Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

На правах рукописи

Цветкова Анастасия Евгеньевна

НАБЛЮДЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ С ИЗВЕСТНЫМ КОСМОЛОГИЧЕСКИМ КРАСНЫМ СМЕЩЕНИЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОНУС-ВИНД

Специальность 01.03.02 — «астрофизика и звёздная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Фредерикс Дмитрий Дмитриевич

Санкт-Петербург 2018

Содержание

B	едение	5
	Космические гамма-всплески	5
	Актуальность темы диссертации	7
	Цели работы	9
	Научная новизна	1
	Достоверность полученных результатов	2
	Научная и практическая значимость	3
	Основные положения, выносимые на защиту	3
	Апробация работы и публикации	4
	Личный вклад	5
	Структура диссертации	6
-	A	
1 2	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- Винд	7 0
1 2 3	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- Винд	7 0
1 2 3	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- 2' Винд 2' Выборка гамма-всплесков с известным красным смещени- 2' ем, зарегистрированных в триггерном режиме в экспери- 3' менте Конус-Винд 3' Временной и спектральный анализ излучения гамма- 3' всплесков 4'	7 0 2
1 2 3	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- 2' Винд 2' Выборка гамма-всплесков с известным красным смещени- 2' ем, зарегистрированных в триггерном режиме в экспери- 3' менте Конус-Винд 3' Временной и спектральный анализ излучения гамма- 4' 8.1 Введение 4'	7 0 2 2
1 2 3	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- Винд 2' Выборка гамма-всплесков с известным красным смещени- ем, зарегистрированных в триггерном режиме в экспери- менте Конус-Винд 3' Временной и спектральный анализ излучения гамма- всплесков 4' 3.1 Введение 4' 3.2 Методика временного анализа 4'	7 0 2 2 2
1 2 3	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- 2' Винд 2' Выборка гамма-всплесков с известным красным смещени- 2' выборка гамма-всплесков с известным красным смещени- 3' ем, зарегистрированных в триггерном режиме в экспери- 3' менте Конус-Винд 3' Временной и спектральный анализ излучения гамма- 4' 3.1 Введение 4' 3.2 Методика временного анализа 4' 3.3 Результаты временного анализа 4'	7 0 2 2 4
1 2 3	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- 2' Винд 2' Выборка гамма-всплесков с известным красным смещени- 2' ем, зарегистрированных в триггерном режиме в экспери- 3' менте Конус-Винд 3' Временной и спектральный анализ излучения гамма- 4' 3.1 Введение 4' 3.2 Методика временного анализа 4' 3.3 Результаты временного анализа 4'	7 0 2 2 4 8
1 2 3	Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус- Винд 2' Выборка гамма-всплесков с известным красным смещени- ем, зарегистрированных в триггерном режиме в экспери- менте Конус-Винд 3' Временной и спектральный анализ излучения гамма- всплесков 4' 3.1 Введение 4' 3.2 Методика временного анализа 4' 3.3 Результаты временного анализа 4' 3.4 Методика спектрального анализа 4'	7 0 2 2 4 8 0

	3.6	Распределение жёсткость-длительность в системах отсчёта на-	
		блюдателя и источника гамма-всплеска	52
	3.7	Статистика спектральных параметров в контексте модели SSM	54
	3.8	Спектральные параметры, полученные в экспериментах Конус-	
		Винд, CGRO-BATSE и Fermi-GBM	56
	3.9	Совместный анализ гамма-всплеска GRB 140801A по данным	
		экспериментов Конус-Винд и Fermi-GBM	59
	3.10	Заключение	65
4	Эне	ргетика гамма-всплесков, зарегистрированных в триг-	
	гері	ном режиме в эксперименте Конус- <i>Винд</i>	72
	4.1	Введение	72
	4.2	Интегральные и пиковые энергетические потоки гамма-	
		всплесков в системе отсчёта наблюдателя	73
	4.3	k-коррекция и энергетика гамма-всплесков в космологической	
		системе отсчёта	73
	4.4	Энергетика гамма-всплесков, скорректированная на коллима-	
		цию излучения	74
	4.5	Результаты	76
	4.6	Сравнение энергетики 26 гамма-всплесков, зарегистрирован-	
		ных в триггерном режиме в экспериментах Конус- <i>Винд</i> и	
		Fermi-GBM	79
	4.7	Заключение	82
5	Эфе	фекты наблюдательной селекции и космологический го-	
	риз	онт детектирования гамма-всплесков	87
	5.1	Введение	87
	5.2	Эффекты наблюдательной селекции гамма-всплесков в экспе-	
		рименте Конус- <i>Винд</i>	88
	5.3	Космологический горизонт детектирования гамма-всплесков в	
		триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд	92
	5.4	Заключение	98

6	Космологическая эволюция энергетики гамма-всплесков.								
	Функции светимости и энерговыделения гамма-всплесков по данным эксперимента Конус-Винд. Темп образования								
	гамма-всплесков								
	6.1	Введение							
	6.2	Методика непараметрического анализа							
	6.3	Функции изотропной светимости и изотропного энерговыделения 109							
	6.4	Темп образования гамма-всплесков							
	6.5	Заключение							
7 Корреляции спектральной жёсткости излучения и энерге-									
	тик	и гамма-всплесков							
	7.1	Введение							
	7.2	Методика							
	7.3	Соотношения Амати и Йонетоку							
	7.4	Эффекты наблюдательной селекции							
	7.5	Корреляции с учётом коллимации излучения							
	7.6	Оценка энергетики GRB 110918A с коррекцией на коллимацию							
		излучения							
	7.7	Корреляции для всплесков типа І							
	7.8	Заключение							
За	клю	чение							
	7.9	Благодарности							
Л	итера	атура							

Введение

Космические гамма-всплески

История открытия и ключевые этапы наблюдений

Космические гамма-всплески (GRB, от англ. Gamma-Ray Bursts) – наблюдаемые вне атмосферы Земли кратковременные (от десятков миллисекунд до нескольких часов) яркие вспышки жёсткого рентгеновского и мягкого гаммаизлучения с энергиями от десятков кэВ до МэВ и выше.

Гамма-всплески были открыты в 1967–1972 гг. космическими аппаратами (KA) *Vela* (США) [1]¹. Первым зарегистрированным гамма-всплеском считается GRB 670702, всего в эксперименте *Vela* было зарегистрировано около 25 событий и установлено их внеземное, несолнечное и непланетное происхождение [2].

Одним из первых независимых подтверждений открытия нового класса транзиентов (рис. 1) было наблюдение GRB 720117 научной аппаратурой (НА) ФТИ им. А. Ф. Иоффе, установленной на борту советского КА *Космос*-461 [3].

В результате экспериментов «Конус», проведённых в ходе межпланетных миссий *Венера*-11, -12, -13 и -14 в 1978–1983 гг., были определены основные наблюдательные свойства популяции гамма-всплесков, получившие впоследствии подтверждение в других экспериментах (рис. 2). В частности, было обнаружено бимодальное распределение гамма-всплесков по длительности (с границей между двумя группами ~ 1 с), позволившее разделить всплески на два класса: «длинные» и «короткие» [4]. Кроме того, благодаря использованию массивов детекторов с анизотропной угловой чувствительностью

¹КА *Vela* предназначались для осуществления контроля над соблюдением Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой, подписанного 05.08.1963 г. СССР, США и Великобританией.



Рисунок 1: Одно из первых независимых подтверждений открытия гаммавсплесков: наблюдение GRB 720117 НА ФТИ им. А. Ф. Иоффе, установленной на борту советского КА *Космос*-461 [3].

и триангуляционного метода локализации гамма-всплесков, была выявлена изотропность распределения источников гамма-всплесков по небесной сфере. Был установлен нетепловой характер спектров² гамма-всплесков. Также было обнаружено, что спектры гамма-всплесков простираются вплоть до энергий ~ 1 МэВ и демонстрируют корреляцию жёсткости спектра (отношение скоростей счёта в двух различных энергетических диапазонах) и интенсивности излучения в течение всплеска (так называемое «соотношение Голенецкого») [4, 5].

В 1990-е годы указанные результаты были подтверждены данными эксперимента ВАТЅЕ на борту космической обсерватории им. Комптона (*CGRO*, от англ. Compton Gamma Ray Observatory). По данным ВАТЅЕ было установлено, что типичный спектр коротких гамма-всплесков является более жёстким, чем у длинных [6]. Кроме того, широкий спектральный диапазон ВАТЅЕ (~20–2000 кэВ) позволил установить, что спектр значительной части гаммавсплесков хорошо описывается двухстепенной эмпирической функцией Банда [7] с изломом, параметризуемым через энергию максимума EF_E -спектра E_p , с типичными значениями в диапазоне ~100–1000 кэВ.

²Здесь и далее под спектром понимается энергетический спектр излучения.



Рисунок 2: Результаты экспериментов «Конус», проведённых в ходе межпланетных миссий *Венера* в 1978–1983 гг. Слева – карта локализации гаммавсплесков на небесной сфере. Справа – бимодальное распределение всплесков по длительности.

Спектры гамма-всплесков также моделируются степенной функцией с экспоненциальным завалом в области высоких энергий и простой степенной функцией. В некоторых случаях для описания спектра гамма-всплесков необходимо использовать дополнительную компоненту: степенную (см., например, [8]) или тепловую (см., например, [9]). Также было обнаружено, что часть коротких всплесков сопровождается так называемым «продлённым излучением» в мягком гамма-диапазоне, характеризующимся длительностью от десятков до сотен секунд и меньшей, по сравнению с коротким начальным импульсом, интенсивностью [10, 11, 12, 13].

С запуском в 1996 г. итальянско-голландской космической обсерватории *BeppoSAX* им. Джузеппе Оккиалини, оснащённой монитором гаммавсплесков и телескопами рентгеновского излучения WFC с широким полем зрения и высоким (до нескольких минут) угловым разрешением, появилась возможность локализовать источники гамма-всплесков на небесной сфере с высокой точностью, что положило начало эпохе отождествлений гаммавсплесков в различных диапазонах длин волн. Регистрация рентгеновского и оптического послесвечений гамма-всплеска GRB 970228 (рис. 3) позволила



Рисунок 3: Наблюдение гамма-всплеска GRB 970228 на космической обсерватории *BeppoSAX* и локализация его источника по собственному излучению и послесвечению [14]. Слева – кривые блеска собственного излучения по данным эксперимента GRBM (40–700 кэВ) и телескопа WFC (2–30 кэВ). Справа – карта локализации источника на небесной сфере по наблюдениям в различных диапазонах длинн волн.

идентифицировать его слабую родительскую галактику [14, 15]. Таким образом было установлено, что источники гамма-всплесков имеют внегалактическую природу и находятся на космологических расстояниях. Следует отметить, что из-за низкой светимости родительской галактики данного всплеска точное значение её красного смещения (z = 0.695) было измерено лишь в 2001 г. [16].

Первая оценка расстояния до источника гамма-всплеска была получена для GRB 970508. Красное смещение источника данного всплеска было измерено по линиям поглощения в спектре оптического послесвечения [17] и составило z = 0.835 [18, 19], что соответствует ≈ 6 миллиардам световых лет. Впоследствии была обнаружена родительская галактика данного всплеска [20], причём положение оптического транзиента накладывалось на центр родительской галактики. Кроме того, для указанного всплеска впервые было зарегистрировано послесвечение в радио-диапазоне [21]. Следующей орбитальной обсерваторией, внёсшей существенный вклад в изучение гамма-всплесков, была HETE-2 (от англ. High-Energy Transient Explorer), регистрирующая излучение в диапазоне 2–400 кэВ. В частности, с помощью HETE-2 был открыт новый класс событий (XRF, X-Ray Flashes), сходных по характеристикам с гамма-всплесками, но наблюдаемых в более мягкой области спектра. Также на HETE-2 были впервые проведены наблюдения длинных гамма-всплесков, ассоциированных со сверхновыми типа Ic [22].

Для вышеописанных экспериментов задержка между регистрацией гамма-всплеска и началом оптических наблюдений места его локализации на небесной сфере составляла не менее восьми часов. С запуском в 2004 г. космической обсерватории *Swift* (с 2017 г. – обсерватория им. Нила Герельса) ситуация изменилась кардинальным образом. Благодаря быстрой (около минуты) и точной (порядка угловых секунд) локализации гамма-всплесков стало возможным осуществлять оперативную идентификацию событий и исследовать переход от фазы собственного излучения к фазе послесвечения всплеска в различных диапазонах электромагнитного излучения. Кроме того, впервые было зарегистрировано послесвечение короткого всплеска GRB 050509B [23], что позволило определить красное смещение и подтвердить космологическое происхождение всплеска.

Высокая (до 10^{-8} эрг с⁻¹) чувствительность телескопа *Swift*-BAT (от англ. Burst Alert Telescope) к излучению в относительно мягком диапазоне энергий 15–150 кэВ позволяет эффективно регистрировать гамма-всплески с высоким красным смещением (до $z \sim 9$). Следует отметить, что пиковая энергия (максимум EF_E спектра) значительной части гамма-всплесков лежит вне спектрального диапазона телескопа *Swift*-BAT и не может быть оценена напрямую по спектральным данным указанного прибора.

Благодаря запуску в июне 2008 г. космической обсерватории *GLAST*, позднее переименованной в честь Энрико Ферми, с приборами GBM (8 кэВ– 40 МэВ) и LAT (20 МэВ–300 ГэВ) на борту, появилась возможность исследовать излучение гамма-всплесков в широком диапазоне энергий. В частности, было обнаружено, что энергетический спектр гамма-всплесков простирается вплоть до нескольких десятков ГэВ (см., например, [24]). Отмечается за-



Рисунок 4: Статистика наблюдений транзиентных событий в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд*. Красным цветом отмечены случаи детектирования в триггерном режиме гамма-всплесков, фиолетовым – солнечных вспышек, зелёным – мягких гамма-репитеров.

