3. получение локализаций коротких гамма-всплесков методом триангуляции;
4. поиск в полученном наборе коротких всплесков гигантских вспышек мягких гамма-репитеров в ближайших галактиках;
5. спектральный анализ коротких гамма-всплесков и определение наблюдаемой энергетике событий.

Научная новизна

Следующие основные результаты получены впервые:

1. Проанализирован набор гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд за первые 15 лет непрерывных наблюдений с 1994 г. по 2010 г. Для всех всплесков определены параметры временных историй: длительности, жесткости и спектральные задержки. Соискателем предложена независимая методика определения физического типа источника всплеска на основе полученных параметров.

2. Создан каталог локализаций 271 короткого гамма-всплеска. В ходе работы 165 всплесков локализованы впервые и 86 локализаций, полученных другими космическими обсерваториями, были существенно уточнены.
3. На основе составленного каталога локализаций соискателем независимо получен верхний предел на частоту гигантских вспышек мягких гамма-репитеров.
4. Создан каталог спектральных и энергетических параметров 293 коротких гамма-всплесков. Каталог содержит наиболее обширный набор коротких всплесков, исследованных в широком диапазоне энергий 10 кэВ–10 МэВ. Соискателем обнаружено три новых коротких GRB с дополнительной степенной компонентой в спектре, ранее было известно только два таких всплеска.
5. В данных эксперимента Конус-Винд соискателем обнаружено 30 коротких всплесков с продленным излучением (ЕЕ), что является наиболее широкой выборкой подобных событий. Спектральный анализ 21 короткого всплеска с продленным излучением подтверждает присутствие значительной доли событий с жестким ЕЕ. В том числе обнаружено одно событие с характерной энергией выше 2 МэВ, что существенно выше значений, известных из более ранних исследований.
6. Результаты временного и спектрального анализа, проведенного соискателем, коротких гамма-всплесков, зарегистрированных Конус-Винд, дают независимое подтверждение неоднородности природы источников таких событий.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных при анализе данных космического эксперимента Конус-Винд подтверждается:

1. Использованием нескольких независимых и взаимозаменяемых методов обработки экспериментальных данных.

2. Интенсивной кооперацией с экспериментами *Swift*, *Fermi* и др., совместным анализом общих событий, показавшим применимость используемых методик.

Научная и практическая значимость

1. Анализ долговременной эволюции параметров эксперимента Конус-Винд может быть использован для планирования долговременных космических экспериментов на основе сцинтилляционных детекторов.
2. Каталог локализаций коротких GRB может быть использован при решении широкого круга задач современной астрофизики, таких как ретроспективный поиск гравитационных волн, потоков нейтрино высоких энергий и гигантских вспышек внегалактических SGR.
3. Результаты спектрального анализа обширной выборки коротких GRB в широком спектральном диапазоне важны для оценки теоретических моделей генерации гамма-излучения в источниках всплесков.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод классификации гамма-всплесков по данным эксперимента Конус-Винд на основе длительности и жесткости излучения всплеска, а также величин спектральных задержек.
2. Каталог локализаций коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд с 1994 г. по 2010 г.
3. Результаты поиска гигантских вспышек от мягких гамма-репитеров в близлежащих галактиках по данным эксперимента Конус-Винд.
4. Каталог спектральных и временных параметров коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд.
5. Обнаружение дополнительной степенной компоненты в спектрах трёх коротких GRB, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд.

6. Временные и спектральные характеристики коротких GRB с продленным излучением, зарегистрированные в эксперименте Конус-Винд.

Апробация работы и публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2007 по 2015 годы и опубликованы в 4 статьях в реферируемых журналах и в тезисах 5 конференций.

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. V. D. Pal'shin, K. Hurley, D. S. Svinkin et al. Interplanetary Network Localizations of Konus Short Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J. Suppl.* 2013. Vol. 207. id 38;
2. K. Hurley, ... , D. S. Svinkin et al. The Interplanetary Network Supplement to the Fermi GBM Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J. Suppl.* 2013. Vol. 207. id 39;
3. Leo P. Singer, ... , D. Svinkin, et al. The Needle in the 100 deg² Haystack: Uncovering Afterglows of Fermi GRBs with the Palomar Transient Factory // *Astrophys. J.* 2015. Vol. 806 p. 52;
4. D. S. Svinkin, K. Hurley, R. L. Apteкар, S. V. Golenetskii, D. D. Frederiks A search for giant flares from soft gamma-repeaters in nearby galaxies in the Konus-Wind short burst sample // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2015. Vol. 447, 1. p. 1028;

Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях:

1. «Астрофизика высоких энергий» HEA2010, Москва, ИКИ РАН, 12.2010 (стендовый доклад);
2. The 2011 Fermi Symposium, Rome, Italy, 05.2011 (стендовый доклад);
3. IX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, ИКИ РАН, 04.2012 (устный доклад);

4. Explosive Transients: Lighthouses of the Universe, Santorini, Greece, 09.2013 (стендовый доклад);
5. Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: Twenty Years of Konus-Wind Experiment, St. Petersburg, Russia, 09.2014 (устный доклад)

и на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе и ГАИШ МГУ.

Личный вклад

Соискатель совместно с сотрудниками лаборатории экспериментальной астрофизики разработал методику классификации гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд. Также автор, совместно с В. Д. Пальшиным и К. Орли (K. Hurley), провел обширную работу по поиску гамма-всплесков в данных других космических экспериментов и по получению локализаций всплесков методом триангуляции. Поиск внегалактических гигантских вспышек от источников мягких повторяющихся гамма-всплесков соискатель провёл совместно с соавторами. Работа по спектральному анализу коротких гамма-всплесков выполнена, главным образом, соискателем. Также соискатель успешно апробировал свои работы на российских и международных конференциях.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 155 страниц, включая 33 рисунка, 13 таблиц. Библиография включает 206 наименований на 18 страницах.

Во **введении** приведено краткое описание текущего понимания природы гамма-всплесков, рассматривается актуальность данной работы, а также поставленные задачи, обсуждается научная новизна задач и полученных результатов, оценивается научная значимость и применимость проведенных исследований. Также сформулированы основные результаты и положения,

выносимые на защиту, и приведен список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена описанию эксперимента Конус-Винд и условий наблюдений, рассматривается эволюция параметров эксперимента со временем и оценивается чувствительность детекторов к гамма-всплескам с различной длительностью и спектром.

В **главе 2** описывается методика классификации гамма-всплесков на основе параметров излучения в гамма-диапазоне, а также на основе многоволновых наблюдений послесвечений и родительских галактик. Для набора всплесков с определённым физическим типом, зарегистрированных Конус-Винд, сопоставляется классификация на основе излучения в гамма-диапазоне и физическая классификация. Определяются и обосновываются критерии отбора коротких всплесков.

Глава 3 посвящена локализации выбранных коротких всплесков методом триангуляции. Глава содержит описания космических аппаратов сети IPN, подробное изложение методики триангуляции, а также результаты локализации 271 короткого всплеска.

Глава 4 посвящена поиску гигантских вспышек от мягких гамма-репитеров, расположенных в близких (ближе 30 Мпк) галактиках. В главе оценивается чувствительность Конус-Винд к гигантским вспышкам, описывается набор близких галактик, приводятся результаты поиска наложений локализаций всплесков на галактики. В заключении приводится оценка частоты гигантских вспышек различной интенсивности.

В **главе 5** представлен спектральный анализ 293 коротких всплесков, зарегистрированных Конус-Винд с 1994 по 2010 гг. Описывается методика спектрального анализа и вычисления энергетических характеристик, приводятся модели, описывающие спектр большинства гамма-всплесков. Сообщается об обнаружении трёх всплесков с дополнительной степенной спектральной компонентой. Приводятся результаты анализа набора 30 коротких всплесков с продленным излучением, спектральный анализ 21 из них подтверждает присутствие значительной доли событий с жестким продленным излучением. **Заключение** содержит краткий обзор полученных в диссертации результатов.

Глава 1

Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус-Винд

Рассматриваемые в работе данные получены с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра Конус, предназначенного для изучения космических гамма-всплесков, мягких гамма-репитеров и солнечных вспышек, установленного на космическом аппарате (КА) *GGS-Wind*, лаборатории NASA по изучению солнечно-земных связей. КА был запущен в 1994 году на сложную высокоапогейную орбиту с удалением до двух миллионов километров от Земли. В настоящее время КА находится на орбите вокруг точки либрации L_1 системы Земля-Солнце на расстоянии около 1.5 миллионов километров от Земли. Подробное описание гамма-спектрометра Конус-Винд (KW) дано в работе [40].

Эксперимент Конус-Винд состоит из двух одинаковых NaI(Tl) сцинтилляционных гамма-спектрометров (S1 и S2), расположенных на противоположных сторонах стабилизированного вращением КА *Wind*. Схематический вид КА и детектора приведён на рис. 1.1. Оси полей зрения детекторов направлены в полюса эклиптики, при этом S1 направлен на южный полюс эклиптики, S2 на северный. Таким образом, обеспечивается обзор всей небесной сферы. Каждый детектор состоит из кристалла NaI(Tl) диаметром 13 см и высотой 7.5 см, помещенного в алюминиевый контейнер. Эффективная площадь одного детектора составляет $\sim 80\text{--}160\text{ см}^2$ в зависимости от энергии падающего фотона и угла падения. Для снижения энергетического порога регистрации входные окна алюминиевых контейнеров кристаллов выполнены из бериллия толщиной 1.5 мм. Кристалл просматривается фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) через свинцовое стекло толщиной 19 мм, служащее для снижения фонового излучения от космического аппарата. Описанные параметры

эксперимента дают возможность непрерывно производить наблюдения транзиентов, таких как гамма-всплески и мягкие гамма-репитеры, в условиях исключительно стабильного фона, без затенения части небесной сферы Землей и влияния ее радиационных поясов.

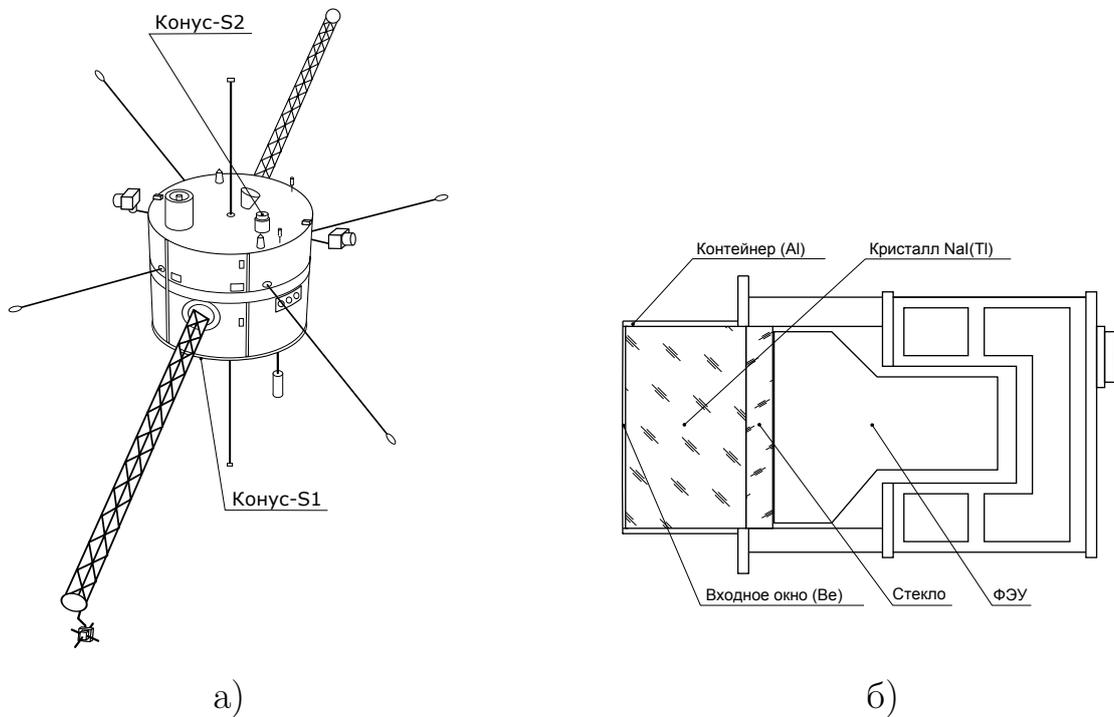


Рисунок 1.1: Схематическое изображение КА *GGS-Wind* (а) и детектора KW (б).

Детекторы KW работают независимо друг от друга в двух режимах наблюдений: фоновом и триггерном. Переход в триггерный режим происходит при статистически значимом превышении скорости счета над фоном $\approx 9\sigma^1$, где σ — стандартное отклонение фона, на интервале 1 с или 140 мс в энергетическом диапазоне 50–200 кэВ. При этом скорость счёта фона определяется на предшествующем интервале длиной 30 с. В фоновом режиме ведется непрерывная запись временной истории в трёх каналах G1 (13–50 кэВ), G2 (50–200 кэВ) и G3 (200–760 кэВ) с временным разрешением 2.944 с². В триггерном режиме запись временной истории ведется в тех же энергетических

¹ KW имеет три аналоговых интенсиметра с временами интегрирования 30 с, 1 с и 0.140 с. Триггер вырабатывается, если напряжение в интенсиметрах с масштабами 1 с или 0.140 с превышает напряжение в интенсиметре с временем интегрирования 30 с. При этом число отсчётов явно не вычисляется.

² В некоторую часть времени, когда КА *Wind* находился недалеко от Земли, запись велась с разрешением 1.477 с.

каналах с временным разрешением от 2 до 256 мс в интервале от -512 мс до 229.632 с относительно времени срабатывания триггера.

Спектральные данные представляют собой 64 спектра. Первые четыре имеют фиксированное время накопления 64 мс. Для последующих 52-х спектров время накопления изменяется от 0.256 до 8.192 с, в зависимости от текущей скорости счёта в окне G2. Последние 8 спектров имеют время накопления 8.192 с. В результате минимальное время измерения спектров составляет 79.104 с, а максимальное — 491.776 с. Измерение спектров ведётся тремя анализаторами амплитуд импульсов ФЭУ, соответствующих двум перекрывающимся энергетическим диапазонам: РНА1 (13–760 кэВ), РНА2 (0.16–10 МэВ) и РНА3 (дублирует РНА1), каждый из которых разделён на 63 квазилогарифмических энергетических канала. Изменения временного разрешения по ходу записи временной истории и спектров связаны с существенными ограничениями на объем телеметрии, выделенной для эксперимента Конус (55 бит с^{-1}). Результаты измерений записываются в оперативную память прибора. По окончании триггерного режима информация медленно переписывается в бортовую память, на что уходит 1–1.5 часа. На время перезаписи работа прибора в фоновом режиме прекращается. В это время резервирующая система продолжает измерения скорости счета в окне G2 по каналу служебной телеметрии с разрешением 3.680 с.

1.1 Функция отклика детектора

Попадая в детектор, гамма-квант передаёт часть или всю свою энергию веществу сцинтиллятора, которая преобразуется в световую вспышку, регистрируемую ФЭУ. Заряд, собранный с анода ФЭУ, преобразуется в импульс напряжения, который усиливается и формируется для получения максимального отношения сигнал-шум, после чего амплитуда импульса измеряется аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

В общем виде исходный спектр излучения $f(E)$ связан с аппаратным спектром амплитуд импульсов $C(i)$ соотношением:

$$C(i) = \int_0^{\infty} f(E)G(E, i)dE, \quad (1.1)$$

где $G(E, i)$ — функция отклика детектора, которая описывает вероятность кванту с энергией E дать отсчёт в канал АЦП с номером i . На практике интегрирование заменяют суммированием, для KW функция отклика рассчитывается для 255 значений энергии в диапазоне 5 кэВ–30 МэВ и 20 углов падения от 0° до 95° с шагом 5° .

В общем случае невозможно получить исходный спектр $f(E)$, зная $C(i)$, из уравнения 1.1. Эта проблема решается выбором физически обоснованной спектральной модели и определением её параметров подгонкой под аппаратный спектр. Подгонка осуществляется методом минимизации

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (C(i) - C_M(i))^2 / C(i) , \quad (1.2)$$

где $C(i)$ — число отсчётов в канале i , $C_M(i)$ — предсказанное моделью число отсчетов в канале, полученное свёрткой модели с функцией отклика (выражение 1.1).

Расчет матрицы отклика KW производился с помощью библиотеки Geant4 [41]. Подробное описание методики расчета матриц отклика детекторов KW методом Монте-Карло и используемых процедур восстановления фотонных спектров падающего излучения приведены в работе [42].

1.2 Калибровка спектров

Реальные границы энергетических диапазонов изменяются со временем в сторону увеличения нижнего порога энергии регистрируемых гамма-квантов, это связано с накоплением радиационных дефектов в детекторе под воздействием космических лучей и деградацией фотокатода ФЭУ. Определить реальное значение границ диапазонов можно благодаря наличию в спектрах фоновых линий 186 кэВ, 511 кэВ и 1460 кэВ.

Линия 186 кэВ связана с превращением изотопа ^{123}I , образующегося в сцинтилляторе под действием космических лучей, в ^{123}Te посредством электронного захвата, $T_{1/2} = 13$ часов. Ядро ^{123}Te образуется в возбужденном состоянии. Возбуждение с наибольшей вероятностью снимается излучением γ -кванта с энергией 159 кэВ. Заполнение вакансии на К-оболочке происходит с излучением рентгеновских K_α линий с энергиями ≈ 27 кэВ.

Линия 511 кэВ связана с аннигиляцией позитронов после образования электрон-позитронных пар в материалах космического аппарата фоновыми гамма-квантами с энергиями > 1022 кэВ.

Наиболее интенсивная линия 1460 кэВ сопровождает распад радиоактивного изотопа ^{40}K , содержащегося в стекле, соединяющим кристалл и ФЭУ. Изотоп имеет два канала распада: β^- в ^{40}Ca с вероятностью 89.3% и электронный захват в ^{40}Ar с вероятностью 10.7%. Время полураспада $T_{1/2} = 1.2 \times 10^9$ лет. Ядро ^{40}Ar образуется в возбужденном состоянии. Возбуждение с наибольшей вероятностью снимается излучением гамма-кванта с энергией 1460 кэВ.

Для автоматической калибровки спектров автором настоящей работы была разработана процедура поиска и аппроксимации линии 1460 кэВ в аппаратных спектрах KW. Калибровка РНА2 выполнялась непосредственно по положению линии 1460 кэВ. Положение границ РНА1 определялось по перекрытию с РНА2, таким образом чтобы спектр отсчетов в РНА1 наилучшим образом соответствовал спектру в РНА2 на основании статистики χ^2 . Разработанный метод позволяет получать калибровки для большинства регистрируемых всплесков.

Изменение границ энергетического диапазона KW со временем представлено на рис. 1.2. Резкие изменения границ в 1994–1996 годах связаны с изменением коэффициента усиления по команде с Земли. Дальнейший сдвиг границ диапазонов связан с деградацией детекторов. Скачкообразные изменения границ с последующей релаксацией к предшествующему тренду связаны потоками протонов высоких энергий, ускоренных в мощных солнечных вспышках класса «X» (см. рис. 1.3 а). Годичные изменения границ диапазонов на $\approx 3\%$, хорошо заметные в 2006–2012 гг. (рис. 1.3 б), синхронные с вариациями температуры детекторов при движении КА *Wind* по орбите вокруг Солнца. Однако, изменение границ не связано напрямую с температурой детекторов, так как годичный максимум значений границ приходится на начало сентября, а минимум температуры — на начало июля.

Этот эффект гораздо сильнее зависимости световыхода сцинтиллятора NaI(Tl) от температуры и имеет противоположное направление. Зависимость световыхода NaI(Tl) от температуры эффективно сдвигает линию в младшие

каналы при росте температуры (реальные значения границ каналов увеличиваются). При этом зависимость положения фотопика 662 кэВ (^{137}Cs) от температуры составляет не более $-0.6\%/1^\circ\text{C}$ [43].

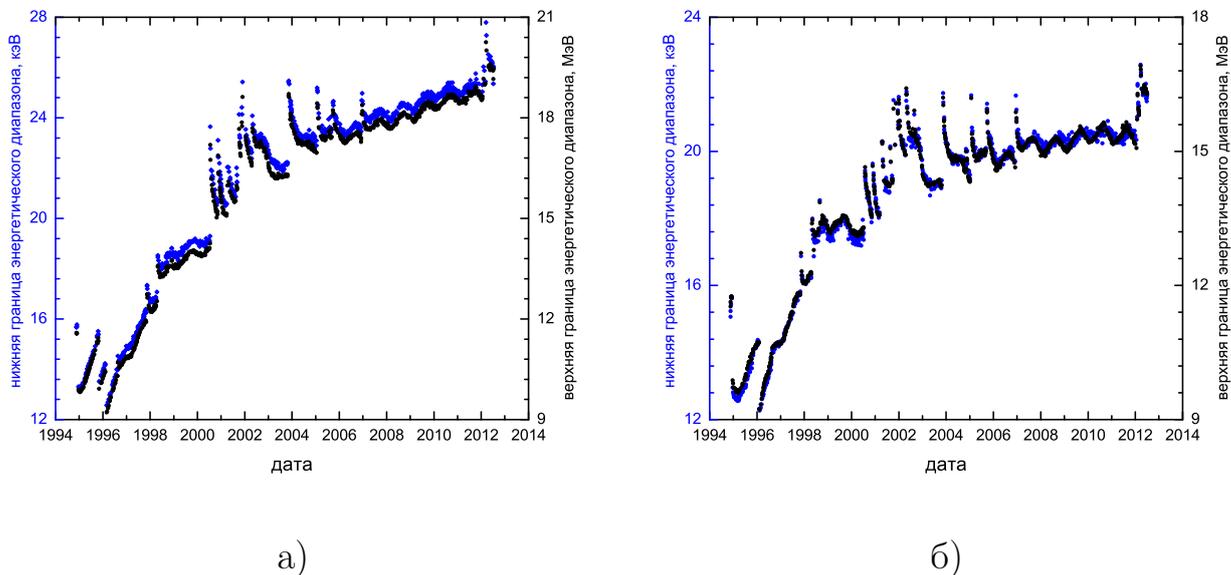


Рисунок 1.2: Изменение со временем границ энергетического диапазона для детекторов S1 (а) и S2 (б).

1.3 Чувствительность детекторов

Под чувствительностью детектора понимается минимальный интегральный поток S [эрг см $^{-2}$], который вызовет превышение фона в канале детектора на заданном временном интервале на заданное число стандартных отклонений фона. При этом искомый поток будет зависеть от формы спектра падающего излучения, угла падения на детектор и фоновой скорости счёта детектора.

1.3.1 Фоновая скорость счёта

Уровень фона KW благодаря нахождению прибора в межпланетном пространстве может оставаться постоянным на протяжении нескольких дней в периоды низкой солнечной активности. При анализе временных историй большинства гамма-всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме,

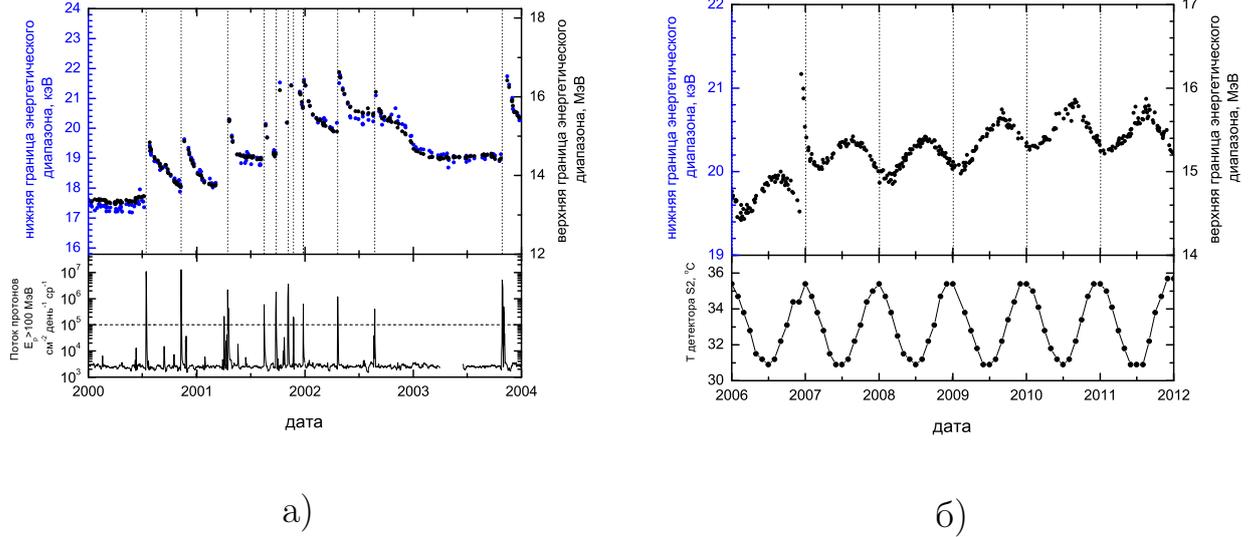


Рисунок 1.3: Изменение со временем границ энергетического диапазона детектора S2 (подробно). Скачкообразные изменения границ диапазона в 2000–2003 гг. при облучении протонами с $E > 100$ МэВ (а). Годичные изменения границ диапазонов в 2006–2011 гг., связанные с вариацией температуры детекторов при движении КА *Wind* по орбите вокруг Солнца (б).

фон аппроксимировался постоянным значением на интервале от $T_0 - 1000$ с до $T_0 - 250$ с, где T_0 — время срабатывания триггера. Значительный отступ от триггерного времени связан с тем, что в случае, если всплеск имеет плавное нарастание интенсивности, триггер срабатывает значительно позже начала всплеска, и значительная часть всплеска лежит вне триггерной записи.

Для подтверждения постоянства фона на заданном интервале проверялась гипотеза о том, что числа отсчётов в 2.944 секундных интервалах измерения (бинах) имеют гауссово распределение, со средним равным среднему числу отсчётов в бинах \bar{N} и стандартным отклонением $\sqrt{\bar{N}}$. Для проверки гипотезы использовался критерий Колмогорова-Смирнова с уровнем значимости 0.01 [44]. Если гипотеза принималась, то фон считался равным вычисленному среднему. Если гипотеза отвергалась, то интервал сокращался на один бин со стороны наиболее удалённой от T_0 и процедура повторялась пока не обнаруживался интервал с постоянным фоном или длительность интервала не достигала минимально допустимого значения 30 с. Для большинства

всплесков длина фонового интервала равна 750 с, менее 1% всплесков имеют малую длину фонового интервала 30–100 с.

Уровни фона в трех диапазонах детекторов S1 и S2 различаются, что связано с различием границ диапазонов детекторов. Скорости счёта фона на 2015 г. и их характерные ошибки и относительное изменение по сравнению с 1994 г. приведены в таблице 1.1. В периоды повышенной солнечной активности наблюдались сильные кратковременные вариации фона. Изменение уровней фона со временем представлено на рис. 1.4. Вариация фона в окне G3 хорошо отражает долговременную вариацию потока космических лучей в ходе 11-летнего солнечного цикла.

Таблица 1.1: Фоновая скорость чёта в детекторах KW

каналы	скорость счёта, отсч с ⁻¹		характерная ошибка, отсч с ⁻¹	относительное изменение, % (1994–2015 гг.)
	S1	S2		
G1	950	1050	1.3	20
G2	300	350	0.7	100
G3	150	130	0.5	100

1.3.2 Расчёт минимального детектируемого потока

Зная уровень фона и форму спектра, можно вычислить интегральный поток S , который даст превышение в k стандартных отклонений (σ) над фоном на временном интервале ΔT в одном из каналов G1, G2 или G3, или их комбинации. Для расчёта S использовались две функции, широко применяемые для моделирования спектров гамма-всплесков: степенной закон с экспоненциальным обрезанием (cutoff power law, CPL)

$$\frac{dN}{dE} = A \left(\frac{E}{E_n} \right)^\alpha \exp \left(-\frac{E}{E_0} \right), \quad (1.3)$$

где A — амплитуда [фотоны см⁻² с⁻¹ кэВ⁻¹], α — показатель степени, E_0 — энергия обрезания спектра, $E_n = 100$ кэВ — нормировочная энергия, и модель

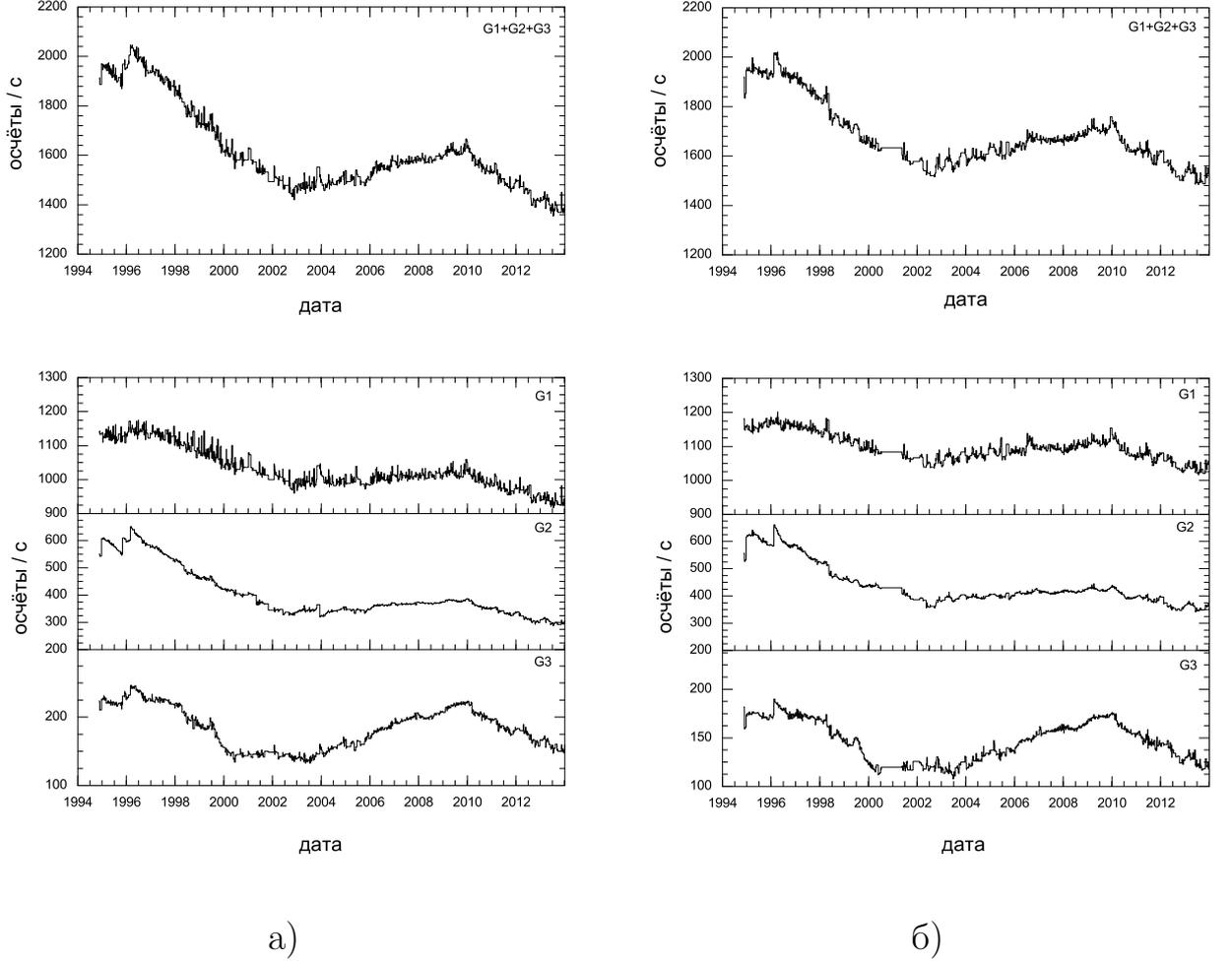


Рисунок 1.4: Изменение со временем уровней фона детекторов S1 (а) и S2 (б). Кратковременные повышения фона, связанные с потоками частиц от Солнца удалены.

Банда (Band) [5]

$$\frac{dN}{dE} = A \begin{cases} \left(\frac{E}{E_n}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), & \text{если } E < (\alpha - \beta)E_0 \\ \left(\frac{E}{E_n}\right)^\beta \left[(\alpha - \beta) \left(\frac{E_0}{E_n}\right)\right]^{(\alpha - \beta)} \exp(\beta - \alpha), & \text{если } E \geq (\alpha - \beta)E_0 \end{cases}, \quad (1.4)$$

здесь β — показатель степени в области больших энергий, характерное значение которого $\beta = -2.5$ [45, 46]. Энергия, на которую приходится максимум в спектре $EF_E = E^2 dN/dE$ равна $E_p = (\alpha + 2)E_0$.

На основе заданных спектральных параметров модели и единичной нормировки $A = 1$ вычислялся поток F [эрг см⁻² с⁻¹]

$$F = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \left(\frac{dN}{dE}\right) dE. \quad (1.5)$$

Используя ту же модель, вычислялась скорость счёта от источника R_{src} в заданном канале (G1, G2 или G3, или их комбинации) путём свёртки модели с трёхканальной матрицей отклика. Интегральный поток S , который даст превышение на k стандартных отклонений фона σ над фоном на интервале ΔT вычислялся по формуле $S = k(F/R_{\text{src}})\sqrt{R_{\text{bg}}\Delta T}$, где R_{bg} — фоновая скорость счёта в канале. Формула представляет собой простой пересчёт порогового числа отсчётов в интегральный поток.

Зависимость интегрального потока S в диапазоне 20 кэВ–10 МэВ для $k = 9$ и $\Delta T = 1$ с от параметров спектральных моделей показаны на рис. 1.5. Расчёт S был проведён для уровней фона R_{bg} : 1000 отсч с^{-1} , 350 отсч с^{-1} и 150 отсч с^{-1} для G1, G2 и G3, соответственно, и границ каналов G1 (20–80 кэВ), G2 (80–300 кэВ) и G3 (300–1200 кэВ), близких к текущим значениям, и угла падения на детектор 60° .

Для канала G2, на основании которого вырабатывается триггер, модель Банда даёт

$$S(20 \text{ кэВ}–10 \text{ МэВ}) \approx 1 \times 10^{-6} \left(\frac{k}{9}\right) \left(\frac{R_{\text{bg}}\Delta T}{350 \text{ отсч } \text{с}^{-1} \cdot 1 \text{ с}}\right)^{1/2} \text{ эрг } \text{см}^{-2}, \quad (1.6)$$

где k — значимость детектирования в σ , для всплесков с $E_p \lesssim 500$ кэВ. Для всплесков, чей спектр описывается моделью CPL (без степенного «хвоста») подобная чувствительность достигается в диапазоне $30 \lesssim E_p \lesssim 800$ кэВ. Для короткого триггерного интервала 140 мс и $k = 9$ порог составляет $\approx 4 \times 10^{-7}$ эрг см^{-2}

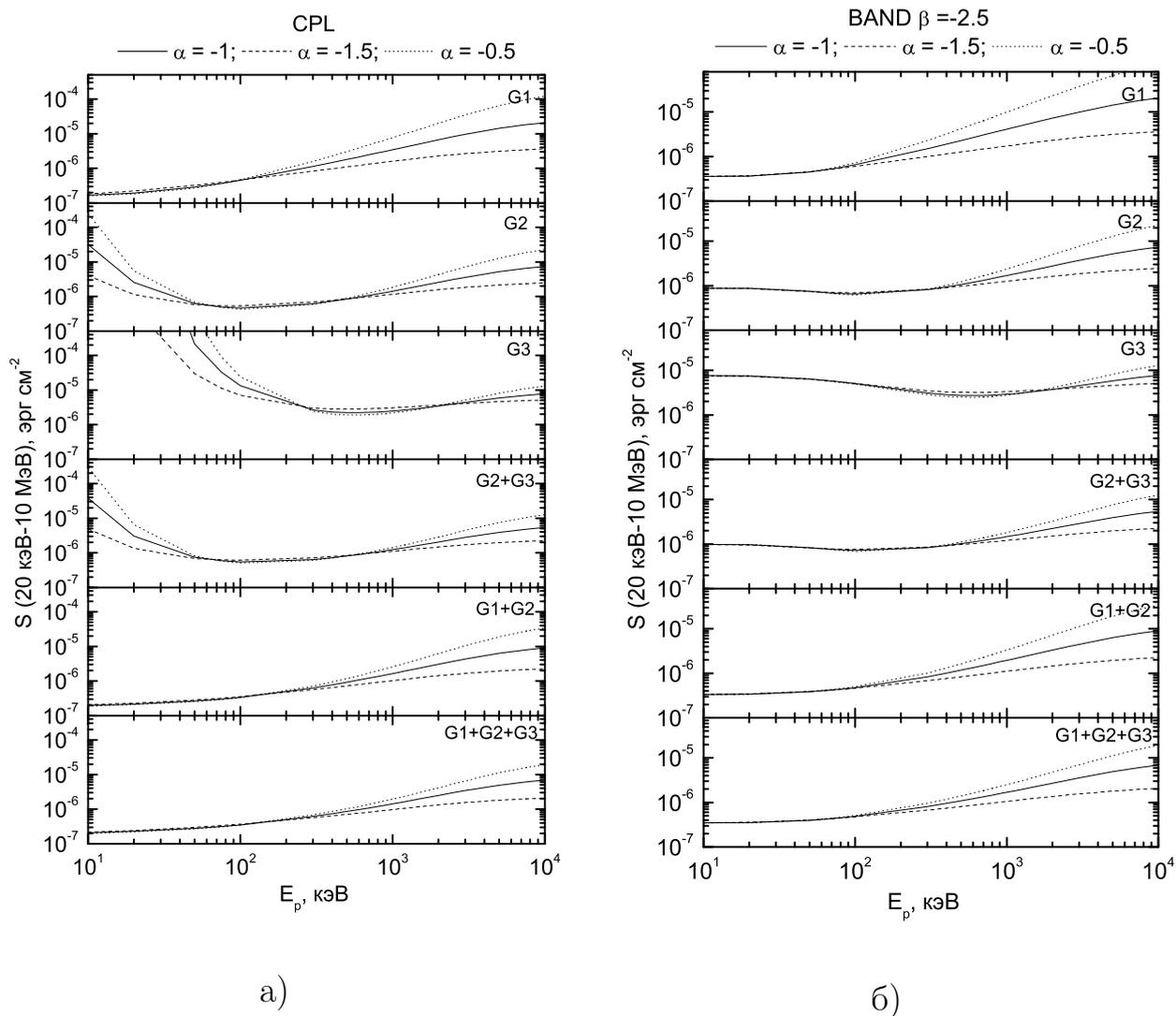


Рисунок 1.5: Минимальные интегральные потоки в диапазоне 20 кэВ–10 МэВ, необходимые для детектирования всплеска на уровне значимости 9σ для спектральной модели CPL с показателями степеней $\alpha = -0.5$, $\alpha = -1$ и $\alpha = -1.5$ (а) и модели Band с теми же значениями α и $\beta = -2.5$ (б).

1.4 Заключение

В данной главе описана методика калибровки спектрометра Конус-Винд и определения параметров спектральных моделей. Оценена чувствительность KW.

Получены следующие результаты:

1. Исследован дрейф параметров KW со временем на протяжении более 20 лет.

2. Оценен порог срабатывания триггера KW, равный $\sim 3 \times 10^{-7} - 10^{-6}$ эрг см⁻², в зависимости от временного масштаба и параметров спектра всплеска.

Гамма-спектрометры на основе сцинтиллятора NaI(Tl) широко применяются в астрофизических исследованиях. Изучение изменения параметров KW на протяжении более 20 лет необходимо для анализа текущих данных KW и планирования будущих экспериментов. Благодаря положению KW в межпланетном пространстве со стабильным фоном излучения и практически непрерывной записи скорости счёта гамма-квантов (доля времени наблюдения KW, отнесённая ко всему времени работы, составляет примерно 95%), полученную в диссертации методику оценки чувствительности KW можно использовать для оценки верхних пределов потоков гамма-излучения от транзитных событий, наблюдаемых в других диапазонах длин волн, к примеру, от взрывов сверхновых и всплесков гравитационных волн.

Результаты расчётов, проведённых соискателем, были использованы для оценки верхних пределов на потоки гамма-излучения от близкой сверхновой SN 2011fe типа Ia в галактике M101 на расстоянии 6.4 Мпк [47].

Глава 2

Классификация гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд

2.1 Введение

Первым свидетельством наличия двух классов всплесков было обнаружение их бимодального распределения по длительности [3, 48, 6, 49]. В работе [6] были введены две меры длительности T_{50} и T_{90} , которые соответствуют временам накопления 50% и 90% от суммарного числа отсчётов всплеска (интервалы от 25% до 75% и от 5% до 95% отсчётов, соответственно), и определена граница между длинными и короткими всплесками $T_{90} = 2$ с на основе локального минимума бимодального распределения. В работе [50] обсуждается, что распределение всплесков по длительности T_{90} хорошо описывается суммой двух логнормальных компонент. Более детальный анализ распределения по T_{90} всплесков из третьего каталога эксперимента BATSE [51] показал, что распределение хорошо аппроксимируется тремя логнормальными компонентами. Третья компонента располагалась между короткими и длинными всплесками, что свидетельствовало о наличии третьего класса всплесков с промежуточной длительностью. Доля промежуточных всплесков составила 6%.

Систематические ошибки величин T_{50} и T_{90} , которые искажают наблюдаемое распределение всплесков, были рассмотрены в работе [12] на примере всплесков, зарегистрированных в эксперименте CGRO-BATSE [52]. Было показано, что как минимум четыре фактора влияют на измеренное значение длительности всплеска и размывают границы между классами коротких и

длинных всплесков: (1) различие в отношении сигнал-шум (S/N) между самым интенсивным и самым слабым всплеском при условии, что эти всплески не отличаются по другим параметрам, приводит к различию их длительностей T_{90} в ~ 2 раза [53]; (2) длительность космологически удалённых длинных всплесков (с красными смещениями источников $z \sim 2-10$) увеличивается в 2–5 раз по сравнению со всплесками, пришедшими с $z = 1$, в это же время поправка длительности для коротких всплесков не превышает двух раз, так как их источники в основном расположены на $z < 1$ (этот фактор увеличивает обособленность распределений коротких и длинных всплесков); (3) эффект зависимости длительности отдельных импульсов всплесков от энергии $\propto E^{-0.35}$ [54], а так же модификация спектра за счёт космологического расширения приводит к зависимости длительности всплеска от энергетического диапазона наблюдений; (4) распределение по длительностям обрезано со стороны коротких всплесков вследствие наблюдательной селекции триггерного алгоритма.

Кроме T_{50} и T_{90} была предложена и другая мера длительности — время эмиссии [55], которая вычисляется как суммарная длительность бинов временной истории, в которых интенсивность излучения превышает заданный уровень от пиковой интенсивности. Этот уровень задается таким образом, чтобы суммарное число отсчетов в бинах составляло заданную долю от общего числа отсчетов всплеска (использовались уровни 30% и 50%, соответствующие меры длительности были обозначены τ_{30} и τ_{50}). Было показано, что данная мера длительности гораздо менее чувствительна и к отношению сигнал-шум и к количеству импульсов во всплеске, разделенных значительным промежутком фона, так как этот промежуток не входит, по определению, в определяемое время эмиссии. Ясно, однако, что эта мера чувствительна к временному разрешению. Распределения всплесков по τ_{30} и τ_{50} также являются бимодальными. Эти меры длительности не получили широкого распространения, поэтому классификация всплесков на их основе в данной работе не рассматривается.

Короткие и длинные всплески, в среднем, отличаются жёсткостью спектра. В работе [6] было обнаружено, что короткие всплески BATSE, в среднем, имеют большую жёсткость (HR_{32}), чем длинные, где HR_{32} определялась как

отношение числа отсчетов, накопленных за T_{90} в энергетических диапазонах 100–300 кэВ и 50–100 кэВ (диапазоны 3 и 2) эксперимента *CGRO*-BATSE. Однако, в последующих работах было отмечено, что жёсткость не является обязательной чертой коротких всплесков [см., например, 56, 12].

На основе распределения на плоскости жёсткость–длительность также был обнаружен третий класс всплесков [57, 58]. Анализ влияния систематических эффектов на наличие третьего класса всплесков был проведён в [59]. Авторы показали, что третий класс всплесков не является физическим и может являться следствием селекции триггерного алгоритма. Также было показано, что сам по себе эффект зависимости длительности от яркости всплеска [53] не может привести к появлению третьего класса всплесков. Однако, в последующей работе [60] были приведены доводы в пользу реальности третьего класса всплесков и исследовалось количество и значимость классов всплесков на основе параметров распределения на плоскости $\log T_{90}$ – $\log \text{HR}_{32}$ для 1956 всплесков, зарегистрированных в эксперименте BATSE. При этом распределение аппроксимировалось суммой двумерных нормальных распределений. Было установлено, что распределение наилучшим образом описывается тремя компонентами (классами). При этом доля всплесков из класса с промежуточной длительностью составляет 10–15%. Также было показано, что поправка набора всплесков на селекцию триггерного алгоритма сохраняет полученное разделение на классы. Аналогичный метод был применен к 222 всплескам *Swift*-BAT [61], при этом также было обнаружено три класса всплесков. При этом доля промежуточного класса всплесков составила 30%.

Помимо жесткости и длительности, еще одним параметром для классификации всплесков может служить спектральная задержка. Этот параметр характеризует запаздывание излучения в более мягком диапазоне по отношению к излучению в более жестком диапазоне. Значение задержки (τ_{lag}) соответствует положению максимума кросскорреляционной функции временных историй в двух энергетических диапазонах [62]. Анализ спектральных задержек коротких всплесков BATSE и *Swift*-BAT показал, что они распределены вблизи нуля с разбросом порядка 25 мс [12, 63]. В то же время длинные всплески могут иметь значительные задержки. Идея о том, что различие

спектральных задержек длинных и коротких всплесков отражает различие физических свойств источников всплесков, была выдвинута в работе [64].

После начала эры многоволновых наблюдений гамма-всплесков стало возможным классифицировать всплески на основании параметров послесвечений и родительских галактик. В работах [37, 65, 38] была предложена схема классификации всплесков, основанная на этих параметрах, на физические типы: I и II. Считается, что всплески типа I, генерируются при слиянии компактных объектов, а всплески типа II образуются при коллапсе молодых массивных звёзд. В работе [38] было показано, что всплески типа II на плоскости жёсткость-длительность располагаются в области длинных/мягких всплесков, при этом всплески типа I — в области коротких/жестких событий. Авторы также отмечают, что всплески типа I обладают незначительной спектральной задержкой.

Неоднозначность соответствия коротких всплесков и всплесков типа I связана, в том числе, с существованием коротких гамма-всплесков, сопровождающихся слабым сравнительно мягким излучением в гамма-диапазоне, длящимся десятки секунд после начального короткого импульса. Это явление получило название продленного излучения (EE). Впервые этот класс всплесков был обнаружен в данных BATSE [9] и Конус [10]. В работе [11] было обнаружено 11 всплесков с продлённым излучением среди 125 коротких гамма-всплесков KW. Для оставшихся всплесков был обнаружен избыток излучения на интервале 5–100 с в сумме временных профилей с вычтенным фоном. Такой же избыток был выявлен в данных BATSE [66, 67], *BeppoSAX-GRBM* [68] и *INTEGRAL-SPI-ACS* [69]. Основную сложность представляет разделение коротких всплесков с EE и длинных всплесков. Авторы работы [12] использовали визуальные признаки для выделения коротких всплесков с продлённым излучением: длительность начального импульса $T_{90} < 2$ с, отсутствие заметной спектральной эволюции в начальном импульсе и EE. Авторы обнаружили в данных BATSE 8 всплесков, удовлетворяющих этим критериям, и показали, что их спектральные задержки близки к нулю. Также в работе отмечается наличие у некоторых всплесков интервала с практически нулевой интенсивностью излучения между начальным импульсом и продлённым излучением. Сравнение интенсивностей продлённого излучения для этих 8 всплесков и

интенсивности излучения, обнаруженного в суммарном временном профиле в работе [66], показывает, что динамический диапазон интенсивности продлённого излучения составляет $\sim 10^4$, так же как и динамический диапазон отношения интенсивности начального импульса и продлённого излучения. В работе [70] на основе 12 всплесков с продлённым излучением, зарегистрированных *Swift*-ВАТ, был оценен физический порог отношения интенсивностей продлённого излучения и начального пика как единицы $\times 10^3$ и было показано, что для начальных импульсов всплесков без продлённого излучения характерны в ~ 2 – 3 раза меньшие длительности по сравнению с всплесками с ЕЕ, также всплески без продлённого излучения имеют меньшее число пиков в начальном импульсе.

Различие природы источников коротких гамма-всплесков с продлённым излучением и без него в настоящее время не подтверждено. В работе [71] было установлено, что смещения относительно центра родительской галактики коротких всплесков с продлённым излучением в среднем меньше, чем для всплесков без него: единицы и десятки килопарсек, соответственно. Исследование [72] с использованием данных наблюдений телескопа *Hubble Space Telescope* опровергло этот результат.

В данной главе анализируются временные истории всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд. Всплески классифицируются на основе длительности, жесткости и спектральной задержки, и определяется набор коротких всплесков для дальнейшей локализации и спектрального анализа. При этом обсуждается принадлежность исследуемых всплесков к типам I и II. В разделе 2.2 приводится описание использованного набора всплесков. В разделе 2.3 рассматривается распределение всплесков по длительности, определяется граница между длинными и короткими всплесками на основе длительности T_{50} и определяется итоговый набор коротких всплесков. В разделе 2.4 рассматриваются жесткости всплесков и производится классификация всплесков на основе соотношения жёсткость-длительность. В разделе 2.5 анализируются спектральные задержки коротких всплесков. Сравнение классификации на физические типы I и II и классификации на основе жесткости, длительности и спектральной задержки приведено в разделе 2.6. Обобщение и обсуждение результатов приведено в разделе 2.7.

2.2 Набор всплесков

За период с ноября 1994 г. по декабрь 2010 г. KW зарегистрировал 2008 гамма-всплесков в триггерном режиме. Среди них 69 всплесков содержат сбои, представляющие собой промежутки в данных во время всплеска, или значительные флуктуации фона, накладывающиеся на всплеск. Всего 1939 всплесков без сбоев.

Для вычисления параметров временных историй использовалась сшивка фоновой и триггерной записи. Длительность всплесков, у которых значительная часть события лежит в бине фоновой записи, предшествующем триггерной записи, может быть искажена из-за низкого разрешения фоновой записи. Из дальнейшего рассмотрения было исключено 105 таких событий. Таким образом, для анализа использовались временные истории 1834 гамма-всплеска.

2.3 Длительности

Для вычисления длительностей мы использовали сумму временных историй всплеска в энергетических диапазонах G2 и G3. Такой выбор обоснован тем, что пиковая энергия EF_E спектра (E_p) абсолютного большинства всплесков лежит в диапазоне $E_p > 80$ кэВ, и, следовательно, отсчёты, соответствующие основному энерговыделению во всплеске, регистрируются в диапазонах G2 и G3. Фон в G2 и G3 стабилен на более длительных интервалах времени, чем в G1. Это позволяет с гораздо меньшей вероятностью неверно определять начало и конец всплеска из-за флуктуаций фона. Также в диапазон G1 может попадать начало рентгеновского послесвечения, учёт которого исказит длительность начального импульса всплеска.

Уровни фона для вычисления длительностей определялись по методике, описанной в разделе 1.3.1 Главы 1. В результате, из всего набора 1834 всплесков у 96% всплесков длительность интервала для определения фона составила 750 с и только у < 1% всплесков длительность этого интервала составила 30–100 с.

2.3.1 Автоматическая процедура определения длительности

Основной задачей при вычислении любой меры длительности является определение момента начала и конца всплеска. В работе [73], описывающей методику вычисления длительностей T_{90} и T_{50} для второго каталога BATSE, моменты начала и конца всплеска t_0 и t_{100} определялись визуально на основании интеграла от временной истории с вычтенным фоном всплеска, где t_x соответствует времени накопления заданной доли x (0%, 5%, ..., 100%) от полного числа отсчётов всплеска. В работе [53] использовалась автоматическая процедура поиска t_0 и t_{100} , которая заключалась в поиске положительной флуктуации числа отсчетов с вычетом фона со значимостью от 3σ до 6σ на временных масштабах от 0.5 с до 16 с в диапазоне > 25 кэВ.

Для вычисления длительности всплесков KW использовалась автоматическая процедура поиска начала и конца всплеска. Поиск производился на интервале от $T_0 - 250$ с до $T_0 + 230$ с (конец триггерной записи), где T_0 — время триггера KW. Для некоторых всплесков границы интервала вычисления длительности отличались от указанных, к примеру, в случае присутствия солнечной вспышки в данных. Для поиска начала всплеска производился поиск положительной флуктуации числа отсчетов с вычетом фона на заданном уровне значимости. При этом поиск превышения производился на интервале с длительностью от временного разрешения текущего участка записи до 100 с. Началом всплеска t_0 считается начало интервала, на котором было обнаружено превышение, если вероятность его случайного обнаружения была меньше пороговой. Иллюстрация алгоритма поиска начала всплеска приведена на рис. 2.1. Времена начала интервалов поиска превышения брались последовательно, начиная от $T_0 - 250$ с. Конец всплеска — t_{100} определяется аналогичного, при этом поиск ведётся в обратном направлении по времени, начиная от $T_0 + 230$ с. Длительности всплесков вычислялись для порогов, соответствующих вероятности случайного превышения значений 4σ , 5σ и 6σ для распределения Гаусса. При этом на интервалах, где число отсчётов от фона меньше 20, для вычисления вероятности случайного превышения исполь-

зовалась статистика Пуассона. Значения T_{90} и T_{50} и их ошибки определялись методом, описанном в работе [73].

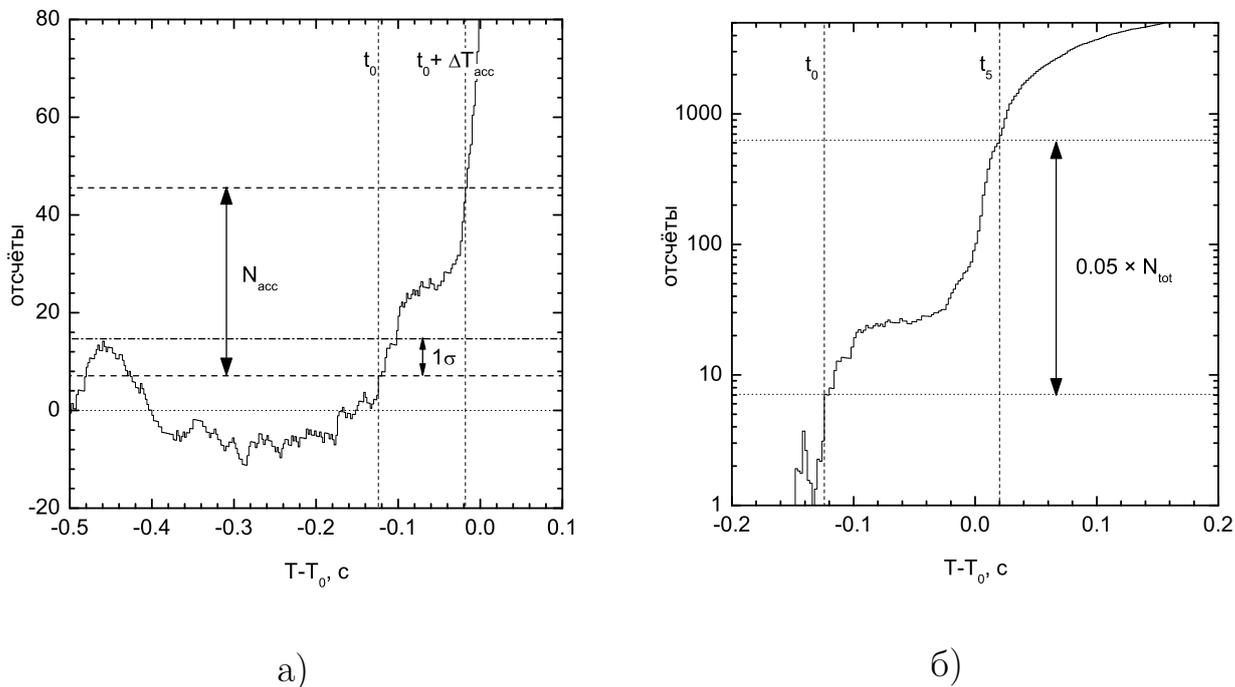


Рисунок 2.1: (а) Иллюстрация определения времени начала всплеска t_0 для GRB20031214_T36655. Сплошная линия — интегральное число отсчетов всплеска с вычетом фона. Число отсчётов N_{acc} (горизонтальные штриховые линии), накопленное на интервале ΔT_{acc} (вертикальные штриховые линии), соответствует превышению 5σ над фоном. Уровень 1σ относительно интегрального числа отсчётов на момент t_0 изображен горизонтальной штрихпунктирной линией. Горизонтальная точечная линия обозначает нулевой уровень. (б) Иллюстрация определения начала интервала T_{90} (t_5) для того же всплеска. Число отсчётов, соответствующие 5% от общего числа отсчётов N_{tot} обозначено горизонтальными штриховыми линиями, время начала всплеска t_0 и время t_5 обозначены вертикальными штриховыми линиями.

2.3.2 Распределения по длительностям

Для 1834 всплесков KW были построены гистограммы распределений всплесков по T_{90} и T_{50} для порогов значимости поиска начала и конца всплеска 4σ , 5σ и 6σ .

Распределения аппроксимировались методом минимизации χ^2 суммой двух логнормальных распределений

$$f(x) = \sum_{l=1}^2 A_l f_l(x) , \quad (2.1)$$

где

$$f_l(x) = \frac{1}{w_l \sqrt{\pi/2}} \exp\left(\frac{-2(x - x_{cl})^2}{w_l^2}\right) , \quad (2.2)$$

с параметрами A_l — площадь под распределением, $w = 2\sigma$ — ширина, x_{cl} — среднее значение и $x = \log T$. При этом число всплесков в бине по модели равно интегралу от аппроксимирующей функции в границах бина.

Доверительные интервалы параметров распределения на уровне 68% вычислялись методом Монте-Карло для 1000 реализаций распределения. При этом значение в каждом бине распределения разыгрывалось как пуассоновская случайной величиной со средним, равным числу отсчётов в соответствующем бине исходного распределения. Полученный набор значений каждого параметра распределения сортировался по возрастанию. В качестве нижней и верхней границы доверительного интервала на уровне 68% из этого отсортированного массива параметров брались значения с индексами 160 и 840, соответственно. В качестве значения параметра бралась медиана распределения.

Из-за эффектов селекции число очень коротких всплесков ($T_{90} \lesssim 100$ мс) и число длинных всплесков ($T_{90} \gtrsim 200$ с) в наборе KW недооценено. Так же неверно считать ошибки числа отсчётов в бине гауссовыми при числе отсчётов < 10 , поэтому бины с $\log T_{90} \leq -1.2$ ($T_{90} \leq 0.063$ с) и $\log T_{90} \geq 2.4$ ($T_{90} \geq 251$ с) не учитывались при аппроксимации гистограммы распределения по T_{90} , для аппроксимации использовалось 18 бинов. При аппроксимации гистограммы распределения по T_{50} игнорировались бины с $\log T_{50} \leq -1.8$ ($T_{50} \leq 0.016$ с) и $\log T_{50} \geq 2.0$ ($T_{50} \geq 100$ с), для аппроксимации использовалось 19 бинов.

Параметры распределений представлены в таблицах 2.2 и 2.3. Из представленных результатов видно, что при изменении порога от 4σ до 6σ параметры распределения по T_{50} и T_{90} для полного набора 1834 всплесков изменяются. Распределение длинных всплесков смещается в сторону меньших дли-

тельностью, такое же смещение, но в меньшей степени, наблюдается для распределение коротких всплесков. При этом изменение параметров распределения по T_{90} гораздо существенней, чем для распределения по T_{50} , см. таб. 2.1, где T_{int} соответствует пересечению распределений и $\delta T = |T_{4\sigma} - T_{6\sigma}|/T_{4\sigma}$. Так как вариации параметров распределения по T_{50} существенно меньше, чем для распределения по T_{90} для классификации всплесков на основе длительностей мы выбрали величину T_{50} .

Таблица 2.1: Изменение параметров распределений T_{90} и T_{50} при изменении порога поиска от 4σ до 6σ

набор	величина	δT_{c1} (%)	δT_{c2} (%)	δT_{int} (%)
1834	T_{90}	19	27	14
	T_{50}	7	13	4
1168	T_{90}	26	21	15
	T_{50}	7	10	6

Вследствие наблюдательной селекции триггерной системы по отношению сигнал-шум наш набор всплесков неоднороден. Как видно из диаграммы T_{50} -S/N (рис. 2.2) в наборе отсутствуют всплески с отношением сигнал-шум $S/N < 10$ и $T_{50} \lesssim 100$ мс. Здесь S/N определено как отношение числа отсчётов от источника к стандартному отклонению числа отсчётов фона на интервале 64 мс с максимальной скоростью счёта. Для дальнейшего рассмотрения был выбран однородный набор всплесков с $S/N \geq 10$, который содержит 1168 всплесков. Результаты аппроксимации распределений набора по T_{50} и T_{90} приведены в таблицах 2.2 и 2.3, и на рис. 2.3. Относительные изменения параметров скорректированных распределений при изменении порога от 4σ до 6σ приведены в таб. 2.1.

В качестве порога значимости был выбран уровень 5σ так как было замечено, что при пороге 4σ в качестве начала и конца всплеска часто выбирают флуктуации фона или эпизоды излучения транзиентов, не относящиеся ко всплеску (установить отношение подобных слабых эпизодов к триггерному всплеску в большинстве случаев не представляется возможным). При пороге 6σ часто игнорируется «хвост», непосредственно прилегающий к основному пику, тем самым полное число отсчетов во всплеске может недооцениваться

на величину до $\sim 70\%$. Такая ситуация возможна, к примеру, для коротких всплесков с продлённым излучением.

В качестве границы между длинными и короткими всплесками была выбрана точка пересечения двух логнормальных распределений по T_{50} для порога значимости 5σ набора 1168 всплесков $T_{50,\text{int}} = 0.6$ с.

Для указанного распределения и границы между длинными и короткими всплесками можно оценить долю «засорения» набора коротких всплесков длинными и наоборот. Доля «засорения» набора коротких всплесков длинными равна отношению интеграла от распределения длинных всплесков и интеграла от распределения коротких всплесков на интервале $-\infty$ до $T_{50,\text{int}}$) и составляет $\approx 7\%$. При этом доля «засорения» длинных всплесков короткими составляет $\approx 2\%$.

Границы диапазонов KW менялись со временем, что могло внести систематический сдвиг в длительности всплесков, зарегистрированных в различные периоды, и привести к изменению со временем границы между длинными и короткими всплесками. Для анализа дрейфа границы между длинными и короткими всплесками набор 1168 всплесков был разделён на три поднабора: 583 GRBs ноябрь 1994 – май 2003; 585 GRBs июнь 2003 – декабрь 2010; 582 GRBs май 1999 – январь 2007. Полученные для поднаборов границы $T_{50,\text{int}}$ равны: $0.41^{+0.19}_{-0.09}$ с, $0.74^{+0.22}_{-0.16}$ с и $0.62^{+0.28}_{-0.17}$ с, соответственно. Наблюдаемый дрейф границы лежит в пределах 1σ интервала для границы $T_{50,\text{int}} = 0.6$ с, полученной с использованием полного набора всплесков.

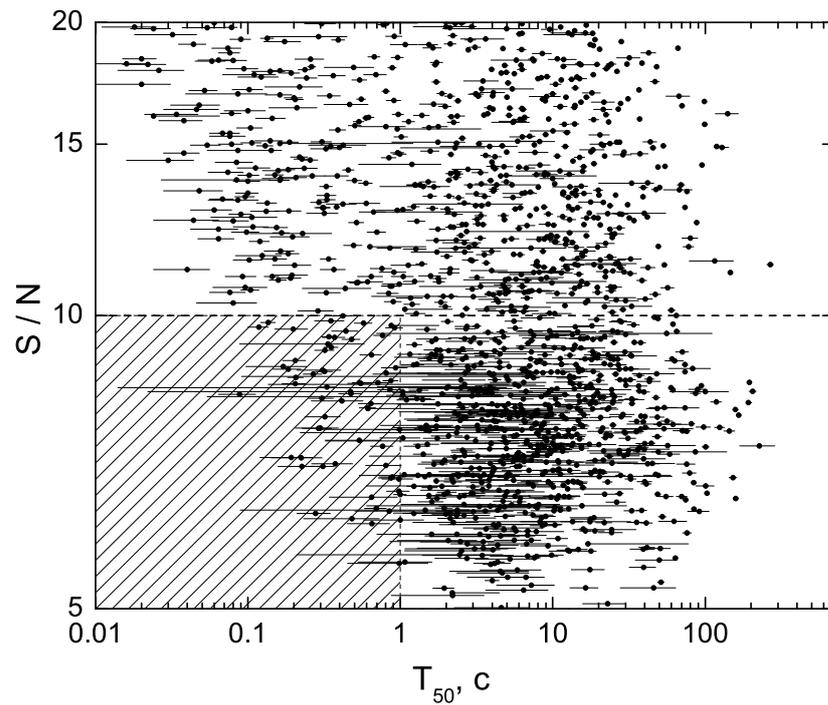


Рисунок 2.2: Соотношение S/N – T_{50} для 1834 всплесков. Пунктирная линия соответствует $S/N = 10$. Штрихованная область наиболее подвержена селекции триггерного алгоритма. Отношение сигнал-шум $S/N \geq 10$ имеют 1168 всплесков.

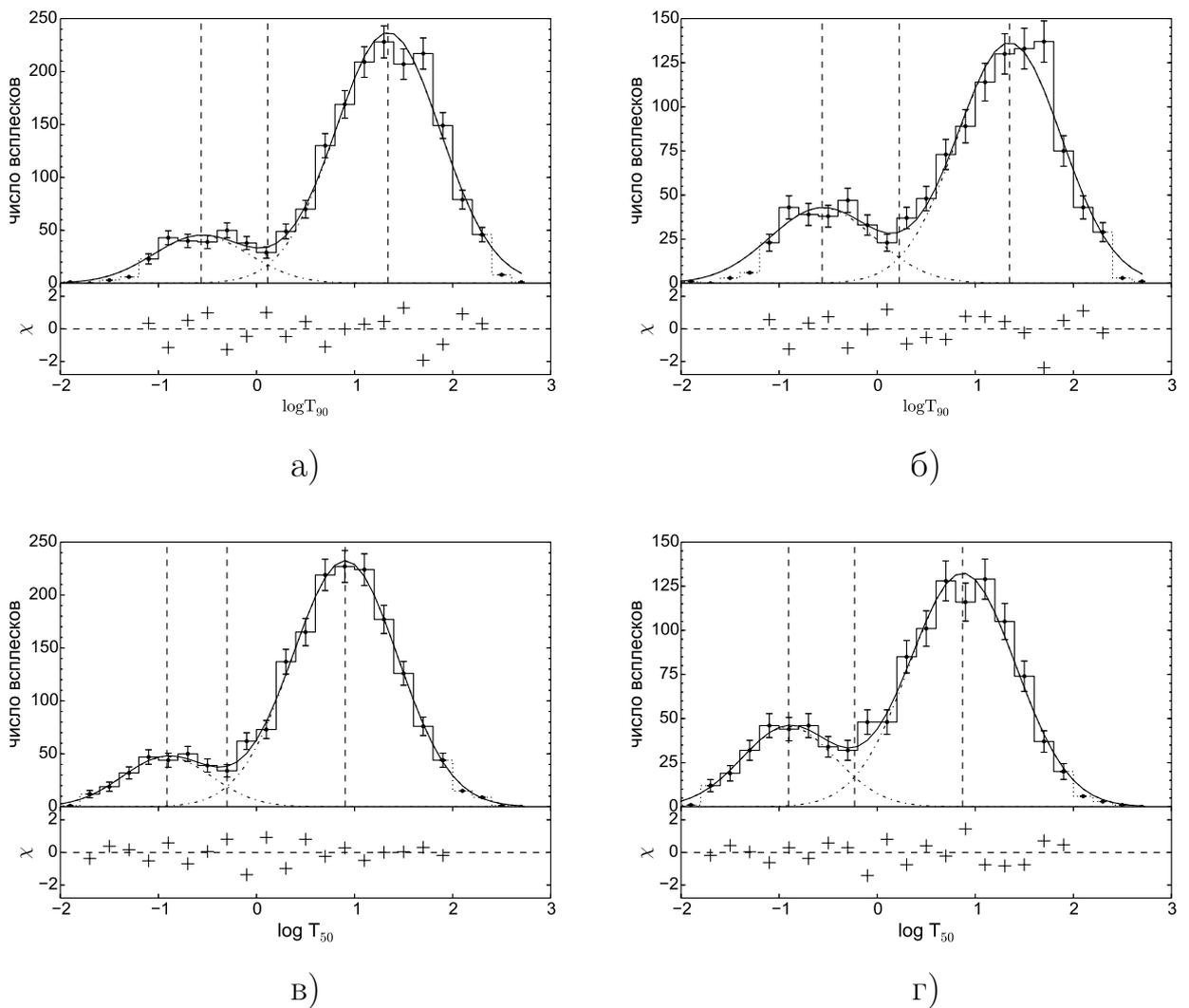


Рисунок 2.3: Распределения 1834 и 1168 всплесков с $S/N \geq 10$ по T_{90} (а и б, соответственно) и T_{50} (в и г, соответственно) для порога 5σ (непрерывная гистограмма), игнорированные при аппроксимации бины гисторграммы показаны пунктиром. Аппроксимация распределения суммой двух логнормальных распределений показана непрерывной линией, распределение коротких и длинных всплесков показаны штрихпунктирными линиями. Вертикальные штриховые линии обозначают средние значения распределений коротких и длинных всплесков и точку их пересечения. На нижней панели каждого рисунка показаны невязки аппроксимации.

Таблица 2.2: Параметры аппроксимации распределений по T_{90} для порогов 4σ , 5σ и 6σ

число всплесков	σ	A_1	x_{c1}	T_{90c1} c	w_1	A_2	x_{c2}	T_{90c2} c	w_2	x_{int}	T_{90int} c	χ^2	dof
1834	4	50^{+6}_{-5}	$-0.49^{+0.06}_{-0.05}$	$0.32^{+0.05}_{-0.03}$	$0.92^{+0.16}_{-0.12}$	324^{+9}_{-11}	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	$27.30^{+1.15}_{-1.17}$	$1.11^{+0.04}_{-0.04}$	$0.15^{+0.07}_{-0.06}$	$1.42^{+0.26}_{-0.19}$	10.5	12
	5	54^{+8}_{-6}	$-0.56^{+0.06}_{-0.05}$	$0.27^{+0.04}_{-0.03}$	$0.97^{+0.21}_{-0.12}$	316^{+9}_{-10}	$1.34^{+0.02}_{-0.02}$	$22.09^{+0.89}_{-0.90}$	$1.06^{+0.04}_{-0.04}$	$0.11^{+0.07}_{-0.06}$	$1.30^{+0.24}_{-0.16}$	14.6	12
	6	59^{+8}_{-6}	$-0.59^{+0.05}_{-0.05}$	$0.26^{+0.03}_{-0.03}$	$0.95^{+0.16}_{-0.13}$	312^{+9}_{-10}	$1.30^{+0.02}_{-0.02}$	$20.00^{+0.91}_{-0.74}$	$1.07^{+0.04}_{-0.04}$	$0.09^{+0.07}_{-0.06}$	$1.22^{+0.22}_{-0.15}$	10.3	12
1168	4	53^{+11}_{-7}	$-0.47^{+0.10}_{-0.06}$	$0.34^{+0.09}_{-0.05}$	$1.03^{+0.31}_{-0.18}$	182^{+10}_{-12}	$1.42^{+0.03}_{-0.03}$	$26.41^{+2.12}_{-1.85}$	$1.07^{+0.07}_{-0.06}$	$0.28^{+0.15}_{-0.12}$	$1.91^{+0.81}_{-0.45}$	13.2	12
	5	58^{+10}_{-8}	$-0.57^{+0.08}_{-0.07}$	$0.27^{+0.05}_{-0.04}$	$1.09^{+0.29}_{-0.20}$	178^{+9}_{-10}	$1.35^{+0.03}_{-0.03}$	$22.51^{+1.74}_{-1.41}$	$1.05^{+0.06}_{-0.06}$	$0.23^{+0.13}_{-0.10}$	$1.71^{+0.58}_{-0.36}$	15.5	12
S/N>10	6	61^{+12}_{-7}	$-0.60^{+0.06}_{-0.06}$	$0.25^{+0.04}_{-0.04}$	$1.04^{+0.29}_{-0.16}$	175^{+7}_{-10}	$1.32^{+0.03}_{-0.03}$	$20.79^{+1.54}_{-1.28}$	$1.04^{+0.06}_{-0.06}$	$0.21^{+0.11}_{-0.10}$	$1.63^{+0.49}_{-0.32}$	16.1	12

Таблица 2.3: Параметры аппроксимации распределений по T_{50} для порогов 4σ , 5σ и 6σ

число всплесков	σ	A_1	x_{c1}	T_{50c1} c	w_1	A_2	x_{c2}	T_{50c2} c	w_2	x_{int}	T_{50int} c	χ^2	dof
1834	4	50^{+5}_{-4}	$-0.86^{+0.05}_{-0.05}$	$0.14^{+0.02}_{-0.01}$	$0.86^{+0.10}_{-0.09}$	312^{+9}_{-9}	$0.95^{+0.02}_{-0.02}$	$8.86^{+0.36}_{-0.35}$	$1.06^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.26^{+0.06}_{-0.06}$	$0.54^{+0.08}_{-0.07}$	14.7	13
	5	53^{+6}_{-5}	$-0.91^{+0.05}_{-0.05}$	$0.12^{+0.02}_{-0.01}$	$0.89^{+0.12}_{-0.10}$	311^{+10}_{-9}	$0.91^{+0.02}_{-0.02}$	$8.06^{+0.35}_{-0.33}$	$1.07^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.30^{+0.07}_{-0.06}$	$0.50^{+0.09}_{-0.07}$	6.9	13
	6	57^{+6}_{-5}	$-0.89^{+0.06}_{-0.05}$	$0.13^{+0.02}_{-0.02}$	$0.93^{+0.12}_{-0.10}$	307^{+10}_{-9}	$0.89^{+0.02}_{-0.02}$	$7.73^{+0.35}_{-0.34}$	$1.07^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.28^{+0.07}_{-0.07}$	$0.52^{+0.09}_{-0.08}$	8.4	13
1168	4	51^{+6}_{-5}	$-0.85^{+0.07}_{-0.06}$	$0.14^{+0.02}_{-0.02}$	$0.92^{+0.13}_{-0.12}$	178^{+8}_{-9}	$0.91^{+0.03}_{-0.03}$	$8.07^{+0.55}_{-0.51}$	$1.05^{+0.06}_{-0.05}$	$-0.19^{+0.09}_{-0.09}$	$0.65^{+0.15}_{-0.12}$	15.8	13
	5	54^{+7}_{-6}	$-0.90^{+0.08}_{-0.06}$	$0.12^{+0.03}_{-0.01}$	$0.94^{+0.17}_{-0.12}$	178^{+7}_{-9}	$0.87^{+0.03}_{-0.03}$	$7.43^{+0.58}_{-0.51}$	$1.07^{+0.06}_{-0.06}$	$-0.23^{+0.11}_{-0.09}$	$0.59^{+0.17}_{-0.11}$	9.3	13
S/N>10	6	56^{+7}_{-6}	$-0.89^{+0.07}_{-0.06}$	$0.13^{+0.02}_{-0.02}$	$0.96^{+0.14}_{-0.11}$	175^{+8}_{-8}	$0.86^{+0.03}_{-0.03}$	$7.29^{+0.52}_{-0.48}$	$1.06^{+0.06}_{-0.05}$	$-0.21^{+0.09}_{-0.08}$	$0.61^{+0.15}_{-0.11}$	9.6	13

2.3.3 Сравнение длительностей определенных по данным BATSE и KW

Среди 1939 всплесков KW без сбоев 267 всплесков наблюдались BATSE. Соотношение длительностей T_{50} и T_{90} , вычисленных по данным BATSE [74] и KW, изображено на рис. 2.4.

Большинство всплесков имеют бóльшую длительность по данным BATSE, в особенности T_{90} по сравнению с KW, что связано с большей эффективной площадью детекторов BATSE $\sim 10^3$ см² против $(0.80\text{--}1.6) \times 10^2$ см² у KW. Другим фактором является то, что длительность всплесков BATSE определяется в диапазоне > 25 кэВ, что позволяет учитывать продолжительные мягкие хвосты всплесков. Более редкой ситуацией является существенное превышение длительностей по данным KW, наблюдаемое в 10 всплесках. Шесть всплесков имеют плавное спадание/нарастание интенсивности, которое не было учтено при вычислении длительностей по данным BATSE, возможно, из-за недостаточно точной аппроксимации фона. В трех всплесках по данным KW в интервал T_{90} попадает слабый импульс, отделенный от основного пика. При этом эклиптические широты основного пика и слабого импульса согласуются, что позволяет отнести их к одному источнику. Во всплеске GRB 950904, $T_{0,\text{BATSE}} = 52777$ s UT ($T_{90,\text{KW}} = 99 \pm 4$ с, $T_{90,\text{BATSE}} = 11.1 \pm 1.8$ с) длительности BATSE даны для второго импульса, так как в [75] полагается, что два импульса являются различными всплесками.

Среди общих всплесков KW и BATSE 46 имеют $T_{50\text{KW}} \leq 0.6$ с, из них 9 входят в набор 105 всплесков с искаженной длительностью (см. Раздел 2.2). Из оставшихся 37, 8 имеют $T_{90\text{BATSE}} > 2$ с, из них один является коротким всплеском с продлённым излучением. Таким образом, засорение нашего списка длинными всплесками, связанное с низким S/N всплесков KW по сравнению с BATSE, составляет 19% (=7/37). Ранее в работе [76] была получена доля «засорения» коротких всплесков KW длинными $\approx 60\%$. В этой работе длительность всплесков в данных KW оценивалась визуально, что могло стать причиной получения высокой доли засорения.

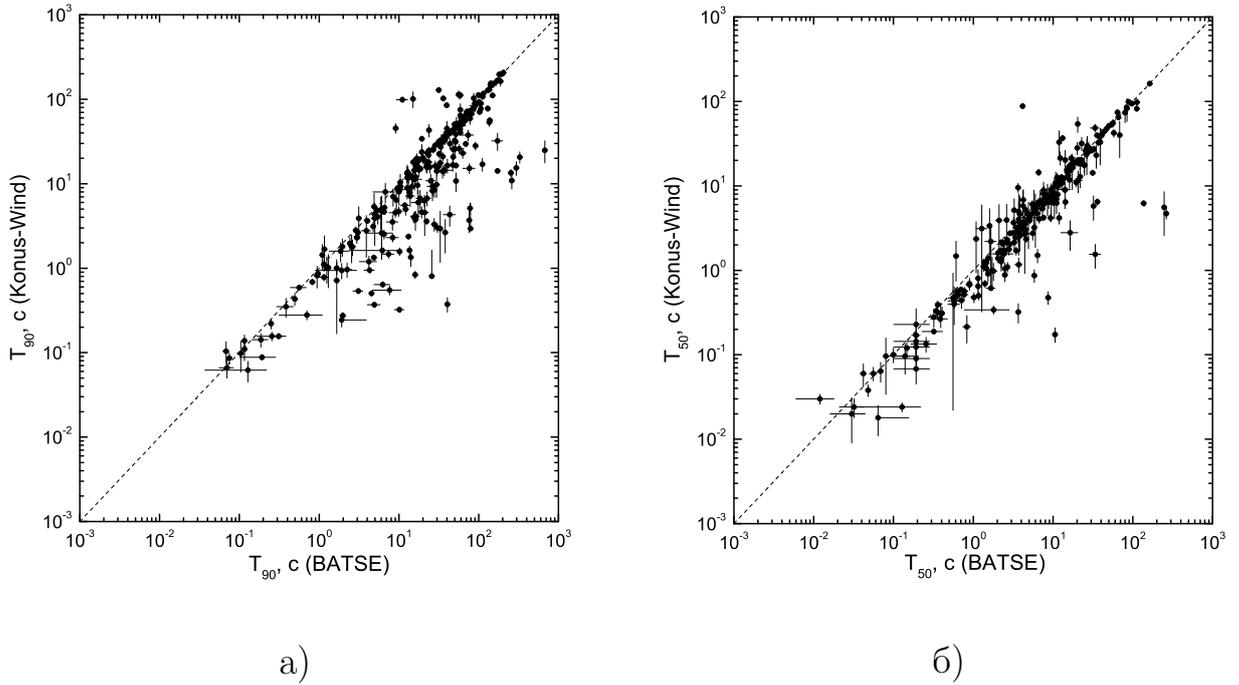


Рисунок 2.4: Соотношение длительностей T_{90} (а) и T_{50} (б), определённых по данным BATSE и KW для 267 гамма-всплесков.

2.3.4 Набор коротких всплесков

Набор из 1834 всплесков KW содержит 277 событий с $T_{50} \leq 0.6$ с. Среди них было обнаружено: пять очевидно длинных всплесков, в которых T_{50} определялось наиболее сильным импульсом, при этом полная длительность всплеска была значительно больше 2 с; и 12 кандидатов в короткие всплески с продлённым излучением. Визуальный анализ показал, что среди 69 всплесков со сбоями пять имеют $T_{50} \leq 0.6$ с, эти всплески были включены в итоговый набор. Таким образом, набор коротких всплесков KW содержит 265 событий без продлённого излучения.

Кроме того, было обнаружено 19 кандидатов во всплески с продлённым излучением среди всплесков с $T_{50} > 0.6$ с. К этому типу всплесков были отнесены события, имеющие короткий начальный импульс с $T_{50} \leq 0.6$ с, за которым следует эпизод излучения, не содержащий импульсов с заметной спектральной эволюцией. В некоторых случаях начальный пик и продлённое излучение были разделены интервалом, на котором интенсивность излучения

мала. Таким образом, полученный набор коротких всплесков с продлённым излучением насчитывает 31 событие.

Объединённый набор коротких всплесков с учётом всплесков с продлённым излучением содержит 296 событий.

2.4 Жёсткости

Для анализа спектральных различий всплесков использовались две величины: интегральная жёсткость (HR_{32}) — отношение числа отсчетов, накопленных в каналах G3 и G2 за интервал T_{100} и пиковая жёсткость (HR_{32pk}) — отношение числа отсчетов, накопленных за интервал 64 мс с пиковой скоростью счета. Отношение числа отсчетов в каналах G3 и G2 было выбрано, так как оно наименее чувствительно к углу падения на детектор и более чувствительно к пиковой энергии E_p .

При вычислении жесткости HR_{32} был учтён временной дрейф границ диапазонов. Для этого трёхканальный спектр отсчетов аппроксимировался степенной функцией с экспоненциальным завалом $dN/dE \propto E^\alpha \exp(-E/E_0)$. С использованием полученной аппроксимации, вычислялось количество отсчетов в номинальных границах диапазонов: 13–50 кэВ (G1), 50–200 кэВ (G2) и 200–750 кэВ (G3). Реальные границы диапазонов были вычислены с использованием калибровки, полученной по многоканальному спектру (см. Главу 1).

При рассмотрении интегральной жесткости использовался однородный набор из 1168 всплесков с $S/N \geq 10$. Набор содержит восемь всплесков со сбоями в G1, для которых невозможно провести аппроксимацию трёхканального спектра. Из оставшихся всплесков, 17 имеют значительную ошибку HR_{32} ($\sigma HR_{32}/HR_{32} > 0.3$), эти всплески были исключены из рассмотрения. В итоге для исследования соотношения жёсткость-длительность использовалось 1143 всплеска.

Распределение этого набора всплесков по HR_{32} хорошо описывается суммой двух лог-нормальных распределений. Добавление третьей компоненты не даёт существенного улучшения аппроксимации.