держка появления излучения в области высоких энергий относительно более мягкого гамма-излучения. Кроме того, длительность всплесков в жёсткой области спектра выше, чем в более мягкой [25]. Всплески, зарегистрированные телескопом LAT, характеризуются высоким полным потоком энергии и высоким энерговыделением, а также наличием дополнительной жёсткой компоненты в спектре [26].

С ноября 1994 г. на борту космической обсерватории GGS-*Wind* (NASA, США) лабораторией экспериментальной астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе проводится эксперимент Конус-*Винд* [27], играющий важную роль в исследовании гамма-всплесков благодаря своим уникальным характеристикам: положение космического аппарата вблизи точки Лагранжа L1 системы Солнце-Земля обеспечивает стабильный фон излучения и непрерывный обзор всего неба двумя детекторами NaI в широком диапазоне энергий (~10 кэВ–~10 МэВ) и с высоким временным разрешением.

К середине 2016 г. Конус-*Винд* зарегистрировал в триггерном режиме ~ 4350 транзиентных событий (рис. 4), в том числе ~ 2700 гамма-всплесков

(частота детектирования ~ 120 гамма-всплесков в год). Являясь ключевой частью межпланетной сети (IPN; от англ. Interplanetary Network) [28], Конус-Винд обеспечивает локализацию ~ 50 гамма-всплесков в год методом триангуляции между разнесёнными в пространстве КА (см., например, [29, 30]).

Красные смещения гамма-всплесков

Как правило, красные смещения гамма-всплесков³ измеряются либо по деталям оптических спектров (линиям абсорбции и эмиссии) родительской галактики и/или послесвечения, либо фотометрически. Тем не менее существуют и другие, косвенные подходы к оценке красного смещения гаммавсплесков, например, методика «pseudo-redshift» («pseudo-z»), основанная на спектральных свойствах собственного гамма-излучения гамма-всплесков [31], или по нахождению минимума на плоскости колонковая плотность водорода – красное смещение (см., например, [32]).

Если учитывать только красные смещения, определённые спектроскопически либо фотометрически, то к середине 2016 г. красные смещения были надёжно измерены для ~450 гамма-всплесков. На середину 2016 г. красные смещения гамма-всплесков находились в диапазоне от z = 0.0087 (GRB 980425; [33]) до фотометрического z = 9.4 (GRB 090429B; [34]) либо спектроскопического z = 8.1 (GRB 090423; [35]), измеренного в ближнем инфракрасном диапазоне. Ожидается, однако, что гамма-всплески могут достигать наблюдателя с красных смещений вплоть до $z \approx 10$ и, возможно, до $z \approx 15-20$ [36].

Красное смещение коротких всплесков, как правило, определяется по спектроскопическим либо фотометрическим данным родительской галактики. Исключение составляют GRB 090426 (z = 2.609) и GRB 130603B (z = 0.356), для которых красное смещение было определено благодаря спектроскопии послесвечения. Красные смещения коротких гамма-всплесков лежат в диапазоне от z = 0.1 до z = 2.6, причём среднее значение составляет z = 0.5.

³Здесь и далее подразумевается космологическое красное смещение излучения гамма-всплеска.

Характеристики излучения и модели гамма-всплесков

Гамма-всплески возникают вследствие катастрофических процессов, предполагающих разрушение исходного астрофизического объекта (или их системы), причём прародителями длинных/мягких и коротких/жёстких гамма-всплесков являются объекты разной физической природы.

Источники длинных гамма-всплесков находятся в галактиках с активным звездообразованием, причём отмечается корреляция положения источников всплесков и ярких областей галактик в ультрафиолетовом диапазоне. К началу 2017 г. было известно 46 гамма-всплесков, ассоциированных со сверхновыми [37]. Красные смещения всплесков, ассоциированных со сверхновыми, не превышают, на сегодня, значения $z \approx 1.1$. Первое отождествление источника гамма-всплеска со сверхновой (SN 1998bw) было произведено для длинного GRB 980425. Расстояние до сверхновой SN 1998bw типа Ic составляет 35.6 Мпк, что соответствует красному смещению z = 0.0085. Как показало моделирование, энерговыделение SN 1998bw в ~ 10 раз превышает энерговыделение обычной сверхновой (10^{51} эрг), а скорость расширения является релятивистской: ~ 0.1 скорости света [22]. Пик оптической кривой блеска SN 1998bw пришёлся на 10–20 сутки после регистрации гамма-всплеска. Сверхновая SN 1998bw также называется гиперновой в силу высокой кинетической энергии выброса вещества ~ $2-5 \times 10^{52}$ эрг [38].

Поскольку интенсивность послесвечений коротких гамма-всплесков, в среднем, примерно в семь раз ниже, чем у длинных всплесков [39], первая регистрация послесвечения короткого всплеска (GRB 050509B) была осуществлена лишь в 2005 г. космической обсерваторией *Swift* [23]. Кроме того, для коротких всплесков не наблюдаются сопутствующие взрывы сверхновых, и их родительские галактики характеризуются различной скоростью звездообразования. Также можно отметить большой разброс расстояний источников коротких гамма-всплесков от центров родительских галактик.

Исходя из перечисленных наблюдаемых свойств длинных гаммавсплесков их наиболее вероятными прародителями являются молодые массивные звёзды [40, 41, 42, 43]. В свою очередь короткие всплески происходят при слиянии компактных объектов, двух нейтронных звёзд или нейтронной звезды и чёрной дыры [39], которое может сопровождаться излучением гравитационных волн.

Гравитационные волны, испущенные в ходе слияния двух нейтронных звёзд, были впервые зарегистрированы 17 августа 2017 г. Событие GW170817 является первым гравитационноволновым событием, для которого удалось осуществить многоволновые наблюдения [44]. Спустя 1.7 с после обнаружения GW170817 детекторами Advanced LIGO [45] и Advanced Virgo [46] в эксперименте *Fermi*-GBM был зарегистрирован гамма-всплеск GRB 170817A, наблюдавшийся, также, прибором SPI-ACS обсерватории INTEGRAL, при этом область локализации GRB 170817А по данным Fermi-GBM и SPI-ACS согласуется с областью локализации GW170817. Массы компонент источника гравитационно-волнового сигнала согласуются с массами нейтронных звёзд, а сам источник находится на фотометрическом расстоянии 40 ± 8 Мпк $(z = 0.008 \pm 0.003)$. Спустя 11–12 часов после слияния нейтронных звёзд многоволновые наблюдения источника GW170817 выявили наличие яркого оптического транзиента в галактике NGC4993. В связи с тем, что определённые Fermi-GBM характеристики длительности и жёсткости спектра собственного излучения GRB 170817A ($T_{90} = 2 \pm 0.5$ с и $E_{\rm p} = 185 \pm 62$ кэВ) не позволяют однозначно отнести его к категории «классических» коротких/жёстких гамма-всплесков, модели генерации излучения GRB 170817А являются предметом широкой дискуссии.

Существуют различные модели механизмов генерации собственного гамма-излучения в источнике гамма-всплеска [47]. Наиболее распространённая модель предполагает преобразование кинетической энергии релятивистской струи вещества в гамма-излучение при помощи внутренних ударных волн, образующихся в струе вследствие переменной активности источника всплеска. Послесвечение, следующее за гамма-всплеском излучение, регистрируемое в диапазоне длин волн от гамма до радио, вероятнее всего, генерируется на головной ударной волне между струёй и межзвёздной средой.

На рис. 5 схематично изображено поведение «канонической» кривой блеска послесвечения гамма-всплеска в рентгеновском диапазоне энергий по данным телескопа *Swift*-XRT [48]: за быстрым спадом интенсивности излучения (фаза I) следует фаза «плато» (II), которая через несколько тысяч секунд сменяется фазой III – степенным спадом интенсивности излучения с индексом ~ 1.2, наблюдавшимся ещё до запуска KA *Swift*, после чего, при переходе к фазе IV, наблюдается ахроматический излом кривой блеска, подтверждающий модель коллимации излучения гамма-всплеска и позволяющий оценить энергетику всплеска с учётом коллимации излучения.

Считается, что ахроматические (то есть происходящие одновременно на всех длинах волн) изломы являются следствием конической (а не сферической) геометрии ультрарелятивистского выброса вещества с углом раскрытия порядка нескольких градусов [49]. Ахроматический излом кривой блеска послесвечения впервые наблюдался у GRB 990510 [50], а теоретически был рассмотрен двумя годами ранее в работе [51]. Поскольку вещество джета движется с ультрарелятивистскими скоростями, излучение гамма-всплеска коллимировано. Угол коллимации излучения обратно пропорционален Лоренцфактору, и, поскольку вещество джета тормозится окружающей источник всплеска средой, увеличивается со временем. Считается, что в момент времени $t_{\rm jet}$, соответствующий излому кривой блеска послесвечения, угол коллимации излучения становится равным углу раскрытия джета. Коррекция на коллимацию излучения понижает энерговыделение гамма-всплесков, изотропный эквивалент которого превышает 10^{54} эрг, на порядки величины, делая его сопоставимым с энерговыделением сверхновых [52].

Известно, что излучение начальной фазы оптического послесвечения гамма-всплесков поляризовано – степень линейной поляризации спустя несколько минут после окончания фазы собственного излучения достигает 30%, что согласуется с предположением о наличии стабильного, глобально упорядоченного магнитного поля в джете на больших расстояниях от источника всплеска [53]. Поляризация собственного оптического излучения гаммавсплесков (то есть оптического излучения, возникающего синхронно с гаммаизлучением) была впервые измерена для яркого длинного GRB 160625B, характеристики собственного излучения которого в гамма-диапазоне были исследованы, в частности, в настоящей работе. Линейная поляризация излучения данного всплеска является переменной и составляет, по самым консервативным оценкам, 8.3%±0.8% [54].



Рисунок 5: «Каноническая» кривая блеска рентгеновского послесвечения гамма-всплесков по наблюдениям космической обсерватории *Swift* [48]. Излом $t_{\rm b3} = t_{\rm jet}$ между фазами III и IV является ахроматическим (происходит одновременно на всех длинах волн) и связан с геометрией релятивистского джета гамма-всплеска.

Эволюция энергетики гамма-всплесков

Космологическая эволюция изотропного эквивалента энергетики гаммавсплесков может быть обусловлена как эволюцией самой энергетики (полного энерговыделения и пиковой светимости), так и эволюцией угла коллимации излучения [55]. В первом случае можно предположить, что гамма-всплески в прошлом (на больших красных смещениях) были существенно ярче, что может быть обусловлено изменением со временем характеристик прародителей всплесков.

Теория и наблюдения [56, 57] дают предпосылки считать, что шкала начальной функции масс (IMF, от англ. Initial Mass Function) звёзд была выше для объектов на высоких красных смещениях [56]. Шкала масс IMF, возможно, должна демонстрировать сильную зависимость от температуры облаков, где происходит звездообразование. В более ранней Вселенной указанная температура, вероятно, была выше по ряду причин. Среди них более высокая температура реликтового излучения, более низкая металличность (что подразумевает более низкую скорость охлаждения, следовательно, в среднем, более высокие температуры звёзд), а также более высокая скорость нагрева вследствие более высокого темпа звездообразования на единицу объёма, что ведёт к более интенсивному излучению. При более высоких температурах требуется больший масштаб масс (например, Джинсовской массы) для коллапса протозвёздных облаков и образования звёзд. В работе [56] указывается, что шкала масс IMF могла быть выше на порядок и более на красных смещениях выше z = 5.

Кроме того, поскольку потеря массы вследствие звёздного ветра, повидимому, зависит от металличности звезды (см., например, [58, 59, 60]), массивные звёзды теряли лишь незначительную часть своей массы до коллапса. Массивные звёзды на низких красных смещениях (что предполагает металличность звезды, близкую к солнечной) теряли бы бо́льшую часть массы вследствие звёздного ветра ещё до коллапса. Таким образом, прародители гамма-всплесков с высоким красным смещением, вероятно, не только обладали более высокими массами, но и значительная часть их массы сохранялась вплоть до коллапса звезды.

Механизм генерации гамма-всплесков требует быстрой аккреции диска вокруг чёрной дыры звёздной массы. В этом случае энергия всплеска стремительно возрастает с увеличением массы вещества внутри диска и темпа аккреции [61] (темп аккреции выше для более массивных звёзд-прародителей).

Природа эволюции угла раствора джета является предметом дискуссии и, возможно, зависит от ряда факторов, в том числе, от момента импульса прародителя гамма-всплеска (он мог быть выше для более далёких/ранних всплесков). Например, в модели коллапсара, представленной в работе [42], гамма-всплеск генерируется при коллапсе ядра очень массивной звезды в чёрную дыру, причём момент импульса звезды должен находиться в определённом диапазоне, чтобы обеспечить несферический коллапс на подходящей временной шкале. Предполагается, что чем выше скорость вращения прародителя всплеска, тем меньше угол раскрытия джета.

Актуальность темы диссертации

Несмотря на то что с момента открытия космических гамма-всплесков прошло более полувека, многие аспекты данного явления остаются неизвестными. Прорыв в исследованиях гамма-всплесков был достигнут 20 лет назад, когда с началом эпохи оптических отождествлений гамма-всплесков и измерением красного смещения GRB 970508 [18] была достоверно установлена космологическая природа источников гамма-всплесков.

К середине 2016 г. красные смещения были определены для ~ 450 гаммавсплесков, покрывая диапазон от z = 0.0087 (GRB 980425; [33]) до z = 9.4(GRB 090429B; [34]). По разным оценкам гамма-всплески могут достигать наблюдателя с красных смещений вплоть до $z \approx 10$ и, возможно, до $z \approx 15-$ 20 [36].