Аналогично работе [60] распределения всплесков на плоскости $\log T_{50}$ – $\log HR_{32}$ аппроксимировалось суммой двух и трёх гауссовых компонент, при

помощи метода наибольшего правдоподобия. Каждая компонента имеет вид:

$$p(x, y|l) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \times \exp \left[-\frac{1}{2(1-r^2)} \left(\frac{(x-a_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-a_y)^2}{\sigma_y^2} - \frac{C}{\sigma_x\sigma_y} \right) \right], \quad (2.3)$$

где

$$C = 2r(x-a_x)(y-a_y),$$

где $x = \log T_{50}$ и $y = \log \text{HR}_{32}$, a_x, a_y — средние, σ_x, σ_y — дисперсии, r — коэффициент корреляции, и l — номер компоненты. При этом функция правдоподобия определяется следующим образом:

$$L = \sum_i \ln p(x_i, y_i), \quad (2.4)$$

где

$$p(x, y) = \sum_l p(x, y|l)p_l$$

Аппроксимация производилась с помощью алгоритма expectation maximization [60, 77] реализованного в пакете Scikit-learn [78]. Ошибки параметров вычислялись таким же методом, как и для распределения по длительностям. На каждой из 1000 итераций генерировалось распределение на плоскости $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32}$ на основе ошибок T_{50} и HR_{32} . Затем из полученного массива параметров в качестве центрального значения и ширины доверительного интервала бралась медиана и ширина на уровне 68%. Значения параметров гауссовых компонент для случая двух и трёх компонент представлены в таблицах 2.4 и 2.5, расположение компонент представлено на рис. 2.5.

Различие значений функций правдоподобия для двух компонент $L_2 = -1243$ и трёх компонент $L_3 = -1219$ ($\Delta L = 24$). Как показано в [60] в этом случае $2\Delta L$ распределено как χ_6^2 и вероятность случайного отклонения $2\Delta L = 48$ равна 10^{-8} . Функция правдоподобия для четырёх компонент $L_4 = -1211$, $2(L_4 - L_3) = 16$ вероятность получения этой величины случайным образом равна 0.01. Это свидетельствует о наличии не более трёх классов всплесков. Третий класс всплесков значительно перекрывается с классом длинных/мягких всплесков (см. Рис. 2.5), поэтому нельзя утверждать, что он соответствует реальному физически выделенному классу всплесков, а не

вызван эффектами селекции. Также, учитывая, что распределения по T_{50} и HR_{32} сами по себе описываются только двумя компонентами, для дальнейшего описания набора всплесков KW была выбрана сумма только двух компонент, которые далее именуются короткие/жесткие и длинные/мягкие всплески.

Принадлежность всплеска к классу с номером l определяется на основании значения индикаторной функции

$$I_l = \frac{p_l p(x, y|l)}{\sum_l p(x, y|l)} \quad (2.5)$$

Используя индикаторную функцию кластера коротких/жестких всплесков I , всплески были классифицированы следующим образом: $I \geq 0.9$ — Тип I, $0.1 \leq I < 0.9$ — Тип I/II (неопределённый тип), $I < 0.1$ — Тип II. Названия типов выбраны по аналогии с физической классификацией. Результаты классификации представлены на Рис 2.6.

В наборе 1143 всплесков доли всплесков разных типов составляют: Тип I — 18%, Тип I/II — 4% и Тип II — 78%. Для всех всплесков типа I длительность согласуется с ограничением $T_{50} \leq 0.6$ с. Доля всплесков типа II среди коротких всплесков составляет 7% (19% если всплески типа I/II относятся к типу II), что согласуется с долей «засорения» коротких всплесков длинными, вычисленной только на основе распределения по длительностям. Для временных историй коротких всплесков типа II характерно наличие одного импульса с плавным нарастанием и спадом. Из 31-го кандидата в короткие всплески с EE начальные импульсы 21-го события имеют Тип I (далее Iee) и 10 имеют неопределённый тип (далее Iee/II). При этом начальные импульсы двух событий, отнесённых к всплескам с EE, имеют тип II.

Также был произведён анализ распределения длительность-пиковая жёсткость. Для этого использовались 1104 GRBs с $S/N \geq 10$ и $\sigma HR_{32pk}/HR_{32pk} < 0.3$. Результаты аппроксимации двумя и тремя гауссовыми компонентами приведены на рис. 2.7. Параметры распределений приведены в таблице 2.6 и 2.7. Различие в жесткостях длинных и коротких всплесков составляет примерно 1.7 раза для пиковых жесткостей и 2.4 раза для интегральных.

Таблица 2.4: Параметры распределения $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32}$, в случае $k = 2$

l	a_x	T_{50c} (c)	a_y	HR_c	σ_x	σ_y	r	p_l
1	$-0.940^{+0.032}_{-0.012}$	$0.115^{+0.009}_{-0.003}$	$-0.124^{+0.011}_{-0.019}$	$0.752^{+0.020}_{-0.032}$	$0.442^{+0.033}_{-0.015}$	$0.221^{+0.008}_{-0.010}$	$0.020^{+0.041}_{-0.056}$	$0.210^{+0.011}_{-0.003}$
2	$0.835^{+0.017}_{-0.005}$	$6.834^{+0.265}_{-0.081}$	$-0.499^{+0.001}_{-0.002}$	$0.317^{+0.001}_{-0.002}$	$0.560^{+0.003}_{-0.019}$	$0.216^{+0.003}_{-0.003}$	$0.176^{+0.006}_{-0.008}$	$0.791^{+0.002}_{-0.012}$

Таблица 2.5: Параметры распределения $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32}$, в случае $k = 3$

l	a_x	T_{50c} (c)	a_y	HR_c	σ_x	σ_y	r	p_l
1	$-0.962^{+0.008}_{-0.016}$	$0.109^{+0.002}_{-0.004}$	$-0.058^{+0.003}_{-0.013}$	$0.876^{+0.005}_{-0.026}$	$0.414^{+0.019}_{-0.018}$	$0.168^{+0.007}_{-0.016}$	$0.098^{+0.020}_{-0.056}$	$0.170^{+0.009}_{-0.010}$
2	$0.088^{+0.129}_{-0.115}$	$1.224^{+0.424}_{-0.284}$	$-0.583^{+0.019}_{-0.023}$	$0.261^{+0.012}_{-0.013}$	$0.739^{+0.031}_{-0.030}$	$0.264^{+0.023}_{-0.004}$	$-0.176^{+0.063}_{-0.112}$	$0.187^{+0.006}_{-0.017}$
3	$0.949^{+0.004}_{-0.012}$	$8.886^{+0.083}_{-0.237}$	$-0.468^{+0.005}_{-0.004}$	$0.340^{+0.004}_{-0.003}$	$0.487^{+0.005}_{-0.003}$	$0.194^{+0.001}_{-0.003}$	$0.071^{+0.009}_{-0.004}$	$0.654^{+0.010}_{-0.022}$

Таблица 2.6: Параметры распределения $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32pk}$, в случае $k = 2$

l	a_x	T_{50c} (c)	a_y	HR_c	σ_x	σ_y	r	p_l
1	$-0.948^{+0.025}_{-0.021}$	$0.113^{+0.007}_{-0.003}$	$-0.068^{+0.008}_{-0.008}$	$0.856^{+0.016}_{-0.016}$	$0.422^{+0.009}_{-0.015}$	$0.260^{+0.002}_{-0.008}$	$0.112^{+0.020}_{-0.045}$	$0.214^{+0.003}_{-0.003}$
2	$0.842^{+0.004}_{-0.006}$	$6.954^{+0.059}_{-0.097}$	$-0.286^{+0.006}_{-0.001}$	$0.517^{+0.007}_{-0.001}$	$0.550^{+0.001}_{-0.004}$	$0.248^{+0.007}_{-0.001}$	$0.191^{+0.002}_{-0.013}$	$0.786^{+0.003}_{-0.003}$

Таблица 2.7: Параметры распределения $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32pk}$, в случае $k = 3$

l	a_x	T_{50c} (c)	a_y	HR_c	σ_x	σ_y	r	p_l
1	$-0.992^{+0.023}_{-0.021}$	$0.102^{+0.005}_{-0.005}$	$-0.005^{+0.025}_{-0.026}$	$0.988^{+0.059}_{-0.058}$	$0.411^{+0.026}_{-0.027}$	$0.200^{+0.021}_{-0.016}$	$0.213^{+0.055}_{-0.065}$	$0.175^{+0.019}_{-0.022}$
2	$0.298^{+0.207}_{-0.241}$	$1.988^{+1.216}_{-0.848}$	$-0.394^{+0.022}_{-0.028}$	$0.404^{+0.021}_{-0.025}$	$0.737^{+0.082}_{-0.094}$	$0.291^{+0.018}_{-0.015}$	$0.009^{+0.136}_{-0.175}$	$0.251^{+0.078}_{-0.051}$
3	$0.964^{+0.038}_{-0.030}$	$9.210^{+0.834}_{-0.607}$	$-0.243^{+0.013}_{-0.010}$	$0.572^{+0.017}_{-0.013}$	$0.476^{+0.016}_{-0.016}$	$0.215^{+0.007}_{-0.013}$	$0.104^{+0.029}_{-0.044}$	$0.579^{+0.063}_{-0.102}$

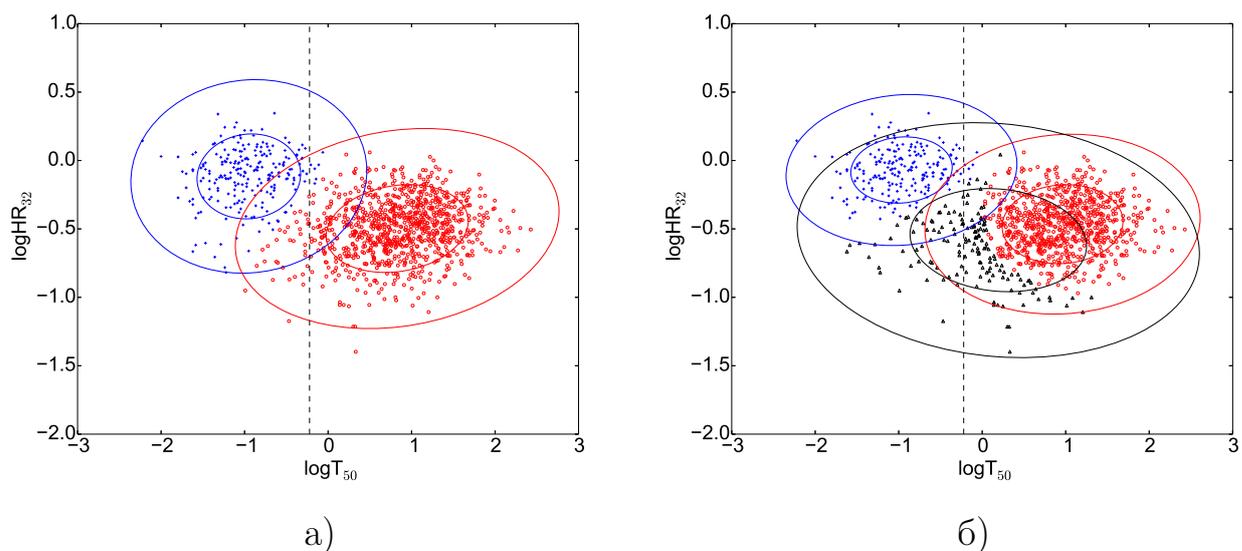


Рисунок 2.5: Аппроксимация распределения $\log T_{50} - \log \text{HR}_{32}$ для 1143 ярких ($S/N \geq 10$) всплесков двумя (а) и тремя (б) гауссовыми компонентами. Эллипсами для каждого распределения отмечены области 1σ и 3σ . Пунктирная вертикальная линия — $T_{50} = 0.6$ с. Кресты — короткие/жесткие всплески, круги — длинные/мягкие всплески, треугольники — промежуточные всплески. Изображенное разделение сделано на основе I_l , но отличается от указанного в тексте для большей наглядности. Всплеск отнесён к кластеру l если значение I_l для этого кластера, превышает значения для других кластеров.

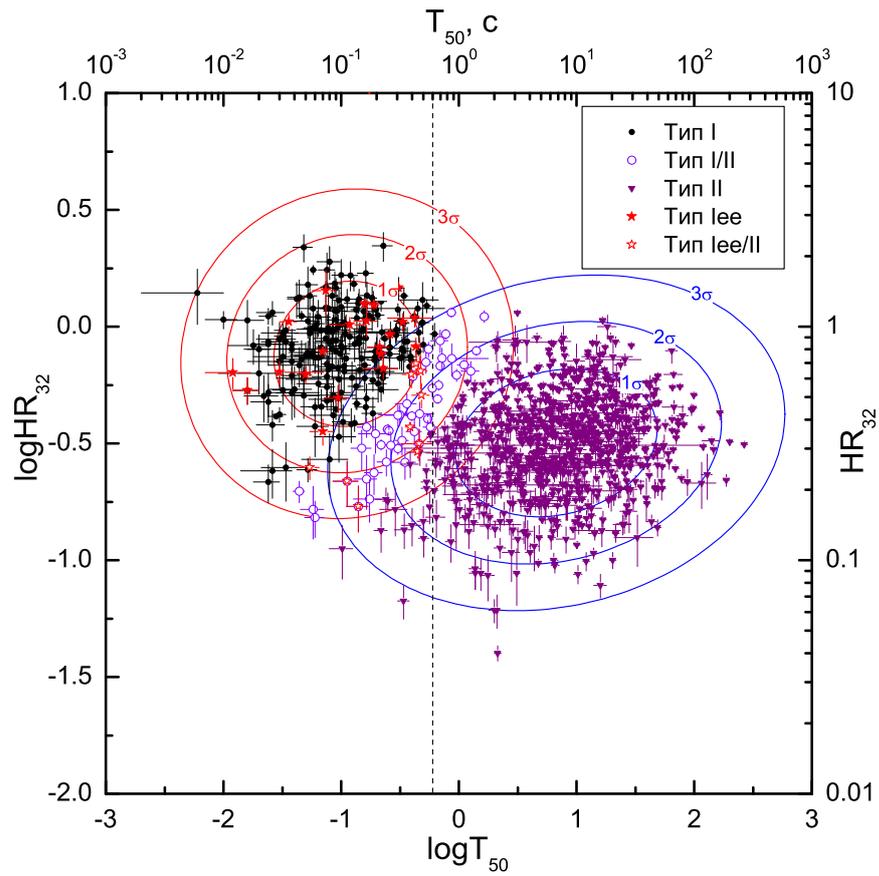


Рисунок 2.6: Классификация 1143 ярких всплесков KW. Черные точки — Тип I, круги — Тип I/II, треугольники — Тип II, см. описание методики классификации в тексте.

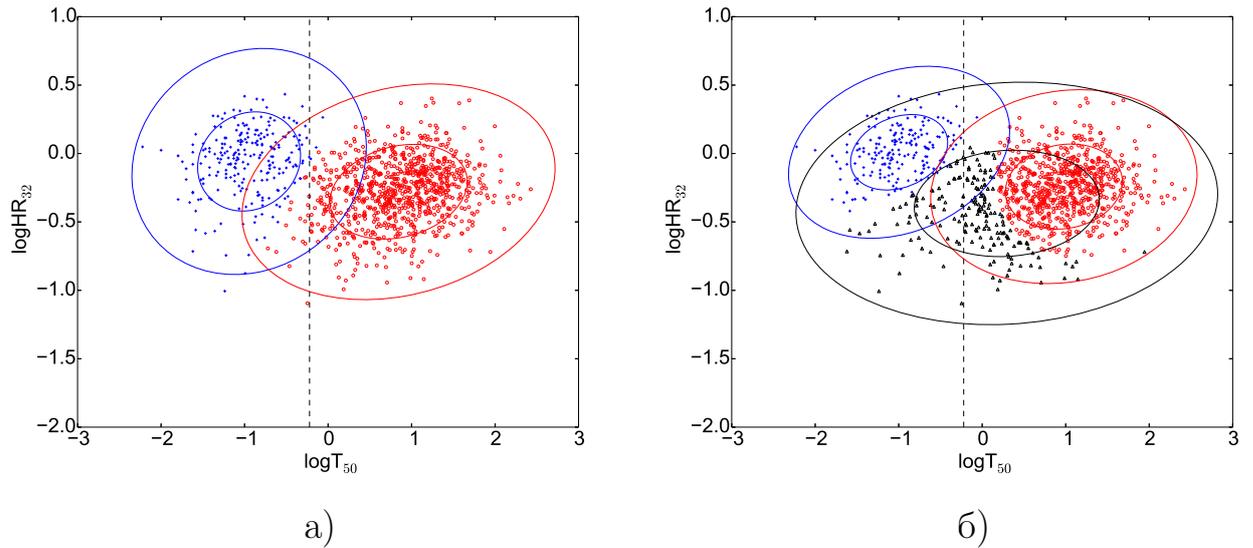


Рисунок 2.7: Аппроксимация распределения $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32\text{pk}}$ для 1104 ярких всплесков ($S/N \geq 10$) двумя (а) и тремя (б) гауссовыми компонентами. Эллипсами для каждого распределения отмечены области 1σ и 3σ . Пунктирная вертикальная линия — $T_{50} = 0.6$ с. Кресты — короткие/жесткие всплески, круги — длинные/мягкие всплески, треугольники — промежуточные всплески. Изображенное разделение сделано на основе I_l , но отличается от указанного в тексте для большей наглядности. Всплеск отнесён к кластеру l если значение I_l для этого кластера, превышает значения для других кластеров.

2.5 Спектральные задержки

Одной из характеристик спектральной эволюции гамма-всплесков является спектральная задержка. Она представляет собой количественную характеристику запаздывания излучения в мягком спектральном диапазоне по сравнению с более жестким [см., например, 79, Глава 3]. Обзор моделей, описывающих появление спектральной задержки, смотри там же. В данном разделе спектральная задержка используется исключительно в роли дополнительного параметра классификации гамма-всплесков, без обсуждения физической причины её возникновения.

2.5.1 Методика вычисления спектральных задержек для кривых блеска KW

Для вычисления спектральных задержек всплесков KW использовался кросскорреляционный анализ временных историй [80, 62]. В этом методе задержка (τ_{lag}) соответствует положению максимума кросс-корреляционной функции (ККФ) временных историй в различных каналах детектора. Определение спектральной задержки между временными историями в двух диапазонах (τ_{lag}) включало выбор разрешения временных историй, выбор интервала кросс-корреляции и вычисление τ_{lag} и её ошибки.

Временное разрешение выбралось таким образом, чтобы для временных историй в обоих диапазонах бин с наибольшей скоростью счета имел отношение сигнал-шум $S/N \geq 8$. Порог $S/N \geq 8$ был выбран произвольно, чтобы исключить из рассмотрения слабые всплески с большими ошибками τ_{lag} . Возможные значения разрешения временной истории составляли от 4 мс до 1024 мс. В качестве интервала кросс-корреляции брался наиболее широкий интервал, ограниченный бинами, в которых было обнаружено превышение 5σ над фоном хотя бы в одном из каналов.

Значение τ_{lag} и его ошибка определялись методом Монте-Карло на основе 100 реализаций исходных кривых блеска. На каждой итерации генерировались искусственные временные истории при помощи добавления пуассоновского шума к исходным данным. На каждой итерации значения ККФ

вычислялось аналогично формуле (10) из [80], ошибки ККФ вычислялись аналогично формуле (5) из [54]. После построения ККФ производился поиск интервала, содержащего основной пик ККФ при этом использовались только значения > 0.1 . После чего ККФ аппроксимировалась полиномом 4-й степени на выбранном интервале и в качестве значения τ_{lag} брался максимум полинома. Если p -значение аппроксимации (*null hypothesis probability*) оказывалось меньше порогового значения 1%, то из ККФ удалялись две крайние точки, и процедура повторялась до превышения порога. Если в результате уменьшения интервала аппроксимации число степеней свободы сокращалось до нуля, то текущая итерация считалась неудачной. В случае, если итоговое число удачных итераций было больше 50, то значение τ_{lag} вычислялось как среднее по всем удачным итерациям, в качестве ошибки бралась дисперсия значений. Иначе значение τ_{lag} считалось определенным ненадёжно и дальше не использовалось. Примеры вычисления лага на одной из итераций представлены рис. 2.8.

2.5.2 Спектральные задержки коротких всплесков

Спектральные задержки вычислялись между парами каналов G3–G1, G2–G1 и G3–G2, где τ_{lag} соответствует сдвигу временной истории в канале, указанном вторым по отношению к каналу, указанному первым. Для коротких всплесков было получено 42, 66 и 158 задержек для пар каналов G3–G1, G2–G1 и G3–G2, соответственно.

На рис. 2.9 представлены распределения коротких всплесков без ЕЕ и начальных импульсов коротких всплесков с ЕЕ по спектральным задержкам. Всплески Типа I имеют, в основном, незначительные $\tau_{\text{lag}} \lesssim 25$ мс для пар каналов G3–G1 и G2–G1, при этом значительная часть всплесков типов I/II и II имеют задержки $\tau_{\text{lag}} \gtrsim 25$ мс для тех же пар каналов.

Среди коротких всплесков с продлённым излучением два события имеют существенные спектральные задержки начального импульса в G3–G1 и были классифицированы Тип Iee/II в предыдущем разделе. Таким образом, можно заключить, что значительная спектральная задержка подкрепляет классификацию на основе распределения на плоскости жёсткость–длительность.

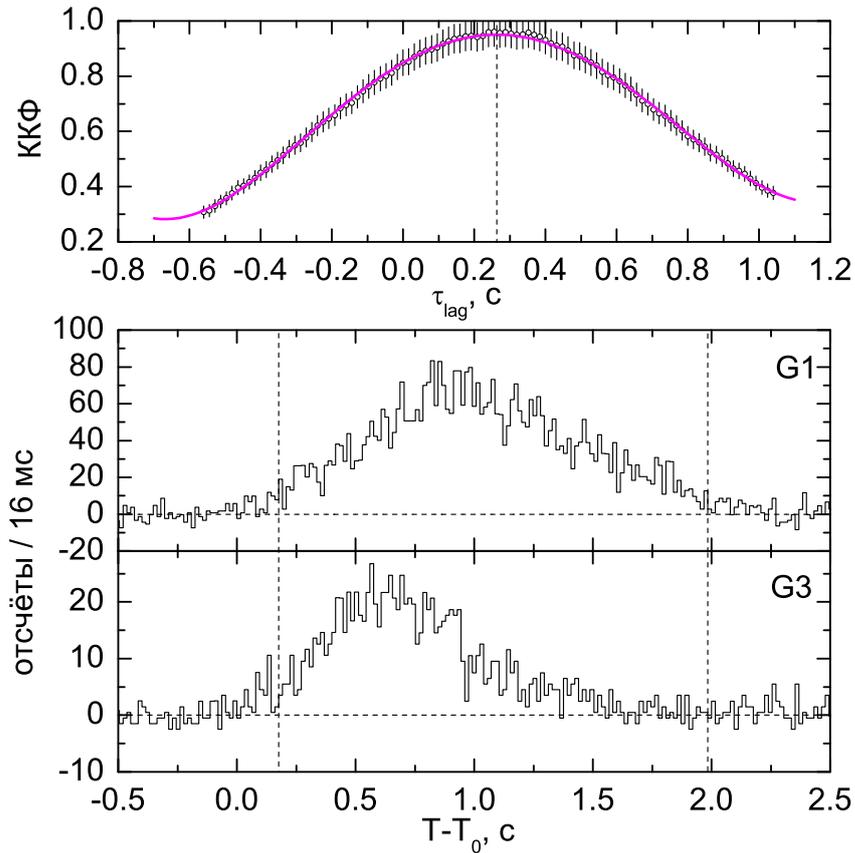


Рисунок 2.8: Иллюстрация вычисления лага между кривыми блеска в G3 и G1 для короткого всплеска GRB20070512_T21972 со значительной задержкой, $\tau_{lag} = 277 \pm 16$ мс. Вертикальные линии на нижней панели обозначают границы интервала кросс-корреляции. Непрерывная линия на верхней панели показывает аппроксимацию ККФ полиномом 4-й степени. Вертикальная пунктирная линия на верхней панели соответствует значению лага.

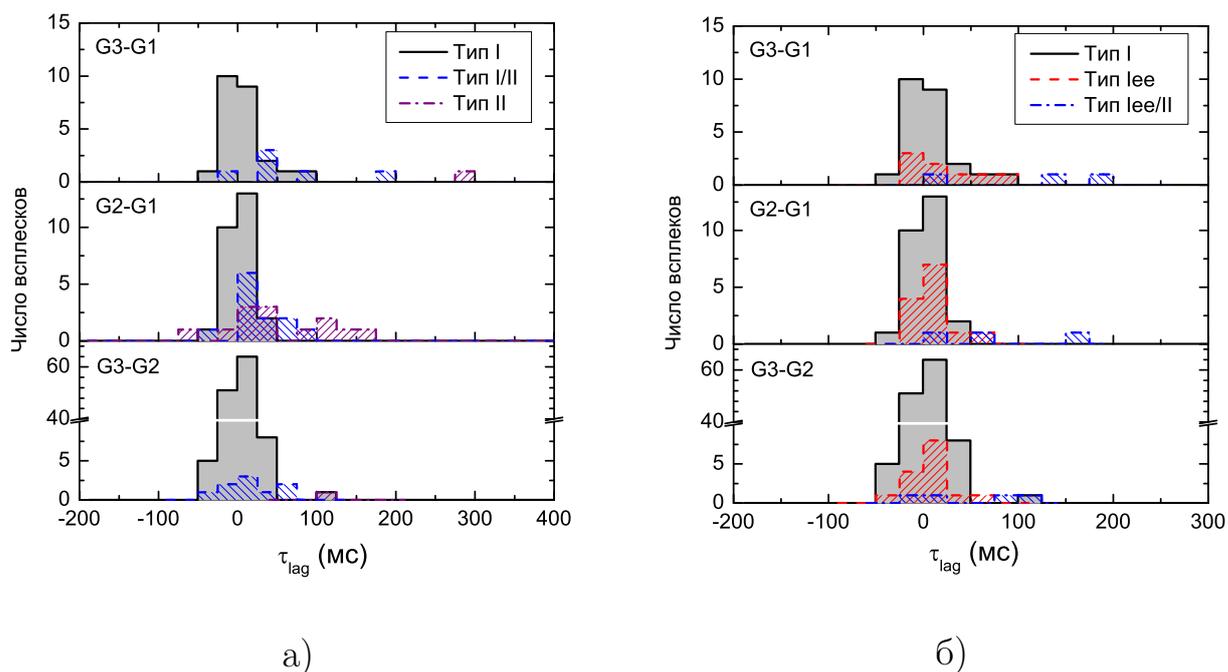


Рисунок 2.9: Распределение коротких всплесков без ЕЕ (а) и начальных импульсов всплесков с ЕЕ (б) по спектральной задержке. На панели (а), заполненная гистограмма — всплески Типа I, заштрихованные гистограммы — всплески Типа I/II и II. На панели (б), заполненная гистограмма — всплески Типа I, заштрихованные гистограммы — всплески Типа Iee и Iee/II.

2.6 Сравнение классификаций на физические типы I и II всплесков KW с определенными красными смещениями

Набор всплесков KW, зарегистрированных с ноября 1994 г. по июнь 2014 г., содержит 126 гамма-всплесков с измеренными красными смещениями [81]. Из них пять имеют сбой во временной истории, далее рассматривается набор из 121 всплесков. Указанный набор содержит 11 коротких и 110 длинных всплесков.

Короткие всплески KW имеют красные смещения в диапазоне 0.1–1.0, длинные — 0.1–5.0. Для $\sim 50\%$ длинных и практически всех коротких всплесков из набора были определены физические типы на основе данных о послесвечении и родительских галактиках [38, 82, 83]. При этом стоит выделить два всплеска. Длинный всплеск GRB 060614 относят к коротким всплескам с продлённым излучением [64]. Однако, по данным KW его нельзя отнести к этому классу, так как на основе полной длительности $T_{50} = 49 \pm 5$ с, длительности его начального импульса $T_{50} = 2.7 \pm 0.3$ с и жесткости этот всплеск относится к типу II. Всплеск GRB 040924 можно отнести к коротким всплескам на основе длительности $T_{50} = 0.34 \pm 0.06$ с, при этом он имеет значительную спектральную задержку, 120 ± 30 мс между каналами G2 и G1, и является достаточно мягким. По данным KW этот всплеск классифицируется как Тип II, так же как и по данным многоволновых наблюдений [38].

Было также проанализировано распределение жёсткость-длительность в системе отсчёта источника всплеска. При этом T_{50} уменьшается в $1 + z$ раз, а жёсткость вычислялась в каналах, чьи границы соответствуют номинальным умноженным на $1/(1 + z)$. Распределения на плоскости $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32}$ в системе отсчёта наблюдателя и собственной системе отсчёта представлены на рис. 2.10. Для сравнения распределений по жесткости и длительности всплесков типов I и II в системе наблюдателя и собственной системе был использован тест Колмогорова-Смирнова для двух наборов. Вероятности (p-значения) того, что жесткости или длительности 121-го всплеска являются выборкой из общего распределения малы ($< 1\%$) как в случае системы наблюдателя,

так и источника. Хотя в последнем случае граница между типами становится размытой, рассмотренные распределения существенно отличаются, что свидетельствует различие параметров коротких/жестких и длинных/мягких всплесков как в системе наблюдателя, так и системе источника всплеска.

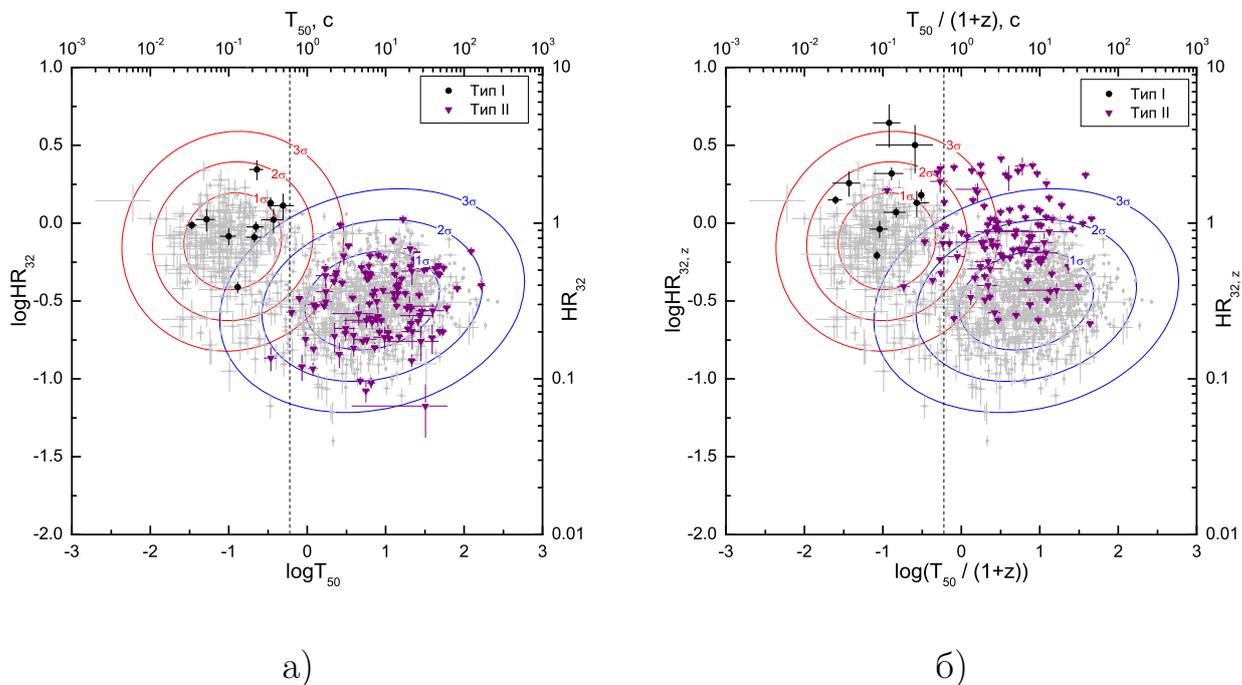


Рисунок 2.10: Распределение всплесков на плоскости $\log T_{50}$ – $\log HR_{32}$ в системе отсчёта наблюдателя (а) и источника (б), с поправкой на космологическое красное смещение. Круги — всплески типа I, треугольники — всплески типа II, серые точки — набор 1143 ярких всплесков.

2.7 Заключение

В данной главе описана методика классификации всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд и получены следующие результаты:

1. Для набора 1834 всплесков KW были вычислены длительности T_{50} и T_{90} , жесткости и спектральные задержки. Показано, что распределения всплесков по T_{50} и T_{90} хорошо аппроксимируются двумя логнормальными распределениями. Обнаружено, что параметры аппроксимации распределения T_{50} более устойчивы к выбору порога поиска начала и конца всплеска, поэтому длительность T_{50} более предпочтительна для

классификации всплесков. В качестве границы между длинными и короткими всплесками была выбрана точка пересечения логнормальных компонент для порога значимости 5σ , $T_{50} = 0.6$ с.

2. Выбран набор коротких всплесков (без продлённого излучения), включающий 265 событий, что составляет 14% от общего числа проанализированных всплесков. Для сравнения, доля коротких ($T_{90} < 2$ с) всплесков в каталоге BATSE равна 24% [84], в каталоге *Fermi*-GBM 18% [85], в каталоге *Swift*-BAT 8% [86]. Доля коротких всплесков, оцененная из площадей гауссовых компонент распределения T_{50} , равна 30%. Соответствующая доля в наборе всплесков BATSE равна 32% [51] и 8% в наборе всплесков *Swift*-BAT [87].
3. Обнаружен 31 всплеск, который можно классифицировать как короткий всплеск с продлённым излучением. Таким образом, доля всплесков с продлённым излучением среди коротких всплесков составляет 10%. Соответствующая доля в выборке *Swift*-BAT равна 20% [86]. Спектральный анализ продлённого излучения представлен в главе 5.
4. Аппроксимация распределения всплесков на плоскости $\log T_{50}$ – $\log \text{HR}_{32}$ набором гауссовых компонент показала наличие двух классов всплесков, коротких/жестких и длинных/мягких. При этом доля коротких/жестких всплесков, определённая на основе аппроксимации, составляет 21%. По данным BATSE доля коротких/жестких всплесков составляет 28% [51]. Добавление третьей компоненты даёт значимое улучшения аппроксимации, однако эта компонента существенно перекрывается с компонентой, описывающей длинные всплески, и не представляет физического смысла. Дополнительный довод в пользу использования только двух классов всплесков связан с тем, что для описания распределений по T_{50} и HR_{32} достаточно только двух компонент. На основании полученной аппроксимации 7% всплесков с $T_{50} < 0.6$ с относятся к типу II. (0.07=18/260) При этом к типу I относятся только всплески с $T_{50} < 0.6$ с (исключение составляет жесткий всплеск GRB20061006_T31422 с пограничной длительностью $T_{50} = 0.620 \pm 0.049$ с, который не входит

в набор коротких всплесков). Неопределённую классификацию (I/II) имеют около 4% всплесков с длительностями T_{50} от 0.04 с до 1.65 с.

На основании аппроксимации распределения $\log T_{50} - \log \text{HR}_{32}$ для 1143 всплесков, был классифицирован набор 265 коротких всплесков без продлённого излучения. Набор включает $\sim 70\%$ всплесков Типа I, $\sim 8\%$ Типа II и $\sim 12\%$ всплесков неопределённого типа (I или II). Доля коротких всплесков с продлённым излучением составляет $\sim 10\%$. Среди начальных импульсов всплесков, отнесённых на основе морфологии временной истории к коротким всплескам с продлённым излучением, 21 (68%) классифицированы как Тип I 7 как неопределённый тип (I/II) и 3 как Тип II.

5. Анализ спектральных задержек коротких всплесков показал, что большинство коротких всплесков Типа I имеют незначительную по абсолютному значению спектральную задержку $\tau_{\text{lag}} \lesssim 25$ мс, в то же время значительная доля всплески типов II и I/II имеет $\tau_{\text{lag}} > 25$ мс. Два всплеска с продлённым излучением имеют задержку начального импульса > 100 мс и были классифицированы как тип II, что свидетельствует о том, что эти всплески относятся к популяции длинных всплесков.
6. Сравнение классификаций на физические типы I и II с классификацией на основе длительности, жесткости и спектральной задержки подтвердило, что всплески Типа I относятся к коротким/жестким всплескам с малой спектральной задержкой, а всплески Типа II, в основном, — длинные мягкие с заметной спектральной задержкой. Сравнение распределений $\log T_{50} - \log \text{HR}_{32}$ в системе отсчёта наблюдателя и в собственной системе отсчёта показывает, что различие в жесткости и длительности всплесков типа I и II становится менее значимым, но сохраняется.

Для дальнейшего анализа выбран полный набор 296 коротких всплесков. Различия между короткими всплесками разных типов будут подробно исследованы на основе спектрального анализа всплесков в главе 5.

По материалам Главы 2 на защиту выносится следующее положение:

- Метод классификации гамма-всплесков по данным эксперимента Конус-Винд на основе длительности и жесткости излучения всплеска, а также величин спектральных задержек.

Глава 3

Локализация источников гамма-всплесков методом триангуляции

3.1 Введение

Для каждого всплеска из набора 296 коротких гамма-всплесков, рассмотренного в предыдущей главе, был произведён поиск детектирования на КА, входящих в межпланетную сеть Interplanetary Network (IPN). Было обнаружено, что 271 ($\sim 92\%$) коротких всплесков Конус-Винд (KW) были зарегистрированы по крайней мере одним КА IPN, что позволило получить их локализацию триангуляционным методом.

В период с ноября 1994 г. по декабрь 2010 г. IPN содержала от 3-х до 11 КА. За все время существования IPN туда, помимо KW, входили следующие аппараты на большом удалении от Земли:

- *Ulysses*, находившийся на гелиоцентрической орбите расстоянии 670–3180 световых секунды от Земли, с инструментом для изучения рентгеновского излучения Солнца и гамма-всплесков GRB [88];
- *Near-Earth Asteroid Rendezvous (NEAR)*, находившийся на расстоянии до 3100 световых секунд от Земли, с рентгеновским/гамма-спектрометром XGRS [89];
- *Mars Odyssey*, запущенный в апреле 2001 г и достигший орбиты вокруг Марса в октябре 2001 г на расстоянии до 1250 световых секунд от Земли [90], КА оборудован гамма-спектрометром GRS, в состав которого входят два детектора с возможностью регистрировать гамма-

всплески: гамма-детектор GSH и детектор высокоэнергичных нейтронов HEND [91, 92];

- *Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry, and Ranging (MESSENGER)* со спектрометром гамма-излучения и нейтронов GRNS [93], запущенный в августе 2004 г и вышедший на орбиту вокруг Меркурия в марте 2011 г на расстоянии до 700 световых секунд от Земли, полное функционирование КА началось в 2007 г [94, 95];
- *International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL)*, где в качестве детектора гамма излучения выступает защита (ACS) спектрометра SPI (SPI-ACS) [96], КА находится на вытянутой орбите с максимальным удалением до 0.5 световых секунд от Земли;

на околоземных орбитах:

- *Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO)* с экспериментом Burst and Transient Source Experiment (BATSE) [52];
- *BeppoSAX* с экспериментом Gamma-Ray Burst Monitor (GRBM) [97, 98];
- *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)* [99, 100];
- *High Energy Transient Explorer (HETE-2)* с телескопом French Gamma-Ray Telescope (FREGATE) [101, 102];
- *Swift* с телескопом Burst Alert Telescope (BAT) [103, 104];
- *Suzaku* с телескопом Wide-band All-sky Monitor (WAM) [105, 106];
- *AGILE* с инструментами Mini-Calorimeter (MCAL) и Super-AGILE [107];
- *Fermi* с инструментом Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) [108];
- Солнечная обсерватория *Коронас-Ф* с гамма-спектрометром Геликон [109];
- КА *Космос 2326* с гамма-спектрометром Конус-А [110];

- КА *Космос 2367* с гамма-спектрометром Конус-А2;
- КА *Космос 2421* с гамма-спектрометром Конус-А3 и
- Солнечная обсерватория *Коронас-Фотон* с гамма-спектрометром Конус-РФ.

По крайней мере два других КА наблюдали гамма-всплески в рассматриваемый период: *Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)* [111, 112, 113] и *Stretched Rohini Satellite Series (SROSS)* [114]. Однако они не использовались для триангуляции, поэтому они не относятся к IPN.

Далее представлена методика локализации и результаты, полученные для 271 короткого всплеска Конус-Винд, детектированных по крайней мере ещё одним КА IPN.

3.2 Наблюдения

Для каждого короткого всплеска Конус-Винд производился поиск в данных КА сети IPN. Для околоземных КА и *INTEGRAL* временное окно поиска было центрировано на времени срабатывания триггера KW, ширина окна соответствовала расстоянию, немного превышающему расстояние от Земли до *Wind*. Для КА в межпланетном пространстве ширина окна поиска соответствовала удвоенному расстоянию до КА, если направление прихода излучения было неизвестно, что имело место для большинства событий. Если направление прихода было известно хотя бы грубо, то вычислялось ожидаемое время прихода излучения на КА и производился поиск вблизи этого времени.

Временные интервалы существования различных КА в IPN и число коротких всплесков KW, зарегистрированных каждым КА/инструментом показаны на рис. 3.1. Наибольшее число зарегистрированных всплесков 139, после KW, было зарегистрировано *INTEGRAL* (SPI-ACS).

Данные о 271-м коротком всплеске KW представлены в таблице 3.1, размещённой на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе по ссылке <http://www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog2/Data/tables/>.

В первой колонке приведено обозначение всплеска, «GRBYYYYMMDD_Tsssss», где YYYYYMMDD — дата всплеска и sssss —

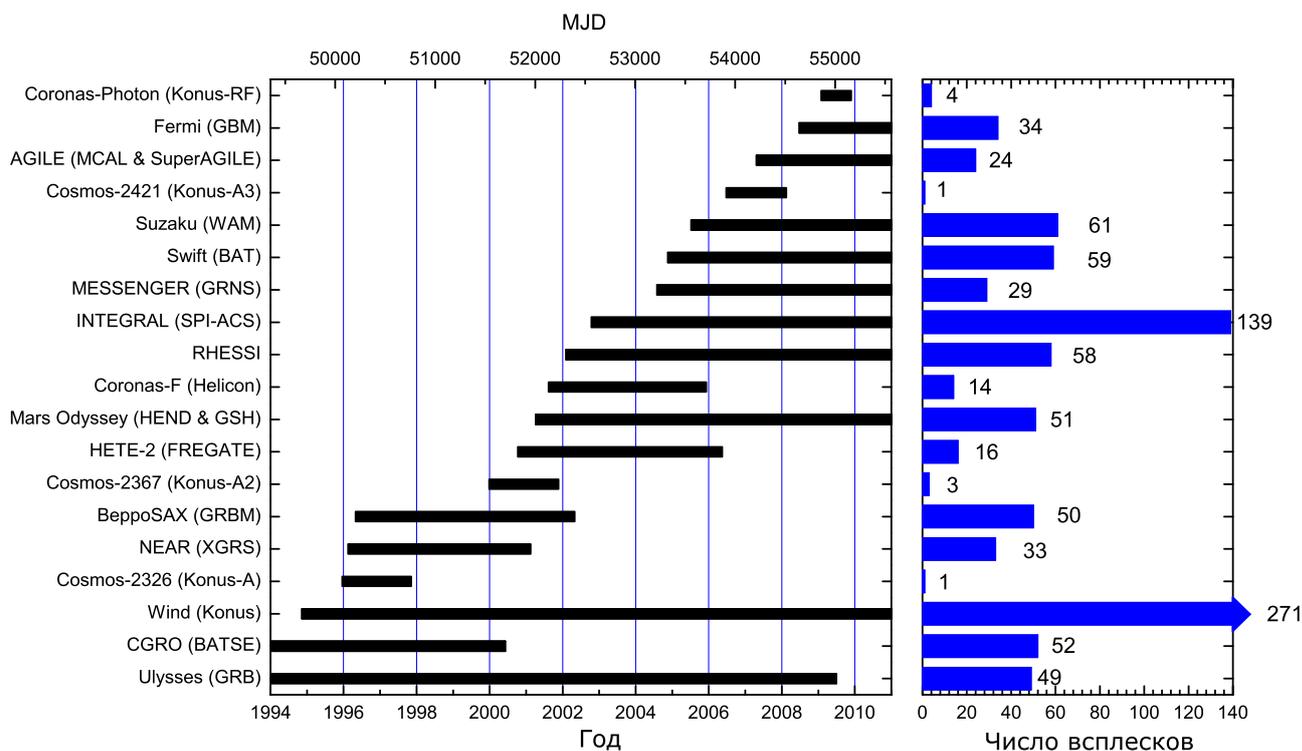


Рисунок 3.1: Левая панель: сроки работы инструментов IPN с момента запуска *Wind* в ноябре 1994 года (имена инструментов приведены в скобках). Правая панель: число коротких всплесков KW, детектированных каждым инструментом (для KW — количество всплесков, детектированных по меньшей мере одним другим КА IPN).

время триггера KW в секундах UT, округлённое до целых секунд (из-за значительного удаления *Wind* от Земли это время может отличаться на ~ 6 с от времени, поправленного на распространения сигнала от KW до центра Земли). Колонки (2)–(4) содержат год, месяц и число, когда произошел всплеск. Колонки (5)–(7) содержат часы, минуты и секунды триггерного времени KW. Колонка (8) содержит Тип всплеска определенный в предыдущей главе. Типы имеют значения: I (результат слияния компактных объектов), II (результат коллапса массивной звезды), I/II (неопределенный тип), Iee (тип I с продлённым излучением) и Iee/II (тип не определен: Iee или II). Колонка (9) содержит время задержки на распространение фронта излучения от *Wind* до центра Земли, колонки (10) и (11) содержат 3σ ошибки этого значения (Задержки вычислены с использованием IPN локализаций приведённых ниже). Колонка (12) содержит названия миссий/инструментов, которые наблюдали всплеск (также отмечены наблюдения инструментами, которые

не являются часть IPN, а именно: COMPTEL на *CGRO*, DMSP, *Fermi* LAT, MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) и SROSS) Колонки (13)–(14) содержат полное число КА IPN и число дальних КА IPN, наблюдавших всплеск. Последняя колонка содержит комментарий, если есть. Описание таблицы также приведено по указанной выше ссылке.

За рассматриваемый период четыре КА в межпланетном пространстве входили в состав IPN: *Ulysses*, *NEAR*, *Mars Odyssey* и *MESSENGER*. Из 271 всплеска, 30 наблюдались двумя из перечисленных КА, 102 — одним, 139 — не наблюдались ни одним из указанных КА.

Семь коротких всплесков Конус-Винд были точно локализованы инструментами, способными строить изображения в рентгеновском или мягком гамма-диапазоне, а именно *Swift*-BAT, *HETE-2* (WXM/SXC) и *INTEGRAL* (IBIS/ISGRI). Для большинства этих всплесков было зарегистрировано рентгеновское послесвечение; для некоторых из них было определено космологическое красное смещение источника по наблюдениям оптического послесвечения или спектроскопии родительской галактики. Эти всплески были использованы для проверки используемого метода триангуляции.

3.3 Методика триангуляции

При регистрации всплеска на двух КА с временной задержкой δT , для него может быть построена область локализации в виде кольца на небесной сфере с углом раствора θ относительно вектора, соединяющего два КА. Значение угла θ определяется выражением

$$\cos \theta = \frac{c\delta T}{D}, \quad (3.1)$$

где c — скорость света и D — расстояние между КА. Здесь подразумевается, что всплеск представляет собой плоскую волну, т. е. расстояние до источника много больше D .

Измеряемая временная задержка имеет ошибку, которая в общем случае не симметрична $d_{\pm}(\delta T)$, т. е. измеренная временная задержка имеет доверительный интервал от $\delta T + d_{-}(\delta T)$ до $\delta T + d_{+}(\delta T)$ ($d_{-}(\delta T)$ — отрицательно) на заданном уровне значимости.

Полуширина кольца $d\theta_{\pm}$ определяется выражением

$$d\theta_{\pm} \equiv \theta_{\pm} - \theta = \arccos \left[\frac{c(\delta T + d_{\mp}(\delta T))}{D} \right] - \arccos \left[\frac{\delta T}{D} \right]. \quad (3.2)$$

Следует отметить, что даже в случае симметричных ошибок $|d_{-}(\delta T)| = d_{+}(\delta T)$, кольцо может быть существенно несимметрично если $c(\delta T + d_{\pm}(\delta T))/D \sim 1$ (т. е. направление на источник близко к вектору, соединяющему два КА).

В случае $d_{\pm}(\delta T) \ll D/c$ уравнение 3.2 переходит в часто используемое выражение

$$d\theta_{\pm} = -\frac{cd_{\mp}(\delta T)}{D \sin \theta}. \quad (3.3)$$

Для вычисления наиболее вероятной временной задержки и её доверительного интервала был использован метод минимизации χ^2 , описанный в [115] для триангуляции с дальними КА и этот же метод с некоторыми изменениями был использован для триангуляции с использованием КВ и околоземных КА (или *INTEGRAL*).

Наиболее вероятная временная задержка τ и её ошибка $d_{\pm}\tau$ между временными историями, записанными двумя инструментами вычислялась следующим образом. Пусть $n_{1,i} = n(t_{1,i})$, $n_{2,j} = n(t_{2,j})$ и $\sigma_{1,i}$, $\sigma_{2,j}$ обозначают числа отсчётов с вычетом фона и их ошибки в последовательных равномерных временных интервалах (бинах) $t_{1,i} = t_{1,0} + i\Delta_1$, $t_{2,j} = t_{2,0} + j\Delta_2$, где $i = 0, \dots, m_1$, $j = 0, \dots, m_2$; Δ_1 , Δ_2 — размеры бинов и $t_{1,0}$, $t_{2,0}$ — времена привязки для каждого КА по всемирному времени (UT).

Для простоты будем считать, что $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$ и что отсчёты детекторов подчиняются статистике Пуассона $\sigma_{1(2),i} = n_{\text{tot}1(2),i}^{1/2}$, где $n_{\text{tot}1(2),i}$ — полное число отсчётов (источник + фон) в бине i . Предполагается, что обе временные истории содержат интересующий нас всплеск и интервалы до и после него (если эти интервалы отсутствуют они всегда могут быть заполнены нулями, а в качестве $\sigma_{1(2),i}$ взято стандартное отклонение числа отсчётов фона). Также предполагается, что в первой временной истории $N + 1$ бин, начиная с i_{start} содержат всплеск или участок всплеска, который кросскоррелируется во второй временной истории. С учётом этих предположений можно скон-

струировать статистику:

$$R^2(\tau \equiv k\Delta) = \sum_{i=i_{\text{start}}}^{i=i_{\text{start}}+N} \frac{(n_{2,i} - sn_{1,i+k})^2}{(\sigma_{2,i}^2 - s^2\sigma_{1,i+k})^2}, \quad (3.4)$$

где s — масштабный множитель являющийся отношением полного числа отсчётов, зарегистрированных инструментами $s = \sum_i n_{1,i} / \sum_j n_{2,j}$. Для идеального случая одинаковых детекторов с одинаковыми энергетическими диапазонами и углами падения излучения, и пуассоновской статистики отсчётов, R^2 распределена как χ^2 с N степенями свободы. В реальности существует несколько сложностей. Детекторы имеют разные энергетические диапазоны, разные аппаратные функции и работают в условиях с различным поведением фоновой скорости счёта (переменный фон на околоземных орбитах). Для коротких гамма-всплесков часть этих факторов оказывают незначительное влияние: вариации фона на малых временных масштабах малы, спектральная эволюция, которая приводит к значительному сдвигу между временными историями в различных диапазонах, практически отсутствует у коротких всплесков [116].

Для учёта всех отличий от идеального случая (учёта неопределённости вычисления τ) был применён следующий метод: для заданного N (числа бинов, используемых для построения R^2) вычислялось значение $\chi^2(N)$, соответствующие уровню значимости 3σ (соответствующие вероятности $Q(\chi^2|N) = 2.7 \times 10^{-3}$), на основе которого вычислялся соответствующий 3σ уровень значимости для приведённого $R_r^2(\equiv R^2/N)$, равный

$$R_{r,3\sigma}^2 = \chi_{r,3\sigma}^2 + R_{r,\min}^2 - 1, \quad (3.5)$$

где $R_{r,\min}^2$ — минимум $R_r^2(\tau)$. Вычитание 1 в формуле 3.5 связано с тем, что $R_{r,\min}^2 \sim 1$ для идеального случая, однако, часто на практике $R_{r,\min}^2 > 1$ и следовательно $R_{r,3\sigma}^2 > \chi_{r,3\sigma}^2$. Для определения 3σ доверительного интервала для τ используются ближайшие точки кривой $R_r^2(\tau)$, лежащие выше уровня 3σ полученного из выражения 3.5 (см. примеры на Рис. 3.2). После определения кросскорреляционной задержки τ и её ошибок $d_{\pm}(\tau)$ может быть вычислена временная задержка $\delta T = t_{02} - t_{01} + \tau$; $d_{\pm}(\delta T) = d_{\pm}(\tau)$ (здесь предполагается, что абсолютные времена t_{01} и t_{02} определены точно). Далее для простоты будем называть R^2 как χ^2 .

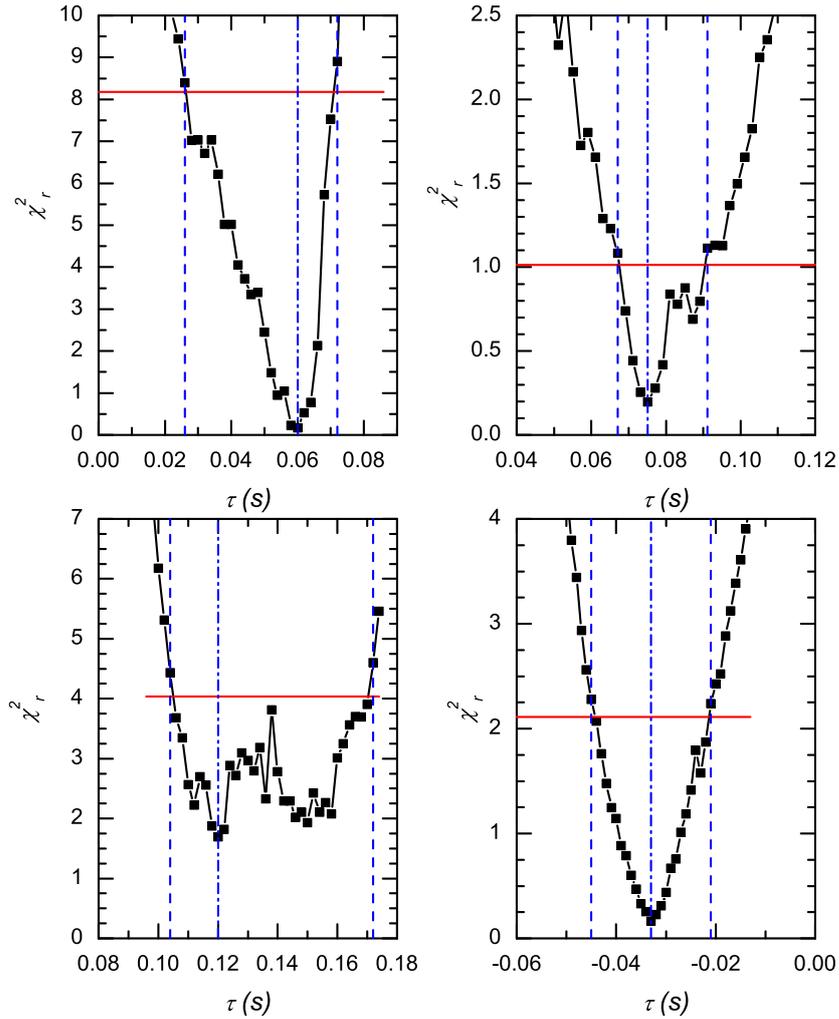


Рисунок 3.2: Примеры кросскорреляционных кривых $\chi_r^2(\tau)$. Горизонтальные красные линии обозначают уровни 3σ . Вертикальные синие линии показывают наиболее вероятную кросскорреляционную задержку τ (штрихпунктирная линия) и её 3σ доверительный интервал (пунктирные линии). Вверху слева: GRB19971118_T29008. Кросскорреляция временной истории KW (2 мс) с временной историей BATSE (64 мс), $\tau = 0.060(-0.034, +0.012)$ с (dof = 2). Вверху справа: GRB20070321_T67937. Кросскорреляция временной истории KW (2 мс) с временной историей WAM (1/64 с), $\tau = 0.075(-0.008, +0.016)$ с (dof = 12). Внизу слева: GRB20090715_T62736. Кросскорреляция временной истории KW (2 мс) с временной историей SPI-ACS (50 мс), $\tau = 0.120(-0.016, +0, 052)$ с (dof = 7). Внизу справа: GRB20100206_T48606. Кросскорреляция временной истории GBM (1 мс) с временной историей KW (2 мс), $\tau = -0.033 \pm 0.012$ с (dof = 9).

3.4 Триангуляционные кольца

Используя приведённую выше методику для 271 короткого всплеска Конус-Винд было получено одно или более триангуляционное кольцо. Обсуждение деталей получения временных задержек для различных пар КА приведены в нижеследующих разделах.

3.4.1 Кольца, полученные с использованием дальних КА

Дальние КА (КА в межпланетном пространстве) играют важную роль в триангуляции гамма-всплесков. Их длинная база позволяет получать малые области локализации для большого числа всплесков. Однако детекторы на этих КА обычно меньше, чем на околоземных, при этом часть детекторов предназначены для планетарных исследований с возможностью регистрации гамма-всплесков. Эти детекторы могут иметь более грубое временное разрешение и меньшую чувствительность. Также часы на этих КА не всегда калиброваны по Всемирному координированному времени (UTC) настолько точно, насколько часы на околоземных КА (или их калибровка не может быть определена настолько аккуратно).

Для локализации использовались данные четырёх межпланетных КА: *Ulysses*, *NEAR*, *Mars Odyssey* и *MESSENGER*. Из них только *Ulysses* имел эксперимент, посвященный гамма-всплескам. Временное разрешение этих четырёх экспериментов составляло от 32 мс (триггерный режим *Ulysses*) до 1 с (*MESSENGER*, *NEAR*). При регистрации короткого всплеска детектором с разрешением, намного превышающим длительность всплеска, обычно наблюдается превышение скорости счёта в одном бине, при этом неопределённость временной задержки составляет половину от наибольшего временного разрешения. Точность часов КА определялась двумя способами. В случае *Ulysses*, эксперименту, регистрирующему гамма-всплески, в точно известные моменты времени посылались определённые команды. Учитывая абберационное время и задержки выполнения команд на борту КА, можно было уточнить временную привязку с точностью от нескольких миллисекунд до 125 мс.

Дополнительно точность временной привязки межпланетных КА может быть проверена триангуляцией известных источников, чьё положение хорошо известно из других измерений: это могут быть как источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (другие употребляемые названия этих объектов: мягкие гамма-репитеры; SGRs), так и гамма-всплески локализованные *Swift*-XRT или *Swift*-UVOT. При вычислении кросскорреляционной задержки коротких всплесков использовалась консервативная оценка ошибок, считалось, что ошибка τ на уровне 3σ не может быть меньше 125 мс.

Всего 132 коротких всплеска KW наблюдались дальними КА: 30 наблюдались двумя дальними КА и 102 одним дальним КА. Среди них девять были точно локализованы инструментами, способными строить изображения в рентгеновском или мягком гамма-диапазоне. Без учёта этих всплесков было получено 150 колец. Распределение 3σ полуширин 150 колец представлено на Рис. 3.3. Наименьшая полуширина $0^{\circ}.0024$ ($0^{\circ}.14$), наибольшая $2^{\circ}.21$, средняя $0^{\circ}.099$ ($5^{\circ}.9$), геометрическое среднее $0^{\circ}.028$ ($1^{\circ}.7$).

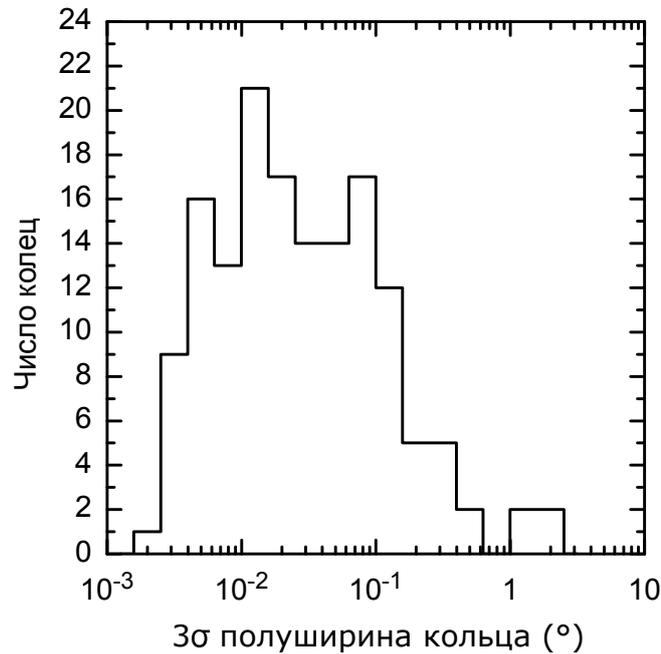


Рисунок 3.3: Распределение 3σ полуширин 150 триангуляционных колец, полученных с использованием данных дальних КА.

3.4.2 Кольца, полученные с использованием KW, *INTEGRAL* и околоземных КА

KW занимает особое место в IPN благодаря уникальному набору характеристик: непрерывному обзору всего неба двумя спектрометрами, положению в межпланетном пространстве в условиях исключительно стабильного фона, широкому энергетическому диапазону (10 кэВ–10 МэВ номинальный; ~ 20 кэВ–15 МэВ в 2010 г.) и достаточно высокой чувствительности ($\sim 10^{-7}$ эрг см $^{-2}$). Доля времени наблюдения KW, отнесённая ко всему времени работы, составляет примерно 95%. Эксперимент зарегистрировал большую часть событий IPN, являясь важным компонентом IPN на расстоянии $\simeq 1$ –7 световых секунды (см. Рис. 3.4).

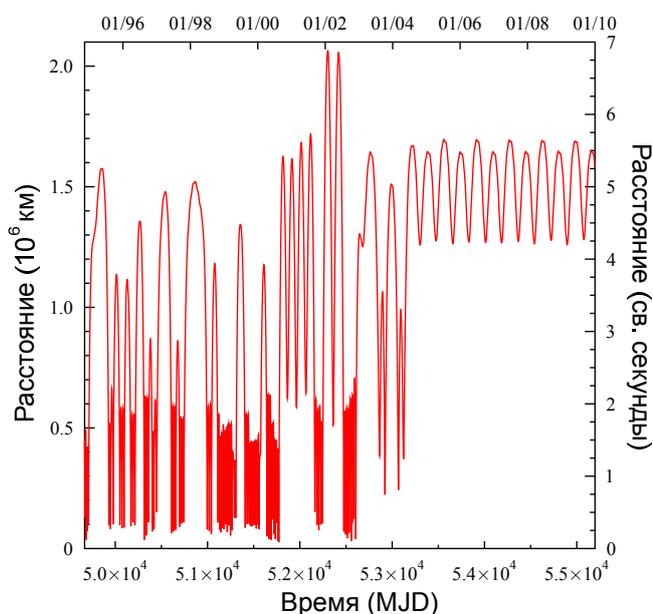


Рисунок 3.4: Зависимость расстояния *Wind* от Земли от времени. Максимальное расстояние составляло 7 световых секунд с января по май 2002 г., когда КА находился на далекой орбите (distant prograde orbit, DPO). С 2004 г. *Wind* находится на орбите Лиссажу вокруг точки либрации L_1 в системе Солнце–Земля на расстоянии 5 световых секунд.

В триггерном режиме временное разрешение KW составляет 2 мс на интервале от $T_0 - 0.512$ с до $T_0 + 0.512$ с (T_0 — время срабатывания триггера), который покрывает, в большинстве случаев, весь короткий всплеск или, по крайней мере, его наиболее интенсивную часть, позволяя производить точ-

ную кросс-корреляцию с временными историями других инструментов. Погрешность часов KW составляет менее 1 мс и их точность была проверена триангуляцией всплесков от SGRs и точно локализованных гамма-всплесков.

Наибольшую точность кросс-корреляции с KW (наименьшие неопределённости времени задержки) дают околоземные КА с большими эффективными площадями, а именно: *CGRO* (BATSE), *BeppoSAX* (GRBM), *INTEGRAL* (SPI-ACS), *Suzaku* (WAM), *Swift* (BAT), и *Fermi* (GBM). В настоящее время кросс-корреляции с *Fermi* (GBM) обычно даёт наилучший результат (наиболее узкое кольцо) благодаря схожим детекторам (сцинтилляционные спектрометры на основе NaI(Tl)), большой эффективной площади GBM (несколько сотен см² при использовании нескольких детекторов) и временной привязке каждого фотона в 128 энергетических каналах, что позволяет получать временную историю GBM с любым временным разрешением и в том же спектральном диапазоне, что у KW.

Так как часы на большинстве околоземных КА очень точные, высокая статистика отсчётов в сумме с высоким временным разрешением дают ошибки временных задержек вплоть до нескольких миллисекунд. Таким образом, несмотря на достаточно небольшое расстояние между околоземными КА и KW в несколько световых секунд, получаемая относительная ошибка временной задержки ($cd_{\pm}(\delta T)/D$), которая определяет ширину кольца (см. Уравнения 3.2 и 3.3) может быть сравнима или даже меньше, чем для кольца с дальним КА. Подобные малые ошибки, порядка нескольких миллисекунд, и следовательно узкие кольца, могут быть получены для коротких всплесков с острым пиком или быстрым нарастанием/спадом. С другой стороны, всплески с плавными импульсами дают достаточно большие ошибки времени задержки, и следовательно более широкие кольца.

Для КА *Wind*, *INTEGRAL* и околоземных аппаратов, неопределённости эфемерид незначительны по сравнению с ошибками времён задержки и поэтому они не учитываются при построении триангуляционных колец.

Всего было получено 356 колец для Конус-Винд и околоземных КА, и Конус-Винд и *INTEGRAL*. На Рис. 3.5 представлено распределение ошибок временных задержек и 3σ полуширин этих колец. Наименьшая неопределённость времени задержки составляет 2 мс, наибольшая – 504 мс, средняя –

43 мс и средняя геометрическая — 23 мс. Наименьшая 3σ полуширина кольца составляет $0^{\circ}027$ ($1'6$), наибольшая — $32^{\circ}2$, средняя — $1^{\circ}3$ и средняя геометрическая — $0^{\circ}43$.

В последующих подразделах приведены некоторые детали триангуляции с использованием KW и *INTEGRAL* и околоземных КА.

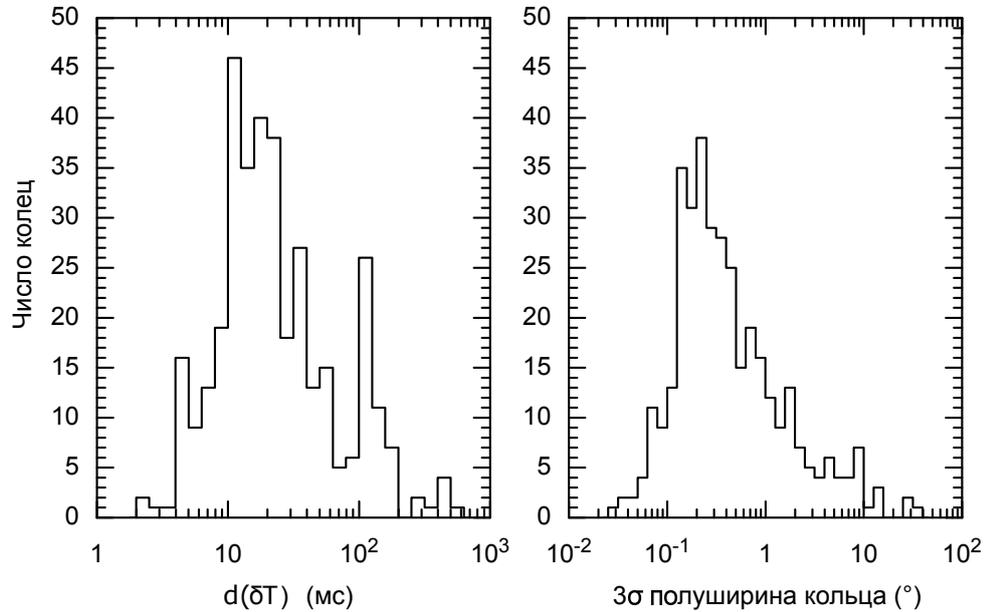


Рисунок 3.5: Распределение неопределенности времени задержки $d(\delta T) \equiv (\delta T_+ + |\delta T_-|)/2$ и 3σ полуширины для 356 триангуляционных колец, полученных с использованием данных KW и околоземного КА (или INTEGRAL).

Триангуляции KW–*CGRO* (BATSE)

Эксперимент BATSE был установлен на обсерватории имени Комптона и предназначен для исследований в области астрофизики высоких энергий [52]. Его детекторы большой площади (Large Area Detectors) записывали временные истории гамма-всплесков в четырёх энергетических диапазонах: Ch1, Ch2, Ch3, Ch4 с номинальными границами каналов: 25–55 кэВ, 55–110 кэВ, 110–320 кэВ и > 320 кэВ. Часы на борту *CGRO* имели точность 100 мкс, которая проверялась при помощи тайминга пульсаров. Бортовое программное обеспечение увеличивало эту ошибку, давая неопределённость в триггерных временах BATSE до $\simeq 1$ мс.

BATSE зарегистрировал 52 коротких всплеска Конус-Винд: 44 в триггерном режиме и 8 в режиме реального времени (real-time mode), в котором

ведётся непрерывная запись скорости счёта с разрешением 0.25, 0.5, 1 или 2 с в зависимости от скорости передачи информации. Триангуляционные кольца были получены для 44 всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме, и 6 всплесков, зарегистрированных в режиме реального времени (эти всплески наблюдались только Конус-Винд и BATSE).

Для кросс-корреляции с триггерными всплесками BATSE использовались временные истории KW в диапазонах G2+G3 или G2 с временным разрешением 2 или 16 мс и объединённые временные истории BATSE (объединение типов данных DISCLA, PREB и DISCS [52]) в диапазонах Ch2+Ch3+Ch4 или Ch2+Ch3 с временным разрешением 64 мс. Для нескольких всплесков такие временные истории были недоступны и были использованы другие типы данных BATSE. Обычно делались кросс-корреляции для различных комбинаций каналов для проверки согласия получаемых временных задержек и выбиралась та, для которой χ^2 был наименьший. Кросс-корреляционные кривые для различных диапазонов могут быть сдвинуты относительно друг друга (на несколько миллисекунд), но 3σ интервалы для кросс-корреляционной задержки τ всегда согласуются хорошо.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.06 до 4.51 со средним 0.81. Максимальное $\chi_{r,\min}^2 = 4.51$ (dof=6) — явный выброс в распределении всплесков по $\chi_{r,\min}^2$.

Это значение соответствует особенно сильному всплеску GRB19970704_T04097 (триггер BATSE #6293) с пиковой скоростью счёта 1.8×10^5 отсчётов s^{-1} на масштабе 2 мс на KW и 6.9×10^5 отсчётов s^{-1} на масштабе 64 мс у BATSE. Обе временные истории существенно искажены эффектами мёртвого времени и наложения импульсов (когда два фотона считаются как один с суммарной энергией). Полученная статистическая ошибка задержки для этого всплеска составила всего 3 мс, для учёта описанных эффектов была добавлена систематическая ошибка 6 мс.

Полученные ошибки временных задержек находятся в диапазоне от 5 мс до 84 мс со средним 24 мс и геометрическим средним 18 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $0^\circ.082$ до $11^\circ.0$ со средним $1^\circ.14$ и геометрическим средним $0^\circ.60$. Наиболее широкое кольцо с 3σ полушири-

ной 11:0 получено для GRB19991001_T04950 (триггер BATSE #7781), в это время *Wind* находился всего в 0.34 световых секунды от Земли.

Расстояния между центральными линиями колец KW–BATSE и центрами локализаций BATSE находятся в диапазоне от 0°007 до 7°7 со средним 2°23 и геометрическим средним 0°60. Для 14 всплесков 1σ круговая область локализации BATSE не пересекает кольца KW–BATSE и расстояния от ближайшей границы кольца находятся в диапазоне от 1.02σ до 7.2σ . Из 52 всплесков 16 наблюдались только Конус-Винд и BATSE и 12 наблюдались только Конус-Винд, BATSE и *ВерроSAX*. Для этих всплесков область локализации была получена в виде сегмента кольца KW–BATSE с использованием следующего метода. В качестве центра сегмента выбиралась точка на центральной линии кольца ближайшая к центру локализации BATSE, и в качестве углов сегмента выбирались точки пересечения кольца и окружности с центром в этой точке и с радиусом равным сумме удвоенной 1σ ошибки локализации BATSE, систематической ошибки, взятой равной 2°0 и расстояния между центром локализации BATSE и центральной линией кольца. Иллюстрация метода приведена на Рис. 3.6. Систематическая ошибка локализаций BATSE $\simeq 2^\circ$ была обнаружена в работе [117].

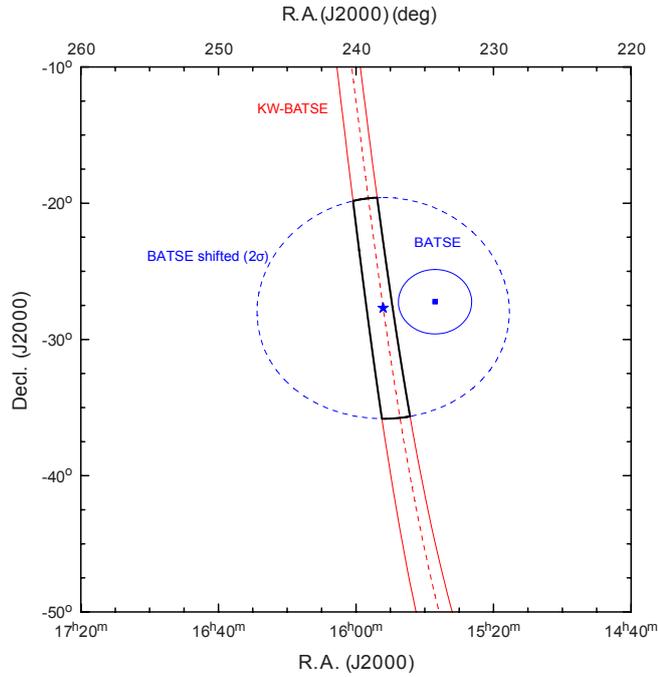


Рисунок 3.6: IPN/BATSE локализация GRB19960420_T16844 (BATSE #5439). Центр локализации BATSE (R.A., decl.(J2000), Err = 234°25, -27°23, 2:37) лежит в 3°38 от центральной линии кольца KW-BATSE. Полученный вытянутый бокс показан сплошной черной линией и его центр (то есть, ближайшая к центру локализации BATSE точка на центральной линии кольца) обозначена звездочкой. Углы бокса образованы пересечением окружности с центром, отмеченным звездочкой, и радиусом 8°12, то есть суммой 2 σ радиуса локализации BATSE и 3°38 систематической ошибки (пунктирная линия), и кольца KW-BATSE.

Триангуляции KW-Fermi (GBM)

Инструмент GBM на борту обсерватории *Fermi* предназначен для изучения гамма-всплесков в диапазоне ~ 8 кэВ–40 МэВ [108]. Преимущества GBM состоят в высокой эффективной площади и возможности временной привязки каждого фотона (Time-tagged events, TTE данные). Часы на борту GBM имеют точность временной привязки превышающую 20 мкс. TTE данные содержат отсчёты в 128 энергетических каналах от ~ 5 кэВ–2 МэВ, что даёт возможность получить временную историю в тех же энергетических диапазонах что и на Конус-Винд.

Инструмент GBM наблюдал 34 коротких всплеска Конус-Винд, для всех из них были получены триангуляционные кольца. Для кросс-корреляции с

триггерными всплесками BATSE использовались временные истории Конус-Винд в диапазонах G2+G3 или G2 с временным разрешением 2 или 16 мс и временные истории GBM с разрешением от 1 до 16 мс созданные из TTE данных только NaI детекторов.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.16 до 2.10 со средним 0.9. Полученные ошибки времён задержки лежат в диапазоне 2.5 мс до 136 мс со средним 22 мс и геометрическим средним 15 мс. Полученные 3σ полуширины колец находится в диапазоне от $0^{\circ}035$ ($2'1$) до $1^{\circ}65$ со средним $0^{\circ}35$ и геометрическим средним $0^{\circ}23$.

Триангуляции KW–*INTEGRAL* (SPI-ACS)

Помимо своего прямого назначения — отсеечения фоновых событий германиевого спектрометра инструмента SPI, защита ACS используется как в качестве всенаправленного детектора гамма-всплесков [118]. Инструмент измеряет временные истории гамма-всплесков с временным разрешением 50 мс в одном энергетическом диапазоне выше ~ 80 кэВ (подробнее см. в [119]). Систематическая ошибка 125 ± 10 мкс во временной привязке ACS была обнаружена [120] и начиная с апреля 2004 г. все временные истории SPI-ACS корректируются автоматически; корректировка для предшествующих данных была выполнена вручную.

Систематическая ошибка связана с тем что преобразование из бортового времени в UTC происходило приблизительно при получении временных историй SPI-ACS в реальном времени (в пределах нескольких секунд после триггера <ftp://isdcarc.unige.ch/arc/FTP/ibas/spiacs/>). С другой стороны, преобразование времени, использовавшиеся для архивных и данных и данных, приходящих с задержкой, является точным. Также было показано, что дрейф часов ACS по отношению к часам германиевого детектора составляет в течении всей миссии составило ~ 1 мс [121], таким образом уменьшив систематическую ошибку временной привязки ACS с 10 мс до 1 мс.

Временные истории SPI-ACS, скорректированные на систематические сдвиги и имеющие высокую точность привязки (по крайней мере с точность вплоть до 1 мс), доступны в архиве данных *INTEGRAL* начиная с версии 3. Архивные и данные, приходящие с задержкой, с одинаковой точностью вре-

менной привязки (приходящие в пределах часа после регистрации всплеска) доступны на ресурсе <http://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/> и <http://www.isdc.unige.ch/heavens/>. Эти данные систематически используются для оперативной триангуляции.

Инструмент SPI-ACS зарегистрировал 139 коротких всплеска Конус-Винд, из них для 103 были получены триангуляционные кольца. Для кросс-корреляции использовались временные истории Конус-Винд в диапазонах G2+G3 или G3 с временным разрешением 2 или 16 мс.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.04 до 3.96 со средним 1.02. Полученные ошибки задержек лежат в диапазоне 4 мс до 175 мс со средним 24 мс и геометрическим средним 19 мс. Полученные 3σ полуширины колец находится в диапазоне от $0^{\circ}047$ ($2'8$) до $4^{\circ}3$ со средним $0^{\circ}41$ и геометрическим средним $0^{\circ}29$.

Триангуляции KW–*Suzaku* (WAM)

Инструмент WAM является активной защитой детектора жесткого рентгеновского излучения на борту миссии *Suzaku* [105]. В триггерном режиме WAM записывает временные истории всплесков с временным разрешением 1/64 с в четырёх каналах в диапазоне ≈ 50 –5000 кэВ. В режиме реального времени разрешение составляет 1 с. В работе [105] было показано, что систематическая ошибка временной привязки *Suzaku* (WAM) пренебрежимо мала.

Инструмент WAM зарегистрировал 61 короткий всплеск Конус-Винд: 51 в триггерном режиме и 10 в режиме реального времени. Кольца были получены для 45 триггерных всплесков.

Для кросс-корреляции использовались временные истории Конус-Винд в диапазонах G2+G3 или G3 с временным разрешением 2 или 16 мс и временные истории WAM в сумме четырёх диапазонов детектора с наиболее сильным откликом.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.21 до 1.78 со средним 1.03. Полученные ошибки задержек лежат в диапазоне от 4 мс до 104 мс со средним 20 мс и геометрическим средним 14 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $0^{\circ}060$ ($3'6$) до $2^{\circ}44$ со средним $0^{\circ}30$ и геометрическим средним $0^{\circ}21$.

Триангуляции KW–*ВерроSAX* (GRBM)

Инструмент *ВерроSAX* (GRBM) являлся защитой, работающей по принципу антисовпадения, системы детектирования гамма квантов PHOSWICH (PHOSphor sandWICH) [98, 97]. В триггерном режиме инструмент измерял временные истории с разрешением 7.8125 мс в диапазоне 40–700 кэВ; в режиме реального времени разрешение составляло 1 с.

Инструмент GRBM зарегистрировал 50 коротких всплесков Конус-Винд: 41 в триггерном режиме и 9 в режиме реального времени. Триангуляционные кольца были получены для 38 всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме и для одного всплеска, зарегистрированного в режиме реального времени (этот всплеск наблюдался только Конус-Винд и GRBM).

Для кросс-корреляции использовались временные истории Конус-Винд в диапазонах G2 или G2+G3 с временным разрешением 2 или 16 мс и временные истории GRBM, приведённые к разрешению 32 мс.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.25 до 12.1 со средним 1.43. Максимальный $\chi_{r,\min}^2$ равный 12.1 (dof=6) соответствует исключительно интенсивному событию GRB19970704_T04097 с пиковой скоростью счёта 1.8×10^5 отсчётов с^{-1} на Конус-Винд на масштабе 2 мс и 1.5×10^5 отсчётов с^{-1} в GRBM на масштабе 32 мс. Обе временные истории существенно искажены эффектами мёртвого времени и наложения импульсов (когда два фотона считаются как один с суммарной энергией). Полученная статистическая ошибка задержки для этого всплеска составила всего 2 мс, для учёта описанных эффектов ошибка была увеличена до 6 мс.

Полученные ошибки задержек лежат в диапазоне от 4.5 мс до 216 мс со средним 32 мс и геометрическим средним 18 мс.

Сравнение первоначально полученных колец с другими кольцами IPN, так же как сравнение временных историй GRBM и BATSE выявило систематический сдвиг во временной привязке GRBM доходящий до 100 мс. Так как этот сдвиг варьируется от всплеска к всплеску, для триангуляции KW–GRBM была введена 100 мс систематическая ошибка. Это привело к существенному уширению колец. Таким образом, конечные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $1^\circ 23'$ до $32^\circ 2'$ со средним $5^\circ 30'$ и геометрическим средним $3^\circ 87'$.

Триангуляции KW–*Swift* (ВАТ)

Swift (ВАТ) – высокочувствительный телескоп с кодирующей маской с широким полем зрения, который регистрирует гамма-всплески в реальном времени [103]. Если всплеск происходит вне поля зрения, он не может быть локализован, но временная история ВАТ может быть использована для триангуляции. Для таких всплесков всегда доступна временная история с разрешением 64 мс в четырёх стандартных диапазонах ВАТ (15–25 кэВ, 25–50 кэВ, 50–100 кэВ и 100–350 кэВ). Для некоторых всплесков доступны ТТЕ данные, что даёт возможность получить временную историю с любым необходимым разрешением.

Инструмент ВАТ зарегистрировал 44 коротких всплеска Конус-Винд вне поля зрения, для 23 из них были получены триангуляционные кольца.

Для кросс-корреляции использовались временные истории Конус-Винд в диапазонах G2 или G2+G3 с временным разрешением 2 или 16 мс и временные истории ВАТ с разрешением 64 мс в большинстве случаев в диапазоне выше 50 кэВ, что обычно даёт лучшее отношение сигнал-шум и лучшее соответствует диапазону Конус-Винд.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.25 до 7.48 со средним 1.41. Максимальный $\chi_{r,\min}^2$ равный 12.1 (dof=6) соответствует исключительно интенсивному всплеску GRB20060306_T55358 с сильной спектральной эволюцией и пиковой скоростью счёта 1.9×10^5 отсчётов/с на Конус-Винд на масштабе 2 мс. Полученная статистическая ошибка задержки для этого всплеска составила всего 5 мс, для учёта описанных эффектов была добавлена систематическая ошибка 10 мс.

Полученные ошибки временных задержек лежат в диапазоне от 5 мс до 64 мс со средним 22 мс и геометрическим средним 18 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от 0°:059 (3/5) до 1°:18 со средним 0°:41 и геометрическим средним 0°:29.