Энергетика взрыва является одним из ключевых параметров, важных для понимания физики прародителей, центральной машины и механизма излучения гамма-всплесков. Знание красного смещения гамма-всплеска позволяет оценить изотропный эквивалент его энерговыделения (E_{iso}), характеристику энергии, выделенной центральной машиной всплеска, и изотропный эквивалент пиковой светимости (L_{iso}), характеризующий механизмы преобразования кинетической энергии взрыва в излучение. С учётом высокой наблюдаемой энергетики и космологических расстояний до источников, данные характеристики гамма-всплесков достигают гигантских величин: $E_{\rm iso} \leq 10^{55}$ эрг (GRB 080916C, при z = 4.35; [62, 63]) и $L_{\rm iso} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с⁻¹ (GRB 110918A, $z \approx 1.0$; [64]).

Огромное изотропное энерговыделение гамма-всплесков было впервые объяснено для GRB 970508 [65] предположением о высокой коллимации излучения (jet beaming). Ключевой характеристикой, позволяющей оценить угол коллимации гамма-всплеска θ_{jet} [51, 66], является время наблюдения ахроматического излома (jet break) в кривой блеска послесвечения t_{jet} . Для типичных углов коллимации в несколько градусов истинное энерговыделение большинства гамма-всплесков составляет ~ 10^{51} эрг, что сопоставимо с энерговыделением сверхновой [52].

Исследование корреляций между жёсткостью излучения и энергетикой гамма-всплесков в космологической системе отсчёта (так называемые соотношения «Амати» [67], «Йонетоку» [68] и их «коллимированные» версии [69]) может способствовать разрешению вопроса о применимости гамма-всплесков в качестве «стандартных свечей» [70, 71]. Положительное решение данного вопроса позволит наложить ограничения на параметры космологических моделей в широком диапазоне высоких красных смещений.

Постепенное накопление статистики по наблюдениям гамма-всплесков с известными красными смещениями позволяет перейти к оценке таких характеристик их популяции, как функция светимости и космологическая эволюция темпа образования гамма-всплесков. Оценки данных параметров важны для понимания природы центральной машины и механизмов излучения гамма-всплесков, а также исследования параметров популяций их прародителей в разные космологические эпохи.

Эксперимент Конус-Винд [27] успешно проводится с ноября 1994 г. и играет важную роль в исследовании гамма-всплесков благодаря уникальному сочетанию характеристик орбиты и аппаратуры: положение космического аппарата вблизи точки Лагранжа L1 системы Солнце-Земля обеспечивает стабильный фон излучения и непрерывный обзор всего неба в широком диапазоне энергий (~10 кэВ–~10 МэВ) с высоким временным разрешением

(до 2 мс). Благодаря широкому спектральному диапазону энергия обрезания спектра (параметризованная через $E_{\rm p}$, максимум EF_E спектра) может быть определена непосредственно из спектральных данных прибора, и энергетика гамма-всплесков может быть оценена с минимальной экстраполяцией.

К середине 2016 г. в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд* зарегистрировано ~ 2700 гамма-всплесков, из них ≥ 150 – с известными красными смещениями. Данная выборка представляет, на сегодня, наиболее обширный гомогенный набор наблюдательных данных, полученных в широком спектральном диапазоне, и её систематическое исследование с целью получения несмещённых характеристик гамма-всплесков в собственной космологической системе отсчёта является, несомненно, актуальной задачей в контексте исследования процессов генерации излучения гамма-всплесков, построения моделей их источников и исследования параметров Вселенной начиная с самых ранних этапов её существования.

Цели работы

Цель настоящей работы заключается в определении временных и спектральных характеристик, а также энергетики гамма-всплесков с надёжно измеренным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд*; получении характеристик гамма-всплесков в космологической системе отсчёта и оценке на их основе параметров популяции гамма-всплесков.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- Анализ опубликованных данных о красных смещениях, формирование выборки гамма-всплесков с надёжными оценками красных смещений, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-Винд. Классификация отобранных гамма-всплесков по критерию жёсткостьдлительность.
- 2. Оценка фоновой обстановки, временной анализ кривых блеска гаммавсплесков, определение полной длительности всплесков T_{100} , длительностей T_{90} и T_{50} . Вычисление спектральных задержек излучения.

- 3. Определение оптимальных интервалов накопления энергетических спектров гамма-всплесков. Спектральный анализ интегральных и пиковых спектров с использованием моделей Банда и CPL. Определение наилучшей модели для каждого исследованного энергетического спектра. Вычисление полного и пикового потока энергии гамма-всплесков в системе отсчёта наблюдателя.
- Оценка изотропного эквивалента полного энерговыделения (E_{iso}) и пиковой светимости (L_{iso}) в болометрическом диапазоне энергий в космологической системе отсчёта гамма-всплеска.
- 5. Анализ опубликованных данных об ахроматических изломах кривых блеска послесвечений гамма-всплесков (t_{jet}) и формирование выборки гамма-всплесков с надёжными оценками t_{jet}. Оценка полного энерговыделения и пиковой светимости гамма-всплесков с учётом фактора коллимации излучения.
- Оценка болометрической чувствительности эксперимента Конус-Винд.
 Оценка космологических пределов наблюдаемости гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд.
- Оценка космологической эволюции энергетики гамма-всплесков, их функций светимости и энерговыделения. Оценка темпа образования гамма-всплесков.
- 8. Определение параметров корреляций жёсткости излучения гаммавсплесков и их энергетики в изотропном приближении и с учётом коллимации излучения.

Научная новизна

Следующие основные результаты получены впервые:

- 1. Сформирован и исследован набор гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд за ~20 лет непрерывных наблюдений с начала эпохи оптических отождествлений гамма-всплесков (1997 г.) по июнь 2016 г. На основе проведённого временного и спектрального анализа данных получены оценки длительности, спектральной жёсткости и энергетики 150 гамма-всплесков в космологической системе отсчёта, а для 32 всплесков с известным временем ахроматического излома кривой блеска послесвечения также оценена энергетика с учётом фактора коллимации излучения. Опубликованный каталог является наиболее полным набором характеристик гамма-всплесков в собственной системе отсчёта, полученных в результате систематического анализа однородного массива наблюдений в широком диапазоне энергий гамма-квантов.
- 2. Проведён совместный временной и спектральный анализ данных гаммавсплеска, одновременно зарегистрированного в экспериментах Конус-Винд и Fermi-GBM (GRB 140801А), подтверждена согласованность методик спектрального анализа данных экспериментов Конус-Винд и Fermi-GBM. На основании совместного анализа результатов экспериментов Конус-Винд и Fermi-GBM по 26 гамма-всплескам с известным красным смещением показана согласованность полученных оценок E_{iso}.
- 3. На основании анализа энергетики гамма-всплесков в космологической системе отсчёта оценена болометрическая чувствительность прибора Конус-Винд и получена оценка космологических пределов наблюдае-мости гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд на уровне z ~ 16.6.
- По данным эксперимента Конус-Винд, с использованием непараметрических методов анализа, получены независимые оценки параметров космологической эволюции энергетики гамма-всплесков, функций изотропной светимости и энерговыделения в интервале 0.1 ≤ z ≤ 5. Получены

свидетельства в пользу экспоненциального завала функции изотропного энерговыделения гамма-всплесков с параметром обрезания $E_{\rm cut} \gtrsim 10^{54}$ эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки $L_{\rm iso} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с⁻¹.

- 5. По данным эксперимента Конус-Вин∂, с использованием непараметрических методов анализа, проведена независимая оценка космологической эволюции темпа образования гамма-всплесков (GRBFR) в интервале 0.1 ≤ z ≤ 5 и подтверждено существование относительного избытка GRBFR в сравнении с темпом звездообразования в области малых красных смещений.
- 6. По данным эксперимента Конус-Винд получены независимые, наиболее надёжные оценки параметров корреляций жёсткости и энергетики гамма-всплесков в космологической системе отсчёта (E_{p,z}-E_{iso} и E_{p,z}-L_{iso}). Установлено, что учёт фактора коллимации излучения не повышает значимость исследованных корреляций. Показано, что уникальная яркость гамма-всплеска GRB 110918А обусловлена исключительно сильной коллимацией излучения.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных в данной работе, подтверждается:

- 1. Использованием стандартных и апробированных методик обработки экспериментальных данных.
- 2. Научной кооперацией с другими космическими экспериментами по изучению гамма-всплесков, совместным анализом общих событий и сравнением полученных результатов, показавшим применимость используемых методик.

Научная и практическая значимость

- 1. Оценки временных, спектральных, и энергетических характеристик гамма-всплесков в космологической системе отсчёта для обширной выборки как длинных, так и коротких гамма-всплесков важны для проверки теоретических моделей прародителей, центральной машины и механизма генерации гамма-излучения в источниках всплесков.
- 2. Оценка болометрической чувствительности прибора Конус-*Винд* может быть использована для широкого круга задач, в том числе для совместного анализа выборок гамма-всплесков, зарегистрированных в различных экспериментах.
- 3. Оценка космологических пределов наблюдаемости гамма-всплесков в эксперименте Конус-*Винд* может быть использована для планирования экспериментов, детектирующих излучение гамма-всплесков в различных спектральных диапазонах.
- 4. Оценка параметров космологической эволюции энергетики гаммавсплесков, их функций светимости и энерговыделения по данным эксперимента Конус-*Винд* важна для проверки теоретических моделей генерации гамма-излучения в источниках всплесков.
- 5. Оценка темпа образования гамма-всплесков важна для проверки моделей прародителей/источников гамма-всплесков.
- 6. Параметры корреляций жёсткости излучения гамма-всплесков и их энергетики в изотропном приближении и с учётом коллимации излучения позволяют исследовать вопрос о возможности использования гамма-всплесков в качестве стандартных свечей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Временны́е, спектральные и энергетические параметры 150 гаммавсплесков с известным космологическим красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд*.

- Изотропный эквивалент полного энерговыделения и пиковой светимости 150 гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд. Значения полного энерговыделения и пиковой светимости с коррекцией на коллимацию излучения для 32 гамма-всплесков с надёжными оценками t_{iet}.
- Эффекты селекции при наблюдениях гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд и соответствующие им ограничения в космологической системе отсчёта. Космологические пределы наблюдаемости гаммавсплесков в эксперименте Конус-Винд.
- Оценка космологической эволюции энергетики гамма-всплесков, их функций светимости и энерговыделения по данным эксперимента Конус-Винд. Оценка относительного темпа образования гаммавсплесков.
- 5. Корреляции жёсткости излучения гамма-всплесков и их энергетики в изотропном приближении и с учётом коллимации излучения.

Апробация работы и публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2013 по 2017 годы и опубликованы в пяти статьях в реферируемых журналах и в тезисах пяти конференций.

Статьи в рецензируемых изданиях:

- 1. D. D. Frederiks, ..., A. E. Tsvetkova et al. The Ultraluminous GRB 110918A // Astrophys. J. 2013. Vol. 779. p. 151;
- 2. A. A. Volnova, ..., A. E. Tsvetkova et al. GRB 051008: a long, spectrally hard dust-obscured GRB in a Lyman-break galaxy at $z \approx 2.8$ // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2014. Vol. 442, p. 2586;
- V. M. Lipunov, ..., A. E. Tsvetkova et al. The optical identification of events with poorly defined locations: the case of the *Fermi* GBM GRB 140801A // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2016. Vol. 455, p. 712;

- J.-L. Atteia, ..., A. E. Tsvetkova et al. The Maximum Isotropic Energy of Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. 2017. Vol. 837 p. 119;
- A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii et al. The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode // Astrophys. J. 2017. Vol. 850 p. 161.

Результаты доложены на всероссийских и международных конференциях:

- 1. «Астрофизика высоких энергий» НЕА2013, Москва, ИКИ РАН, 12.2013 (стендовый доклад);
- 2. Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: Twenty Years of Konus-Wind Experiment, St. Petersburg, Russia, 09.2014 (устный доклад)
- «Успехи российской астрофизики 2016: Теория и Эксперимент» Москва, ГАИШ МГУ, 12.2016 (устный доклад);
- 4. «Взрывающаяся Вселенная глазами роботов» Москва, ГАИШ МГУ, 08.2017 (устный доклад);
- 5. 7th International Fermi Symposium, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 10.2017 (устный доклад);

а также на семинарах Max Planck Institute for Astrophysics (Garching, Germany), ГАИШ МГУ, ИКИ РАН и ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Личный вклад

Соискатель провел работу по анализу данных о красных смещениях гамма-всплесков и отбору событий эксперимента Конус-Винд для исследуемой в работе выборки. Соискатель провел систематический анализ кривых блеска и энергетических спектров гамма-всплесков, определил временные, спектральные и энергетические параметры событий. Исследование корреляций жёсткости и интенсивности излучения гамма-всплесков, применение непараметрических методов к данным эксперимента Конус-Винд, оценка эффектов селекции и космологических пределов детектирования были реализованы, главным образом, соискателем. В результатах, вынесенных на защиту,

вклад соискателя является определяющим. Соискатель принимал активное участие в постановке задач исследования, обработке и анализе данных, формулировке выводов и подготовке публикаций. В публикации, где соискатель является первым автором, ему принадлежит основной вклад в работу. Интерпретация свойств ультраяркого GRB 110918А была проведена на основании данных о гамма-всплесках с известным красным смещением, подготовленных соискателем. Соискатель, совместно с Д. Д. Фредериксом, провёл подготовку и анализ данных GRB 140801A, полученных в эксперименте Конус- $Buh\partial$, также осуществил анализ данных Fermi-GBM, подготовленных В. Пелассой, и совместный анализ данных экспериментов Конус-Винд и Fermi-GBM. Coucкатель, совместно с Д. Д. Фредериксом, провёл подготовку и анализ данных эксперимента Конус-Винд для GRB 051008. Также соискатель осуществил подготовку данных эксперимента Конус-Винд для 69 ярких длинных гаммавсплесков с известным красным смещением и, совместно с Ж.-Л. Аттейей и Д. Д. Фредериксом, провёл сравнение энергетики 26 общих с Fermi-GBM всплесков, полученной по данным двух экспериментов.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 146 страниц, включая 29 рисунков и девять таблиц. Библиография включает 153 наименования на 13 страницах.

Все ошибки величин, если не указано иное, приведены на уровне значимости 68% и являются статистическими. В настоящей работе используется стандартная космологическая модель Λ CDM с параметрами $H_0 =$ 67.3 км с⁻¹ Мпк⁻¹, $\Omega_{\Lambda} = 0.685$ и $\Omega_M = 0.315$ [72]. Кроме того, в настоящей работе применяется широко используемая нотация $Q_k = Q/10^k$.

Глава 1

Аппаратура и условия наблюдений в эксперименте Конус-*Винд*

Используемые в работе данные получены в ходе продолжающегося с 1994 г. эксперимента Конус-Bund, предназначенного для изучения временных и спектральных характеристик космических гамма-всплесков, мягких гамма-репитеров, солнечных вспышек и иных транзиентных явлений в широком энергетическом диапазоне ~10 кэВ–10 МэВ. Сцинтилляционный гаммаспектрометр Конус состоит из двух одинаковых всенаправленных детекторов NaI(Tl), расположенных на противоположных сторонах стабилизированно вращением космического аппарата *GGS-Wind*. Ось поля зрения детектора S1 направлена в южный полюс эклиптики, ось поля зрения детектора S2 – в северный полюс эклиптики, таким образом обеспечивается обзор всей небесной сферы. Эффективная площадь каждого из двух детекторов составляет ~80–160 см² в зависимости от энергии падающего фотона и угла падения фотона к оси детектора. Схематический вид КА и детектора приведён на рис. 1.1.

Расположение КА GGS-Wind в окрестности точки Лагранжа L1 системы Солнце–Земля, далеко за пределами магнитосферы Земли, позволяет, в отличие от околоземной орбиты, проводить наблюдения в непрерывном режиме (без затенения Землёй), в условиях стабильного фона, свободного от искажений вследствие прохождений КА радиационных поясов Земли и подверженного лишь изменениям, связанным с активностью Солнца. Расстояние КА от Земли, как функция времени, представлено в работе [29] и может составлять до семи световых секунд.

Детекторы, независимо друг от друга, могут проводить наблюдения в двух режимах: в триггерном режиме и в режиме ожидания (фоновом). В



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

режиме ожидания скорость счёта регистрируется в трёх каналах с временным разрешением 2.944 с и номинальными (на момент начала эксперимента) границами: 13–50 кэВ (G1), 50–200 кэВ (G2) и 200–760 кэВ (G3). Прибор переходит в триггерный режим работы, когда скорость счёта в окне G2 на одном из двух временных масштабов $\Delta T_{\rm trig}$, 1 с либо 140 мс, превышает фон, накопленный на протяжении 30 с, на $\approx 9\sigma$, причём данные режима ожидания также доступны вплоть до времени T_0+250 с.

В триггерном режиме скорости счёта записываются в каналах G1, G2 и G3 с временным разрешением от 2 мс до 256 мс в интервале от -0.512 с до 229.632 с относительно времени срабатывания триггера T_0 . Спектральные данные записываются начиная со времени T_0 в двух частично перекрывающихся диапазонах с номинальными границами 13–760 кэВ (PHA1) и 160 кэВ– 10 МэВ (PHA2), каждый из которых содержит по 63 канала на псевдологарифмической шкале измеряемой энергии, всего регистрируются 64 спектра. Время накопления каждого из первых четырёх спектров составляет 64 мс.

ся от 0.256 с до 8.192 с в зависимости от текущей скорости счёта в диапазоне G2. Время накопления каждого из последних восьми спектров составляет 8.192 с. Таким образом, минимальная длительность накопления спектральных данных составляет 79.104 с, максимальная – 491.776 с (что на ~260 с больше, чем длительность временной истории). По окончании триггерного режима прибор перезаписывает информацию в бортовую память KA, что занимает около одного часа. В это время запись данных режима ожидания не ведётся, а резервирующая система продолжает регистрацию скорости счёта в диапазоне G2 по каналу служебной телеметрии с разрешением 3.680 с.

Для всех всплесков применялась стандартная процедура коррекции на мёртвое время детектора (DT) кривых блеска (DT порядка нескольких мс) и спектральных данных (DT составляет ~42 мс). Матрица отклика детектора (DRM), являющаяся функцией угла падения излучения на детектор, была рассчитана с использованием пакета GEANT4 [73]; описание процедуры наземной калибровки и вычисления отклика детекторов приведено в работе [74]. Актуальная версия DRM содержит функцию отклика детектора, рассчитанную для 264 точек, соответствующих энергиям фотонов в интервале от 5 кэВ до 30 МэВ на квазилогарифмической шкале для углов падения излучения от 0° до 100° с шагом 5°. В ходе эксперимента шкала энергий калибруется по линии ⁴⁰К (1460 кэВ) и по e⁺e⁻ аннигиляционной линии (511 кэВ). Необходимость калибровки связана с тем, что коэффициент усиления детекторов медленно изменяется со временем. Инструментальный контроль коэффициента усиления исчерпал свои возможности в 1997 г. и к 2016 г. спектральный диапазон детекторов сместился с номинальных значений 13 кэB-10 МэВ до 25 кэB-18 МэВ для S1 и до 20 кэB-15 МэВ для S2. Границы диапазонов G1, G2, G3, PHA1 и PHA2 изменились аналогичным образом.

Согласованность спектральных параметров гамма-всплесков, полученных в эксперименте Конус-*Винд*, с результатами других экспериментов была проверена посредством кросс-калибровки с приборами *Swift*-BAT и *Suzaku*-WAM в работе [75], а также путём совместного анализа данных экспериментов Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM (см., например, [76]). Было показано, что различие в оценке падающего потока энергии, полученное при совместном анализе данных указанных экспериментов, составляет ≤ 20%.

Глава 2

Выборка гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*

Набор событий, исследованный в данной работе, включает все гаммавсплески с надёжно измеренными красными смещениями, зарегистрированные в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд* с начала эпохи оптических отождествлений (1997 г.) по середину 2016 г. Основная информация о гамма-всплесках представлена в табл. 2.1. Первая и вторая колонка содержат идентификатор всплеска (в нотации GRB YYMMDD, где YY — год, MM месяц, DD – день регистрации) и время срабатывания триггера НА Конус-*Винд*¹. До начала 2010 г. к имени второго и последующего гамма-всплесков, зарегистрированных за одни сутки, добавлялись буквенные суффиксы «В», «С» и т. д. в порядке обнаружения всплесков в данных. С 2010 г. суффиксы «А», «В» и т. д. присваиваются всплескам в порядке их первого упоминания в циркулярах GCN. Соответственно, иногда всплеск с суффиксом «А».

Третья колонка содержит «тип» всплеска (I/II) согласно описанной ниже классификации. Одним из наиболее распространённых вариантов классификации гамма-всплесков является разделение событий на «короткие» и «длинные» по длительности T_{90} (см. Главу 3). В данной работе использовалась усовершенствованная классификация [78], учитывающая, наряду с

¹Данное время не содержит поправку на распространение фронта излучения всплеска между КА и Землей и может отличаться от UT на величину до \sim 7 с. Триггерные времена всплесков, поправленные на распространение фронта излучения, приведены в работе [77].

длительностью, и другие характеристики гамма-всплесков. В рамках данного подхода гамма-всплески делятся на два типа: к типу I относятся всплески, источником которых, предположительно, является слияние компактных объектов [79, 80, 81, 82, 83], к типу II относятся всплески, вызванные коллапсом ядер сверхмассивных звёзд [40, 41, 42, 43], часть таких событий ассоциирована со сверхновыми типа Ib/c. В работе [78] показано, что гаммавсплески типа II расположены в области длинных/мягких событий на плоскости жёсткость-длительность, в то время как всплески типа I, в основном, занимают область коротких/жёстких событий и обладают незначительной спектральной задержкой, которая характеризует запаздывание излучения в более мягком диапазоне энергий по отношению к излучению в более жёстком диапазоне. Данная «физическая» классификация гамма-всплесков, в отличие от классификации по длительности, учитывает несколько характеристик гамма-всплесков, в том числе жёсткость их спектра, а также параметры послесвечений и родительских галактик. Кроме того, условная граница между длинными и короткими всплесками может зависеть от прибора: например, для данных эксперимента CGRO-BATSE она составляет $T_{90} = 2$ с [6], в то время как в эксперименте Конус-*Винд* граничное значение $T_{90} = 1.7$ с [84]. Классификация части всплесков известна из более ранних работ, например, [78], для остальных событий классификация была проведена на основании методики, описанной в [85], а именно, по положению всплеска на диаграмме жёсткость–длительность (рис. 2.1).

В качестве оценки жёсткости было принято отношение количества отсчётов, накопленных за полную длительность всплеска T_{100} в номинальных границах каналов G3 и G2 (методика перехода к номинальным границам, не зависящим от текущей калибровки детектора, описана в [85]). В качестве меры длительности гамма-всплеска использовались времена накопления 50% либо 90% отсчётов всплеска, T_{50} и T_{90} , соответственно.

По данной методике 11 из 150 всплесков исследуемой выборки были однозначно классифицированы как всплески типа I, а 137 всплесков были отнесены к типу II. Несмотря на то что длительность GRB 160410A $T_{50} \approx 1.0$ с превышает условную границу между двумя типами всплесков, определённую в работе [85], $T_{50} = 0.6$ с, данный всплеск был причислен к типу I вследствие



Рисунок 2.1: Распределение жёсткость-длительность для гамма-всплесков, зарегистрированных а триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*. Всплески с известным красным смещением обозначены красными треугольниками (тип I) и синими кругами (тип II). GRB 160410A обозначен зелёным ромбом; начальный импульс GRB 060614 обозначен зелёной звёздочкой, весь всплеск – зелёным квадратом. Серым цветом показано распределение жёсткость-длительность для 1143 ярких триггерных всплесков [85], аппроксимированное суммой двух двумерных Гауссовых распределений, причём контуры обозначают доверительные области Гауссовых распределений на уровне значимости 1σ , 2σ и 3σ .

его положения на диаграмме жёсткость-длительность (рис. 2.1), построенной для большой выборки ярких всплесков (в том числе, без измеренного красного смещения), зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, а также ввиду малой длительности всплеска $T_{90} \approx 1.6$ с. Физическая классификация GRB 060614 неясна: длинный всплеск, не сопровождавшийся сверхновой [86, 87, 88, 89], в работе [78] был отнесён к типу I на основании низкой удельной скорости звездообразования в его родительской галактике. Анализ же собственного излучения гамма-всплеска по данным эксперимента Конус-*Винд*, напротив, даёт предпосылки отнести данное событие к типу II [85], что и было принято в качестве классификации всплеска в данной работе. Таким образом, 138 из 150 гамма-всплесков выборки были отнесены к типу II, оставшиеся 12, что составляет 8% всей выборки, – к типу I.

Четвертая колонка табл. 2.1 указывает эксперимент, по данным которого была проведена наиболее точная локализация источника собственного излучения гамма-всплеска, что позволило осуществить дальнейшую идентификацию события с источниками излучения на других длинах волн. Из 150 всплесков выборки 103 события (или $\sim 2/3$) локализованы *Swift*-BAT, 13 – *BeppoSAX*, 14 – приборами LAT и/или GBM миссии *Fermi*, восемь – *HETE-2*, два – *INTEGRAL*-IBIS/ISGRI, два – *RXTE*-ASM. Наиболее точная локализация источника собственного излучения десяти всплесков была получена путём триангуляции сетью IPN [28]. В пятой колонке приведена информация о наблюдениях собственного излучения всплеска в жёстком рентгеновском и гамма-диапазонах некоторыми другими экспериментами. Следующая колонка содержит угол падения излучения относительно оси детектора Конус-*Bund*, в котором сработал триггер.

В двух последних колонках табл. 2.1 приведена информация о красном смещении гамма-всплеска (z) и методе его измерения: спектроскопически («s») или фотометрически («p»). Ссылки на публикации, содержащие информацию о локализации источников собственного излучения и о красном смещении гамма-всплесков, приведены в табл. 1 каталога [77]. Для некоторых событий в литературе представлено несколько независимых оценок красного смещения. В случае наличия как спектроскопических, так и фотометриче-



Рисунок 2.2: Распределение красных смещений гамма-всплесков, актуальное на середину 2016 г.

ских оценок красного смещения всплеска, предпочтение отдавалось первым. В работе [90] было выявлено два вероятных красных смещения GRB 060121: $z = 4.6 \pm 0.5$ с вероятностью 63% и $z = 1.7 \pm 0.4$ с вероятностью 35%. Первое из них было использовано в настоящей работе. Используемая в настоящей работе оценка красного смещения GRB 150424A z = 0.3 [91] основана на наблюдениях галактики, расположенной на угловом растоянии 5"(что соответствует 22.5 кпк при указанном z) относительно положения послесвечения, указанного в работе [92]. Следует, однако, заметить, что в работе [93] была найдена другая возможная родительская галактика данного всплеска, расположенная в месте локализации его послесвечения, причём красное смещение этой галактики было оценено как z > 0.7.

На рис. 2.2 приведены распределения красных смещений, актуальные на середину 2016 г. Представлены данные как для выборки всплесков, зареги-

стрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд, так и для всех всплесков с известным красным смещением. Отдельно отмечены подвыборки всплесков типа I, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, а также всплесков, зарегистрированных до начала проведения эксперимента Swift-BAT. Красные смещения гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, лежат в диапазоне $0.1 \le z \le 5$, причём среднее и медианное значения красного смещения выборки составляют ~ 1.5 и ~ 1.3, соответственно. Данная статистика сопоставима со статистикой для гаммавсплесков, зарегистрированных до начала проведения эксперимента Swift-BAT, распределение красного смещения которых достигает максимума при $z \sim 1$ [94]. В то же время, распределение красных смещений всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, сдвинуто в сторону меныших значений по сравнению с распределением z для всплесков, зарегистрированных Swift, для которого среднее значение красного смещения составляет $\bar{z} \sim 2.3$ [95].