Триангуляции KW–*Коронас-Ф* (Геликон)

Гамма спектрометр Геликон, установленный на солнечной обсерватории Коронас-Ф, имел схожие с Конус-Винд характеристики детекторов и типы

научных данных. Схожее устройство двух инструментов позволило получить хорошие кросс-корреляции временных историй всплесков.

Геликон зарегистрировал 14 коротких всплесков Конус-Винд, для всех из них были получены кольца KW–Геликон.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.25 до 2.67 со средним 1.02. Полученные ошибки временных задержек лежат в диапазоне от 4 мс до 80 мс со средним 25 мс и геометрическим средним 17 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $0^{\circ}045$ ($2'7$) до $1^{\circ}15$ со средним $0^{\circ}38$ и геометрическим средним $0^{\circ}25$.

Триангуляции KW–Космос (Конус-А, А2, А3)

Гамма спектрометры Конус-А, Конус-А2 и Конус-А3 были установлены на КА *Космос* -2326, -2367 и -2421. Краткое описание инструмента Конус-А дано в [110], инструменты Конус-А2 и Конус-А3 имели схожее устройство и типы научных данных.

Этими инструментами было зарегистрировано в триггерном режиме пять коротких всплесков Конус-Винд. Триангуляционные кольца KW–*Космос* были получены для четырёх из них.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.73 до 1.42 со средним 1.07. Полученные ошибки временных задержек лежат в диапазоне от 4 мс до 56 мс со средним 35 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $0^{\circ}15$ до $1^{\circ}20$ со средним $0^{\circ}79$.

Триангуляции KW–*RHESSI*

Гамма спектрометр высокого разрешения *RHESSI* предназначен для изучения излучения высоких энергий от солнечных вспышек в широком диапазоне энергий от 3 кэВ до 17 МэВ [99, 100]. Данные накопленные в режиме ТТЕ позволяют получить произвольную временную и спектральную группировку зарегистрированных квантов.

Инструмент *RHESSI* зарегистрировал 58 коротких всплесков Конус-Винд, из них для 32 были получены кольца KW–*RHESSI*.

Для кросс-корреляции использовались временные истории Конус-Винд в диапазонах G2, G1+G2 или G2+G3 с временным разрешением 2, 16, 64 или 256 мс, в зависимости от интенсивности всплеска.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.36 до 2.62 со средним 1.07. Полученные ошибки временных задержек лежат в диапазоне от 2 мс до 184 мс со средним 36 мс и геометрическим средним 20 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $0^{\circ}027$ ($1'6$) до $2^{\circ}71$ со средним $0^{\circ}53$ и геометрическим средним $0^{\circ}30$.

Триангуляции KW–*HETE-2* (FREGATE)

Гамма спектрометр FREGATE на борту *HETE-2* был предназначен для регистрации гамма-всплесков в диапазоне энергий 8–400 кэВ [101, 102]. В триггерном режиме он записывал временные истории гамма-всплесков с временным разрешением 1/32 с в диапазоне 8–400 кэВ, помимо этого велась непрерывная запись скорости счёта с разрешением 0.1638 с.

Инструмент FREGATE зарегистрировал 16 коротких всплесков KW: 8 в триггерном режиме и 8 в режиме непрерывной записи. В большинстве случаев отклик FREGATE был существенно слабее чем у других инструментов, установленных на КА с низкими околоземными орбитами, поэтому данные FREGATE использовались нескольких случаях, года ни один другой КА на низкой орбите не детектировал данный всплеск. Кольца KW–FREGATE были получены для четырёх всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме.

Для кросс-корреляции использовались временные истории KW в диапазонах G2 или G2+G3 с временным разрешением 2 или 16 мс.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.50 до 1.43 со средним 0.96. Полученные ошибки временных задержек лежат в диапазоне от 56 мс до 168 мс со средним 102 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $0^{\circ}95$ до $1^{\circ}47$ со средним $1^{\circ}10$.

Триангуляции KW–*AGILE* (МСАЛ)

Гамма спектрометр МСАЛ на борту миссии *AGILE* чувствителен к гамма-квантам с энергией $\approx 0.35\text{--}100$ МэВ [107]. Запись временных историй гамма-всплесков в триггерном режиме ведётся в формате TTE.

Инструмент МСАЛ зарегистрировал 24 коротких всплесков KW: 22 в триггерном режиме и 2 в режиме непрерывной записи. Во многих случаях отклик МСАЛ оказывался слабым из-за его высокого энергетического порога и сильного экранирования инструментом GRID, поэтому МСАЛ использовался для триангуляции сильных всплесков. В сумме было получено девять колец KW–МСАЛ.

Для кросс-корреляции использовались временные истории KW в диапазонах G3 или G2+G3 с временным разрешением 2 или 16 мс.

Полученные $\chi_{r,\min}^2$ находятся в диапазоне от 0.29 до 2.26 со средним 1.08. Полученные ошибки временных задержек лежат в диапазоне от 5 мс до 21 мс со средним 13 мс. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $0^\circ 071$ ($4/3$) до $0^\circ 06$ со средним $0^\circ 21$.

Триангуляции *INTEGRAL*–околоземные КА

Даже без планетарных миссий, мини-сеть КА на низких околоземных орбитах, плюс *INTEGRAL* и KW, часто позволяют получить область локализовать гамма-всплеска. Так как орбита *INTEGRAL* расположена на расстояниях $\lesssim 0.5$ световых секунд, что гораздо меньше расстояния Земля–*Wind* $\simeq 5$ световых секунд, кольца KW–*INTEGRAL* и KW–околоземные КА пересекаются под очень острым углом, образуя одну или две вытянутых области локализации. В некоторых случаях пересечения колец *INTEGRAL*–околоземный КА и KW–околоземный КА дают меньшую область локализации.

Суммарно было получено 11 колец *INTEGRAL*–околоземные КА. Полученные 3σ полуширины колец находятся в диапазоне от $1^\circ 0$ до $14^\circ 0$ со средним $5^\circ 9$.

3.4.3 Проверка достоверности триангуляционных колец

Среди 271 короткого гамма всплеска KW, локализованного IPN, 17 были точно локализованы инструментами, способными строить изображения в рентгеновском или мягком гамма-диапазоне: 15 *Swift*-BAT (один из них, GRB 090510, был так же локализован *Fermi*-LAT), 1 *HETE-2* (WXM и SXC) и 1 *INTEGRAL* (IBIS/ISGRI).

Эти всплески были использованы для проверки полученных триангуляций. Для этих 17 всплесков было получено 21 кольцо KW–околоземные КА и 12 колец KW–*INTEGRAL*, при этом не использовалась временная история инструмента, строившего изображение, так как отклик инструмента на всплески в поле зрения отличен от отклика для всплесков вне поля зрения, чьи временные истории использовались для IPN триангуляции. Во всех случаях триангуляционные кольца согласовывались с известным положением источника. Подобная проверка не только подтверждает точность временной привязки и эфемерид космических аппаратов, но и пригодность методики кросс-корреляции и метода получения колец.

На Рис. 3.7 представлено распределение относительных расстояний источников от центральных линий колец, видно что все расстояния, по абсолютной величине, меньше 2σ . Наибольшее отрицательное отклонение составляет -2σ , наибольшее положительное — 1.9σ , среднее — 0.04σ и стандартное отклонение 1.1σ . Помимо этой проверки, часто правильность триангуляции KW–околоземные КА можно установить по согласию нескольких колец KW–околоземные КА между собой и с кольцами, полученными с использованием дальних КА.

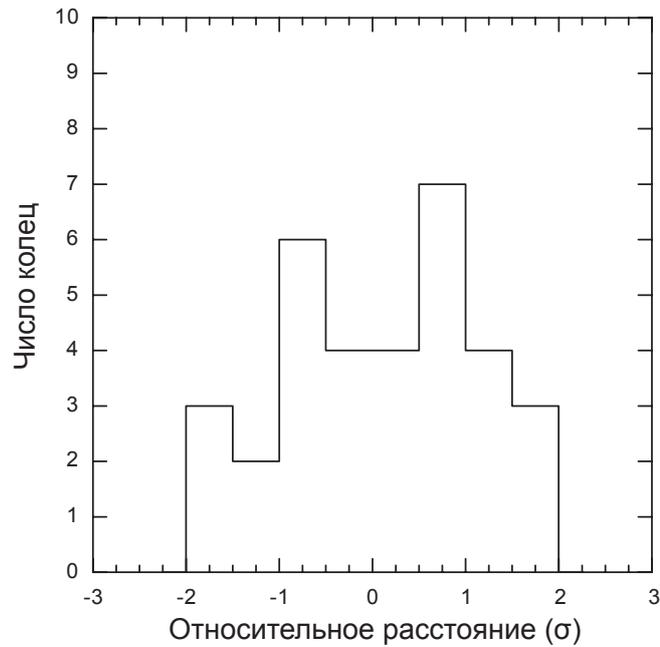


Рисунок 3.7: Распределение расстояний от точных позиций GRB до центральных линий 33 колец, полученных с использованием KW и околоземного КА (или INTEGRAL).

3.4.4 Дополнительные ограничения локализаций

Помимо триангуляционных колец, было получено ещё несколько типов локализационной информации. Они включают: диапазон эклиптических широт, автономные локализации, полученные *CGRO-BATSE*, *BeppoSAX-GRBM* и *Fermi-GBM*, а также области затенённые Землёй или Марсом (*MESSENGER* находится на вытянутой орбите вокруг Меркурия, из-за этого, затенения Меркурием редки). Эта дополнительная информация помогает ограничить положение источника, полученное триангуляционным методом, например, выбрать одну из областей локализации или исключить часть кольца.

Эклиптические широты

Эклиптические широты всплесков вычисляются на основе отношения скоростей счёта в двух детекторах KW, измеренных в режиме фон с разрешением 1.472 или 2.944 с. Ось детектора S2 направлена в северный полюс эклиптики, а ось детектора S1 — в южный. Помимо статистической ошибки, получаемая эклиптическая широта имеет систематическую ошибку, связанную, помимо прочего, с переменными рентгеновскими источниками, затенениями

другими инструментами на борту стабилизированного вращением КА *Wind*. Ошибки полученных значений были взяты на уровне 95%.

Диапазон эклиптических широт, а именно, наилучшая оценка b , верхний и нижний пределы b_{\min} , b_{\max} , можно рассматривать как кольцо с центром в северном или южном полюсе эклиптики с углом раствора $\theta = 90^\circ - |b|$ и полуширинами $d_-(\theta) = b_{\min} - b$ и $d_+(\theta) = b_{\max} - b$.

Затенения планетами

Затенения планетой задаётся прямым восхождением и склонением центра планеты и её радиусом. При наблюдении всплеска на околоземном или околомарсианском КА планета затеняет до ≈ 3.7 ср неба. Положение источника должно быть вне этой затенённой части неба.

Разрешенная часть неба может быть представлена как вырожденное кольцо с центром в направлении, противоположном центру планеты с углом раскрытия $\theta = 0$ и полуширинами $d_-(\theta) = 0$ и $d_+(\theta) = \arcsin(R_{\text{planet}}/R)$, где R — радиус орбиты КА (здесь пренебрегается сплюснутостью планеты и поглощением излучения в её атмосфере).

Автономные локализации

Принцип автономной локализации всплесков с помощью системы детекторов с анизотропной чувствительностью был предложен в [122] и впервые реализован в системе Конус на КА Венера 11 и 12 [123]. Схожие системы локализации с различным числом детекторов были установлены на КА *CGRO* (BATSE), *ВерроSAX* (GRBM) и *Fermi* (GBM). Автономная локализация рассчитывается на основе соотношения скоростей счёта в детекторах. При этом на локализацию влияет альбеда Земли и поглощение излучения в конструкциях КА. Полученные локализации представляют собой плотность вероятности положения источника на небесной сфере. Локализации обычно имеют сложную форму и аппроксимируются кругом с центром в точке наиболее вероятного положения источника, радиус выбирается таким образом, чтобы площадь круга была равна соответствующей площади реальной области локализации для уровней значимости 1σ (BATSE, GBM) или 90% (GRBM), с

учётом только статистической неопределённости. Все локализации подвержены систематическим ошибкам не менее нескольких градусов.

Эти области также могут быть описаны вырожденным кольцом с центром в точке наиболее вероятного положения источника, углом раскрытия $\theta = 0$ и с ширинами $d_-(\theta) = 0$ и $d_+(\theta) = r$, где r — ошибка положения источника.

3.5 Результаты локализации

Информация по локализации 271 короткого всплеска Конус-Винд доступна на сайте ФТИ¹. Первая колонка содержит обозначение всплеска. Вторая колонка даёт число ограничений на локализацию всплеска (число строк с локализационной информацией для всплеска). Третья колонка содержит название источника локализации: КА1–КА2 (триангуляционное кольцо, полученное с использованием КА1 и КА2) или «Ecl.Band» (диапазон эклиптических широт), или «Instrument» (название инструмента, автономно локализовавшего всплеск), или «Occ.sc» (затенение планетой). Колонки (4)–(8) содержат прямые восхождения и склонения центров колец (J2000), угол раствора кольца θ , и 3σ ошибки радиуса $d_-(\theta)$ и $d_+(\theta)$.

Затенения планетами даны только в случаях если они ограничивают локализацию. Диапазон эклиптических широт дан для всех всплесков. Также приведены все автономные локализации.

Локализации *Swift*-BAT взяты из второго каталога *Swift*-BAT, охватывающего период с 19 декабря 2004 по 21 декабря 2009 [86]. Для более поздних всплесков локализации взяты из циркуляров GCN (http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html) с уточнённой локализацией BAT.

Локализация HETE-2 всплеска GRB 040924 (=GRB20040924_T24735) взята из [124].

Локализация IBIS/ISGR1 всплеска GRB 070707 (=GRB20070707_T58122) взята из [125].

Локализации BATSE взяты из каталога на сайте эксперимента², а также из каталога нетриггерных всплесков BATSE [126, 127]. Каталог [127] содер-

¹<http://www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog2/Data/tables/>

²<http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/current/>

жит локализации всех восьми коротких всплесков Конус-Винд, зарегистрированных BATSE в режиме непрерывной записи, в каталоге [126] часть из них пропущена, приведённые локализации взяты исключительно из [127].

Локализации *ВерроSAX* взяты как из каталога GRBM [128] так и из циркуляров IAU (<http://www.cbat.eps.harvard.edu/iauc/RecentIAUCs.html>) и GCN.

Локализации GBM взяты из первого каталога *Fermi*-GBM, охватывающего период с 12 июля 2008 по 11 июля 2010 [129], циркуляров GCN или из последних версий соответствующих `glg_tcat*.fit` файлов из архива GBM (<ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/fermi/data/gbm/>).

3.5.1 Пересечения колец

Для всплесков, зарегистрированных тремя или более достаточно удалёнными друг от друга КА, может быть получена область локализации (бокс) в виде четырёхугольника или более сложной формы.

В общем случае пересечение двух колец, построенных с использованием дальнего КА, даёт маленький бокс с площадью вплоть до одной квадратной угловой минуты.

Пересечение двух колец, полученных с использованием дальнего КА, Конус-Винд и околоземного КА обычно даёт вытянутый бокс, который тем не менее имеет небольшую площадь в несколько сотен квадратных угловых минут. В некоторых случаях пересечение кольца, полученного с использованием дальнего КА, Конус-Винд и околоземного КА может дать бокс меньшей площади, чем с использованием двух дальних КА.

Протяженные боксы были получены для всплесков, не зарегистрированных ни одним дальним КА, но зарегистрированные KW, *INTEGRAL* (SPI-ACS) и одним или более околоземным КА. В этих случаях бокс образуют кольцо KW–околоземный КА и кольцо *INTEGRAL*–околоземный КА или кольцо KW–околоземный КА и кольцо KW–*INTEGRAL*, пересекающиеся под достаточно острым углом. Во всех случаях, когда КА используемые для триангуляции, практически лежат на одной линии кольца пересекаются под очень острыми углами, образуя протяженный бокс. Суммарно было получе-

но 162 бокса для коротких всплесков Конус-Винд: 27 для всплесков, зарегистрированных двумя дальними КА; 84 для всплесков, зарегистрированных одним дальним КА, и, по крайней мере, одним околоземным КА и 51 для всплесков, зарегистрированных KW, INTEGRAL и, по крайней мере, одним околоземным КА. В некоторых случаях полученные области локализации представляют собой дуги (значительные части колец).

3.5.2 Сегменты

Для всплесков, зарегистрированных только KW и другим КА или KW и одним или более околоземных КА, полученная локализация представляет часть кольца (наиболее узкого при детектировании несколькими околоземными КА), удовлетворяющая дополнительными ограничениями. Эти локализации представляют собой целое кольцо (если оно полностью находится внутри ограничений на эклиптическую широту и отсутствуют другие ограничения), или один или два сегмента кольца, образованные пересечением кольца и диапазоном эклиптических широт, и/или исключением затенённой планетой части кольца, или часть кольца, ограниченная локализацией BATSE (см. раздел 3.4.2). Описанный тип локализации имеют 114 всплесков: 20 — всплески, зарегистрированные KW и одним дальним КА (из них 3 зарегистрированы одним околоземным КА в режиме непрерывной записи, но для них не было получено кольцо KW–околоземный КА) и 94 всплеска были зарегистрированы только KW и одним или более околоземным КА.

3.5.3 Полученные области локализации

Окончательные области локализации для 254 коротких всплесков KW (в список не включены 17 точно локализованных всплесков) приведены на ресурсе <http://vizier.cfa.harvard.edu/vizier/ftp/cats/J/ApJS/207/38/table3.dat>. Девять колонок таблицы содержат: (1) обозначение всплеска; (2) число областей локализации всплеска N_r (1 или 2); (3) число углов u области локализации N_c , (4) тип области: «B» (бокс), «LB» (протяженный бокс: бокс с наибольшим размером $> 10^\circ$), «S» (сегмент) или «A» (кольцо); (5) площадь области (или сумма площадей в случае двух областей

локализации); (6) наибольший размер области (наибольшее угловое расстояние между двумя точками границы области; для сегментов больших чем половина кольца приведён внешний диаметр кольца); (7) название локализаций, формирующих область; (8) прямое восхождение центра области, в первой строке, и прямое восхождение всех углов области в последующих N_c строках и (9) склонения центра области, в первой строке, и склонение всех углов области в последующих N_c строках. В случае двух областей локализации дополнительно даны $N_c + 1$ строк: центр второй области и её углы. Таким образом, для таких всплесков дано $2(N_c + 1)$ строк. Все координаты даны на эпоху J2000. В общем случае область локализации не может быть полностью описана четырёхугольником, для точного представления должна учитываться кривизна колец. Только в случаях, когда максимальный размер области не превышает нескольких градусов, область может описываться только четырьмя углами. В других случаях, когда область переставляет собой длинную дугу или сегмент кольца приведённые центр и углы области предназначены для приблизительного указания положения области на небе. Рисунки, иллюстрирующие IPN локализации (все вычисленные кольца и полученные области) можно найти на сайте ФТИ им. А. Ф. Иоффе (http://www.ioffe.ru/LEA/ShortGRBs_IPN/).

Распределение площадей полученных областей локализаций приведено на Рис. 3.8. Для всплесков, зарегистрированных дальними КА, площади находятся в диапазоне от $2.40 \times 10^{-4} \text{ deg}^2$ (0.86 arcmin^2) до 142 deg^2 со средним 3.49 deg^2 и геометрическим средним 0.141 deg^2 . Для всплесков, не зарегистрированных дальними КА, площади находятся в диапазоне от 0.210 deg^2 до 4420 deg^2 со средним 242 deg^2 и геометрическим средним 46.2 deg^2 .

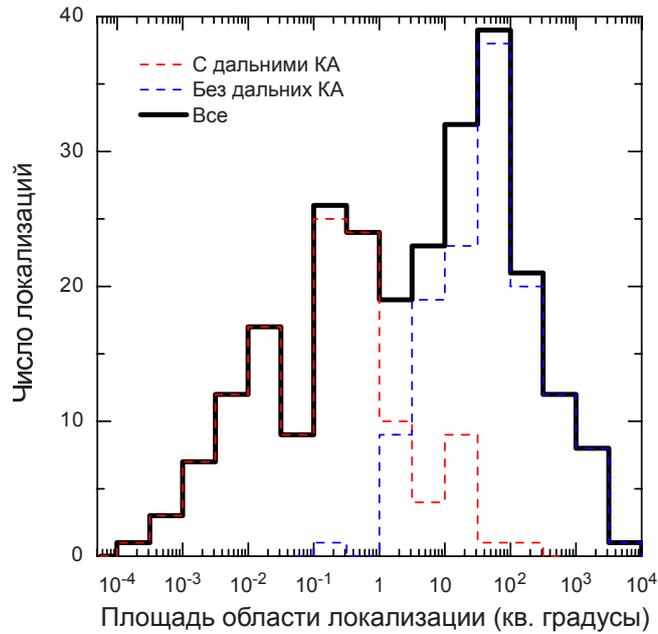


Рисунок 3.8: Распределение площадей областей локализации для 123 коротких всплесков Конус-Винд наблюдавшихся, по крайней мере, одним дальним КА (красная пунктирная линия) и 131 всплеска, не наблюдавшегося ни одним дальним КА (синяя пунктирная линия). Суммарное распределение 254 всплесков обозначено непрерывной линией (17 точно локализованных всплесков не использовались при построении распределения).

3.6 Обсуждение особых событий

GRB 051103 (=GRB20051103_T33943) может являться гигантской вспышкой мягкого гамма-репитера (SGR) в близкой группе взаимодействующих галактик M81, что было предложено в работе [130]. Итоговая область локализации этого события совместно с дальнейшим исследованием предложенной природы этого события приведено в [131]. В работе [132] приведены выводы, сделанные на основе оптических и радио наблюдений, последовавших за детектированием всплеска в гамма-диапазоне. В работе [133] обсуждается не детектирование гравитационных волн во время этого события.

GRB 070201 (=GRB20070201_T55390) вероятно является гигантской вспышкой SGR в туманности Андромеды [134]. В работе [135] обсуждаются результаты недетектирования гравитационных волн от этого события и в [136] обсуждается недетектирование оптического послесвечения и периодического рентгеновского источника.

Поиск других кандидатов в гигантские вспышки SGR на основе полученных локализаций приведён в следующей главе.

GRB 000420 (=GRB20000420_T42271) на основании кольца KW-NEAR был отнесён в работе [76] к кандидатам в гигантские вспышки SGR в близкой галактике M74 (NGC 628). Положение этой галактики находится вне кольца KW-*VerroSAX*, таким образом исключая возможность происхождения этого всплеска в M74 (см. Рис. 3.9).

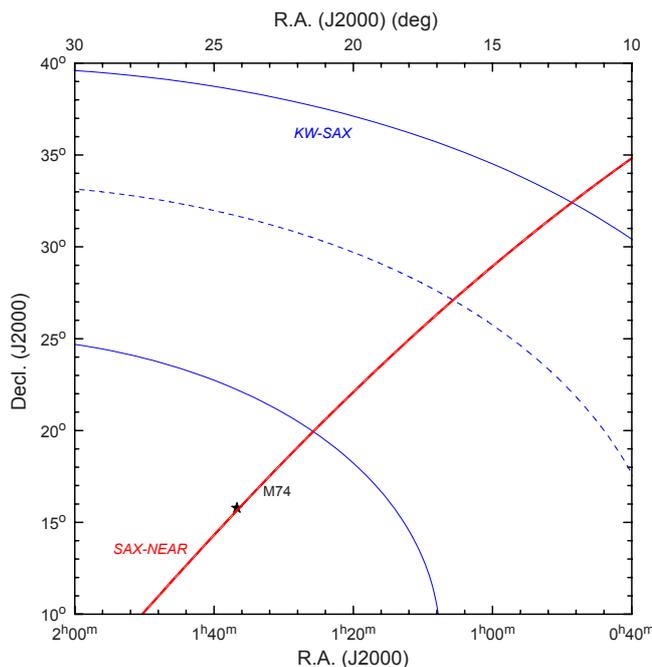


Рисунок 3.9: IPN локализация GRB 000420 (= GRB20000420_T42714). Узкое кольцо SAX-NEAR, шириной $1'7$, проходит через близкую галактику M74, в то время как галактика лежит далеко за пределами широкого 3σ кольца KW-SAX.

GRB 990405 (=GRB19990405_T30059) изначально был классифицирован как всплеск от SGR 1900+14 так как узкое кольцо *VerroSAX-Ulysses* (с 3σ полушириной $0^{\circ}035$) проходило через положение этого SGR. Полученное кольцо KW-*VerroSAX* (с 3σ полушириной $6^{\circ}4$) также согласуется положением этого SGR. Но этот всплеск существенно жестче, чем два необычно жестких всплеска из SGR 1900+14: 981022 и 991001 [137], делая ассоциацию этого всплеска с SGR 1900+14 сомнительной.

3.7 IPN локализация всплесков, наблюдаемых iPTF

Короткие гамма-всплески являются наиболее вероятными источниками гравитационных волн. Для детектирования грав. волн созданы детекторы Advanced LIGO [30] и Advanced Virgo [31], которые будут способны зарегистрировать сигнал от слияния двух нейтронных звёзд на расстоянии в несколько сотен мегапарсек. Область локализации источников гравитационных волн, в случае использования трёх детекторов может иметь размер до $\approx 300 \text{ deg}^2$ [138].

Основным инструментом для поиска оптических транзиентов, связанных с источниками гравитационных волн, в настоящее время является телескоп P48, входящий в состав системы телескопов для поиска транзиентов Паломарской обсерватории (iPTF, *Intermediate Palomar Transient Factory* [139]). Телескоп имеет диаметр ≈ 1.2 м, поле зрения 7 квадратных градусов и чувствительность на уровне 5σ в фильтре R (570–730 нм) ≈ 21 зв. величина за минутную экспозицию. Для проверки возможностей инструмента проводится кампания по наблюдению локализаций гамма-всплесков, зарегистрированных *Fermi*-GBM и IPN.

Длинный гамма-всплеск GRB 120716A был зарегистрирован *Fermi*-GBM, *Konus-Wind*, *INTEGRAL-SPI-ACS*, *Suzaku*-WAM и *MESSENGER*-GRNS, площадь полученной локализации составила ≈ 2 квадратных градуса [140]. Оптическое послесвечение всплеска было обнаружено iPTF через ~ 1.5 дня [141], на расстоянии 3 угловые минуты от центра локализации.

За период с 2013 по 2014 гг. iPTF наблюдала локализации 35 гамма-всплесков, зарегистрированных GBM, для восьми было обнаружено послесвечение. Из них, в четырёх случаях отбор кандидатов был упрощён благодаря IPN локализации.

3.8 Заключение

В этой главе представлено продолжение серии каталогов локализаций гамма-всплесков триангуляционным методом с использованием КА сети IPN. Список предшествующих каталогов приведён в таблице 3.1.

Полученные локализации могут быть использованы для большого круга задач, включающего: поиск гравитационных волн и нейтрино от слияния компактных объектов, поиск гамма-квантов сверхвысоких энергий из источников всплесков и поиск гигантских вспышек SGR в ближайших галактиках.

Таблица 3.1: Каталоги IPN локализаций гамма-всплесков

Период покрытия, годы	Число всплесков	Описание
1990–1992	16	<i>Ulysses, Pioneer Venus Orbiter, WATCH, SIGMA, PHEBUS</i> GRBs [142]
1990–1994	56	<i>GRANAT-WATCH</i> supplement [143]
1991–1992	37	<i>Pioneer Venus Orbiter, CGRO, Ulysses</i> GRBs [144]
1991–1994	218	BATSE 3B supplement [115]
1991–2000	211	BATSE untriggered GRBs supplement [145]
1992–1993	9	<i>Mars Observer</i> GRBs [146]
1994–1996	147	BATSE 4Br supplement [147]
1994–2010	271	короткие гамма-всплески Конус-Винд (эта работа)
1996–2000	343	BATSE 5B supplement [148]
1996–2002	475	<i>BeppoSAX</i> supplement [149]
2000–2006	226	HETE-2 supplement [150]
2008–2010	146	<i>Fermi-GBM</i> supplement [151]

В главе получены следующие результаты:

1. В главе получена наиболее полная локализационная информация для 271 короткого гамма-всплеска Конус-Винд. Для 254 всплесков были получены области локализации и для 17 всплесков с точно известной локализацией, полученной инструментами с возможностью построения изображений в жестком рентгеновском диапазоне, триангуляционные кольца получены для проверки методики.

Суммарно было получено 517 триангуляционных колец, включая 150 колец с использованием дальних КА. Показано, что для многих коротких всплесков триангуляции KW–околоземные КА (или *INTEGRAL*) дают достаточно узкое кольцо с полушириной сравнимой или меньше чем при использовании дальних КА. Таким образом, даже в случае

детек-тирования всплеска только одним дальним КА (и одним и более околосземным КА) можно получить область локализации с площадью несколько сотен квадратных угловых минут. Для всплесков, зарегистрированных только KW, *INTEGRAL* (SPI-ACS) и одним или более околосземным КА, получают протяженные области локализации.

2. С использованием описанной методики были получены локализации 146 гамма-всплесков, зарегистрированных *Fermi* (GBM) за период с 12 июля 2008 г. по 11 июля 2010 г. Было установлено, что IPN-триангуляции существенно улучшают локализации всплесков по сравнению с GBM, сокращая площадь области локализации всплеска в $\lesssim 180$ раз.
3. Описанная методика была успешно применена для подтверждения оптических послесвечений, зарегистрированных системой телескопов для поиска транзиентов Паломарской обсерватории.

По материалам Главы 3 на защиту выносится следующее положение:

- Каталог локализаций коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд с 1994 г. по 2010 г.

Результаты, описанные в главе, отражены в следующих публикациях:

1. V. D. Pal'shin, K. Hurley, D. S. Svinkin et al. Interplanetary Network Localizations of Konus Short Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J. Suppl.* 2013. Vol. 207. id 38;
2. K. Hurley, ... , D. S. Svinkin et al. The Interplanetary Network Supplement to the Fermi GBM Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J. Suppl.* 2013. Vol. 207. id 39;
3. Leo P. Singer, ... , D. Svinkin, et al. The Needle in the 100 deg² Haystack: Uncovering Afterglows of Fermi GRBs with the Palomar Transient Factory // *Astrophys. J.* 2015. Vol. 806 p. 52.

Глава 4

Поиск гигантских вспышек от мягких гамма-репитеров в ближайших галактиках среди коротких всплесков Конус-Винд

4.1 Введение

Мягкие гамма-репитеры (SGRs) относятся к редкому классу нейтронных звёзд, проявляющих два типа активности в жестком рентгеновском диапазоне ($\sim 10\text{--}1000$ кэВ). Во время периода активности SGRs испускают короткие ($\sim 0.001\text{--}1$ с) жесткие рентгеновские всплески с пиковой светимостью $10^{38}\text{--}10^{42}$ эрг с^{-1} . Фаза активности может длиться от дней до года, после чего наступает длительная фаза затишья. Значительно реже, возможно, один раз за время нахождения нейтронной звезды в стадии SGR, SGR может производить гигантские вспышки (GF), во время которых высвобождается значительная энергия $\sim (0.01\text{--}1) \times 10^{46}$ эрг. Гигантская вспышка начинается с короткого ($\sim 0.2\text{--}0.5$ с) жесткого импульса с быстрым нарастанием, порядка нескольких миллисекунд, и более медленным спаданием, который переходит в длинный затухающий хвост, модулированный вращением нейтронной звезды. Пиковая светимость начального импульса может достигать $\sim 10^{47}$ эрг с^{-1} . Подробное описание наблюдательных свойств SGRs дано в работе [33].

На конец 2015 г. известно 15 SGR [152], из которых 14 находятся в нашей Галактике и один расположен в Большом Магеллановом Облаке.

Первая гигантская вспышка была зарегистрирована от SGR в Большом Магеллановом Облаке 5 марта 1979 года приборами Конус на советских межпланетных станциях «Венера-11 и -12» [153, 154] и сетью IPN [155, 156, 157, 158]. На конец 2015 г. гигантские вспышки наблюдались только у трёх источников SGR 0526–66, SGR 1900+14 и SGR 1806–20, все они были зарегистрированы приборами Конус и сетью IPN. Две недавние вспышки от SGR 1900+14 и SGR 1806–20 сопровождались возрастанием вспышечной активности [159, 39].

Все известные SGR являются быстро замедляющимися рентгеновскими пульсарами с периодами 2–12 с и рентгеновскими светимостями в спокойном состоянии $(0.1–1) \times 10^{36}$ эрг с^{-1} . Считается, что SGR принадлежат к более широкому классу магнетаров. Этот класс также включает аномальные рентгеновские пульсары (AXP) и радиопулсары с сильным магнитным полем (high-B radio pulsars). Граница между SGR и AXP размыта из-за наличия аномально высокой рентгеновской светимости SGR, не объясняемой в рамках существующих моделей остывания нейтронных звёзд, и регистрации жестких рентгеновских вспышек от AXPs. Примерно половина известных магнетаров отождествлена с областями активного звездообразования или остатками сверхновых. Пространственное распределение магнетаров в Галактике схоже с распределением наиболее массивных звёзд класса O [152]. Считается, что активность магнетаров связана с наличием у них сверхсильного магнитного поля, оцененного из высокой скорости замедления SGR, $\sim 10^{13}–10^{15}$ Гс, [160, 161, 162]. Альтернативные модели, описывающие активность SGR и AXP, приведены в работе [163].

Благодаря огромной светимости начального импульса гигантские вспышки возможно регистрировать от SGR, расположенных в ближайших галактиках. При этом начальный импульс будет неотличим от короткого гамма-всплеска. Идея о возможности наблюдения гигантских вспышек в ближайших галактиках впервые была высказана в работах [34, 35]. Оценки частоты гигантских вспышек от одного SGR и их доля среди коротких всплесков важны для понимания механизма генерации гигантских вспышек в рамках модели магнетара.

К настоящему времени обнаружено четыре коротких гамма-всплеска, которые могут являться GF в ближайших галактиках. У всплеска GRB 970110 [164] по данным BATSE после начального импульса с длительностью ≈ 0.4 с была обнаружена пульсирующая компонента с периодом 13.8 с на интервале 100 с. В область локализации этого всплеска попадает только одна близкая галактика NGC 6946 на расстоянии 5.9 Мпк.

В работе [165] обсуждается возможность того, что всплеск GRB 050906, зарегистрированный *Swift*, является GF в галактике IC 328 на расстоянии 138 Мпк. Свидетельством в пользу этой гипотезы авторы считают отсутствие детектирования спадающего рентгеновского и оптического послесвечения этого всплеска, однако, это не кажется удивительным, так как всплеск является наиболее слабым всплеском в каталоге *Swift*-BAT [166]. При этом авторами не отвергается возможность принадлежности источника всплеска к скоплению галактик на $z = 0.43$.

Всплеск GRB 051103, зарегистрированный сетью IPN, считается кандидатом в GF из группы галактик M81/M82, находящийся на расстоянии 3.6 Мпк [132, 167, 168]. Этот всплеск представляет собой короткий импульс длительностью 170 мс с быстрым нарастанием (< 6 мс) и экспоненциальным спадом с постоянной времени ≈ 55 мс. Спектр наиболее интенсивной части всплеска описывается моделью CPL с $\alpha \approx 0.1$ и $E_p \approx 2.4$ МэВ. Локализация всплеска покрывает большое число рентгеновских источников в группе галактик M81/M82. Однако, в работе [168] приводятся доводы против гипотезы о GF, в основном на основании гигантской пиковой светимости вспышки $\approx 4.7 \times 10^{48}$ эрг с^{-1} , если предположить, что источник находился в группе галактик M81/M82. Эта величина на порядок больше пиковой светимости вспышки от SGR 1806–20, которая составляла $(2\text{--}5) \times 10^{47}$ эрг с^{-1} в предположении расстояния до SGR 15 кпк.

Другой всплеск GRB 070201 [134, 136] имеет время нарастания ≈ 25 мс и длительность ≈ 180 мс. Спектр всплеска хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным завалом (формула 1.3) с $\alpha \approx -0.6$ и $E_p \approx 280$ кэВ. Область локализации этого всплеска накладывается на галактику M31 (0.78 Мпк). У всплеска обнаружено мягкое послесвечение в диапазоне

17–70 кэВ на интервале до 94 с после начального импульса, которое было интерпретировано как хвост GF.

Пределы на долю GF среди коротких гамма-всплесков были получены в нескольких работах [169, 170, 171, 172, 76, 173] и составили 1–15%, см. работу [36] с подробным обзором предыдущих результатов.

Каталог локализаций коротких гамма-всплесков KW [174], описанный в предыдущей главе, содержит информацию о локализации 271 короткого всплеска, зарегистрированного за 16 лет практически непрерывных наблюдений всей небесной сферы. Этот каталог позволил осуществить поиск кандидатов в GF в наибольшем на 2014 г. наборе точно локализованных коротких всплесков.

В разделе 4.2 обсуждается чувствительность KW и IPN к GF. В разделе 4.3 приводится набор близких галактик и обсуждаются их свойства. В разделе 4.4 описывается поиск близких галактик в областях локализации коротких всплесков. На основании результатов этого поиска в разделе 4.5 вычисляется верхний предел на частоту гигантских вспышек от SGRs. Заключительные ремарки приведены в разделе 4.6.

4.2 Чувствительность KW и IPN

Начальный импульс гигантской вспышки из близкой галактики вызовет срабатывание триггера на временном масштабе 140 мс. Среди трёх зарегистрированных гигантских вспышек ни одна не имеет достоверных прямых измерений параметров начального импульса из-за экстремальных потоков падающего излучения, перегружающих измерительные тракты всех гамма-детекторов. Значение потока, приводящего к насыщению детекторов KW составляет примерно 2.4×10^{-2} эрг см⁻² с⁻¹ [159].

Параметры начального импульса GF от SGR 1806–20 были определены благодаря регистрации излучения вспышки, отраженного от Луны [39]. Спектр излучения хорошо описывается моделью CPL с параметрами $\alpha = -0.73_{-0.64}^{+0.47}$ и $E_0 = 666_{-368}^{+1859}$ кэВ (что соответствует энергии максимума νF_ν спектра — $E_p = (2 - \alpha)E_0 = 850_{-303}^{+1259}$ кэВ). В работе [175] был восстановлен только временной профиль этой гигантской вспышки. Для двух дру-

гих вспышек удалось получить только грубые оценки на E_p : $\sim 400\text{--}500$ кэВ (SGR 0526–66, [153, 154]) и > 250 кэВ (SGR 1900+14, [176, 177]).

В предположении, что вся энергия начального импульса выделяется на коротком триггерном масштабе (140 мс), был оценен минимальный интегральный поток S_{\min} в диапазоне 20 кэВ–10 МэВ, который даст превышение скорости счёта над фоном на 9σ в энергетическом диапазоне G2 (50–200 кэВ) при скорости счёта фона 400 отсч с^{-1} . На основании полученного значения S_{\min} , предельное расстояние регистрации вычислялось по формуле $d_{\max} = \sqrt{Q/(4\pi S_{\min})}$, где Q [эрг] — энерговыделение начального импульса.

Минимальный поток S_{\min} сильно зависит от жесткости всплеска (α и E_p). Известный диапазон E_p начальных импульсов GF — 200 кэВ–1 МэВ соответствует диапазону $S_{\min} = (2.1\text{--}5.7) \times 10^{-7}$ эрг см^{-2} , см. рис. 4.1.

Также была исследована зависимость площадей областей локализаций IPN коротких всплесков от потока, измеренного KW в диапазоне 20 кэВ–10 МэВ на интервале 140 мс с наибольшей скоростью счёта, при этом не было обнаружено существенной корреляции, см. рис. 4.2. Таким образом, можно использовать полученный интервал значений S_{\min} для всей IPN.

Оценки расстояния до SGR 1806–20 находятся в диапазоне примерно от 6 кпк до 19 кпк [178], по самым последним оценкам [179] диапазон расстояний составляет 9.4–18.6 кпк.

Изотропное энерговыделение начального импульса GF от SGR 1806–20 ($Q = 2.3 \times 10^{46} d_{15}^2$ эрг) предполагает предельное расстояние детектирования $d_{\max} = (18\text{--}30) \times d_{15}$ Мпк, где $d_{15} = d/15$ кпк и d — расстояние до SGR 1806–20. Менее интенсивные GF с энерговыделением $Q \approx 10^{45}$ эрг (сравнимые со вспышкой 5 марта 1979 г. от SGR 0526–66) могут быть зарегистрированы до расстояний $d_{\max} = (3.8\text{--}6.3)Q_{45}^{0.5}$ Мпк, где Q_{45} — энерговыделение вспышки в единицах 10^{45} эрг. Диапазон значений d_{\max} является трансляцией диапазона S_{\min} .

4.3 Набор близких галактик

Наиболее полным каталогом, содержащим параметры близких галактик является каталог для поиска источников гравитационных волн (Gravitational

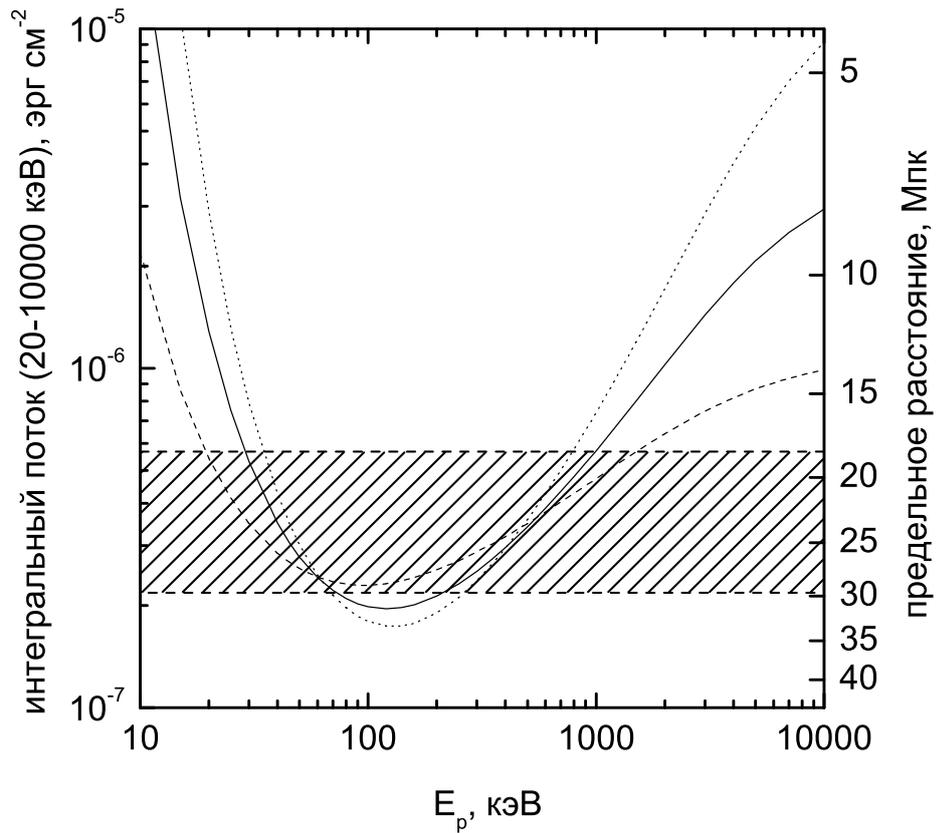


Рисунок 4.1: Зависимость минимального интегрального потока за 140 мс (20 кэВ–10 МэВ) и предельного расстояния, в предположении энерговыделения $Q = 2.3 \times 10^{46}$ эрг, от параметров спектральной модели CPL E_p и α : сплошная линия — $\alpha = -1$, штриховая линия — $\alpha = -1.5$, пунктирная линия — $\alpha = -0.5$. Штрихованная область — диапазон предельных расстояний $\approx 18\text{--}30$ Мпк соответствующий диапазону $E_p = 250$ кэВ–1 МэВ.

Wave Galaxy Catalogue, GWGC [180]). Каталог содержит более 53000 галактик на расстояниях до 100 Мпк. Для поиска возможных родительских галактик гигантских вспышек SGR изначально был выбран набор из 8112 галактик на расстояниях до 30 Мпк. Неопределённость расстояний до галактик в наборе составляет 15–22%.

Используя метод предложенный в работе [76], была оценена полнота набора, связанная с затенением Галактикой. Было построено распределение галактик по Галактической широте с шагом 10° . Разность числа галактик в интервале $0^\circ\text{--}10^\circ$ и числа галактик в незатенённом интервале $10^\circ\text{--}20^\circ$, от-

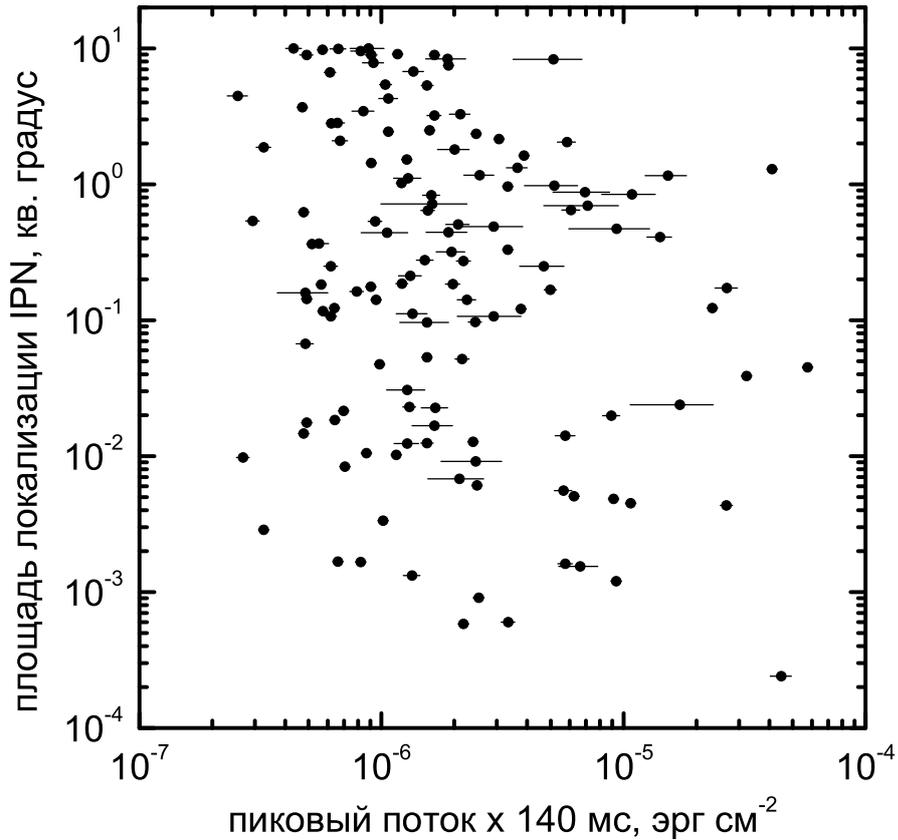


Рисунок 4.2: Площадь области локализации IPN в зависимости от интегрального потока (20 кэВ–10 МэВ) на интервале 140 мс с максимальной скоростью счёта.

несённая к общему числу галактик, даёт долю потерянных галактик 6% и полноту набора галактик $\epsilon_G = 94\%$.

В предположении, что все SGR — молодые изолированные нейтронные звёзды, считалось, что число SGR пропорционально частоте вспышек сверхновых с коллапсом ядра (CCSN, типы Ib/c и II) в галактике.

Следуя работам [181, 182] считалось, что частота вспышек сверхновых пропорциональна светимости галактики в фильтре B^1 (L_B) $R_{\text{SN}} = kL_B$, где k множитель зависящий от морфологического типа галактики данный в единицах SNu, см. таб. 4.1.

¹Параметры фильтра B : $\lambda = 445$ нм и FWHM = 94 нм [183]

Таблица 4.1: Ожидаемая частота вспышек CCSN в зависимости от типа галактики

Тип галактики по Хаббллу	Числовой тип по Хаббллу	Частота вспышек CCSN (k) в SNu
E-S0	от -6 до -1	< 0.05
S0a-Sb	0-3	0.89 ± 0.33
Sbc-Sd	4-7	1.68 ± 0.60
Sm, Irr., Pec.	8-10	1.46 ± 0.71

Единица SNu соответствует $1\text{SN}(100)^{-1}(10^{10}L_{\odot B})^{-1}$, где $L_{\odot B} = 2.16 \times 10^{33}$ эрг с^{-1} светимость Солнца в фильтре B . Светимость галактики L_B вычислялась по формуле $L_B = 10^{-0.4(M_B - M_{\odot B})}L_{\odot B}$, где $M_{\odot B} = 5.48$ абсолютная звёздная величина Солнца в фильтре B .

Исходный набор 8112 галактик содержит 790 галактик, для которых не дана L_B , таким образом полнота набора по L_B составляет $\epsilon_L \approx 90\%$. Среди оставшихся 7322 галактик с указанным L_B , для 2405 не указан морфологический тип. Яркость этих галактик в среднем меньше на три звёздные величины по сравнению с классифицированными галактиками, при этом они содержат меньше 7% суммарной частоты вспышек сверхновых, поэтому эти галактики были исключены из дальнейшего рассмотрения.

В качестве итогового набора галактик были взяты 1896 галактики поздних типов (все кроме E и S0) с наибольшими R_{SN} , содержащие $\epsilon_{\text{SN}} = 90\%$ от суммарной частоты вспышек сверхновых. Плотность этих галактик на небесной сфере составляет 0.046 градус $^{-2}$. Суммарная частота вспышек сверхновых составляет $R_{\text{SN}} = 22.8 \pm 0.4$ год $^{-1}$.

Для проверки методики определения R_{SN} , объёмная плотность частоты вспышек сверхновых $R_{\text{SN}}(d)/(4/3\pi d^3)$, где d — расстояние, для набора 1896 галактик сравнивалась с нижним пределом $1.9_{-0.2}^{+0.4} \times 10^{-4}$ год $^{-1}$ Мпк $^{-3}$, полученным в обзоре сверхновых [184] в галактиках ближе 15 Мпк. Зависимость плотности R_{SN} от расстояния представлена на рис. 4.3. Объёмная плотность, полученная на основе голубой светимости галактик согласуется в пределах 1σ с наблюдаемой величиной, предполагая, что $\approx 19\%$ близких CCSN были пропущены оптическими обзорами неба.

Объёмная плотность частоты вспышек CCSN демонстрирует значимый спад на расстояниях свыше ≈ 22 Мпк, что может быть связано с падени-

ем полноты набора галактик на бóльших расстояниях. Для оценки объёмной частоты вспышек CCNS на расстояниях больших 22 Мпк было использовано среднее значение в диапазоне расстояний до 22 Мпк — $(2.74 \pm 0.18) \times 10^{-4} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$, ошибка дана на уровне значимости 1σ .

Так же было обнаружено увеличение R_{SN}/V внутри ~ 10 Мпк вплоть до $(9.3 \pm 0.16) \times 10^{-4} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ внутри объёма 5 Мпк. При этом всего пять галактик содержат 25% общей частоты CCSN: PGC047885 на расстоянии $d = 5$ Мпк, IC 0342 на расстоянии 3.28 Мпк, NGC 6946 на расстоянии 5.9 Мпк, NGC 5457 (M101) на расстоянии 6.7 Мпк и NGC 5194 (M51) на расстоянии 5.9 Мпк. Эти галактики являются наиболее вероятными источниками гигантских вспышек SGR в ближайшей Вселенной в дополнение к предложенным ранее в работе [172]: M82 на расстоянии $d = 3.4$ Мпк, NGC 253 на расстоянии 2.5 Мпк, NGC 4945 на расстоянии 3.7 Мпк и M83 на расстоянии 3.7 Мпк.

4.4 Поиск гигантских вспышек среди коротких гамма-всплесков, зарегистрированных Конус-Винд

Каталог локализаций коротких всплесков Конус-Винд, полученных при помощи сети IPN [174], содержит 271 всплеск, зарегистрированный по крайней мере одним КА IPN, что дало возможность локализовать их при помощи триангуляции (см. Главу 3). Этот набор содержит 30 всплесков, классифицированных как короткие гамма-всплески с продлённым излучением.

Процедура поиска наложений галактик и локализаций всплесков была проведена для нескольких поднаборов всплесков. При поиске наложений галактика моделировалась кругом с центром, взятым из каталога, и диаметром, равным большой полуоси галактики. Оценка ожидаемого числа галактик в этом наборе областей локализации была выполнена методом Монте-Карло. Было сгенерировано 1000 реализаций набора галактик, в которых центры галактик выбирались случайным образом. Для каждого набора вычислялось число наложений галактик на локализации. Полученные числа сортирова-

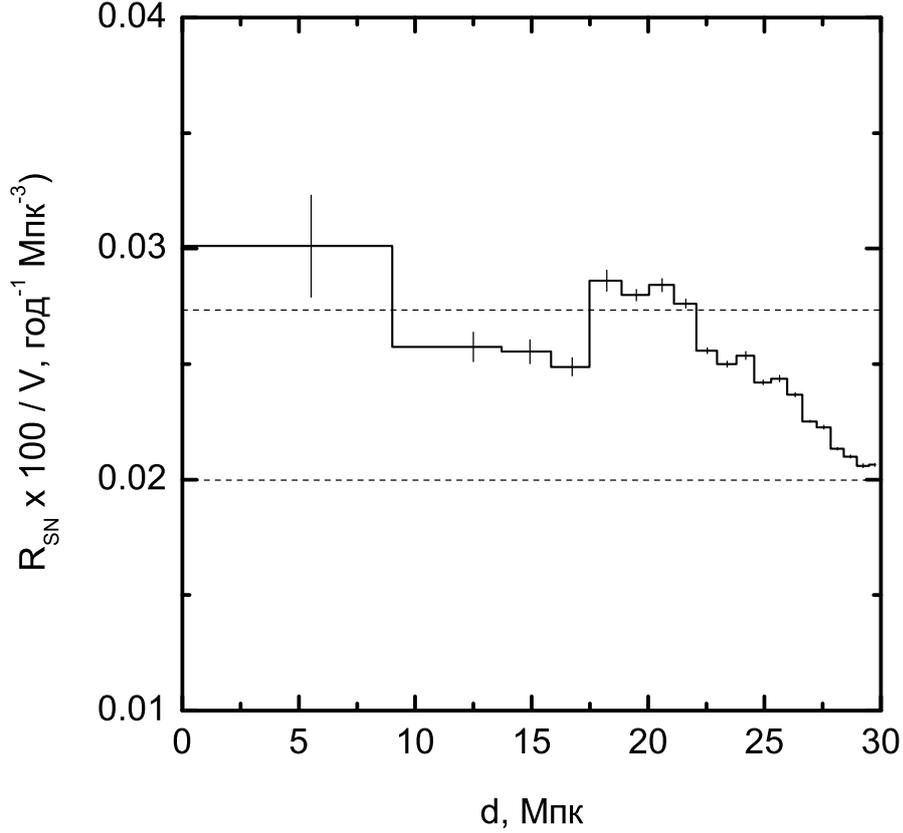


Рисунок 4.3: Удельная частота вспышек CCSN в зависимости от расстояния d . Сплошная линия — $R_{\text{SN}}/V(d)$ для 1896 галактик, содержащих 95% R_{SN} внутри 30 Мпк, из каталога GWGC. Горизонтальные штриховые линии обозначают $\pm 1\sigma$ интервал для локальной удельной частоты вспышек сверхновых $2.3_{-0.2}^{+0.5} \times 10^{-4} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ из работы [184], предполагая, что доля пропущенных в обзоре сверхновых составляет 0.189.

лись по возрастанию и в качестве границ 95% доверительного интервала для числа наложений бралось 25-е и 975-е число.

Наибольший набор включал 140 всплесков с площадями областей локализации меньше 10 кв. градусов. Было обнаружено, что на 12 из 140 IPN локализаций с общей площадью 217 кв. градусов накладывается 20 галактик, при этом ни одна локализация всплеска с продлённым излучением не содержит галактики. Для этого набора локализаций число галактик, ожидаемое для случайного наложения, равно 22–44 на уровне значимости 95%. Также было обнаружено, что локализация только одного всплеска (GRB 050312) накладывается на окраину скопления Девы, при этом локализация не накладывается

ни на одну галактику из набора. Здесь скопление девы моделировалось кругом с центром в $R.A. = 188^\circ$, $Dec. = 12^\circ$ с радиусом 6° , параметры скопления были взяты из работы [185].

Поиск наложений показал, что только два всплеска имеют малую вероятность случайного наложения на близкую галактику $P_{\text{chance}} \sim 1\%$. Эти всплески ранее были отнесены к внегалактическими GF: GRB 051103, чья локализация накладывается на группу галактик M81/M82 (площадь бокса 4.3×10^{-3} кв. градусов) и GRB 070201, считающийся GF в галактике Андромеды (площадь бокса 0.123 кв. градусов). Вероятность P_{chance} соответствует обнаружению как минимум одной галактики в заданной локализации (боксе).

Затем процедура поиска была применена к набору 98 локализаций с площадью меньше 1 кв. градус, который содержит всплески, зарегистрированные по крайней мере одним удалённым космическим аппаратом (см. главу 3). Было обнаружено, что только локализации двух упомянутых выше всплесков содержат галактики.

Общей чертой всех известных GF является малая длительность начального импульса $\lesssim 500$ мс и малое время нарастания импульса $t_r \lesssim 25$ мс. Среди 296 коротких всплесков 40 имеют $t_r < 25$ мс и длительность < 500 мс. Ранее обнаруженные кандидаты GRB 051103 и GRB 070201 имеют $t_r = 2$ мс и $t_r = 24$ мс соответственно. Среди коротких всплесков KW этим критериям удовлетворяют 17 событий с площадями областей локализации менее 10 кв. градусов. Было обнаружено, что четыре области локализации с общей площадью 47 кв. градусов накладываются на пять галактик. Это число попадает в 95% доверительный интервал для случайного наложения, $5\text{--}16$ галактик. Из этих четырёх всплесков только GRB 051103 и GRB 070201 имеют малые вероятности случайного наложения. Результаты поиска наложений для всех перечисленных наборов всплесков приведены в Таблице 4.2.

С учетом произведения факторов полноты набора галактик $\epsilon_{\text{GELS}} \approx 76\%$, и предполагая, что было найдено два кандидата в GF среди 98 хорошо локализованных коротких всплесков, можно поставить верхний предел на долю GF среди коротких всплесков Конус-Винд $< 8\%$ ($=6.296/98/0.76$), где 6.296 — 95% односторонний верхний предел на число вспышек [186]. Благодаря непрерывному наблюдению всего неба IPN, этот предел может быть

Таблица 4.2: Результаты поиска кандидатов в гигантские вспышки SGR в наборе коротких всплесков Конус-Винд

Описание набора	Число локализаций	Число галактик в локализациях	Ожидаемое число наложений на уровне 95%
Площадь локализации < 10 кв. градусов	140	20	22–44
Площадь локализации < 1 кв. градусов	98	2	0–7
$t_r \leq 25$ мс, $T_{100} < 500$ мс, и площадь локализации < 10 кв. градусов	17	5	5–16

распространён на всю популяцию коротких гамма-всплесков с интегральными потоками выше $\sim 5 \times 10^{-7}$ эрг см $^{-2}$. Полученный верхний предел жестче чем полученный в работе [76].

4.5 Верхний предел на частоту гигантских вспышек

Предполагая, что только одна GF с энерговыделением $Q \gtrsim 10^{46}$ эрг наблюдалась в группе галактик M81/M82 внутри объёма $d \leq 30$ Мпк, можно получить верхний предел на частоту подобных GF. Оценка была основана на предположении, что число активных SGR ($N_{\text{SGR}}(d)$) внутри сферы радиуса d пропорционально частоте вспышек CCSN $R_{\text{SN}}(d) = 4/3\pi d^3 r_{\text{SN}}$, где r_{SN} — объёмная частота вспышек CCSN.

$$N_{\text{SGR}}(d) = \frac{N_{\text{SGR,MW+LMC}}}{R_{\text{SN,MW+LMC}}} R_{\text{SN}}(d). \quad (4.1)$$

Галактическая частота CCSN равна $R_{\text{SN,MW}} = 0.028 \pm 0.006$ в год с систематической ошибкой ~ 2 раза [187], и частотой в Большом Магеллановом облаке (LMC) $R_{\text{SN,LMC}} = 0.013 \pm 0.009$ в год [188]. Таким образом, суммарная частота равна $R_{\text{SGR,MW+LMC}} = 0.041 \pm 0.011$ в год.

Наблюдаемая частота гигантских вспышек на SGR задаётся выражением

$$R_{\text{GF}} = \frac{N_{\text{GF,obs}}}{\Delta T N_{\text{SGR}}(d_{\text{max}})}, \quad (4.2)$$

где $N_{\text{GF,obs}}$ — число зарегистрированных GF, $\Delta T = 16$ лет — время наблюдения KW на 2010 г. и $N_{\text{SGR}}(d_{\text{max}})$ задано уравнением 4.1. Для оценки верхнего предела на R_{GF} в случае одной зарегистрированной GF использовался 95% односторонний верхний предел на $N_{\text{GF,obs}} = 4.744$ [186].

Для частоты GF с энерговыделением $Q \gtrsim 10^{46}$ эрг в объеме $d \leq 30$ Мпк уравнение 4.2 даёт верхний предел $(0.6-1.2) \times 10^{-4} Q_{46}^{-1.5}$ год $^{-1}$ SGR $^{-1}$, где Q_{46} энерговыделение GF в единицах 10^{46} эрг. Диапазон верхнего предела является трансляцией ошибок частоты вспышек CCSN. Регистрация только одной GF с энерговыделением $Q \gtrsim 10^{46}$ эрг за последние 35 лет с 1979 г от SGR 1806–20 предполагает частоту таких вспышек в галактике $(0.005-1) \times 10^{-2}$ год $^{-1}$ SGR $^{-1}$ ($= 1_{-0.98}^{+4.6}/35/15$) для одностороннего 95% уровня значимости. Это величина согласуется с верхним пределом, вычисленным выше с учётом диапазона расстояний до SGR 1806–20 9.4–18.6 кпк, в основном из-за больших неопределённостей в галактической частоте GF.

Для менее интенсивных GF с энерговыделением $Q \lesssim 10^{45}$ эрг, которые могут регистрироваться KW и IPN на расстояниях до 6.3 Мпк, считая что одна такая вспышка была зарегистрирована из галактики Андромеды, верхний предел на частоту вспышек составляет $(0.9-1.7) \times 10^{-3}$ год $^{-1}$ SGR $^{-1}$. Этот предел согласуется с наблюдаемой галактической частотой таких вспышек $(0.5-1.4) \times 10^{-2}$ год $^{-1}$ SGR $^{-1}$. Верхний предел и интервал галактической частоты GF дан на уровне значимости 95%.

Дополнительно был вычислен верхний предел на частоту ярких GF с использованием данных *Swift*-BAT. С момента запуска в ноябре 2004 г. *Swift* наблюдал только один кандидат в GF, GRB 050906 [165], предположительно из галактики IC 328 на расстоянии ≈ 130 Мпк. Этот всплеск имел наименьший интегральный поток в диапазоне 15–150 кэВ из всех зарегистрированных на 2011 г. всплесков, $S_{\min} = 6.1 \times 10^{-9}$ эрг см $^{-2}$ [166] и мягкий спектр, описываемый степенным законом с показателем -1.7 . Экстраполяция энерговыделения GF от SGR 1806–20 из диапазона 10 кэВ–10 МэВ в 15–150 кэВ, используя степенной закон с экспоненциальным завалом с параметрами $\alpha = -0.73$ и $E_p = 850$ кэВ даёт 2.5×10^{45} эрг, что соответствует предельному расстоянию детектирования 60 Мпк. Полученное предельное расстояние детектирования в совокупности с мягким спектром всплеска делает ассоциацию с SGR в IC 328 маловероятной.

Время наблюдения 90% неба BAT в 2004–2010 гг. составило 7.25×10^6 с (0.23 года) [189], и экстраполяция этой величины на 2004–2013 гг. даёт 0.35 лет. Отсутствие зарегистрированных GF в объеме $d \lesssim 60$ Мпк в те-

чение наблюдений *Swift*-BAT даёт верхний предел на частоту GF на уровне 95% $\sim 6 \times 10^{-4} Q_{45}^{-1.5}$ год $^{-1}$ на SGR, где Q_{45} — энерговыделение GF в единицах 10^{45} эрг в диапазоне 15–150 кэВ. Таким образом, не смотря на высокую чувствительность BAT, полученный предел менее жесткий, чем полученный по данным KW и IPN из-за меньшей экспозиции всего неба.

4.6 Заключение

В данной главе были получены следующие результаты:

1. Оценена чувствительность KW и IPN, и получено предельное расстояние регистрации гигантских вспышек SGR схожих с GF от SGR 1806–20 равное $(18\text{--}30)d_{15}$ Мпк. Показано, что менее интенсивные GF, сравнимые с GF от SGR 1900+14 и SGR 0526–66 могут быть зарегистрированы IPN в галактиках не далее ≈ 6 Мпк.
2. Произведён поиск близких галактик, находящихся ближе 30 Мпк, в локализациях коротких гамма-всплесков KW. Были обнаружены только два всплеска, ранее ассоциированные с группой галактик M81/M82 (GRB 051103) и галактикой Андромеды (GRB 070201), локализации которых имеют малую вероятность случайного наложения на эти галактики. Дополнительный поиск всплесков из скопления Девы не выявил возможных кандидатов в GF.
3. Получен верхний предел на частоту GF с энерговыделением $Q \gtrsim 10^{46}$ эрг равный $(0.6\text{--}1.2) \times 10^{-4} Q_{46}^{-1.5}$ год $^{-1}$ на SGR, который предполагает появление около одной GF с таким энерговыделением за время активности SGR, $10^3\text{--}10^5$ лет. Этот предел был вычислен на основе наибольшего на 2014 г. набора коротких всплесков и согласуется с ранее полученной в работе [76] оценкой.

Для GF, сопоставимых по энерговыделению со вспышкой 5 марта 1979 г. ($Q \lesssim 10^{45}$ эрг), полученный верхний предел на порядок выше — $(0.9\text{--}1.7) \times 10^{-3}$ год $^{-1}$ SGR $^{-1}$. Что может быть интерпретировано, как возможность наблюдать более одной подобной GF за время жизни

SGR. Полученные верхние пределы содержат неопределённость в порядок величины, связанную с неопределённостью галактической частоты вспышек CCSN, расстояния до SGR 1806–20 и предельного расстояния детектирования IPN. Оцененные дипольные магнитные поля SGR 1900+14 и SGR 0526–66, равные 5.6×10^{14} Гс и 7×10^{14} Гс, соответственно [152], по-видимому, являются достаточными для генерации десятка GF с энерговыделением $Q \sim 10^{45}$ эрг, что согласуется с полученными оценками на частоту появления GF.

4. Определены галактики, которые являются наиболее вероятными источниками GF из-за наибольшего оцененного количества SGR в этих галактиках. Это галактики PGC047885, IC 0342, NGC 6946, NGC 5457 и NGC 5194, в дополнении к предложенным в работе [172].

По материалам Главы 4 на защиту выносится следующее положение:

- Результаты поиска гигантских вспышек от мягких гамма-репитеров в близлежащих галактиках по данным в эксперимента Конус-Винд.

Результаты, полученные в главе, отражены публикации

D. S. Svinkin, K. Hurley, R. L. Aptekar, S. V. Golenetskii, D. D. Frederiks A search for giant flares from soft gamma-repeaters in nearby galaxies in the Konus-Wind short burst sample // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2015. Vol. 447, 1. p. 1028

Глава 5

Спектральный анализ коротких всплесков Конус-Винд

5.1 Введение

Настоящая глава посвящена спектральному анализу 295 коротких всплесков Конус-Винд (KW), локализация которых была описана в Главе 3.

Глава организована следующим образом. В разделе 5.2 дано описание методики спектрального анализа и методики определения интегральных (S) и пиковых (F_{peak}) энергетических потоков. В разделе 5.3 приведены результаты анализа, представлены распределения параметров всплесков. В разделе 5.4 полученные результаты обсуждаются в контексте физической классификации гамма-всплесков.

5.2 Методика

Для каждого всплеска на основе его локализации¹ вычислялась матрица отклика детектора (см. Главу 1). Типичный спектр короткого гамма-всплеска по данным KW состоит из подгруппы первых четырех спектров с временем накопления 64 мс на интервале от 0 до 0.256 с относительно триггера. Около 10% всплесков имеют значимое излучение в пятом спектре (0.256–8.192 с). Для 4% ярких событий границы интервалов накопления спектров с 5 и далее были изменены системой адаптации.

Спектр фона для коротких всплесков без продлённого излучения, как правило, брался на интервале $T_0 + 25$ с со временем накопления около 100 с, он

¹Углы падения для всплесков даны в таблице 5.1 по ссылке <http://www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog2/Data/tables>.

же использовался для калибровки. Для примерно четверти всплесков анализ многоканальных спектров был не возможен, из-за того что основная часть события лежала до начала измерения спектров. Для таких всплесков строился трехканальный спектр, с использованием отсчетов временной истории, накопленных за полную длительность всплеска T_{100} . Из-за малого числа отсчетов (количества фотонов) для большинства всплесков F_{peak} определялся на основе интегрального спектра. Только для 18 достаточно интенсивных событий можно было выделить спектр вблизи максимальной скорости счёта. Итоговой набор спектров состоял из 214 интегральных многоканальных спектров (без учёта 18 спектров вблизи пиковой скорости счёта) и 79 трёхканальных. Два слабых всплеска: GRB19960325_T69892 и GRB19980614_T31854 имели сбои во временных историях и спектрах и были исключены из рассмотрения.

5.2.1 Многоканальные спектры

Спектры коротких всплесков моделировались тремя функциями: простой степенью (PL), степенью с экспоненциальным обрезанием (CPL) и функцией Банда (BAND), см. Главу 1. Процедура определения параметров моделей, описанная в Главе 1, для многоканальных спектров производилась в программе XSPEC[190] версии 12.8.0. Для определения параметров моделей использовалась статистика χ^2 . Спектральные каналы были сгруппированы для получения не менее 10 отсчетов в канале для обеспечения близкой к гауссовой статистики отсчетов. Группировка по 20 и более отсчетов на канал приводила к исключению из анализа старших каналов спектра, что в некоторых случаях значительно сужало энергетический диапазон. В качестве нормировки модели использовался поток в диапазоне 10 кэВ–10 МэВ, который вычислялся с использованием модели `cflux` в XSPEC. Ошибки спектральных параметров определялись для уровня значимости 90%. После определения параметров каждой из трёх спектральных моделей для спектра, выбиралась наиболее подходящая модель на основе различия полученного минимального χ^2 . Критерием для предпочтения модели с одним дополнительным параметром было $\Delta\chi^2 \geq 5$ с соответствующей вероятностью ≈ 0.025 . Было обнаружено, что такое значение предпочтительно для нашего набора всплесков по сравнению

с часто используемым $\Delta\chi^2 \geq 6$, так как оно даёт в два раза меньше расходящихся PL моделей, в качестве наилучших, что критично для вычисления энергетики всплесков.

5.2.2 Трёхканальные спектры

Определение параметров PL и CPL моделей для 79 трёхканальных спектров производилось специально созданной программой. При этом ошибки параметров определялись методом Монте-Карло.

Для проверки методики было проведено сравнение результатов многоканального и трёхканального спектрального анализа на наборе 214 всплесков с многоканальными спектрами. Для каждого всплеска был взят трёхканальный спектр, накопленный в течение интервала измерения многоканального спектра. Затем сравнивались параметры модели, которые лучше всего описывают многоканальный спектр с параметрами и той же модели, полученными по трёхканальному спектру. В случае PL полученные фотонные индексы согласуются для двух типов спектрального анализа. Для CPL модели было обнаружено, что α также в целом согласуется между двумя типами спектров. То же самое верно и для E_p , но только в случае если значение попадает в энергетический диапазон, охватываемый трёхканальным спектром ($\lesssim 1$ МэВ), в противном случае трёхканальный анализ давал завышенное и плохо ограниченное значение E_p . Это показывает, что на основе данных KW можно получать достаточно точные значения спектральных параметров и энергетики, даже когда многоканальные спектральные данные отсутствуют.

Поскольку аппроксимация трёхканального спектра моделью CPL имеет нулевое число степеней свободы (и, в случае сходимости, $\chi_{\text{CPL}}^2 = 0$), наиболее подходящая модель не может быть выбрана на основе критерия $\Delta\chi^2 \geq 5$. Поэтому, для того чтобы не переоценить энергетику всплеска, для вычисления S и F_{peak} использовалась модель CPL в случаях когда E_p была ограничена снизу.

5.3 Результаты

5.3.1 Спектральные параметры

В результате спектрального анализа было получено, что 201, 9 и 4 интегральных спектра наилучшим образом описываются CPL, BAND и PL, соответственно. Так как ни один метод основанный на использовании функции правдоподобия не даёт вероятности того, что конкретная модель хорошо описывает данные, в опубликованном каталоге были также приведены все модели параметры которых ограничены. Для моделей CPL и BAND требовалось чтобы α и E_p имели ограниченные ошибки, и для модели BAND дополнительно требовалось $\beta > -4$. Для исключения моделей с большими невязками дополнительно было наложено условие на вероятность случайного получения заданного значения статистики χ^2 (вероятностью нулевой гипотезы) $P > 10^{-6}$. Суммарно были получены параметры 473 моделей для интегральных спектров (210 — CPL, 117 — BAND и 146 — PL). Для всех трёхканальных спектров кроме одного были получены параметры модели CPL, для GRB19961113_T80522 с неограниченной E_p оценки энергетики делались на основе модели PL².

На Рис. 5.1, представлены распределения интегральных спектров по E_p и α . Фотонные индексы α наиболее подходящих спектральных моделей распределены вокруг значения -0.5 . Около 66% фотонных индексов $\alpha > -2/3$, нарушают «линию смерти» для синхротронной модели излучения [191], в тоже время только около 1% (три фотонных индекса для PL моделей) фотонных индексов $\alpha < -3/2$, нарушают предел охлаждения в синхротронной модели излучения. Для четырёх спектров, которые описываются степенной моделью, фотонные индексы находятся на мягком конце распределения α . Для 9 моделей BAND индексы β распределены вблизи значения -2.3 . Распределение по E_p для CPL моделей имеет максимум около 500 кэВ и покрывает около двух порядков величины. Было исследовано различие значений E_p между моделями BAND и CPL в наборе моделей с ограниченными параметрами и

²Параметры моделей для многоканальных и трёхканальных спектров даны в таблице 5.2 по ссылке <http://www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog2/Data/tables>.

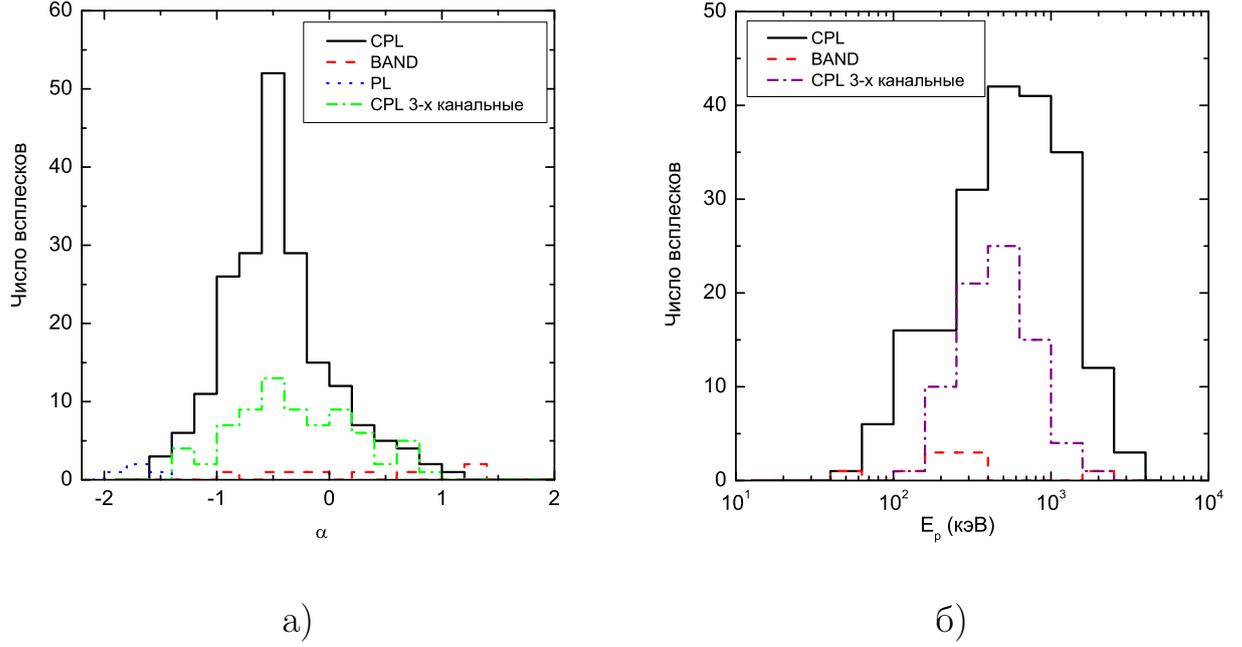


Рисунок 5.1: Распределение α (а) и E_p (б), полученных в результате моделирования интегральных спектров. Распределение для каждой модели показано отдельно.

было обнаружено, что для каждого спектра значения согласуются в пределах ошибок на уровне 90%.

5.3.2 Всплески с дополнительной спектральной компонентой

Для трёх ярких всплесков была получена низкая достоверность моделирования интегральных спектров ($P < 0.001$) для всех трёх использованных моделей. Детальное рассмотрение этих всплесков выявило причину малых значений P . Всплеск GRB20060306_T55358, с $P \approx 10^{-4}$, имеет сильную спектральную эволюцию — жесткость спектра уменьшается в течении всплеска, что приводит к систематическому расхождению с модельными спектрами (BAND и CPL). Однако, модель BAND хорошо описывает ($P > 0.05$) отдельные спектры этого яркого всплеска. Было обнаружено, что интегральные спектры двух других всплесков GRB19960908_T25028 и GRB20031214_T36655 хорошо описываются суммой функций CPL и PL. Помимо перечисленных всплесков, явные систематиче-

ские отклонения модели от спектра были обнаружены для интегрального спектра GRB19980205_T19785 ($P = 0.08$), который также хорошо аппроксимируется суммой CPL+PL.

Параметры CPL+PL аппроксимаций интегральных спектров описанных всплесков приведены в Таблице 5.1. Степенная компонента этих спектров, которая также детектируется в большинстве отдельных спектров, является достаточно жесткой ($\alpha \sim -2$) и даёт основной вклад в спектр на энергиях ниже ~ 50 – 100 кэВ, и должна доминировать на энергиях $\gtrsim 10$ МэВ. Жесткая CPL компонента имеет $E_p \sim (1.5$ – $2)$ МэВ и достаточно пологий фотонный индекс $\alpha > -1$). Все перечисленные всплески находятся среди 10% наиболее интенсивных всплесков в смысле интегральных энергетических потоков, при этом GRB20031214_T36655 и GRB20060306_T55358 имеют наибольшие потоки в наборе. Иллюстрация временной истории и спектров GRB20031214_T36655 приведена на рис. 5.2.

Таблица 5.1: Параметры интегральных спектров с дополнительной компонентой (CPL+PL)

Обозначение всплеска	α_{CPL}	$E_{p,\text{CPL}}$, МэВ	Flux _{CPL} , 10^{-6} эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$	α_{PL}	Flux _{PL} , 10^{-6} эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$	χ^2/dof (вер.)
GRB19960908_T25028	$-0.5(-0.5, +0.8)$	$1.53(-0.28, +0.36)$	$27.3(-8.0, +7.0)$	$-2.1(-0.4, +0.2)$	$8.7(-5.2, +8.8)$	77/63 (0.11)
GRB19980205_T19785	$-0.7(-0.6, +1.2)$	$1.81(-0.67, +1.33)$	$13.2(-5.6, +6.2)$	$-2.2(-0.5, +0.2)$	$5.4(-3.0, +3.9)$	40/55 (0.94)
GRB20031214_T36655	$-0.3(-0.1, +0.1)$	$1.91(-0.08, +0.08)$	$274.6(-13.4, +12.4)$	$-2.0(-0.4, +0.2)$	$10.6(-5.6, +8.6)$	87/75 (0.15)

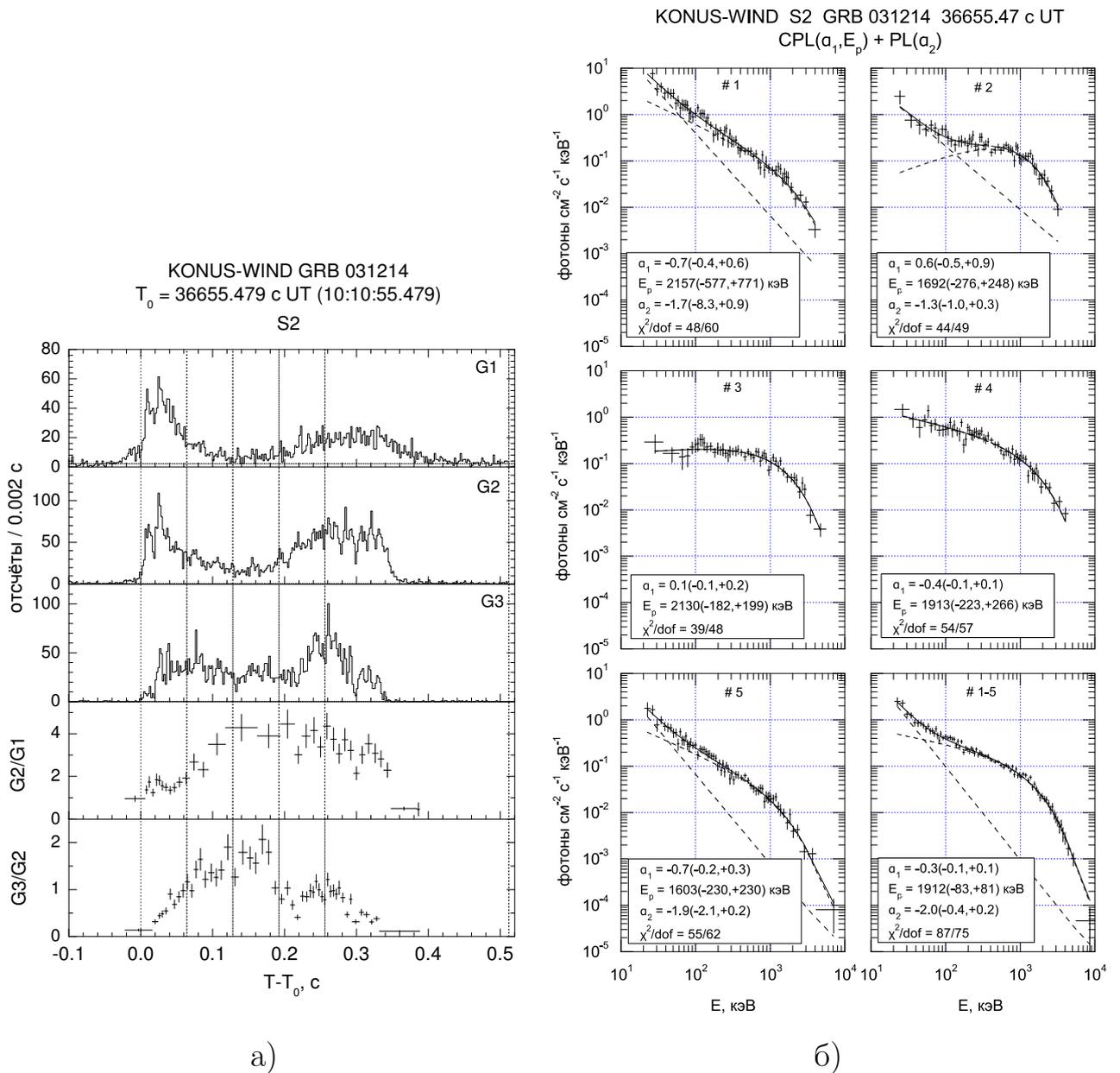
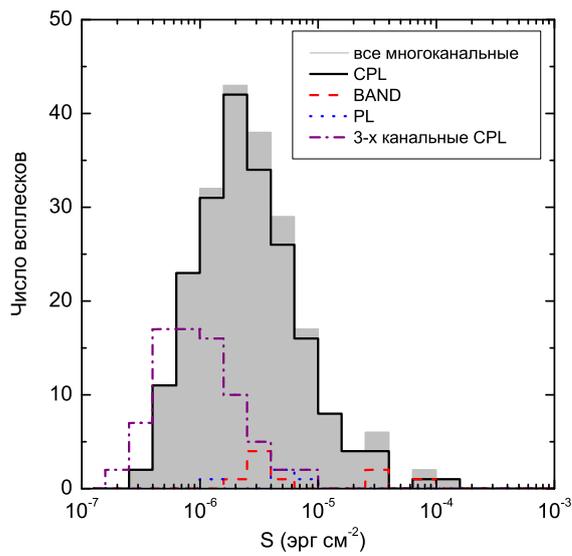


Рисунок 5.2: Временная история GRB20031214_T36655 (а) и результаты спектрального анализа (б). Вертикальными штриховыми линиями на панели (а) показаны границы накопления спектров. На панели (б) показаны восстановленные спектры, где пунктиром показана каждая спектральная компонента.