Доля всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд*, составляет ~0.4–0.5 от общего числа всплесков с измеренным красным смещением в области z < 1 и плавно уменьшается с увеличением z. Для всплесков типа I указанное соотношение составляет ~0.5. Отсутствие, к настоящему времени, регистраций в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд* гаммавсплесков с высоким красным смещением (z > 5) может быть объяснено рядом инструментальных эффектов селекции, рассмотренных в Главе 5.

Таблица 2.1: Основная информация о гамма-всплесках с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд

Имя всплеска	Триггерное время	Тип	Локализ. прибор	Др. ^а набл.	Угол паления	z^b	Тип <i>z</i>
GRB 970228	02:58:01 317	II	BennoSAX	3	79.1	0 695	s
GRB 970828	17:44:42.357	II	RXTEASM	0	7.1	0.9578^{\dagger}	s
GRB 971214	23:20:52.214	II	BeppoSAX	$1 \ 3$	33.9	3.418	s
GRB 990123	09:47:14.151	II	BeppoSAX	13	29.9	1.6004	S
GRB 990506	11:23:30.813	II	BeppoSAX	$1 \ 3$	65.1	1.30658^{\dagger}	\mathbf{S}
GRB 990510	08:49:10.059	II	BeppoSAX	$1 \ 3$	28.7	1.6187	\mathbf{S}
GRB 990705	16:01:26.864	II	BeppoSAX	3	7.1	0.8424	\mathbf{S}
GRB 990712	16:43:06.123	II	BeppoSAX	3	33.2	0.4331	\mathbf{S}
GRB 991208	04:36:53.263	II	IPN		23.0	0.7055	\mathbf{S}
GRB 991216	16:07:18.085	II	BeppoSAX	13	78.1	1.02	\mathbf{S}
GRB 000131	14:59:15.102	II	IPN		14.7	4.5	\mathbf{S}
GRB 000210	08:44:05.712	II	BeppoSAX	3	41.6	0.8463^{\dagger}	\mathbf{S}
GRB 000301C	09:51:38.569	II	IPN+ASM		40.1	2.0335	\mathbf{S}
GRB 000418	09:53:09.906	II	IPN		69.1	1.1181	\mathbf{S}
GRB 000911	07:15:25.914	II	IPN		84.3	1.0585	\mathbf{S}
GRB 000926	23:49:33.661	II	IPN		16.3	2.0369	\mathbf{S}
GRB 010222	07:23:11.652	II	BeppoSAX	3	34.5	1.4768	\mathbf{S}
GRB 010921	05:15:57.151	II	BeppoSAX	$2 \ 3$	44.6	0.45	\mathbf{S}
GRB 011121	18:47:13.457	II	BeppoSAX	3	25.7	0.36	\mathbf{S}
GRB 020405	00:41:39.501	II	BeppoSAX	3	71.9	0.6898	\mathbf{S}
GRB 020813	02:44:40.651	II	HETE-2	2	91.6	1.254	\mathbf{S}
GRB 020819 B^c	14:57:39.766	II	HETE-2	2	81.0	0.411^{\dagger}	\mathbf{S}
GRB 021211	11:18:35.206	II	HETE-2	2	76.9	1.004	\mathbf{S}
GRB 030329	11:37:29.254	II	HETE-2	2	77.5	0.16854	\mathbf{S}
GRB 040924	11:52:15.280	II	HETE-2	2	87.0	0.859	\mathbf{S}
GRB 041006	12:18:43.030	II	HETE-2	2	94.3	0.716	\mathbf{S}
GRB 050401	14:20:11.344	II	SwiftBAT	4	66.2	2.8992^{\ddagger}	\mathbf{S}
GRB 050525A	00:02:56.704	II	SwiftBAT	4	40.5	0.606	\mathbf{S}
GRB 050603	06:29:00.767	II	SwiftBAT	4	51.6	2.821	\mathbf{S}
GRB 050820 \mathbf{A}^d	06:39:14.512	II	SwiftBAT	4	63.2	2.6147	\mathbf{S}
GRB 050922C	19:55:54.480	II	SwiftBAT	$2\ 4$	82.7	2.198	\mathbf{S}
GRB 051008	16:33:20.762	II	SwiftBAT	4	43.1	$2.77^{\dagger e}$	р
Таблица 2.1: Продолжение

Имя	Триггерное	Тип	Локализ.	Др. ^{<i>a</i>}	Угол	7	Тип
всплеска	время	1 1111	прибор	набл.	падения	~	z^b
GRB 051022	13:08:25.298	II	HETE-2	2	71.7	0.8	\mathbf{S}
GRB 051109A	01:12:22.541	II	SwiftBAT	4	41.5	2.346	\mathbf{S}
GRB 051221A	01:51:12.976	Ι	SwiftBAT	4	62.3	0.5465	\mathbf{S}
GRB 060121	22:25:00.890	Π^f	HETE-2	2	62.1	4.6^{g}	р
GRB 060124	16:04:13.894	II	SwiftBAT	4	43.4	2.3000	\mathbf{S}
GRB 060502A	03:03:33.119	II	SwiftBAT	4	11.4	1.5026	\mathbf{S}
GRB 060614	12:43:51.590	II^h	SwiftBAT	4	54.4	0.1254	\mathbf{S}
GRB 060814	23:02:34.447	II	SwiftBAT	4	55.3	1.9229^{\dagger}	\mathbf{S}
GRB 060912A	13:55:57.788	II	SwiftBAT	4	72.9	0.937	\mathbf{S}
GRB 061006	16:45:26.896	\mathbf{I}^i	SwiftBAT	4	13.9	0.4377	\mathbf{S}
GRB 061007	10:08:09.344	II	SwiftBAT	4	27.0	1.2622	\mathbf{S}
GRB 061021	15:39:08.304	II	SwiftBAT	4	56.4	0.3453	\mathbf{S}
GRB 061121	15:23:32.445	II	SwiftBAT	4	65.2	1.3145	\mathbf{S}
GRB 061201	15:58:34.558	Ι	SwiftBAT	4	33.4	0.111	\mathbf{S}
GRB 061222A	03:30:14.682	II	SwiftBAT	4	47.6	2.088^{\dagger}	\mathbf{S}
GRB 070125	07:20:50.853	II	IPN+BAT		80.0	1.547	\mathbf{S}
GRB 070328	03:53:49.993	II	SwiftBAT	4	35.6	2.0627	\mathbf{S}
GRB 070508	04:18:22.779	II	SwiftBAT	4	32.9	0.82^{\ddagger}	\mathbf{S}
GRB 070521	06:51:31.587	II	SwiftBAT	4	39.9	$1.7^{\dagger j}$	р
GRB 070714B	04:59:25.178	Ι	SwiftBAT	4	97.9	0.923	\mathbf{S}
GRB 071003	07:40:55.120	II	SwiftBAT	4	59.6	1.60435	\mathbf{S}
GRB 071010B	20:45:48.490	II	SwiftBAT	4	58.6	0.947	\mathbf{S}
GRB 071020	07:02:26.637	II	SwiftBAT	4	78.0	2.1462	\mathbf{S}
GRB 071112C	18:33:02.583	II	SwiftBAT	4	102.4	0.8227	\mathbf{S}
GRB 071117	14:50:04.535	II	SwiftBAT	4	41.8	1.3308	\mathbf{S}
GRB 071227	20:13:48.722	Ι	SwiftBAT	4	18.3	0.384	\mathbf{S}
GRB 080319B	06:12:50.339	II	SwiftBAT	4	42.3	0.9382	\mathbf{S}
GRB 080319C	12:25:57.938	II	SwiftBAT	4	12.3	1.9492^{\ddagger}	\mathbf{S}
GRB 080411	21:15:32.496	II	SwiftBAT	4	18.6	1.0301	\mathbf{S}
GRB 080413A	02:54:23.605	II	SwiftBAT	4	95.1	2.433	\mathbf{S}
GRB 080413B	08:51:11.831	II	SwiftBAT	4	96.0	1.1014	\mathbf{S}
GRB 080514B	09:55:58.672	II	SuperAGILE/IPN	4	75.4	1.8	р
GRB 080602	01:31:26.229	II	SwiftBAT	4	74.0	1.8204	\mathbf{S}
GRB 080603B	19:38:12.383	II	SwiftBAT	4	32.6	2.6892	\mathbf{S}

Таблица 2.1: Продолжение

Имя	Триггерное	Тип	Локализ.	Др. ^{<i>a</i>}	Угол	<i>z</i>	Тип
всплеска	время		прибор	набл.	падения		z^{o}
GRB 080605	23:48:02.336	II	SwiftBAT	4	62.8	1.6403^{\ddagger}	\mathbf{S}
GRB 080607	06:07:23.336	II	SwiftBAT	4	69.5	3.0363^{\ddagger}	\mathbf{S}
GRB 080721	10:25:10.927	II	SwiftBAT	4	85.0	2.591	\mathbf{S}
GRB 080916C	00:12:44.632	II	FermiLAT	56	17.1	4.35^{k}	р
GRB 080916A	09:45:21.715	II	SwiftBAT	4 5	47.0	0.6887	\mathbf{S}
GRB 081121	20:35:31.435	II	SwiftBAT	4 5	5.9	2.512	\mathbf{S}
GRB 081203A	13:51:30.368	II	SwiftBAT	4	15.6	2.05	\mathbf{S}
GRB 081221	16:21:14.915	II	SwiftBAT	4 5	61.3	2.26	\mathbf{S}
GRB 081222	04:54:02.534	II	SwiftBAT	45	50.1	2.77	\mathbf{S}
GRB 090102	02:55:36.283	II	SwiftBAT	45	76.2	1.547	\mathbf{S}
GRB 090201	17:47:00.275	II	SwiftBAT	4	20.0	2.1000	\mathbf{S}
GRB 090323	00:02:54.632	II	FermiLAT	56	70.1	3.6	\mathbf{S}
GRB 090328	09:36:49.486	II	FermiLAT	56	24.6	0.736	\mathbf{S}
GRB 090424	14:12:11.725	II	SwiftBAT	45	70.8	0.544	\mathbf{S}
GRB 090510	00:23:01.547	Ι	SwiftBAT	456	75.4	0.903	\mathbf{S}
GRB 090618	08:28:24.974	II	SwiftBAT	45	13.6	0.54	\mathbf{S}
GRB 090709A	07:38:34.965	II	SwiftBAT	4	10.5	$1.8^{\dagger l}$	р
GRB 090715B	21:03:19.008	II	SwiftBAT	4	23.9	3.00	\mathbf{S}
GRB 090812	06:02:38.942	II	SwiftBAT	4	83.0	2.452	\mathbf{S}
GRB 090926A	04:20:28.683	II	FermiLAT	56	36.0	2.1062	\mathbf{S}
GRB 091003	04:35:43.801	II	FermiLAT	56	31.3	0.8969	\mathbf{S}
GRB 091020	21:36:44.860	II	SwiftBAT	4 5	46.1	1.71	\mathbf{S}
GRB 091117A	17:44:29.513	Ι	SwiftBAT	4	62.4	0.096	\mathbf{s}
GRB 091127	23:25:49.449	II	SwiftBAT	45	58.5	0.49034	\mathbf{S}
GRB 100206A	13:30:06.775	Ι	SwiftBAT	45	85.7	0.41	\mathbf{s}
GRB 100414A	02:20:27.289	II	FermiLAT	456	77.2	1.368	\mathbf{S}
GRB 100606A	19:12:43.712	II	SwiftBAT	4	35.6	1.5545	\mathbf{S}
GRB 100621A	03:03:33.352	II	SwiftBAT	4	57.4	0.542	\mathbf{S}
GRB 100728A	02:18:20.008	II	SwiftBAT	456	51.3	1.567	\mathbf{S}
GRB 100814A	03:50:11.288	II	SwiftBAT	45	64.7	1.44	\mathbf{S}
GRB 100816A	00:37:53.983	II	SwiftBAT	45	62.5	0.8049	\mathbf{S}
GRB 100906A	13:49:30.732	II	SwiftBAT	45	49.5	1.727	\mathbf{S}
GRB 101213A	10:49:18.472	II	SwiftBAT	45	48.2	0.414	\mathbf{S}
GRB 101219A	02:31:34.716	Ι	SwiftBAT	4	64.9	0.718	\mathbf{S}

Таблица 2.1: Продолжение

Имя	Триггерное	Тип	Локализ.	Др. ^{<i>a</i>}	Угол	7.	Тип
всплеска	время		прибор	набл.	падения	~	z^b
GRB 110213A	05:17:28.893	II	SwiftBAT	4 5	58.8	1.46	\mathbf{S}
GRB 110422A	15:41:42.948	II	SwiftBAT	4	37.7	1.77	\mathbf{S}
GRB 110503A	17:35:41.862	II	SwiftBAT	4	56.9	1.613	\mathbf{S}
GRB 110715A	13:13:55.304	II	SwiftBAT	4	64.5	0.82	\mathbf{S}
GRB 110731A	11:09:34.604	II	SwiftBAT	456	84.6	2.83	\mathbf{S}
GRB 110918A	21:27:02.856	II	IPN		52.3	0.984	\mathbf{S}
GRB 111008A	22:13:01.676	II	SwiftBAT	4	38.1	5.0	\mathbf{S}
GRB 111228A	15:45:36.171	II	SwiftBAT	45	84.3	0.7156	\mathbf{S}
GRB 120119A	04:04:34.872	II	SwiftBAT	45	61.0	1.728	\mathbf{S}
GRB 120624B	22:20:06.904	II	SwiftBAT	456	85.4	2.1974	\mathbf{S}
GRB 120711A	02:45:55.810	II	INTEGRAL	56	4.8	1.405	\mathbf{S}
GRB 120716A	17:05:07.357	II	IPN	5	64.0	2.486	\mathbf{S}
GRB 120804A	00:54:15.749	II	SwiftBAT	4	99.2	1.3	р
GRB 121128A	05:05:53.703	II	SwiftBAT	45	19.1	2.2	\mathbf{S}
GRB 130408A	21:51:41.194	II	SwiftBAT	4	43.0	3.758	\mathbf{S}
GRB 130427A	07:47:09.501	II	SwiftBAT	456	67.4	0.3399	\mathbf{S}
GRB 130505A	08:22:27.038	II	SwiftBAT	4	91.0	2.27	\mathbf{S}
GRB 130518A	13:54:57.501	II	SwiftBAT	456	45.9	2.488	\mathbf{S}
GRB 130603B	15:49:16.448	Ι	SwiftBAT	4	77.4	0.3565	\mathbf{S}
GRB 130701A	04:17:42.161	II	SwiftBAT	4	56.2	1.155	\mathbf{S}
GRB 130831A	13:04:22.044	II	SwiftBAT	4	62.7	0.4791	\mathbf{S}
GRB 130907A	21:39:15.997	II	SwiftBAT	4	35.0	1.238	\mathbf{S}
GRB 131030A	20:56:17.811	II	SwiftBAT	4	90.9	1.293	\mathbf{S}
GRB 131105A	02:05:27.233	II	SwiftBAT	45	8.8	1.686	\mathbf{S}
GRB 131108A	20:41:52.947	II	FermiLAT	56	89.9	2.40	\mathbf{S}
GRB 131231A	04:45:32.361	II	FermiLAT	56	84.1	0.6439	\mathbf{S}
GRB 140213A	19:21:33.011	II	SwiftBAT	45	8.4	1.2076	\mathbf{S}
GRB 140419A	04:06:51.110	II	SwiftBAT	4	63.7	3.956	\mathbf{S}
GRB 140506A	21:07:39.098	II	SwiftBAT	45	57.8	0.889	\mathbf{S}
GRB 140508A	03:03:58.423	II	SwiftBAT	5	24.6	1.027	\mathbf{S}
GRB 140512A	19:31:50.769	II	SwiftBAT	45	82.9	0.725	\mathbf{S}
GRB 140606B	03:11:50.769	II	SwiftBAT	5	46.8	0.384	\mathbf{S}
GRB 140801A	18:59:54.769	II	FermiGBM	5	81.2	1.320	\mathbf{S}
GRB 140808A	00:53:59.264	II	FermiGBM	5	31.6	3.293	\mathbf{S}

Имя всплеска	Триггерное время	Тип	Локализ. прибор	Др. ^а набл.	Угол падения	z	Тип z ^b
GRB 141220A	06:02:51.666	II	SwiftBAT	4 5	54.8	1.3195	s
GRB 150206A	14:31:20.265	II	SwiftBAT	4	31.8	2.087	\mathbf{S}
GRB 150314A	04:54:51.727	II	SwiftBAT	456	46.9	1.758	\mathbf{S}
GRB 150323A	02:51:22.369	II	SwiftBAT	4	64.3	0.593	\mathbf{S}
GRB 150403A	21:54:12.693	II	SwiftBAT	456	47.3	2.06	\mathbf{S}
GRB 150424A	07:43:01.073	Ι	SwiftBAT	4	54.8	0.30^{m}	\mathbf{S}
GRB 150514A	18:35:05.130	II	FermiLAT	56	8.7	0.807	\mathbf{S}
GRB 150821A	09:44:34.166	II	SwiftBAT	45	44.7	0.755	\mathbf{S}
GRB 151021A	01:28:56.535	II	SwiftBAT	4	67.9	2.330	\mathbf{S}
GRB 151027A	03:58:24.154	II	SwiftBAT	45	5.3	0.81	\mathbf{S}
GRB 160131A	08:20:44.577	II	SwiftBAT	4	60.1	0.972	\mathbf{S}
GRB 160410A	05:09:52.644	\mathbf{I}^n	SwiftBAT	4	82.0	1.717	\mathbf{S}
GRB 160509A	08:58:46.696	II	FermiLAT	56	15.8	1.17	\mathbf{S}
GRB 160623A	04:59:37.594	II	FermiLAT	56	34.5	0.367	\mathbf{S}
$GRB \ 160625B$	22:40:19.875	II	FermiLAT	456	65.1	1.406	\mathbf{S}
GRB 160629A	22:19:45.314	II	INTEGRAL	5	27.6	3.332	\mathbf{S}

Таблица 2.1: Продолжение

Примечания:

- † «Тёмный» (Dark) гамма-всплеск по классификации работы, где определено красное смещение.
- ‡ «Тёмный» гамма-всплеск по классификации, приведённой в работе [96].
- а Наблюдения собственного излучения гамма-всплеска приборами: 1 = CGRO-BATSE, 2 = HETE-2, 3 = BeppoSAX-GRBM, 4 = Swift-BAT, 5 = Fermi-GBM, 6 = Fermi-LAT.
- b Типы красного смещения: s = cnektpockonuveckoe, p = dotometpuveckoe.
- с Несмотря на то что в циркулярах GCN и некоторых иных публикациях данный всплеск именуется GRB 020819, данное событие является вторым гамма-всплеском, наблюдавшимся в эксперименте Конус-*Винд* 19 августа 2002.
- d Данный всплеск изначально был назван GRB 050820, но после регистрации GRB 050820B в тот же день, первый всплеск был переименован в GRB 050820A.
- е Красное смещение на уровне значимости 95% составляет $z = 2.77^{+0.15}_{-0.20}$.

- f Несмотря на то что GRB 060121 является «коротким» всплеском, он был отнесён к типу II (см., например, [78] или [85]).
- g В работе [90] было обнаружено два вероятных красных смещения GRB 060121: $z = 4.6 \pm 0.5$ с вероятностью 63%, $z = 1.7 \pm 0.4$ с вероятностью 35%.
- h «Физическая» классификация GRB 060614 неясна: длинный всплеск, не ассоциированный, однако, со сверхновой [86, 87, 88, 89]), был отнесён к типу I на основании низкой удельной скорости звездообразования в его родительской галактике [78]. Анализ же собственного излучения всплеска по данным эксперимента Конус-Винд, напротив, даёт предпосылки отнести данное событие к типу II, что и было выбрано в качестве классификации всплеска [85].
- і Данный гамма-всплеск можно классифицировать как «короткий» всплеск с продлённым излучением в соответствии с работами [97, 85].
- ј Доверительный интервал красного смещения на уровне 95% составляет 1.37 < z < 2.20.
- k Красное смещение на уровне значимости 2σ составляет $z = 4.35 \pm 0.15$.
- 1 Для данной оценки красного смещения доверительный интервал на уровне 95% составляет 1.14 < z < 2.34.</p>
- т Оценка красного смещения GRB 150424A (z = 0.3, [91]) основана на наблюдениях галактики, расположенной на угловом растоянии 5"(22.5 кпк при указанном z) от положения послесвечения, указанного в работе [92]. Следует, однако, заметить, что в работе [93] была найдена другая потенциальная родительская галактика данного всплеска, расположенная в месте локализации его послесвечения, причём красное смещение этой галактики было оценено как z > 0.7.
- n Данный всплеск нельзя однозначно отнести к типу I.

Полная версия данной таблицы размещена на сайте ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу http://www.ioffe.ru/LEA/zGRBs/triggered/KW_GRBs_z_trig_tables.zip.

Глава 3

Временной и спектральный анализ излучения гамма-всплесков

3.1 Введение

Настоящая глава посвящена временному и спектральному анализу 150 гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*. Исследуемая выборка всплесков подробно описана в Главе 2.

Глава организована следующим образом. В разделе 3.2 дано описание методики временного анализа кривых блеска гамма-всплесков, а в разделе 3.3 приведены результаты применения данной методики к исследуемой выборке. В разделе 3.4 описана методика спектрального анализа, в разделе 3.5 – результаты спектрального анализа выборки. В разделе 3.6 обсуждается распределение гамма-всплесков выборки на плоскости жёсткость-длительность. В разделе 3.7 полученные спектральные параметры гамма-всплесков обсуждаются в контексте синхротронной модели излучения. В разделе 3.8 результаты спектрального анализа по данным эксперимента Конус-*Винд* сравниваются с результатами спектрального анализа гамма-всплесков по данным других экспериментов. В разделе 3.9 приведены методика и результаты совместного анализа GRB 140801А по данным экспериментов Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM.

3.2 Методика временного анализа

Полная длительность собственного излучения гамма-всплеска T_{100} , а также длительности T_{90} и T_{50} (временные интервалы, содержащие от 5% до 95% и от 25% до 75% полного числа отсчётов за всплеск, соответственно, см., например, [6]) в данной работе были определены по кривым блеска в энергетическом диапазоне G2+G3 (~80–1200 кэВ на 2016 г.). Наиболее мягкий диапазон энергий, G1 (~20-80 кэВ на 2016 г.), не использовался для определения длительностей всплесков по ряду причин. Во-первых, бо́льшая часть спектров гамма-всплесков характеризуются пиковой энергий EF_E спектра $E_{\rm p} > 100$ кэВ, следовательно, основная часть регистрируемого потока энергии собственного излучения всплеска приходится на диапазоны G2 и G3. Вовторых, в отличие от фона в мягком энергетическом окне G1, который может претерпевать значительные вариации вследствие солнечной активности, а также наличия транзиентных явлений в жёстком рентгеновском диапазоне энергий, фон в каналах G2 и G3 может не испытывать заметных вариаций на протяжении нескольких суток [84]. Наконец, для некоторых гамма-всплесков начало яркого рентгеновского послесвечения, регистрируемого детекторами Конус-Винд в канале G1, перекрывается во времени с собственным излучением всплеска.

Для вычисления длительностей гамма-всплесков были использованы данные, записанные как в триггерном режиме, так и в режиме ожидания. Для большинства событий фоновая скорость счёта аппроксимировалась постоянным уровнем, определённым на интервале времени от $T_0 - 1200$ с до $T_0 - 200$ с. Значительный отступ от T_0 обусловлен тем, что для всплесков с плавно нарастающей интенсивностью триггер может сработать значительно позже фактического начала всплеска. Время начала и окончания гамма-всплеска (то есть интервала T_{100}) определяется по превышению скорости счёта над фоновой на уровне 5σ на временных масштабах от 2 мс до 2.944 с на интервале от $T_0 - 200$ с до $T_0 + 240$ с (окончание триггерной записи прибора Конус-*Винд*). В редких случаях, например, для GRB 020813, который частично перекрывается во времени с солнечной вспышкой, интервал поиска начала и окончания гамма-всплеска сужался, чтобы исключить событие, не имеющее отношения к гамма-всплеску.

Спектральная задержка излучения (τ_{lag}) является количественной мерой спектральной эволюции гамма-всплеска, часто наблюдаемой у «длинных» гамма-всплесков, в которых пик излучения в мягких каналах приходится на

более позднее время, чем в жёстких. Также спектральная задержка излучения может выражаться в том, что излучение в мягких каналах спадает медленнее, чем в жёстких. Положительное значение τ_{lag} соответствует задержке излучения в мягких каналах относительно излучения в более жёстких каналах. Для вычисления спектральных задержек излучения был использован метод кросс-корреляции, сходный с описанным в работах [98, 99]. Функция кросс-корреляции вычислялась для трёх пар энергетических каналов прибора Конус-Винд: G2–G1, G3–G1 и G3–G2. В качестве оценки _{Пад}GiGi для каждой пары каналов (Gi,Gj) использовано положение пика аппроксимации функции кросс-корреляции полиномом четвёртой степени. Ошибка $au_{
m lag}$ оценивалась методом статистического моделирования. В связи с тем, что надёжные и однозначные оценки спектральной задержки могут быть сделаны только для событий с простой структурой кривой блеска, в данной работе анализ спектральных задержек был выполнен для подвыборки гамма-всплесков, характеризующихся единственным эпизодом излучения, причём длительность всплеска T_{100} должна полностью попадать в триггерную запись.

3.3 Результаты временного анализа

Полученные длительности и спектральные задержки гамма-всплесков сведены в табл. 3.1. Первая колонка содержит идентификатор гамма-всплеска (см. табл. 2.1). В последующих колонках приведены значения длительностей интервалов T_{100} , T_{90} и T_{50} , а также времена их начала относительно T_0 : t_0 , t_5 и t_{25} , соответственно. Всплеск GRB 081203А был обнаружен в триггерной записи GRB 081203В и наблюдался после окончания регистрации кривой блеска триггерного режима (Глава 2), поэтому для GRB 081203А доступны лишь спектральные данные с грубым временным разрешением ~ 8 с, в связи с чем для указанного всплеска удалось лишь приблизительно оценить длительность T_{100} .

В то время как для слабых всплесков T_{100} и T_{90} являются сходными мерами оценки длительности (см. рис. 3.1), для ярких всплесков длительность T_{100} более чувствительна к наличию у них прекурсоров или длинных, медленно спадающих «хвостов». Подобное поведение особенно выражено для



Рисунок 3.1: Зависимость отношения длительностей T_{90} к T_{100} от длительности T_{100} . Всплески типа I отмечены треугольниками, всплески типа II – окружностями. Цвет символов соответствует логарифму статистической значимости детектирования всплеска.

таких интенсивных событий как «naked-eye» GRB 080319В [100]; сверхяркий GRB 110918А [64]; близкий, исключительно мощный GRB 130427А [101]; и двух недавних всплесков с высокой энергетикой: GRB 160623А [102] и GRB 160625В [103, 104]. В GRB 160625В наблюдался прекурсор, отделённый от основного эпизода излучения длительным временным интервалом. Остальные четыре перечисленных всплеска характеризуются наличием медленно спадающих «хвостов» жёсткого рентгеновского излучения, достаточно ярких для того, чтобы детектироваться в канале G2 на протяжении сотен секунд.