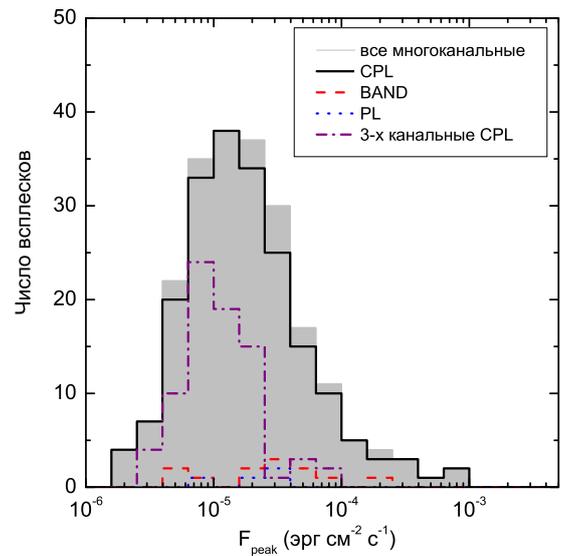
5.3.3 Интегральные и пиковые потоки

Значения S и F_{peak} вычислялись с использованием энергетического потока, полученного для наиболее подходящей спектральной модели в диапазоне 10 кэВ–10 МэВ. Так как интервал накопления спектра обычно отличался от T_{100} , применялась коррекция, которая учитывала излучение лежащее вне интервала накопления спектра для вычисления S . Для коротких всплесков с продлённым излучением интегральные энергетические потоки вычислялись отдельно для ЕЕ и начального импульса (см. Раздел 5.3.4). Значение F_{peak} вычислялось на масштабе 16 мс с использованием наиболее подходящей спектральной модели для спектра вблизи максимальной скорости счёта. Для получения F_{peak} поток по модели умножался на отношение пиковой скорости счёта на масштабе 16 мс к средней скорости счёта за интервал накопления спектра. Обычно для коррекции использовались отсчёты в группах каналов G2+G3, G1+G2 только G2 или G1+G2+G3 в зависимости от жесткости спектра. Значения S и F_{peak} были получены для 293 всплесков. Распределения всплесков по S и F_{peak} показаны на рисунке 5.3.

Следует отметить, что для нескольких очень интенсивных и сильно переменных всплесков (GRB19970704_T04097, GRB20031214_T36655, GRB20051103_T33943, GRB20060306_T55358, GRB20070201_T55390 и GRB20070222_T27115) значения F_{peak} (и в меньшей степени S) могут быть недооценены на основе описанного анализа в ~ 1.5 –2 раз, из-за того что мёртвое время в спектрах оценивалось на основе предположения о постоянстве скорости счёта в интервале накопления.



а)



б)

Рисунок 5.3: Распределение интегральных (а) и пиковых энергетических потоков (б) Серым на каждой панели показано суммарное по всем моделям распределение для 214 многоканальных спектров, распределения для каждой модели показаны отдельно. Штрихпунктирной линией показаны распределения для 79 трёхканальных спектров.

5.3.4 Короткие всплески с продлённым излучением

Продлённое излучение (ЕЕ), которое следует после короткого начального импульса (IP), наблюдалось у некоторой части коротких всплесков, зарегистрированных различными экспериментами: *CGRO*-BATSE [9, 12, 192], KW [193, 11], *INTEGRAL*-SPI-ACS [69], *Swift*-BAT [63, 86], и *Fermi*-GBM [194]. Поиск кандидатов в короткие всплески с ЕЕ был произведён в Главе 2, было обнаружено 31 событие. Хотя яркий начальный импульс GRB 070207 [195] удовлетворяет критериям короткого всплеска ($T_{50} = 0.010 \pm 0.004$ с) с $E_p \sim 300$ кэВ, очень яркое и жесткое ($E_p \sim 1.5$ МэВ) последующее излучение, которое лишь формально может считаться ЕЕ, предполагает, что это событие — длинный/жесткий всплеск с коротким прекурсором, схожий по морфологии с двумя другими всплесками KW, GRB 000115 и GRB 001020 [196].

Только для 21 события, из оставшихся 30, интенсивность ЕЕ была достаточной для спектрального анализа. Для 15 всплесков наилучшей спектральной моделью для ЕЕ является PL и для 6 — CPL. Фотонные индексы модели PL находятся в диапазоне от -2.6 до -1.4 с медианой -1.6 , и в диапазоне от -1.4 до -0.3 с медианой -1.2 для модели CPL. Значения E_p находятся в диапазоне от ≈ 160 кэВ до ≈ 2.2 МэВ с медианой ≈ 300 кэВ и средним геометрическим ≈ 370 кэВ. Для указанного 21 всплеска было вычислено отношение потоков ЕЕ/IP, которое изменяется в пределах от 0.06 до 15 с медианой 3.3. Из шести всплесков, у которых ЕЕ описывается моделью CPL, у четырёх E_p ЕЕ меньше чем у начального импульса и для двух всплесков, GRB19950526_T16613 и GRB20090720_T61379, наблюдается обратная ситуация, причем второй всплеск имеет экстремально жесткое ЕЕ ($E_p = 2.2(-1.0, +2.4)$ МэВ).

5.4 Обсуждение результатов

В главе представлены результаты спектрального анализа 293 коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, этот набор составляет $\sim 15\%$ от полного числа всплесков, зарегистрированных за

первые 15 лет работы инструмента. Набор включает $\sim 70\%$ всплесков Типа I, $\sim 8\%$ Типа II и $\sim 12\%$ имеют неопределённый тип (I или II). Доля коротких всплесков с продлённым излучением составляет $\sim 10\%$.

Суммарно было проанализировано 253 многоканальных спектров: 214 интегральных, 18 пиковых и 21 спектр продлённого излучения; и 79 трёхканальных спектров. Таблица 5.2 содержит медианы и 90% интервалы распределений спектральных параметров и энергетики, полученных в главе. В первой колонке дано название параметра; во второй тип спектральных данных: многоканальный «mult» или трёхканальный «3ch» спектр; последующие колонки содержат медианы и 90% интервалы для распределений α , E_p , S и F_{peak} . Для распределения по β медиана и 90% интервал составляют -2.28 и $[-3.15, -1.74]$, соответственно.

Наибольшие E_p измеренные для коротких всплесков KW составляют ~ 3 МэВ: $E_p = 3.55(-0.71, +0.85)$ МэВ было получено для GRB20090510_T01381 (GRB 090510 [197]); более мягкие всплески GRB19970704_T04097 и GRB20080611_T04742 имеют $E_p \approx 3.3$ МэВ. Практически все всплески с $E_p \lesssim 200$ кэВ классифицированы как Тип II или Тип I/II и, вероятно, представляют собой популяцию отличную от более жестких всплесков (см. обсуждение ниже).

Таблица 5.2: Характеристики распределений спектральных параметров

Модель Модель	Тип спектра	Количество спектров	α		E_p , кэВ		S , 10^{-6} эрг cm^{-2}		F_{peak} , 10^{-5} эрг $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	
			Медиана	CI	Медиана	CI	Медиана	CI	Медиана	CI
PL	mult	4	-1.78	[-1.99, -1.61]	...	...	4.1	[1.4, 5.7]	2.1	[0.8, 3.0]
CPL	mult	201	-0.47	[-1.14, 0.52]	563	[115, 1807]	2.3	[0.5, 13.9]	1.5	[0.3, 12.8]
BAND	mult	9	-0.12	[-1.13, 1.42]	204	[40, 364]	3.8	[1.9, 39.1]	2.8	[0.5, 7.3]
all	mult	214	...	...	...	...	2.4	[0.5, 20.1]	1.6	[0.4, 12.8]
CPL	3ch	79	-0.36	[-1.23, 0.90]	459	[190, 1180]	0.9	[0.3, 3.4]	1.0	[0.4, 4.0]

Результаты анализа подтверждают, что спектры большей части коротких всплесков хорошо описываются моделью CPL с жестким $\alpha \sim -0.5$ и E_p в диапазоне 100 кэВ–2 МэВ. В представленном анализе только $\sim 4\%$ коротких всплесков KW описываются моделью BAND. Среди 5% всплесков с наибольшим S , 20% описываются моделью BAND; для описания оставшихся 80% требуется $\beta \lesssim -2.5$, в большинстве случаев неограниченное снизу.

Это предполагает, что отсутствие степенного поведения спектра на больших энергиях, обнаруженное для большей части ярких коротких всплесков, по видимому является внутренним свойством всплесков, а не связано с низкой статистикой отсчётов на больших энергиях.

В данном разделе не ставилась задача проверки применимости более сложных моделей для описания спектров коротких всплесков. Однако, среди 214 всплесков с многоканальными спектрами было обнаружено три события, для описания которых необходима дополнительная жесткая степенная спектральная компонента с фотонным индексом ~ -2 . Эти всплески входят в 10% наиболее интенсивных событий из набора. Отношение энергетических потоков PL компоненты к CPL находится в диапазоне от 0.03 для GRB20031214_T366655 до 0.4 для GRB19980205_T19785. Обнаруженная компонента может иметь ту же природу, что и обнаруженная в GRB 081024B [198] и GRB 090510 [197] на основе данных *Fermi*-GBM и LAT. GRB 081024B не был зарегистрирован KW триггерном режиме, GRB 090510 (GRB20090510_T01381) содержится в нашем наборе. Для описания спектра последнего всплеска степенная компонента не требуется, верхний предел на поток степенной компоненты с фотонным индексом -1.7 составляет $\sim 1 \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ для уровня значимости 90%. Соответствующий предел на отношение потока PL компоненты к потоку в основной компоненте составляет $\lesssim 0.02$ на уровне значимости 90%.

5.4.1 Сравнение коротких всплесков KW с BATSE и GBM

Результаты представленного спектрального анализа были сопоставлены с данными других экспериментов. Наибольшие наборы данных по GRB в широком спектральном диапазоне получены экспериментами *CGRO*-BATSE³ (в диапазоне 20 кэВ–2 МэВ [45]) и *Fermi*-GBM⁴ (в диапазоне 8 кэВ–40 МэВ [46]). Настоящий анализ содержит примерно в два раза коротких всплесков, чем

³<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/cgro/bat5bgrbsp.html>

⁴<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/fermi/fermigbrst.html>

каталог GBM, в более узком диапазоне энергий, и в ~ 1.5 раза меньше чем набор BATSE, но в более широком диапазоне энергий.

Из каталога BATSE 5B было выбрано 427 всплесков с $T_{90} < 2$ с и с интервалом накопления интегрального спектра короче 10 с. На основе критерия $\Delta\chi^2 > 6$ всплески имеют следующую статистику наиболее подходящих моделей: 11 — BAND, 225 — CPL и 191 — PL. Из второго каталога GBM было выбрано 146 всплесков с $T_{90} < 2$ с. Наиболее подходящие модели, по данным каталога распределены так: 3 — BAND, 67 — CPL и 76 — PL; всплески описываемые степенной моделью с изломом (около пяти событий) были исключены из сравнения.

Отношение числа всплесков, описываемых BAND и CPL моделями, мало ($\lesssim 5\%$) для всех наборов. Было проверено согласуются ли распределения по α и E_p модели CPL между инструментами. Двустороннее р-значение теста Колмогорова-Смирнова для двух наборов (P_{KS}) для распределений KW и GBM по α и E_p равны 10% и 25%, соответственно, в то время как для сравнений KW и BATSE, и GBM и BATSE $P_{KS} < 1\%$. Набор BATSE имеет медиану $\alpha = -0.33$ в то время как медианы KW и GBM равны $\alpha = -0.49$ и $\alpha = -0.50$, соответственно. Медианы распределений по E_p равны ≈ 400 кэВ для BATSE и ≈ 550 кэВ для KW и GBM. Таким образом результаты KW хорошо согласуются с данными GBM и хуже с данными BATSE.

Доля всплесков, наилучшим образом описываемых моделью PL, сильно отличаются у KW и других инструментов: 2% (5% используя критерий $\Delta\chi^2 > 6$) — KW, 52% — GBM и 55% — BATSE. Причина достаточно большой доли PL моделей у BATSE и GBM была детально проанализирована. Для более устойчивого сравнения были выбраны всплески с $S > 5.5 \times 10^{-7}$ эрг см $^{-2}$, данный порог примерно соответствует наименьшему S , полученному для всплесков KW с многоканальными спектрами. Полученные поднаборы 138 (BATSE) и 49 (GBM) GRBs содержали 29 (21%) и 3 (6%) моделей PL, соответственно. Таким образом, в схожем диапазоне интегральных энергетических потоков доли PL моделей согласуются для KW и GBM. Среди моделей CPL с ограниченными параметрами для указанных 29 всплесков BATSE, 17 имеют 1σ верхний предел E_p , превышающий верхнюю границу спектрального диапазона BATSE (2 МэВ). Оставшиеся 12 всплесков составляют 9% от под-

набора. Следовательно, можно считать, что основным источником избытка PL моделей для коротких всплесков BATSE и GBM является большое количество слабых всплесков (с низким S), для которых более сложная модель не может быть предпочтительна из-за низкой статистики отсчётов. Для всплесков BATSE дополнительным фактором, влияющим на увеличение доли PL моделей, является относительно узкий спектральный диапазон.

5.4.2 Короткие всплески с EE

Было обнаружено, что 30 всплесков из набора 1939 KW гамма-всплесков зарегистрированных с 1994 по 2010 гг. могут быть классифицированы как короткие всплески с EE, основываясь на длительности начального импульса и отсутствие в последующем излучении заметной спектральной эволюции. Из них, 21 всплеск имел интенсивность EE достаточную для анализа многоканальных спектров. Для шести из этих всплесков спектр EE описывается моделью с изломом (CPL) с достаточно высокой $E_p \sim 160$ кэВ–2.2 МэВ. Начальные импульсы двух из них были классифицированы как типы Iee/II и они вероятно являются длинными всплесками с короткими начальными импульсами. Оставшиеся четыре всплеска являются «стандартными» короткими всплесками с продлённым излучением на основании формы временного профиля. Подобные спектры были обнаружены у двух из 19 всплесков BATSE [192] и у четырёх из 14 всплесков GBM [194]. Полученные соискателем результаты дают дополнительное свидетельство в пользу наличия достаточно жесткого продлённого излучения у коротких гамма-всплесков.

Набор коротких всплесков с продлённым излучением KW включает два всплеска, где EE наблюдалось на BATSE, и три, где EE наблюдалось GBM. Результаты спектрального анализа этих всплесков (включая GRB20090831_T27393 с жестким EE, $E_p \approx 215$ кэВ) по данным KW согласуются с результатами упомянутых инструментов. Всплеск GRB20090720_T61379 с экстремально жестким EE ($E_p \approx 2.2$ МэВ) был зарегистрирован GBM. Хотя всплеск не был включён в набор [194], параметры интегрального спектра этого всплеска по данным KW согласуются с полученными по данным GBM.

Яркий близкий всплеск GRB 060614, который был классифицирован как короткий всплеск с ЕЕ [199] был зарегистрирован KW ($T_0(KW)=45831.590$ с; [200]). Этот всплеск не был включён в наш набор коротких всплесков из-за большой длительности начального импульса $T_{50} = 2.7 \pm 0.3$ с.

5.4.3 Кандидаты в гигантские вспышки SGR

Яркий начальный импульс гигантской вспышки (GF) источника мягких повторяющихся гамма-всплесков, произошедшей в близкой галактике, может выглядеть в данных гамма детектора как короткий гамма-всплеск. Верхней предел на частоту GF на основе локализаций коротких свсплесков KW был получен в Главе 4. При этом было обнаружено только два кандидата: GRB 051103 (GRB20051103_T33943) в группе галактик M81/M82 [167] и GRB 070201 (GRB20070201_T55390) в галактике M31 [134]. Оба события находятся среди 10% наиболее интенсивных событий на основе интегрального энергетического потока. Спектральные параметры всплесков являются типичными для набора коротких всплесков KW. Избыток отсчётов, наблюдаемый вплоть до 90 с после триггера GRB 070201, был интерпретирован как хвост гигантской вспышки [134]. Значимость избытка составляет 4.3σ , поэтому он не был обнаружен при поиске продлённого излучения (с порогом 5σ).

5.4.4 Неоднородность набора коротких всплесков

На рис. 5.4 показано соотношение E_p , для наиболее подходящей CPL модели, и длительности всплеска T_{50} . Всплески Типа I, в среднем, короче и жестче ($E_p \gtrsim 200$ кэВ), чем всплески Типа II, что подтверждает классификацию, полученную на основе распределения жесткость-длительность. Среди 4 всплесков наилучшим образом описываемых моделью PL, два всплеска принадлежат к типам I и II, и два имеют неопределённый тип (I/II). Явный недостаток всплесков с $E_p \lesssim 100$ кэВ, скорее всего связан с эффектом селекции. Распределение по длительности начальных импульсов коротких всплесков типа I с ЕЕ (I_{ee}) согласуется с распределением для обычных коротких всплес-

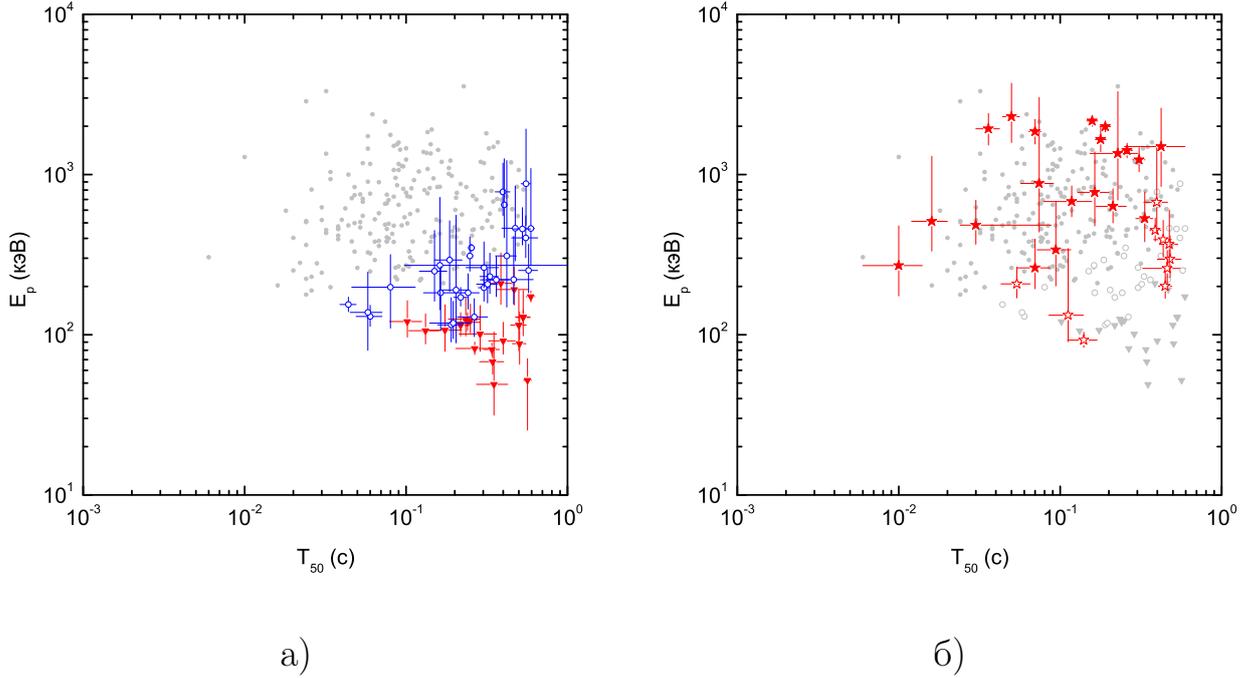


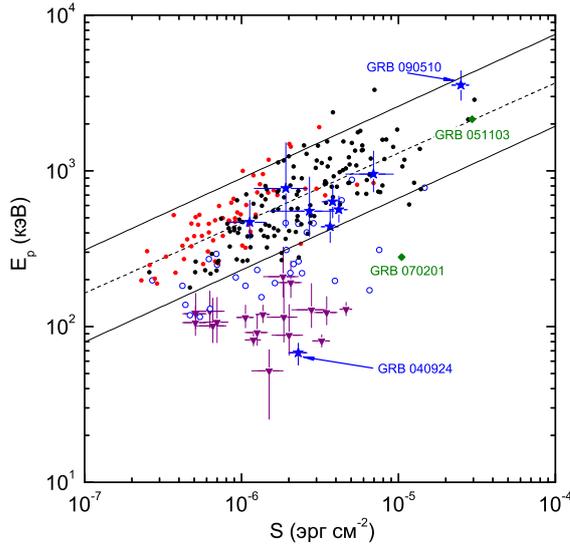
Рисунок 5.4: Соотношение E_p и T_{50} (только для модели CPL). На панели (а) показаны всплески типа I (серые точки), типа II (красные треугольники) и всплески неопределённого типа, I или II (синие окружности). На панели (б) показаны всплески типа I с EE (заполненные красные звёзды) и всплески неопределённого типа Iee/II (пустые красные звёзды). Для всплесков типа I ошибки не показаны.

ков типа I, о чем свидетельствует р-значение теста Колмогорова-Смирнова $P_{KS} = 0.5$. Также было обнаружено, что начальные импульсы всплесков типа Iee, в среднем, жестче (E_p в ~ 1.5 раза выше), чем всплески типа I ($P_{KS} = 0.01$). В заключении были сопоставлены распределения всплесков типов Iee и I по S и F_{peak} , для пар распределений была получена $P_{KS} \sim 0.01$, что свидетельствует о различии распределений, при этом начальные импульсы всплесков с EE, в среднем, более интенсивные.

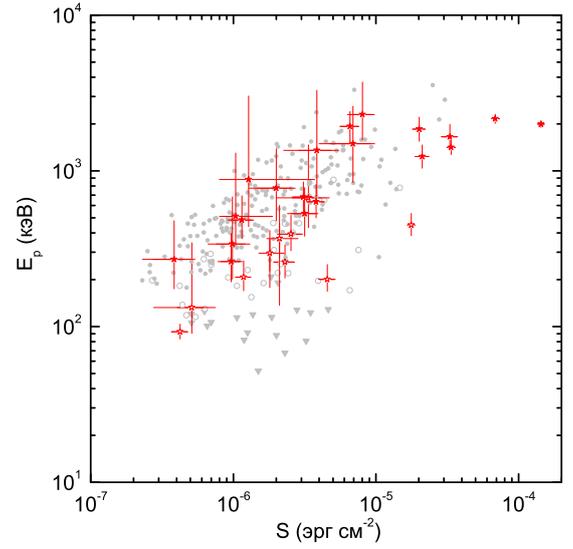
На рис. 5.5 приведены соотношения E_p с S и F_{peak} . Распределение 79 слабых всплесков с трёх-канальными спектрами по спектральным параметрам и F_{peak} схоже с более интенсивными событиями, эти всплески являются продолжением распределения коротких/жестких (Тип I) всплесков в область низких S на диаграмме E_p-S . Явным выбросом из E_p-F_{peak} распределения является предполагаемая GF в галактике M31, что подкрепляет свидетельства в

пользу отличной от GRB природы этого события. Всплески типов I и II занимают практически не пересекающиеся области на диаграмме E_p-S . Всплески типа I образуют вытянутое распределение, которое, в среднем, подчиняется соотношению $E_p \propto S^{1/2}$. Всплески типа II образуют небольшую группу событий с низкой E_p , которая представляет собой малую часть распределения длинных всплесков. На плоскости E_p-F_{peak} всплески типа II продлевают корреляцию жесткость-интенсивность в область низких E_p и малых F_{peak} . Так как только для девяти всплесков из набора были определены космологические красные смещения ($z \sim 0.1-1.0$, определённые как спектрометрически, так и фотометрически), свойства всплесков в собственной системе отсчёта здесь не обсуждаются. Хотя инструментальные эффекты селекции влияют на параметры представленного набора, корреляции наблюдаемых параметров всё же могут отражать корреляции параметров в системе отсчёта источника всплеска $E_{p,\text{rest}}-E_{\text{iso}}$ — соотношение Амати [201] и $E_{p,\text{rest}}-L_{\text{iso}}$ — соотношение Йонетоку [202] (см., к примеру, [203] и ссылки в ней). Таким образом, описанные свойства распределения жесткость-интенсивность в системе наблюдателя, полученные для всплесков типов I и II из набора коротких всплесков KW, свидетельствуют в пользу того, что короткие/жесткие всплески подчиняются своему соотношению Амати на плоскости $E_{p,\text{rest}}-E_{\text{iso}}$ (см., к примеру, [204] и ссылки в ней).

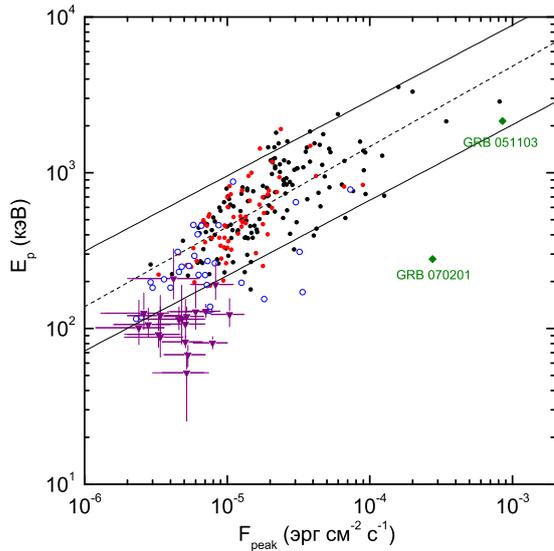
Интегральные распределения $\log N-\log S$ и $\log N-\log F_{\text{peak}}$ для набора 293 коротких всплесков KW, а так же степенные распределения с индексом $-3/2$, соответствующие однородному распределению источников всплесков в пространстве, представлены на рис. 5.6. Распределение $\log N-\log S$ следует однородному распределению в узкой области интегральных потоков ($\sim 4-10$) $\times 10^{-6}$ эрг см^{-2} . В то время как недостаток слабых всплесков может быть объяснён эффектами селекции, наблюдаемый избыток интенсивных всплесков в значительной мере обусловлен событиями не относящимися к «классическим» коротким/жестким всплескам. Среди 12 наиболее интенсивных всплесков в наборе KW с $S \gtrsim 10^{-5}$ эрг см^{-2} только четыре имеют Тип I, остальные классифицированы как типы I/II, II или являются всплесками с ЕЕ. При рассмотрении только всплесков Типа I, соотношение $\log N-\log S$ хорошо описывается крутым показателем степени



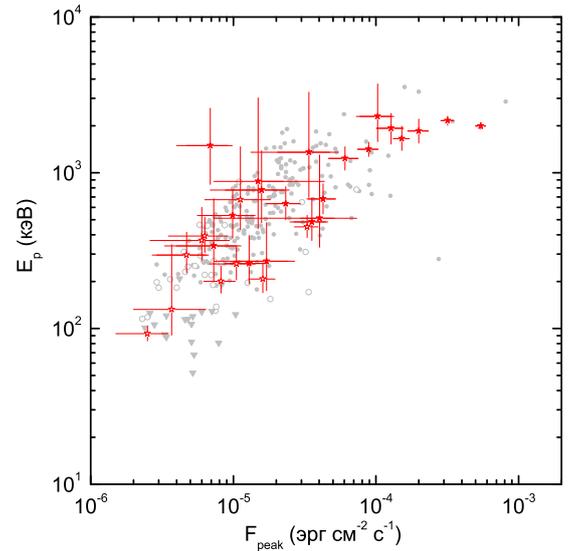
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.5: Соотношение E_p с S и F_{peak} для всплесков, описываемых моделью CPL. На панели (а) показано соотношение E_p и S для всплесков типа I с многоканальными спектрами (чёрные точки); всплесков типа I с трёхканальными спектрами (красные точки); всплесков неопределённого типа (пустые точки), для обоих типов спектров; и для всплесков типа II (треугольники). На панели (б) показаны всплески типов Iee (заполненные звёзды) и Iee/II (пустые звёзды); остальные всплески из набора показаны серым. На панелях (в) и (г) показаны соотношения E_p и F_{peak} для тех же наборов всплесков. Для всплесков типов I и I/II ошибки не показаны. Кандидаты в GF в близких галактиках обозначены ромбами. Звёздами показаны всплески с измеренным z . Пунктирная линия соответствует степенной аппроксимации соотношений для всплесков типа I, в обоих случаях индекс близок к 0.5.

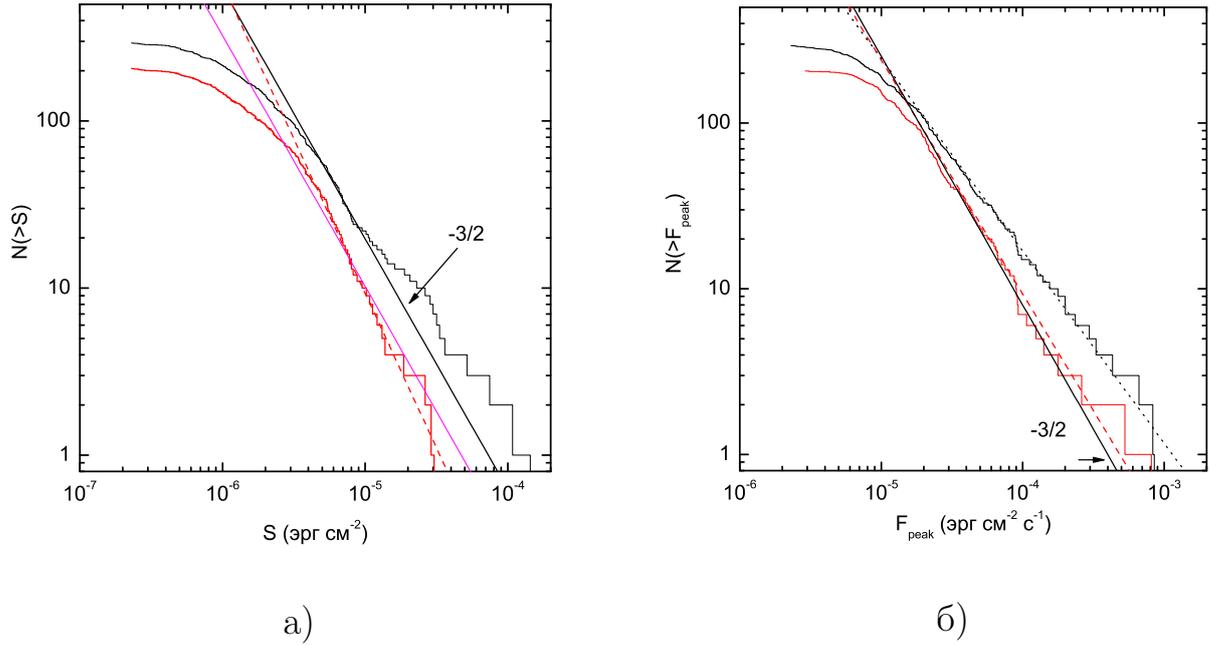


Рисунок 5.6: Интегральные распределения $\log N-\log S$ (а) и $\log N-\log F_{\text{peak}}$ (б). Чёрные гистограммы показывают интегральные распределения для всех всплесков, красные — только для всплесков Типа I. Сплошные прямые линии обозначают степенное распределение с показателем степени $-3/2$ и различными нормировками, ожидаемое для однородного расположения источников всплесков в Евклидовом пространстве. Пунктирные линии показывают степенную аппроксимацию распределений всплесков Типа I. На панели (б) штриховой линией показана аппроксимация распределения всех всплесков (см. параметры и диапазоны аппроксимаций в тексте).

-1.8 ± 0.3 выше $S \sim 5 \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$. Распределение $\log N-\log F_{\text{peak}}$ коротких всплесков KW также более пологое по сравнению с наклоном $-3/2$ и описывается показателем степени -1.16 ± 0.12 для F_{peak} лежащего в интервале $(0.2-9.4) \times 10^{-4}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$. В том же диапазоне показатель степени для всплесков Типа I имеет более крутой показатель -1.42 ± 0.16 , который согласуется с однородным распределением источников в пространстве.

Иллюстрации временных историй и спектров 214 коротких всплесков KW, а также таблицы размещены на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе⁵.

⁵<http://www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog2/>

5.4.5 Короткие гамма-всплески от испарения первичных чёрных дыр

Считается, что помимо космологически удалённых коротких-гамма-всплесков и гигантских вспышек SGR в ближайших галактиках в наборе коротких событий (с длительностями $\lesssim 1$ с) могут встречаться всплески, испущенные на финальной стадии испарением первичных чёрных дыр (ПЧД) в окрестностях Солнца (на расстояниях в несколько пк), см. работу [205] и ссылки в ней. Расстояние до источников таких всплесков можно оценить на основании данных сети IPN, если считать фронт излучения всплеска сферическим. При детектировании тремя КА, в принципе, можно исключить локальное происхождение всплеска, но нельзя подтвердить, что всплеск является локальным. Если всплеск был зарегистрирован четырьмя или более КА на межпланетных расстояниях, то возможно получить точное положение источника в пространстве.

Для отбора кандидатов во всплески от испарения ПЧД были использованы следующие критерии отбора: (1) событие зарегистрировано в период с октября 1990 г. по декабрь 2015 г. (24.25 лет); (2) выполнено условие детектирования несколькими КА, указанное выше (по этому критерию прошли только 839 GRBs из более чем 10000); (3) у всплеска не было обнаружено послесвечение; (4) всплеск имеет полную длительность ≤ 1 с и не сопровождается продлённым излучением. Условий на форму кривой блеска не накладывалось. В итоговый набор всплесков вошли только 36 событий, из них для 34 длительности и энергетика были оценены соискателем на основании данных KW.

В результате авторами работы [205] были получены оценки минимального расстояния до источников всплесков 0.01–10 пк, при этом энергетика событий согласуется с моделью испарения ПЧД с массой $\sim 10^9$ – 10^{14} г. В предположении, что все 36 выбранных всплесков связаны с испарением ПЧД был получен нижний предел на частоту таких событий ~ 3 всплеска пк $^{-3}$ год $^{-1}$. При этом верхний предел на частоту всплесков от ПЧД составляет $\sim 10^5$ – 10^6 всплесков пк $^{-3}$ год $^{-1}$ по данным наземных гамма-обсерваторий.

5.5 Заключение

В данной главе представлен спектральный анализ коротких гамма-всплесков Конус-Винд.

По материалам Главы 5 на защиту выносятся следующие положения:

- Каталог спектральных и временных параметров коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд.
- Обнаружение дополнительной степенной компоненты в спектрах трёх коротких GRB, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд.
- Временные и спектральные характеристики коротких GRB с продленным излучением, зарегистрированные в эксперименте Конус-Винд.

Результаты отражены в публикациях:

1. D. S. Svinkin, D. D. Frederiks, R. L. Aptekar, et al. The second *Konus-Wind* catalog of short gamma-ray bursts // arXiv:1603.06832, принято в ApJS;
2. T. N. Ukwatta, K. Hurley, J. H. MacGibbon, D. S. Svinkin, et al. Investigation of Primordial Black Hole Bursts using Interplanetary Network Gamma-ray Bursts // arXiv:1512.01264, отправлено в ApJ.

Заключение

Таким образом, в результате данной работы:

1. Исследован дрейф параметров КВ со временем на протяжении более 20 лет непрерывных наблюдений, что важно для анализа текущих данных КВ и планирования будущих экспериментов на основе сцинтилляционных детекторов. Оценен порог срабатывания триггера КВ, равный $\sim 3 \times 10^{-7} - 10^{-6}$ эрг см⁻², в зависимости от временного масштаба и параметров спектра всплеска. Благодаря положению КВ в межпланетном пространстве со стабильным фоном излучения и практически непрерывной записи скорости счёта гамма-квантов (доля времени наблюдения КВ, отнесённая ко всему времени работы, составляет примерно 95%), полученную в диссертации методику оценки чувствительности КВ можно использовать для получения верхних пределов потоков гамма-излучения от транзиентных событий, наблюдаемых в других диапазонах длин волн, к примеру, от взрывов сверхновых и всплесков гравитационных волн.

Результаты расчётов, проведённых соискателем, были использованы для оценки верхних пределов на потоки гамма-излучения от близкой сверхновой SN 2011fe типа Ia в галактике M101 на расстоянии 6.4 Мпк [47] и от источника гравитационных волн GW150914 (готовится к публикации).

2. Для набора 1834 всплесков КВ были вычислены длительности T_{50} и T_{90} , жесткости и спектральные задержки. Показано, что распределения всплесков по T_{50} и T_{90} хорошо аппроксимируются двумя логнормальными распределениями. Обнаружено, что параметры аппроксимации распределения T_{50} более устойчивы к выбору порога поиска начала и конца всплеска, поэтому длительность T_{50} более предпочтительна для классификации всплесков. В качестве границы между длинными и ко-

роткими всплесками была выбрана точка пересечения логнормальных компонент для порога значимости 5σ , $T_{50} = 0.6$ с. Для последующего анализа выделен набор 296 коротких всплесков (с учётом кандидатов в короткие гамма-всплески с продлённым излучением).

Аппроксимация распределения 1143 ярких всплесков KW на плоскости $\log T_{50}$ – $\log HR_{32}$ набором гауссовых компонент методом expectation–maximization показала наличие двух классов всплесков, коротких/жестких и длинных/мягких. Добавление третьей компоненты даёт значимое улучшения аппроксимации, однако эта компонента существенно перекрывается с компонентой, описывающей длинные всплески, и не представляет физического смысла. Дополнительный довод в пользу использования только двух классов всплесков связан с тем, что для описания распределений по T_{50} и HR_{32} достаточно только двух компонент.

Сравнение классификаций на физические типы I и II с классификацией на основе длительности, жесткости и спектральной задержки подтвердило, что всплески Типа I относятся к коротким/жестким всплескам с малой спектральной задержкой, а всплески Типа II, в основном, — длинные мягкие с заметной спектральной задержкой. Сравнение распределений $\log T_{50}$ – $\log HR_{32}$ в системе отсчёта наблюдателя и в собственной системе отсчёта показывает, что различие в жесткости и длительности всплесков типа I и II становится менее значимым, но сохраняется.

С учётом проведённого сравнения, события из набора 296 коротких всплесков были отнесены к физическим типам на основе полученной аппроксимации распределения $\log T_{50}$ – $\log HR_{32}$. Определено, что $\sim 70\%$ всплесков имеют Тип I, $\sim 8\%$ Тип II и $\sim 12\%$ имеют неопределённый тип (I или II). Доля коротких всплесков с продлённым излучением составляет $\sim 10\%$. Среди начальных импульсов всплесков, отнесённых на основе морфологии временной истории к коротким всплескам с продлённым излучением (EE), 21 (68%) классифицированы как Тип I 7 как неопределённый тип (I/II) и 3 как Тип II.

3. Получена наиболее полная локализационная информация для 271 короткого гамма-всплеска Конус-Винд. Для 254 всплесков были получены области локализации и для 17 всплесков с точно известной локализацией, полученной инструментами с возможностью построения изображений в жестком рентгеновском диапазоне, триангуляционные кольца получены для проверки методики.

Методом триангуляции получены локализации 146 гамма-всплесков, зарегистрированных *Fermi* (GBM) за период с 12 июля 2008 г. по 11 июля 2010 г. Было установлено, что IPN-триангуляции существенно улучшают локализации всплесков по сравнению с GBM, сокращая площадь области локализации всплеска в $\lesssim 180$ раз.

Описанная в диссертации методика триангуляции была успешно применена для подтверждения оптических послесвечений, зарегистрированных системой телескопов для поиска транзиентов Паломарской обсерватории.

4. Оценена чувствительность Конус-Винд и IPN, и получено предельное расстояние регистрации гигантских вспышек (GF) от SGR схожих с GF от SGR 1806–20 равное ~ 30 Мпк. Показано, что менее интенсивные GF, сравнимые с GF от SGR 1900+14 и SGR 0526–66 могут быть зарегистрированы IPN в галактиках не далее ≈ 6 Мпк. Произведён поиск близких галактик, находящихся ближе 30 Мпк, в локализациях коротких гамма-всплесков Конус-Винд. Были обнаружены только два всплеска, ранее ассоциированные с группой галактик M81/M82 (GRB 051103) и галактикой Андромеды (GRB 070201), локализации которых имеют малую вероятность случайного наложения на эти галактики ($\sim 1\%$). Дополнительный поиск всплесков из скопления Девы не выявил возможных кандидатов в GF.

Получен верхний предел на частоту GF с энерговыделением $Q \gtrsim 10^{46}$ эрг равный $\sim 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$ на SGR, который предполагает около одной GF с таким энерговыделением за время активности SGR, 10^3 – 10^5 лет. Этот предел был вычислен на основе наибольшего на 2014 г.

набора коротких всплесков и жестче, чем оценка ранее полученная в работе [76].

Для GF, сопоставимых по энергосодержанию со вспышкой 5 марта 1979 г. ($Q \lesssim 10^{45}$ эрг), полученный верхний предел на порядок выше $(0.9-1.7) \times 10^{-3}$ год $^{-1}$ SGR $^{-1}$. Что может быть интерпретировано, как возможность наблюдать более одной подобной GF за время жизни SGR. Полученные верхние пределы содержат неопределённость в порядок величины, связанную с неопределённостью галактической частоты вспышек CCSN, расстояния до SGR 1806–20 и предельного расстояния детектирования IPN. Эти неопределённости не были учтены в работе [76].