В последних трёх колонках табл. 3.1 приведены спектральные задержки излучения между тремя парами каналов: $\tau_{lagG2G1}$, $\tau_{lagG3G1}$ и $\tau_{lagG3G2}$. Статистика определения спектральных задержек для 58 всплесков, отобранных для анализа, следующая: $\tau_{lagG2G1}$ (G2-G1) вычислена для 55 всплесков, $\tau_{lagG3G1}$ (G3-G1) – для 32 всплесков, $\tau_{lagG3G2}$ (G3-G2) – для 38 всплесков. Для части всплесков значения некоторых спектральных задержек не определены вследствие низкого отношения сигнал/шум в одном или обоих сравниваемых каналах, либо по причине значительного различия в форме кривых блеска в данных каналах.

В табл. 3.2 собрана описательная статистика по длительностям и спектральным задержкам излучения в системах отсчёта наблюдателя и источника всплеска. Длительности и спектральные задержки в космологической системе отсчёта были оценены путём деления соответствующих величин, измеренных в системе отсчёта наблюдателя, на фактор (1 + z), соответствующий космологическому растяжению наблюдаемой кривой блеска. На рис. 3.2 представлены распределения длительностей гамма-всплесков T_{50} , T_{90} и T_{100} в системах отсчёта наблюдателя и источника всплеска.

Следует отметить, что форма и длительность кривой блеска гаммавсплеска может существенно зависеть от диапазона измерения (см., например, [105]). В силу этого приводимые оценки длительности в космологической системе отсчёта являются смещёнными, так как стандартный энергетический диапазон определения длительности в эксперименте Конус-*Винд* соответствует множеству индивидуальных, зависящих от z конкретного всплеска, энергетических диапазонов в космологической системе отсчёта. Коррекция



Рисунок 3.2: Распределения длительностей T_{100} (верхняя панель), T_{90} (средняя панель) и T_{50} (нижняя панель) в системах отсчёта наблюдателя (сплошная чёрная линия) и источника всплеска (штриховая красная линия).

указанного эффекта возможна в экспериментах с фиксацией энергии каждого зарегистрированного фотона (например, *Swift*/BAT или *Fermi*-GBM), но, к сожалению, неосуществима для данных эксперимента Конус-*Винд*. Аналогичные соображения применимы и к определению спектральных задержек излучения в космологической системе отсчёта гамма-всплеска.

3.4 Методика спектрального анализа

Для каждого гамма-всплеска исследуемой выборки было выбрано два временных интервала для спектрального анализа: ближайший к T_{100} для «интегрального» спектра, по которому определяются усреднённые за всплеск параметры, и более узкий, содержащий время пиковой скорости счёта, «пиковый» спектр. Время накопления пикового спектра может варьироваться в зависимости от интенсивности всплеска и наличия значимой спектральной эволюции. Для 38 гамма-всплесков с низкой интенсивностью излучения интегральный и пиковый спектры совпадают.

Кривые блеска 12-ти всплесков выборки содержат два и более разделённых во времени эпизода излучения. В большинстве случаев все эпизоды излучения были включены в интервал накопления интегрального спектра. Триггер прибора Конус-*Винд* сработал на далеко отстоящие прекурсоры GRB 120716A и GRB 160625B, но они не были включены в интегральные спектры, чтобы не понижать отношение сигнал-шум для указанных всплесков.

Спектральный анализ осуществлялся с использованием пакета XSPEC версии 12.9.0 [106]. Каналы исходных спектров были сгруппированы так, чтобы каждый канал содержал не менее 20 отсчётов, что обеспечивает корректность использования статистики χ^2 . Затем спектры были аппроксимированы стандартными для описания гамма-всплесков моделями методом χ^2 минимизации. Первая из моделей – это функция Банда (далее «BAND» [7]):

$$f(E) \propto \begin{cases} E^{\alpha} \exp\left(-\frac{E(2+\alpha)}{E_{\rm p}}\right), & E < (\alpha - \beta)\frac{E_{\rm p}}{2+\alpha} \\ E^{\beta} \left[(\alpha - \beta)\frac{E_{\rm p}}{(2+\alpha)}\right]^{(\alpha - \beta)} \exp(\beta - \alpha), & E \ge (\alpha - \beta)\frac{E_{\rm p}}{2+\alpha}, \end{cases}$$
(3.1)

где α – фотонный индекс в области низких энергий, β – фотонный индекс в области высоких энергий, $E_{\rm p}$ – пиковая энергия, максимум EF_E спектра.

Вторая использованная спектральная модель – степенной закон с экспоненциальным обрезанием в области высоких энергий (CPL), параметризованный через $E_{\rm p}$:

$$f(E) \propto E^{\alpha} \exp\left(-\frac{E(2+\alpha)}{E_{\rm p}}\right).$$
 (3.2)

В единственном случае (GRB 080413В), где локализация излома спектра (в модели Банда) или параметра экспоненциального обрезания (в модели CPL) по данным эксперимента Конус-*Винд* оказалась невозможна, результаты спектрального анализа приводятся для простой степенной модели (PL): $f(E) \propto E^{\alpha}$.

В качестве нормировки всех спектральных моделей использовался энергетический поток (F) в диапазоне 10 кэВ–10 МэВ. Аппроксимация спектральных данных проводилась в диапазоне от ~ 20 кэВ до 0.5–15 МэВ, в зависимости от наличия статистически значимого излучения в старших каналах спектра, а также от стабильности фона в области высоких энергий, подверженного, для некоторых всплесков, воздействию потоков солнечных частиц. Ошибки параметров моделей были определены с помощью команды ERROR в программе XSPEC по изменению статистики аппроксимации $\Delta \chi^2 = 1$, что соответствует уровню значимости ошибок 68%.

Для каждого спектра приводятся результаты аппроксимаций приемлемого качества (далее GOOD), для которых параметры α и $E_{\rm p}$ моделей CPL и BAND имеют ограниченные ошибки. Для спектров, приемлемо описываемых более чем одной моделью, на основе различия статистики χ^2 была также определена «наилучшая» (далее BEST) модель. Критерием для предпочтения модели с одним дополнительным параметром служило уменьшение χ^2 , как минимум, на 6: $\Delta \chi^2 \equiv \chi^2_{\rm CPL} - \chi^2_{\rm BAND} > 6$. Данный критерий широко применяется для исследования спектральных характеристик гамма-всплесков при необходимости выбора между двумя (или более) «вложенными» моделями (см., например, [107, 108, 109]), и соответствует, в случае приведённого значения $\chi^2_{\rm r} \sim 1$, вероятности случайного улучшения аппроксимации на уровне 0.015. Следует заметить, что в циркулярах GCN, где приводятся результаты оперативного анализа гамма-всплесков по данным эксперимента Конус-*Винд*, используется иной принцип: если аппроксимация моделью BAND имеет приемлемое качество и параметр β ограничен «снизу», то она принимается в качестве BEST-модели вне зависимости от $\Delta \chi^2$.

3.5 Результаты спектрального анализа

Десять колонок табл. 3.3 содержат следующую информацию: (1) идентификатор всплеска (см. табл. 2.1); (2) тип спектра: «i» – интегральный, «p» – пиковый; (3) время начала интервала накопления спектра t_{start} (относительно T_0); (4) длительность интервала накопления ΔT ; (5) идентификатор спектральной модели (символом † отмечена BEST-модель); (6) α ; (7) β ; (8) E_p ; (9) F (нормировка); (10) χ^2 /d.o.f., в скобках приведена вероятность нулевой гипотезы. В случаях, когда фотонный индекс β оказалось невозможно ограничить снизу, в качестве нижней ошибки приводится значение ($\beta_{\min} - \beta$), где $\beta_{\min} = -10$. В случаях, когда аппроксимация моделью Банда сходится к $\beta < -4$, в таблице приведена лишь верхняя граница оценки β .

Несмотря на то что в данных, полученных в эксперименте Конус-*Винд*, запись многоканальных спектров ведётся только после срабатывания триггера, интервалы накопления интегральных спектров для ~ 2/3 гамма-всплесков исследуемой выборки содержат $\geq 90\%$ отсчётов всего всплеска (и лишь для шести всплесков в триггерную запись попадает < 50% отсчётов). Большая часть отсчётов GRB 090812, примерно половина отсчётов короткого GRB 100206A и существенная часть отсчётов короткого GRB 070714B была накоплена до начала триггерной записи. Спектральный анализ указанных всплесков был проведён с использованием как триггерных (многоканальных) спектров, так и трёхканальных спектров, полученных из данных режима ожидания. При этом трёхканальные и многоканальные данные, в совокупности, охватывают весь интервал T_{100} .

На рис. 3.3 приведены распределения спектральных параметров, а в табл. 3.2 представлена их описательная статистика. Фотонные индексы модели CPL распределены вокруг значения $\alpha \approx -1$ как для интегрального, так и для пикового спектров. Фотонные индексы (в области низких энергий) модели BAND распределены вокруг значений $\alpha \approx -1$ и $\alpha \approx -0.85$ для интегрального и пикового спектра, соответственно. Фотонные индексы (в области



Рисунок 3.3: Распределение спектральных параметров α , β , $E_{\rm p}$ и $E_{\rm p,z} = (1+z)E_{\rm p}$ для моделей «GOOD». Распределения параметров интегральных спектров отмечены чёрной сплошной линией, распределения параметров пиковых спектров отмечены красной штриховой линией.

высоких энергий) распределены вокруг значений $\beta \approx -2.5$ и $\beta \approx -2.35$ для интегрального и пикового спектра, соответственно.

Модель Банда наилучшим образом аппроксимирует 54 интегральных и 51 пиковый спектр, для остальныех спектров (за исключением спектра GRB 080413B, см. выше) BEST-моделью является CPL. Пиковая энергия для BEST-моделей находится в диапазоне от $E_{\rm p} \approx 40$ кэB до $E_{\rm p} \approx 3.5$ МэB (для GRB 090510). Распределения пиковой энергии интегральных спектров ($E_{\rm p,i}$) для обеих спектральных моделей достигают максимума при $E_{\rm p,i} \sim 250$ кэB, в то время как распределения пиковой энергии пиковых спектров ($E_{\rm p,p}$), также для обеих моделей, достигают максимума при $E_{\rm p,p} \sim 300$ кэB.

Оценки параметра $E_{\rm p}$ в космологической системе отсчёта всплеска, $E_{\rm p,i,z} = (1+z)E_{\rm p,i}$ и $E_{\rm p,p,z} = (1+z)E_{\rm p,p}$, находится в пределах от $E_{\rm p,z} \approx 50$ кэВ до $E_{\rm p,z} \approx 6.7$ МэВ (для GRB 090510).

3.6 Распределение жёсткость-длительность в системах отсчёта наблюдателя и источника гамма-всплеска

На рис. 3.4 представлена зависимость пиковой энергии интегрального спектра $E_{\rm p,i}$ от длительности T_{90} в системах отсчёта наблюдателя и источника всплеска. В системе отсчёта наблюдателя гамма-всплески типа I, в основном, являются более жёсткими (их спектры характеризуются более высокой пиковой энергией) и более короткими по сравнению со всплесками типа II вне зависимости от красного смещения. Данный вывод естественно согласуется с классификацией всплесков на основе распределения жёсткость–длительность (рис. 2.1), где жёсткость оценивается по соотношению скоростей счёта в кривых блеска диапазонов G3 и G2.

В космологической системе отсчёта картина несколько меняется. Несмотря на то что всплески типа I остаются, в среднем, более короткими, чем всплески типа II, пиковые энергии значительной части всплесков типа II, в силу более высокого красного смещения, начинают превышать характерное для всплесков типа I значение $E_{\rm p,z} \sim 1$ МэВ, и кластеризация в



Рисунок 3.4: Распределение жёсткость–длительность в системах отсчёта наблюдателя (слева) и источника всплеска (справа). Всплески типа I обозначены треугольниками, всплески типа II – окружностями. Цветом отмечено красное смещения всплесков.

плоскости жёсткость-длительность «размывается», оставаясь справедливой лишь для общего для всплесков типа I и II диапазона красных смещений $z \leq 1.7$. Примечательными исключениями среди всплесков типа I оказываются GRB 090510 и GRB 160410A, чья пиковая энергия в космологической системе отсчёта превосходит $E_{\rm p,z}$ даже самых далёких всплесков типа II.

Как было отмечено выше, приводимые оценки длительности в космологической системе отсчёта являются смещёнными в силу того, что стандартный энергетический диапазон определения длительности в эксперименте Конус-Buhd соответствует множеству индивидуальных, зависящих от z конкретного всплеска, энергетических диапазонов в космологической системе отсчёта, а форма и длительность гамма-всплеска в различных диапазонах могут существенно различаться. Также при удалении источника всплеска от наблюдателя длительность события в системе отсчета наблюдателя, измеренная на определенном уровне значимости детектирования, уменьшается вследствие ухудшения отношения сигнал/шум. Кроме того, несмотря на то что энергетический диапазон спектральных измерений гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд можно считать болометрическим, триггерный алгоритм детектора чувствителен к Ер падающего спектра, и полученная выборка значений пиковой энергиии в космологической системе отсчёта также подвержена эффектам наблюдательной селекции (см. Главу 5). Таким образом, к интерпретации распределения жёсткость-длительность в космологической системе отсчёта по данным эксперимента Конус-*Винд* следует подходить с определённой осторожностью.

3.7 Статистика спектральных параметров в контексте модели SSM

Разность фотонных индексов, аппроксимирующих спектр в области высоких и низких энергий, $(\alpha - \beta)$, может быть использована для исследования процессов собственного излучения гамма-всплеска путем сравнения наблюдаемых значений $(\alpha - \beta)$ с предсказанными в рамках синхротронной ударноволновой модели (SSM, от англ. Synchrotron Shock Model) для различных ре-



Рисунок 3.5: Распределение разности фотонных индексов $\alpha - \beta$ для модели BAND.