Определены галактики, которые являются наиболее вероятными источниками GF из-за наибольшего оцененного количества SGR в этих галактиках. Это галактики PGC047885, IC 0342, NGC 6946, NGC 5457 и NGC 5194, в дополнении к предложенным в работе [172].

5. Проведён спектральный анализ 293 коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, этот набор составляет $\sim 15\%$ от полного числа всплесков, зарегистрированных за первые 15 лет работы инструмента. Определены модели, наилучшим образом описывающие спектры всплесков и их параметры, на основе чего оценена энергетика событий.

Среди 214 всплесков с многоканальными спектрами было обнаружено три события, для описания которых необходима дополнительная степенная спектральная компонента с фотонным индексом ~ -2 . Эти всплески входят в 10% наиболее интенсивных событий из набора. Отношение энергетических потоков PL компоненты к CPL находится в диапазоне от 0.03 для GRB20031214_T366655 до 0.4 для GRB19980205_T19785. Обнаруженная компонента может иметь ту же природу, что и обнаруженная в GRB 081024B [198] и GRB 090510 [197] на основе данных *Fermi*-GBM и LAT.

Среди 21 короткого всплеска с EE, достаточно интенсивным для проведения спектрального анализа, было обнаружено четыре события, у которых спектр EE описывается степенной моделью с экспоненциаль-

ным завалом (CPL) с достаточно высокой $E_p \sim 160$ кэВ–2.2 МэВ и начальный импульс классифицирован как Тип I. Этот результат даёт дополнительное свидетельство в пользу наличия достаточно жесткого продлённого излучения у коротких гамма-всплесков.

Исследование соотношений E_p с интегральным (S) и пиковым (F_{peak}) энергетическим потоком (соотношения жесткость-интенсивность) показали, что: (1) Предполагаемая GF в галактике M31 является явным выбросом в распределении E_p-F_{peak} , что подкрепляет свидетельства в пользу отличной от GRB природы этого события; (2) Всплески типов I и II занимают практически не пересекающиеся области на диаграмме E_p-S . Всплески типа I образуют вытянутое распределение, которое, в среднем, подчиняется соотношению $E_p \propto S^{1/2}$. Всплески типа II образуют небольшую группу событий с низкой E_p , которая представляет собой малую часть распределения длинных всплесков. На плоскости E_p-F_{peak} всплески Типа II продлевают корреляцию жесткость-интенсивность в область низких E_p и малых F_{peak} . Приведены доводы в пользу того, что полученные для всплесков типов I и II из набора коротких всплесков KW, что всплески Типа I подчиняются своему соотношению Амари на плоскости $E_{p,\text{rest}}-E_{\text{iso}}$.

Литература

1. Klebesadel R. W., Strong I. B., Olson R. A. [Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin](#) // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 182. — P. L85.
2. Мазец Е. П., Голенецкий С. В., Ильинский В. Н. Вспышка космического гамма-излучения по наблюдениям на ИСЗ Космос-461 // *Письма в ЖЭТФ.* — 1974. — Т. 19. — С. 126–128.
3. Mazets E. P. et al. [Catalog of cosmic gamma-ray bursts from the KONUS experiment data. I.](#) // *Astrophys. Space Sci.* — 1981. — Vol. 80. — P. 3–83.
4. Golenetskii S. V., Mazets E. P., Aptekar R. L., Ilinskii V. N. [Correlation between luminosity and temperature in gamma-ray burst sources](#) // *Nature.* — 1983. — Vol. 306. — P. 451–453.
5. Band D., Matteson J., Ford L. et al. [BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I - Spectral diversity](#) // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 413. — P. 281–292.
6. Kouveliotou C., Meegan C. A., Fishman G. J. et al. [Identification of two classes of gamma-ray bursts](#) // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 413. — P. L101–L104.
7. Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al. [Fermi Observations of GRB 090902B: A Distinct Spectral Component in the Prompt and Delayed Emission](#) // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 706. — P. L138–L144.
8. Guiriec S., Connaughton V., Briggs M. S. et al. [Detection of a Thermal Spectral Component in the Prompt Emission of GRB 100724B](#) // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 727. — P. L33.
9. Burenin R. A. [Early Afterglows of Short Gamma-Ray Bursts](#) // *Astr. Lett.* — 2000. — Vol. 26. — P. 269–276.
10. Mazets E. P., Aptekar R. L., Frederiks D. D. et al. [Konus catalog of short GRBs](#) // *ArXiv astro-ph/0209219.* — 2002.
11. 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 et al. — Vol. 312 of *Astronomical Society of the Pacific Conf. Series.* — 2004. — P. 197.

12. Norris J. P., Bonnell J. T. [Short Gamma-Ray Bursts with Extended Emission](#) // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 643. — P. 266–275.
13. Costa E., Frontera F., Heise J. et al. [Discovery of an X-ray afterglow associated with the \$\gamma\$ -ray burst of 28 February 1997](#) // *Nature.* — 1997. — Vol. 387. — P. 783–785.
14. van Paradijs J., Groot P. J., Galama T. et al. [Transient optical emission from the error box of the \$\gamma\$ -ray burst of 28 February 1997](#) // *Nature.* — 1997. — Vol. 386. — P. 686–689.
15. Djorgovski S. G., Metzger M. R., Kulkarni S. R. et al. [The optical counterpart to the \$\gamma\$ -ray burst GRB 970508](#) // *Nature.* — 1997. — Vol. 387. — P. 876–878.
16. Metzger M. R., Djorgovski S. G., Kulkarni S. R. et al. [Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the \$\gamma\$ -ray burst of 8 May 1997](#) // *Nature.* — 1997. — Vol. 387. — P. 878–880.
17. Reichart D. E. [The Redshift of GRB 970508](#) // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 495. — P. L99–L101.
18. Fruchter A. S., Pian E., Gibbons R. et al. [HUBBLE SPACE TELESCOPE Observations of the Host Galaxy of GRB 970508](#) // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 545. — P. 664–669.
19. Frail D. A., Kulkarni S. R., Nicastro L. et al. [The radio afterglow from the \$\gamma\$ -ray burst of 8 May 1997](#) // *Nature.* — 1997. — Vol. 389. — P. 261–263.
20. Hjorth J., Bloom J. S. *The Gamma-Ray Burst - Supernova Connection* // *Gamma-Ray Bursts, Cambridge Astrophysics Series 51* / Ed. by C. Kouveliotou, R. A. M. J. Wijers, S. Woosley. — Cambridge University Press (Cambridge), 2012. — P. 169–190. — [arXiv:1104.2274](#).
21. Rhoads J. E. [The Dynamics and Light Curves of Beamed Gamma-Ray Burst Afterglows](#) // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 525. — P. 737–749.
22. Rhoads J. E. [How to Tell a Jet from a Balloon: A Proposed Test for Beaming in Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 487. — P. L1–L4.
23. Stanek K. Z., Garnavich P. M., Kaluzny J. et al. [BVRI Observations of the Optical Afterglow of GRB 990510](#) // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 522. — P. L39–L42.
24. Berger E. [Short-Duration Gamma-Ray Bursts](#) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 52. — P. 43–105.

25. Gehrels N., Sarazin C. L., O'Brien P. T. et al. [A short \$\gamma\$ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift \$z = 0.225\$](#) // Nature. — 2005. — Vol. 437. — P. 851–854.
26. Tanvir N. R., Levan A. J., Fruchter A. S. et al. [A 'kilonova' associated with the short-duration \$\gamma\$ -ray burst GRB 130603B](#) // Nature. — 2013. — Vol. 500. — P. 547–549.
27. Kumar P., Zhang B. [The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets](#) // Phys. Rep. — 2014. — Vol. 561. — P. 1–109.
28. Aartsen M. G., Ackermann M., Adams J. et al. [Search for Prompt Neutrino Emission from Gamma-Ray Bursts with IceCube](#) // Astrophys. J. — 2015. — Vol. 805. — P. L5.
29. Baerwald P., Bustamante M., Winter W. [Are gamma-ray bursts the sources of ultra-high energy cosmic rays?](#) // Astroparticle Physics. — 2015. — Vol. 62. — P. 66–91.
30. LIGO Scientific Collaboration, Aasi J., Abbott B. P. et al. [Advanced LIGO](#) // Class. Quant. Grav. — 2015. — Vol. 32, no. 7. — P. 074001.
31. Acernese F., Agathos M., Agatsuma K. et al. [Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector](#) // Class. Quant. Grav. — 2015. — Vol. 32, no. 2. — P. 024001.
32. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al. [Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger](#) // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 116, no. 6. — P. 061102.
33. Mereghetti S. [Pulsars and Magnetars](#) // Brazilian Journal of Physics. — 2013. — Vol. 43. — P. 356–368.
34. Mazets E. P., Golenetskii S. V. [Recent results from the gamma-ray burst studies in the KONUS experiment](#) // Astrophys. Space Sci. — 1981. — Vol. 75. — P. 47–81.
35. Mazets E. P., Golenetskii S. V., Gurian I. A., Ilinskii V. N. [The 5 March 1979 event and the distinct class of short gamma bursts Are they of the same origin](#) // Astrophys. Space Sci. — 1982. — Vol. 84. — P. 173–189.
36. Hurley K. [The short gamma-ray burst - SGR giant flare connection](#) // Advances in Space Research. — 2011. — Vol. 47. — P. 1337–1340.
37. Zhang B. [Astrophysics: A burst of new ideas](#) // Nature. — 2006. — Vol. 444. — P. 1010–1011.

38. Zhang B., Zhang B.-B., Virgili F. J. et al. [Discerning the Physical Origins of Cosmological Gamma-ray Bursts Based on Multiple Observational Criteria: The Cases of \$z = 6.7\$ GRB 080913, \$z = 8.2\$ GRB 090423, and Some Short/Hard GRBs](#) // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 703. — P. 1696–1724.
39. Frederiks D. D., Golenetskii S. V., Pal'shin V. D. et al. [Giant flare in SGR 1806–20 and its Compton reflection from the Moon](#) // *Astronomy Letters.* — 2007. — Vol. 33. — P. 1–18.
40. Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V. et al. [Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft](#) // *Space Sci. Rev.* — 1995. — Vol. 71. — P. 265–272.
41. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. [GEANT4 — a simulation toolkit](#) // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* — 2003. — Vol. 506. — P. 250–303.
42. Terekhov M. M., Aptekar R. L., Frederiks D. D. et al. [The Konus-Wind and Konus-A instrument response functions and the spectral deconvolution procedure](#) // *Gamma-Ray Bursts, 4th Hunstville Symposium* / Ed. by C. A. Meegan, R. D. Preece, T. M. Koshut. — Vol. 428 of American Institute of Physics Conference Series. — 1998. — P. 894–898.
43. Ianakiev K. D., Alexandrov B. S., Littlewood P. B., Browne M. C. [Temperature behavior of NaI\(Tl\) scintillation detectors](#) // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* — 2009. — Vol. 607, no. 2. — P. 432.
44. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., P. Flannery B. *Numerical Recipes in C. Second Edition. The Art of Scientific Computing.* — Cambridge University Press, 1992.
45. Goldstein A., Preece R. D., Mallozzi R. S. et al. [The BATSE 5B GRB Spectral Catalog](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2013. — Vol. 208. — P. 21.
46. Gruber D., Goldstein A., Weller von Ahlefeld V. et al. [The Fermi-GBM Gamma-Ray Burst Spectral Catalog: Four Years of Data](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2014. — Vol. 211. — P. 12.
47. Margutti R., Soderberg A. M., Chomiuk L. et al. [Inverse Compton X-Ray Emission from Supernovae with Compact Progenitors: Application to SN2011fe](#) // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 751. — P. 134.
48. Norris J. P., Cline T. L., Desai U. D., Teegarden B. J. [Frequency of fast, narrow gamma-ray bursts](#) // *Nature.* — 1984. — Vol. 308. — P. 434.

49. Aptekar R. L., Butterworth P. S., Cline T. L. et al. [GRB observations with Konus-Wind in 1994-1997](#) // Gamma-Ray Bursts, 4th Hunstville Symposium / Ed. by C. A. Meegan, R. D. Preece, T. M. Koshut. — Vol. 428 of American Institute of Physics Conference Series. — 1998. — P. 10–14.
50. McBreen B., Hurley K. J., Long R., Metcalfe L. [Lognormal Distributions in Gamma-Ray Bursts and Cosmic Lightning](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1994. — Vol. 271. — P. 662.
51. Horváth I. [A further study of the BATSE Gamma-Ray Burst duration distribution](#) // Astron. Astrophys. — 2002. — Vol. 392. — P. 791–793.
52. Fishman G. J., Meegan C. A., Wilson R. B. et al. [The BATSE experiment on the Compton Gamma Ray Observatory: Status and some early results](#) // NASA Conference Publication / Ed. by C. R. Shrader, N. Gehrels, B. Dennis. — Vol. 3137 of NASA Conference Publication. — 1992. — P. 26–34.
53. Bonnell J. T., Norris J. P., Nemiroff R. J., Scargle J. D. [Brightness-independent Measurements of Gamma-Ray Burst Durations](#) // Astrophys. J. — 1997. — Vol. 490. — P. 79.
54. 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. — 1995. — Vol. 448. — P. L101.
55. Mitrofanov I. G., Anfimov D. S., Litvak M. L. et al. [The Emission Time of Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. — 1999. — Vol. 522. — P. 1069–1078.
56. Sakamoto T., Barbier L., Barthelmy S. et al. [Are Short GRBs Really Hard?](#) // Gamma-Ray Bursts in the Swift Era / Ed. by S. S. Holt, N. Gehrels, J. A. Nousek. — Vol. 836 of American Institute of Physics Conference Series. — 2006. — P. 43–47.
57. Mukherjee S., Feigelson E. D., Jogesh Babu G. et al. [Three Types of Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. — 1998. — Vol. 508. — P. 314–327.
58. Hakkila J., Haglin D. J., Pendleton G. N. et al. [Gamma-Ray Burst Class Properties](#) // Astrophys. J. — 2000. — Vol. 538. — P. 165–180.
59. Hakkila J., Giblin T. W., Roiger R. J. et al. [How Sample Completeness Affects Gamma-Ray Burst Classification](#) // Astrophys. J. — 2003. — Vol. 582. — P. 320–329.
60. Horváth I., Balázs L. G., Bagoly Z. et al. [A new definition of the intermediate group of gamma-ray bursts](#) // Astron. Astrophys. — 2006. — Vol. 447. — P. 23–30.

61. Horváth I., Bagoly Z., Balázs L. G. et al. [Detailed Classification of Swift's Gamma-ray Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 713. — P. 552–557.
62. Norris J. P., Marani G. F., Bonnell J. T. [Connection between Energy-dependent Lags and Peak Luminosity in Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 534. — P. 248–257.
63. Norris J. P., Gehrels N., Scargle J. D. [Heterogeneity in Short Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 735. — P. 23.
64. Gehrels N., Norris J. P., Barthelmy S. D. et al. [A new \$\gamma\$ -ray burst classification scheme from GRB060614](#) // *Nature*. — 2006. — Vol. 444. — P. 1044–1046.
65. Zhang B., Zhang B.-B., Liang E.-W. et al. [Making a Short Gamma-Ray Burst from a Long One: Implications for the Nature of GRB 060614](#) // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 655. — P. L25–L28.
66. Lazzati D., Ramirez-Ruiz E., Ghisellini G. [Possible detection of hard X-ray afterglows of short gamma -ray bursts](#) // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 379. — P. L39–L43.
67. Connaughton V. [BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Tails](#) // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 567. — P. 1028–1036.
68. 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.* — 2005. — Vol. 625. — P. L17–L21.
69. Minaev P. Y., Pozanenko A. S., Loznikov V. M. [Extended emission from short gamma-ray bursts detected with SPI-ACS/INTEGRAL](#) // *Astr. Lett.* — 2010. — Vol. 36. — P. 707–720.
70. Norris J. P., Gehrels N., Scargle J. D. [Threshold for Extended Emission in Short Gamma-ray Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 717. — P. 411–419.
71. Troja E., King A. R., O'Brien P. T. et al. [Different progenitors of short hard gamma-ray bursts](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 385. — P. L10–L14.
72. Fong W., Berger E., Fox D. B. [Hubble Space Telescope Observations of Short Gamma-Ray Burst Host Galaxies: Morphologies, Offsets, and Local Environments](#) // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 708. — P. 9–25.
73. Koshut T. M., Paciesas W. S., Kouveliotou C. et al. [Systematic Effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 463. — P. 570.

74. Paciesas W. S., Meegan C. A., Pendleton G. N. et al. [The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog \(Revised\)](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 1999. — Vol. 122. — P. 465–495.
75. 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. — Vol. 156. — P. 217–226.
76. Ofek E. O. [Soft Gamma-Ray Repeaters in Nearby Galaxies: Rate, Luminosity Function, and Fraction among Short Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 659. — P. 339–346.
77. Balázs L. G., Bagoly Z., Horváth I. et al. [On the difference between the short and long gamma-ray bursts](#) // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 401. — P. 129–140.
78. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. [Scikit-learn: Machine Learning in Python](#) // *Journal of Machine Learning Research.* — 2011. — Vol. 12. — P. 2825–2830.
79. Минаев, П. Ю. Исследование коротких транзиентных событий в гамма-диапазоне по результатам космических лабораторий INTEGRAL, Swift и Fermi. // Дис. канд. ф.-м. наук: 01.03.02 / ИКИ РАН. — М., 2014. — 211 с. — URL: https://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/2d2/178/16978157/Minaev_PhD.pdf.
80. Band D. L. [Gamma-Ray Burst Spectral Evolution through Cross-Correlations of Discriminator Light Curves](#) // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 486. — P. 928.
81. Tsvetkova A. E., Pal'shin V. D., Aptekar R. L. et al. // in prep. — 2015.
82. Kann D. A., Klose S., Zhang B. et al. [The Afterglows of Swift-era Gamma-ray Bursts. I. Comparing pre-Swift and Swift-era Long/Soft \(Type II\) GRB Optical Afterglows](#) // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 720. — P. 1513–1558.
83. Kann D. A., Klose S., Zhang B. et al. [The Afterglows of Swift-era Gamma-Ray Bursts. II. Type I GRB versus Type II GRB Optical Afterglows](#) // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 734. — P. 96.
84. Meegan C. A., Fishman G. J., Briggs M. S. et al. [Current BATSE Gamma-Ray Burst Catalog](#) // on the Internet. — 2001.
85. 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. — Vol. 199. — P. 18.

86. Sakamoto T., Barthelmy S. D., Baumgartner W. H. et al. [The Second Swift Burst Alert Telescope Gamma-Ray Burst Catalog](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2011. — Vol. 195. — P. 2.
87. Horváth I., Balázs L. G., Bagoly Z., Veres P. [Classification of Swift's gamma-ray bursts](#) // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 489. — P. L1–L4.
88. Hurley K., Sommer M., Atteia J.-L. et al. [The solar X-ray/cosmic gamma-ray burst experiment aboard ULYSSES](#) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* — 1992. — Vol. 92. — P. 401–410.
89. Trombka J. I., Boynton W. V., Brückner J. et al. [Remote planetary geochemical exploration with the NEAR X-ray/gamma-ray spectrometer](#) // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* — 1999. — Vol. 422. — P. 572–576.
90. Saunders R. S., Arvidson R. E., Badhwar G. D. et al. [2001 Mars Odyssey Mission Summary](#) // *Space Sci. Rev.* — 2004. — Vol. 110. — P. 1–36.
91. Boynton W. V., Feldman W. C., Mitrofanov I. G. et al. [The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer Instrument Suite](#) // *Space Sci. Rev.* — 2004. — Vol. 110. — P. 37–83.
92. Hurley K., Mitrofanov I., Kozyrev A. et al. [Mars Odyssey joins the third Interplanetary network](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2006. — Vol. 164. — P. 124–129.
93. Goldsten J. O., Rhodes E. A., Boynton W. V. et al. [The MESSENGER Gamma-Ray and Neutron Spectrometer](#) // *Space Sci. Rev.* — 2007. — Vol. 131. — P. 339–391.
94. Gold R. E., Solomon S. C., McNutt R. L. et al. [The MESSENGER mission to Mercury: scientific payload](#) // *Planet. Space Sci.* — 2001. — Vol. 49. — P. 1467–1479.
95. Solomon S. C., McNutt R. L., Gold R. E., Domingue D. L. [MESSENGER Mission Overview](#) // *Space Sci. Rev.* — 2007. — Vol. 131. — P. 3–39.
96. Rau A., Kienlin A. V., Hurley K., Lichti G. G. [The 1st INTEGRAL SPI-ACS gamma-ray burst catalogue](#) // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 438. — P. 1175–1183.
97. Frontera F., Costa E., dal Fiume D. et al. [The high energy instrument PDS on-board the BeppoSAX X-ray astronomy satellite](#) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* — 1997. — Vol. 122. — P. 357–369.

98. Feroci M., Frontera F., Costa E. et al. [In-flight performances of the Bep-poSAX gamma-ray burst monitor](#) // EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VIII / Ed. by O. H. Siegmund, M. A. Gummin. — Vol. 3114 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 1997. — P. 186–197.
99. Lin R. P., Dennis B. R., Hurford G. J. et al. [The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager \(RHESSI\)](#) // Sol. Phys. — 2002. — Vol. 210. — P. 3–32.
100. Smith D. M., Lin R. P., Turin P. et al. [The RHESSI Spectrometer](#) // Sol. Phys. — 2002. — Vol. 210. — P. 33–60.
101. Ricker G. R., Atteia J.-L., Crew G. B. et al. [The High Energy Transient Explorer \(HETE\): Mission and Science Overview](#) // Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001: A Workshop Celebrating the First Year of the HETE Mission / Ed. by G. R. Ricker, R. K. Vanderspek. — Vol. 662 of American Institute of Physics Conference Series. — 2003. — P. 3–16.
102. Atteia J.-L., Boer M., Cotin F. et al. [In-Flight Performance and First Results of FREGATE](#) // Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001: A Workshop Celebrating the First Year of the HETE Mission / Ed. by G. R. Ricker, R. K. Vanderspek. — Vol. 662 of American Institute of Physics Conference Series. — 2003. — P. 17–24.
103. Barthelmy S. D., Barbier L. M., Cummings J. R. et al. [The Burst Alert Telescope \(BAT\) on the SWIFT Midex Mission](#) // Space Sci. Rev. — 2005. — Vol. 120. — P. 143–164.
104. Gehrels N., Chincarini G., Giommi P. et al. [The Swift Gamma-Ray Burst Mission](#) // Astrophys. J. — 2004. — Vol. 611. — P. 1005–1020.
105. Yamaoka K., Endo A., Enoto T. et al. [Design and In-Orbit Performance of the Suzaku Wide-Band All-Sky Monitor](#) // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2009. — Vol. 61. — P. 35.
106. Takahashi T., Abe K., Endo M. et al. [Hard X-Ray Detector \(HXD\) on Board Suzaku](#) // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2007. — Vol. 59. — P. 35–51.
107. Tavani M., Barbiellini G., Argan A. et al. [The AGILE Mission](#) // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 502. — P. 995–1013.
108. Meegan C., Lichti G., Bhat P. N. et al. [The Fermi gamma-ray burst monitor](#) // Astrophys. J. — 2009. — Vol. 702. — P. 791–804.

109. Oraevskii V. N., Sobel'man I. I., Zhitnik I. A., Kuznetsov V. D. [Comprehensive solar studies by CORONAS-F satellite: new results](#) // Physics Uspekhi. — 2002. — Vol. 45. — P. 886–896.
110. Aptekar R. L., Butterworth P. S., Cline T. L. et al. [Hard X-Ray Bursts from GRO J1744-28. I. Observations by the Konus-Wind and Konus-A Experiments](#) // Astrophys. J. — 1998. — Vol. 493. — P. 404.
111. Terrell J., Lee P., Klebesadel R. W., Griffee J. W. [Recent DMSP satellite detections of gamma-ray bursts](#) // Gamma-Ray Bursts, 4th Hunstville Symposium / Ed. by C. A. Meegan, R. D. Preece, T. M. Koshut. — Vol. 428 of American Institute of Physics Conference Series. — 1998. — P. 54–58.
112. Terrell J., Lee P., Klebesadel R. W., Griffee J. W. [DMSP satellite detections of gamma-ray bursts](#) // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by C. Kouveliotou, M. F. Briggs, G. J. Fishman. — Vol. 384 of American Institute of Physics Conference Series. — 1996. — P. 545–549.
113. Terrell J., Klebesadel R. W. [DMSP 14 Observations of GRB011121 and the Giant SGR1900+14 Flare of 98/08/27](#) // Gamma-Ray Bursts: 30 Years of Discovery / Ed. by E. Fenimore, M. Galassi. — Vol. 727 of American Institute of Physics Conference Series. — 2004. — P. 541–544.
114. Marar T. M. K., Sharma M. R., Seetha S. et al. [The gamma-ray burst experiment onboard the SROSS-C satellite](#) // Astron. Astrophys. — 1994. — Vol. 283. — P. 698–704.
115. Hurley K., Briggs M. S., Kippen R. M. et al. [The ULYSSES Supplement to the BATSE 3B Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. Suppl. — 1999. — Vol. 120. — P. 399–408.
116. Norris J. P., Scargle J. D., Bonnell J. T. [Short Gamma-Ray Bursts Are Different](#) // Gamma-ray Bursts in the Afterglow Era / Ed. by E. Costa, F. Frontera, J. Hjorth. — 2001. — P. 40.
117. Briggs M. S., Pendleton G. N., Kippen R. M. et al. [The Error Distribution of BATSE Gamma-Ray Burst Locations](#) // Astrophys. J. Suppl. — 1999. — Vol. 122. — P. 503–518.
118. 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. Astrophys. — 2003. — Vol. 411. — P. L299–L305.
119. Lichti G. G., Georgii R., von Kienlin A. et al. [The \$\gamma\$ -ray burst-detection system of SPI](#) // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by

- M. L. McConnell, J. M. Ryan. — Vol. 510 of American Institute of Physics Conference Series. — 2000. — P. 722–726.
120. Rau A., von Kienlin A., Lichti G. et al. [INTEGRAL-SPI/ACS GRB data: timing correction](#) // GRB Coordinates Network. — 2004. — Vol. 2568. — P. 1.
121. Zhang X. L., Rau A., von Kienlin A., Hurley K. [SPI-ACS timing: cross-check of onboard clocks](#) // Eighth Integral Workshop. The Restless Gamma-ray Universe (INTEGRAL 2010). — 2010.
122. Golenetskii S. V., Il'Inskii V. N., Mazets E. P. Determination of the Efficiency and Angular Directivity of Cosmic γ -Ray Detectors // Cosmic Research. — 1974. — Vol. 12. — P. 706.
123. Mazets E. P., Golenetskii S. V. [Recent results from the gamma-ray burst studies in the KONUS experiment](#) // Astrophys. Space Sci. — 1981. — Vol. 75. — P. 47–81.
124. Arimoto M., Ricker G., Atteia J.-L. et al. [GRB 060121: a bright short/hard GRB localized by HETE-2 WXM.](#) // GRB Coordinates Network. — 2006. — Vol. 4550. — P. 1.
125. Götz D., Beckmann V., Mereghetti S., Paizis A. [INTEGRAL GRB 070707 is a short hard burst.](#) // GRB Coordinates Network. — 2007. — Vol. 6608. — P. 1.
126. Kommers J. M., Lewin W. H. G., Kouveliotou C. et al. [The Intensity Distribution of Faint Gamma-Ray Bursts Detected with BATSE](#) // Astrophys. J. — 2000. — Vol. 533. — P. 696–709.
127. Stern B. E., Tikhomirova Y., Kompaneets D. et al. [An Off-Line Scan of the BATSE Daily Records and a Large Uniform Sample of Gamma-Ray Bursts](#) // Astrophys. J. — 2001. — Vol. 563. — P. 80–94.
128. 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. — Vol. 180. — P. 192–223.
129. 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. — Vol. 199. — P. 18.
130. Frederiks D. D., Pal'shin V. D., Aptekar R. L. et al. [On the possibility of identifying the short hard burst GRB 051103 with a giant flare from a soft gamma repeater in the M81 group of galaxies](#) // Astronomy Letters. — 2007. — Vol. 33. — P. 19–24.

131. Hurley K., Rowlinson A., Bellm E. et al. [A new analysis of the short-duration, hard-spectrum GRB 051103, a possible extragalactic soft gamma repeater giant flare](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 403. — P. 342–352.
132. Ofek E. O., Kulkarni S. R., Nakar E. et al. [The short-hard GRB 051103: observations and implications for its nature](#) // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 652. — P. 507–511.
133. Abadie J., Abbott B. P., Abbott T. D. et al. [Implications for the Origin of GRB 051103 from LIGO Observations](#) // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 755. — P. 2.
134. 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. — Vol. 680. — P. 545–549.
135. Abbott B., Abbott R., Adhikari R. et al. [Implications for the Origin of GRB 070201 from LIGO Observations](#) // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. 1419–1430.
136. Ofek E. O., Munro M., Quimby R. et al. [GRB 070201: A Possible Soft Gamma-Ray Repeater in M31](#) // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. 1464–1469.
137. Woods P. M., Kouveliotou C., van Paradijs J. et al. [Hard Burst Emission from the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14](#) // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 527. — P. L47–L50.
138. Singer L. P. The needle in the 100 deg² haystack: The hunt for binary neutron star mergers with LIGO and Palomar Transient Factory // Ph.D. thesis / California Institute of Technology. — 2015. — URL: <http://arxiv.org/abs/1501.03765>.
139. Rau A., Kulkarni S. R., Law N. M. et al. [Exploring the Optical Transient Sky with the Palomar Transient Factory](#) // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2009. — Vol. 121. — P. 1334–1351.
140. Hurley K., Goldsten J., Golenetskii S. et al. [IPN triangulation of unusual GRB 120716A](#) // *GRB Coordinates Network*. — 2012. — Vol. 13487. — P. 1.
141. Cenko S. B., Ofek E. O., Nugent P. E. [GRB 120716A: candidate optical afterglow from PTF](#) // *GRB Coordinates Network*. — 2012. — Vol. 13489. — P. 1.

142. Hurley K., Laros J., Brandt S. et al. [Gamma-Ray Burst Arrival-Time Localizations: Simultaneous Observations by Ulysses, Pioneer Venus Orbiter, SIGMA, WATCH, and PHEBUS](#) // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 533. — P. 884–889.
143. Hurley K., Lund N., Brandt S. et al. [The Ulysses Supplement to the Granat/WATCH Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2000. — Vol. 128. — P. 549–560.
144. Laros J. G., Hurley K. C., Fenimore E. E. et al. [Gamma-Ray Burst Arrival Time Localizations: Simultaneous Observations by Pioneer Venus Orbiter, Compton Gamma-Ray Observatory, and ULYSSES](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 1998. — Vol. 118. — P. 391–399.
145. 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. — Vol. 156. — P. 217–226.
146. Laros J. G., Boynton W. V., Hurley K. C. et al. [Gamma-Ray Burst Arrival Time Localizations: Simultaneous Observations by Mars Observer, Compton Gamma Ray Observatory, and ULYSSES](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 1997. — Vol. 110. — P. 157.
147. Hurley K., Briggs M. S., Kippen R. M. et al. [The Ulysses Supplement to the BATSE 4BR Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 1999. — Vol. 122. — P. 497–501.
148. Hurley K., Briggs M. S., Kippen R. M. et al. [The Interplanetary Network Supplement to the Burst and Transient Source Experiment 5B Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2011. — Vol. 196. — P. 1.
149. Hurley K., Guidorzi C., Frontera F. et al. [The Interplanetary network supplement to the BeppoSAX gamma-ray burst catalogs](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2010. — Vol. 191. — P. 179–184.
150. 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. — Vol. 197. — P. 34.
151. Hurley K., Pal'shin V. D., Aptekar R. L. et al. [The Interplanetary network supplement to the Fermi GBM catalog of cosmic gamma-ray bursts](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2013. — Vol. 207. — P. 39.
152. Olausen S. A., Kaspi V. M. [The McGill Magnetar Catalog](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2014. — Vol. 212. — P. 6.

153. Golenetskii S. V., Mazets E. P., Ilinskii V. N., Guryan Y. A. [Recurrent gamma-ray bursts from the flaring source FXP 0520 - 66](#) // Soviet Astronomy Letters. — 1979. — Vol. 5. — P. 340–342.
154. Mazets E. P., Golenetskii S. V., Ilinskii V. N. et al. [Observations of a flaring X-ray pulsar in Dorado](#) // Nature. — 1979. — Vol. 282. — P. 587–589.
155. Barat C., Chambon G., Hurley K. et al. [Evidence for periodicity in a gamma ray burst](#) // Astron. Astrophys. — 1979. — Vol. 79. — P. L24.
156. Cline T. L., Desai U. D., Pizzichini G. et al. [Detection of a fast, intense and unusual gamma-ray transient](#) // Astrophys. J. — 1980. — Vol. 237. — P. L1–L5.
157. Evans W. D., Klebesadel R. W., Laros J. G. et al. [Location of the gamma-ray transient event of 1979 March 5](#) // Astrophys. J. — 1980. — Vol. 237. — P. L7–L9.
158. Cline T. L., Desai U. D., Teegarden B. J. et al. [Precise source location of the anomalous 1979 March 5 gamma-ray transient](#) // Astrophys. J. — 1982. — Vol. 255. — P. L45–L48.
159. Mazets E. P., Cline T. L., Aptekar R. L. et al. [Activity of the soft gamma repeater SGR 1900+14 in 1998 from Konus-Wind observations: 2. The giant August 27 outburst](#) // Astronomy Letters. — 1999. — Vol. 25. — P. 635–648.
160. Duncan R. C., Thompson C. [Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts](#) // Astrophys. J. — 1992. — Vol. 392. — P. L9–L13.
161. Thompson C., Duncan R. C. [The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts](#) // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1995. — Vol. 275. — P. 255–300.
162. Thompson C., Duncan R. C. [The Soft Gamma Repeaters as Very Strongly Magnetized Neutron Stars. II. Quiescent Neutrino, X-Ray, and Alfvén Wave Emission](#) // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 473. — P. 322.
163. Bisnovatyi-Kogan G. S., Ikhsanov N. R. [A new look at anomalous X-ray Pulsars](#) // Astronomy Reports. — 2014. — Vol. 58. — P. 217–227.
164. Crider A. [A Magnetar Flare in the BATSE Catalog?](#) // Gamma-Ray Bursts in the Swift Era / Ed. by S. S. Holt, N. Gehrels, J. A. Nousek. — Vol. 836 of American Institute of Physics Conference Series. — 2006. — P. 64–67.

165. Levan A. J., Tanvir N. R., Jakobsson P. et al. [On the nature of the short-duration GRB 050906](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 384. — P. 541–547.
166. Sakamoto T., Barthelmy S. D., Baumgartner W. H. et al. [The Second Swift Burst Alert Telescope Gamma-Ray Burst Catalog](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2011. — Vol. 195. — P. 2.
167. Frederiks D. D., Pal'shin V. D., Aptekar R. L. et al. [On the possibility of identifying the short hard burst GRB 051103 with a giant flare from a soft gamma repeater in the M81 group of galaxies](#) // *Astronomy Letters.* — 2007. — Vol. 33. — P. 19–24.
168. Hurley K., Rowlinson A., Bellm E. et al. [A new analysis of the short-duration, hard-spectrum GRB 051103, a possible extragalactic soft gamma repeater giant flare](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 403. — P. 342–352.
169. Lazzati D., Ghirlanda G., Ghisellini G. [Soft gamma-ray repeater giant flares in the BATSE short gamma-ray burst catalogue: constraints from spectroscopy](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 362. — P. L8–L12.
170. Palmer D. M., Barthelmy S., Gehrels N. et al. [A giant \$\gamma\$ -ray flare from the magnetar SGR 1806–20](#) // *Nature.* — 2005. — Vol. 434. — P. 1107–1109.
171. Nakar E., Gal-Yam A., Piran T., Fox D. B. [The Distances of Short-Hard Gamma-Ray Bursts and the Soft Gamma-Ray Repeater Connection](#) // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 640. — P. 849–853.
172. Popov S. B., Stern B. E. [Soft gamma repeaters outside the Local Group](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 365. — P. 885–890.
173. Tikhomirova Y. Y., Pozanenko A. S., Hurley K. S. [Search for nearby host galaxies of short gamma-ray bursts detected and well localized by BATSE/IPN](#) // *Astronomy Letters.* — 2010. — Vol. 36. — P. 231–236.
174. Pal'shin V. D., Hurley K., Svinkin D. S. et al. [Interplanetary Network Localizations of Konus Short Gamma-Ray Bursts](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2013. — Vol. 207. — P. 38.
175. Terasawa T., Tanaka Y. T., Takei Y. et al. [Repeated injections of energy in the first 600ms of the giant flare of SGR 1806–20](#) // *Nature.* — 2005. — Vol. 434. — P. 1110–1111.
176. Hurley K., Cline T., Mazets E. et al. [A giant periodic flare from the soft \$\gamma\$ -ray repeater SGR1900+14](#) // *Nature.* — 1999. — Vol. 397. — P. 41–43.

177. Mazets E. P., Aptekar R. L., Butterworth P. S. et al. [Unusual Burst Emission from the New Soft Gamma Repeater SGR 1627-41](#) // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 519. — P. L151–L153.
178. Tendulkar S. P., Cameron P. B., Kulkarni S. R. [Proper Motions and Origins of SGR 1806–20 and SGR 1900+14](#) // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 761. — P. 76.
179. Svirski G., Nakar E., Ofek E. O. [SGR 1806-20 distance and dust properties in molecular clouds by analysis of flare X-ray echoes](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 415. — P. 2485–2494.
180. White D. J., Daw E. J., Dhillon V. S. [A list of galaxies for gravitational wave searches](#) // *Classical and Quantum Gravity.* — 2011. — Vol. 28, no. 8. — P. 085016.
181. Cappellaro E., Evans R., Turatto M. [A new determination of supernova rates and a comparison with indicators for galactic star formation](#) // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 351. — P. 459–466.
182. Böser S., Kowalski M., Schulte L. et al. [Detecting extra-galactic supernova neutrinos in the Antarctic ice](#) // *Astroparticle Physics.* — 2015. — Vol. 62. — P. 54–65.
183. Binney J., Merrifield M. *Galactic Astronomy*. Princeton paperbacks. — Princeton University Press, 1998. — ISBN: 9780691025650. — URL: <http://books.google.ru/books?id=arYYRoYjKacC>.
184. Mattila S., Dahlen T., Efstathiou A. et al. [Core-collapse Supernovae Missed by Optical Surveys](#) // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 756. — P. 111.
185. Binggeli B., Tammann G. A., Sandage A. [Studies of the Virgo cluster. VI - Morphological and kinematical structure of the Virgo cluster](#) // *Astron. J.* — 1987. — Vol. 94. — P. 251–277.
186. Gehrels N. [Confidence limits for small numbers of events in astrophysical data](#) // *Astrophys. J.* — 1986. — Vol. 303. — P. 336–346.
187. Li W., Chornock R., Leaman J. et al. [Nearby supernova rates from the Lick Observatory Supernova Search - III. The rate-size relation, and the rates as a function of galaxy Hubble type and colour](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 412. — P. 1473–1507.
188. van den Bergh S., Tammann G. A. [Galactic and extragalactic supernova rates](#) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1991. — Vol. 29. — P. 363–407.

189. Baumgartner W. H., Tueller J., Markwardt C. B. et al. [The 70 Month Swift-BAT All-sky Hard X-Ray Survey](#) // *Astrophys. J. Suppl.* — 2013. — Vol. 207. — P. 19.
190. 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.
191. Preece R. D., Briggs M. S., Mallozzi R. S. et al. [The Synchrotron Shock Model Confronts a “Line of Death” in the BATSE Gamma-Ray Burst Data](#) // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 506. — P. L23–L26.
192. Bostancı Z. F., Kaneko Y., Göğüş E. [Gamma-ray bursts with extended emission observed with BATSE](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 428. — P. 1623–1630.
193. Mazets E. P., Aptekar R. L., Frederiks D. D. et al. [Konus catalog of short GRBs](#) // *arXiv:astro-ph/0209219.* — 2002.
194. Kaneko Y., Bostancı Z. F., Göğüş E., Lin L. [Short gamma-ray bursts with extended emission observed with Swift/BAT and Fermi/GBM](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 452. — P. 824–837.
195. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. [IPN localization of very bright long hard GRB 070207.](#) // *GRB Coordinates Network.* — 2007. — Vol. 6089. — P. 1.
196. Hurley K., Mazets E., Golenetskii S., Cline T. [IPN Triangulation of GRB001020.](#) // *GRB Coordinates Network.* — 2000. — Vol. 859.
197. Ackermann M., Asano K., Atwood W. B. et al. [Fermi Observations of GRB 090510: A Short-Hard Gamma-ray Burst with an Additional, Hard Power-law Component from 10 keV to GeV Energies](#) // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 716. — P. 1178–1190.
198. Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al. [Fermi Detection of Delayed GeV Emission from the Short Gamma-Ray Burst 081024B](#) // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 712. — P. 558–564.
199. Gehrels N., Norris J. P., Barthelmy S. D. et al. [A new \$\gamma\$ -ray burst classification scheme from GRB060614](#) // *Nature.* — 2006. — Vol. 444. — P. 1044–1046.
200. Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E. et al. [Konus-Wind observation of GRB 060614.](#) // *GRB Coordinates Network.* — 2006. — Vol. 5264. — P. 1.

201. Amati L., Frontera F., Tavani M. et al. [Intrinsic spectra and energetics of BeppoSAX Gamma-Ray Bursts with known redshifts](#) // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 390. — P. 81–89.
202. Yonetoku D., Murakami T., Nakamura T. et al. [Gamma-Ray Burst Formation Rate Inferred from the Spectral Peak Energy-Peak Luminosity Relation](#) // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 609. — P. 935–951.
203. Nava L., Ghirlanda G., Ghisellini G., Firmani C. [Peak energy of the prompt emission of long gamma-ray bursts versus their fluence and peak flux](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 391. — P. 639–652.
204. Nava L., Ghirlanda G., Ghisellini G., Celotti A. [Fermi/GBM and BATSE gamma-ray bursts: comparison of the spectral properties](#) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 415. — P. 3153–3162.
205. Ukwatta T. N., Hurley K., MacGibbon J. H et al. [Investigation of Primordial Black Hole Bursts using Interplanetary Network Gamma-ray Bursts](#) // *arXiv:1512.01264*. — 2015.