жимов охлаждения и степенных индексов распределения излучающих электронов [110].

Распределения ($\alpha - \beta$) для интегрального и пикового спектров, аппроксимированных моделью BAND, представлены на рис. **3.5**. Отсутствие ярко выраженного пика распределений может означать наличие разброса показателей степени электронов и/или существование различных режимов SSM в источниках всплесков. Медианные значения ($\alpha - \beta$) составляют 1.5 и 1.6 для интегрального и пикового спектров, соответственно. Кроме того, можно заметить, что распределение ($\alpha - \beta$) для пикового спектра немного сдвинуто в сторону более высоких значений относительно распределения для интегрального спектра.

В результате оценки доли всплесков, нарушающих «линию смерти» ($\alpha = -2/3$) и предел охлаждения ($\alpha = -3/2$) в синхротронной модели [111], было обнаружено, что доверительные интервалы α для 8% интегральных и 21% пиковых спектров полностью попадают в область $\alpha > -2/3$, а доверительные интервалы α для 5% интегральных и 2% пиковых спектров полностью попадают в область $\alpha < -3/2$. При этом использовались доверительные ин-

тервалы на уровне значимости 68% и фотонные индексы α , соответствующие наилучшей аппроксимации спектров.

3.8 Спектральные параметры, полученные в экспериментах Конус-*Винд*, *CGRO*-BATSE и *Fermi*-GBM

В работе [112] показано, что распределения пиковой энергии интегрального спектра (в космологической системе отсчёта), изотропных эквивалентов энерговыделения и светимости гамма-всплесков не зависят от величины потока излучения оптических послесвечений всплесков, то есть распределения указанных параметров не претерпевают существенных искажений, будучи рассчитанными только для всплесков с известным красным смещением. Несмотря на то что настоящая работа охватывает лишь ограниченный набор всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд* ($\approx 7.5\%$ от полного числа триггерных всплесков за описываемый период наблюдений), обсуждение полученных результатов может быть полезным в контексте сравнения спектральных параметров гамма-всплесков по данным различных экспериментов.

Для 83 из 138 интегральных спектров всплесков типа II наилучшая аппроксимация выполнена моделью CPL, для 54 – моделью BAND, для одного – моделью PL. Пиковые спектры характеризуются схожим соотношением моделей, наилучшим образом аппроксимирующих спектры: 86 спектров – CPL, 51 спектр – BAND, один спектр – PL. Было обнаружено, что для >80% всплесков типа II пиковые спектры можно охарактеризовать как более жёсткие, в терминах $E_{\rm p}$, по сравнению с интегральными спектрами, что согласуется с известным соотношением жёсткость–интенсивность.

Медианные значения $E_{\rm p}$ для наилучших аппроксимаций составляют 297 кэВ и 357 кэВ для интегрального и пикового спектров, соответственно. Медианные значения α равняются -1.00 и -0.87, а медианные значения β составляют -2.45 и -2.33 для интегральных и пиковых спектров, соответственно. Единственный всплеск, для которого аппроксимации обеими моде-

лями, включающими пиковую энергию, не являются удовлетворительными, - это относительно слабый GRB 080413В. Для него фотонный индекс (интегральный и пиковый спектры совпадают) составляет $-2.00 \pm 0.1 \; (\chi^2 = 49)$ на 61 степень свободы), что предполагает низкое значение $E_{\rm p}$. Данный фотонный индекс согласуется с полученным в результате совместного анализа всплеска по данным экспериментов Swift-BAT и Suzaku-WAM фотонным индексом $\alpha = -1.92 \pm 0.06$ [108]. Наилучшая аппроксимация спектра для данного всплеска согласно [108] выполнена моделью BAND с параметрами $\alpha \simeq -1.24, \, \beta \simeq -2.77$ и $E_{\rm p} \simeq 67$ к
эВ. Указанные параметры согласуются со спектральными данными прибора Конус-BuHd: $\chi^2 = 53$ на 62 степени свободы (оценка статистики проводилась при фиксированных значениях α , β , и E_p). Таким образом, оценка изотропного энерговыделения GRB 080413B, $E_{\rm iso} = (3.33 \pm 0.61) \times 10^{52}$ эрг, рассчитанного в результате аппроксимации моделью PL данных эксперимента Конус-*Винд* (см. Главу 4), завышена на фактор ~1.6 по сравнению с более точной оценкой $E_{\rm iso} = (2.09 \pm 0.28) \times 10^{52}$ эрг, полученной в результате совместного анализа данных экспериментов Swift-ВАТ и Suzaku-WAM.

Двенадцать (8%) из 150 всплесков выборки классифицированы как принадлежащие к типу I (короткие/жёсткие). Указанная доля всплесков типа I в полной выборке гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд*, составляет около половины доли всплесков типа I среди всех триггерных всплесков, детектированных данным прибором, что указывает на сложность оптической идентификации и измерения красного смещения коротких/жёстких гамма-всплесков. Наилучшие аппроксимации всех спектров всплесков типа I были выполнены моделью CPL с медианными для выборки значениями $\alpha = -0.53$ и $E_{\rm p} = 640$ кэВ, что согласуется с результатами, полученными в работе [85] для 293 коротких всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*.

Было проведено сравнение описательной статистики спектральных параметров наилучших аппроксимаций, полученных для всех всплесков выборки в данной работе, со статистикой, приведённой в каталогах BATSE 5B [113] и *Fermi*-GBM [114]. Было обнаружено, что средние и медианные значения пара-

метров, полученных в данной работе, для обеих спектральных моделей, CPL и BAND, как для интегрального, так и для пикового спектров согласуются со статистикой, приведённой в указанных каталогах, в пределах доверительных интервалов на уровне значимости 68%. В то же время, был замечен ряд систематических различий между результатами по данным разных приборов, например, спектры всплесков по данным эксперимента Конус-Винд являются, в основном, более жёсткими, в терминах E_p, чем по данным BATSE и GBM. Аналогичное утверждение верно и в терминах фотонного индекса (наклона спектра) в области низких энергий: α по данным эксперимента Конус-*Винд*, в среднем, более «пологие», чем по данным ВАТЅЕ и GBM. Наконец, типичные значения фотонного индекса в области высоких энергий β , полученные в настоящей работе, более пологие, чем по данным прибора BATSE, но, в то же время, круче, чем типичные значения, полученные прибором GBM. Указанные систематические отличия могут быть объяснены различием спектральных диапазонов инструментов: верхняя граница спектрального диапазона прибора Конус-Винд (~10–15 МэВ) существенно выше, чем у прибора BATSE (~2 МэВ), что позволяет проводить более точную оценку высоких значений E_p. Широкий энергетический диапазон (~8 кэB-30 МэВ) и большое число спектральных каналов GBM, в свою очередь, позволяет точнее оценивать α
и β для модели BAND, что приводит к меньшим, по сравнению с результатами для данных эксперимента Конус- $Buh\partial$, значениям $E_{\rm p}$.

Следует отметить, что среднее значение $E_{\rm p}$ гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд*, находится за пределами спектрального диапазона прибора *Swift*-BAT (15– 150 кэВ), что подчёркивает важность данных Конус-*Винд* для анализа всплесков, зарегистрированных в эксперименте *Swift*-BAT.

3.9 Совместный анализ гамма-всплеска GRB 140801А по данным экспериментов Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM

Кросс-калибровка (совместный анализ данных) различных экспериментов по общим событиям позволяет провести детальный анализ инструментальных эффектов, влияющих на результаты исследования собственного излучения гамма-всплесков. В ходе данной диссертационной работы был проведён совместный анализ данных по гамма-всплеску с известным красным смещением GRB 140801A, зарегистрированному в экспериментах Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM.

Гамма-всплеск GRB 140801A был зарегистрирован и локализован прибором *Fermi*-GBM [115] в 18:59:53.26 UT [116] и является одним из немногих всплесков, отождествление которого в оптическом диапазоне было сделано исключительно на основании локализации прибором *Fermi*-GBM. Область локализации всплеска оказалась достаточно большой: 137 кв. градусов на уровне значимости 3σ . Оптическое послесвечение GRB 140801A было зарегистрировано Глобальной сетью телескопов-роботов MACTEP¹ [117] всего через 53 с после получения оповещения о всплеске, что являлось самой быстрой регистрацией послесвечения гамма-всплеска в боксе ошибок прибора *Fermi*-GBM [76].

Кривая блеска GRB 140801A по данным детектора NaI (*Fermi*-GBM) в диапазоне энергий 8–970 кэВ показана на нижней панели рис. 3.6. Длительность всплеска по данным эксперимента *Fermi*-GBM составляет $T_{90} =$ 7.2 ± 0.6 с в диапазоне энергий 50–300 кэВ [118]. Для совместного спектрального анализа были использованы данные детекторов NaI 1, 2 и 10 (8–1000 кэВ). Угол падения излучения на указанные детекторы составил менее 60°. Кроме того, указанные детекторы не были затенены KA, солнечными панелями или телескопом LAT, размещённым на том же KA. Также были использованы данные обоих детекторов BGO (150 кэВ–30 МэВ). PHA- и BAK-файлы,

¹Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР является единственным экспериментом, реагирующим на все оповещения космической обсерватории *Fermi*.

необходимые для спектрального анализа в среде XSPEC, были извлечены из данных GBM TTE с помощью программного обеспечения RMFIT².

GRB 140801A был зарегистрирован в триггерном режиме детектором S2 HA Конус-*Винд* (триггерное время T_0 =18:59:54.769 UT) [119]. Кривые блеска GRB 140801A в трёх каналах, G1 (21–78 кэВ), G2 (78–312 кэВ) и G3 (312–1187 кэВ), по данным эксперимента Конус-*Винд* показаны на рис. 3.7. Кривые блеска демонстрируют сложную многопиковую структуру всплеска. Полная длительность всплеска, определённая по превышению скорости счёта над фоновой на 5 σ в канале G2, составляет $T_{100} = 8.030$ с. Длительность T_{90} составляет $6.2^{+0.2}_{-0.5}$ с, что согласуется, с учетом части события в предыстории триггерной записи, с длительностью, оцененной по данным эксперимента *Fermi*-GBM. Как можно заметить из рис. 3.7, излучение всплеска в диапазоне энергий выше ~ 300 кэВ (канал G3) практически отсутствует. Показанная на том же рис. эволюция жёсткости излучения (отношение скорости счёта в каналах G2 и G1) со временем демонстрирует корреляцию жёсткости и интенсивности излучения [5]. Спектральная задержка излучения между каналами G2 и G1 (см. Раздел 3.2) пренебрежимо мала: $\tau_{lag} = -0.01 \pm 0.03$ с.

Был проведён сравнительный спектральный анализ трёх наборов данных: прибора Конус-*Винд*, прибора *Fermi*-GBM (детекторы NaI и BGO) и совместных данных обоих приборов. Для анализа использовались два временны́х интервала: от T_0 до $T_0 + 7.680$ с (интегральный спектр) и от T_0 до $T_0 + 0.256$ с (пиковый спектр). Спектральный данные, полученные в эксперименте Конус-*Винд*, охватывают диапазон энергий 20 кэВ–15 МэВ (излучение наблюдается до ~ 3 МэВ). На рис. 3.6 времена накопления интегрального и пикового спектров показаны вертикальными линиями.

Спектральный анализ осуществлялся с использованием пакета XSPEC методом χ^2 -минимизации. Спектральные данные были аппроксимированы двумя моделями, CPL и BAND, нормированными на энергетический поток в болометрическом диапазоне 1 кэB–10 МэВ. При совместном анализе данных нескольких детекторов в модели вводился дополнительный поправочный множитель, учитывающий систематические ошибки эффективной площади детекторов в матрицах отклика. При анализе данных *Fermi*-GBM для

²http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/rmfit/



Рисунок 3.6: Кривые блеска GRB 140801A с временны́м разрешением 64 мс по данным экспериментов Конус-*Винд* в диапазоне 21–1187 кэВ (сверху) и *Fermi*-GBM в диапазоне 8–970 кэВ (снизу). Данные приведены относительно триггерного времени прибора Конус-*Винд* $T_0 = 18:59:54.769$ UT. Кривая блеска по данным прибора GBM сдвинута на время распространения фронта излучения гамма-всплеска между KA *Fermi* и KA *Wind* (0.639 с). Времена накопления интегрального и пикового спектра показаны вертикальными штриховыми линиями. Уровень фона показан горизонтальными штриховыми линиями.



KONUS-WIND GRB 140801

Рисунок 3.7: В верхней части рисунка приведены кривые блеска GRB 140801A по данным эксперимента Конус-*Винд* в каналах G1, G2 и G3 с временны́м разрешением 64 мс. Уровень фона показан штриховыми линиями. На нижней панели показана эволюция жёсткости гамма-всплеска (отношение скоростей счёта в каналах G2 и G1). Скорости счёта скорректированы на мёртвое время детектора.

поправочного множителя детекторов NaI используется фиксированное значение, равное единице, а поправочный множитель детекторов BGO являлся параметром аппроксимации. При совместном анализе данных Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM аналогичным образом фиксировался поправочный множитель детектора Конус-*Винд*, а множители двух типов детекторов *Fermi*-GBM являлись параметрами аппроксимации. В результате анализа было установлено, что поправочный множитель между детектором Конус-*Винд* и детекторами NaI *Fermi*-GBM близок к единице (\sim 0.96), при этом значения поправочного множителя детекторов BGO, полученные при совместном анализе данных двух экспериментов, согласуются со значениями, полученными при анализе данных *Fermi*-GBM.

Результаты спектрального анализа данных Конус-*Винд*, *Fermi*-GBM и совместного анализа данных обоих приборов (далее «KW+GBM»), представлены в табл. 3.4. Данные обоих спектров (интегрального и пикового) наилучшим образом аппроксимируются моделью CPL при $\chi_r^2 \leq 1$. Использование модели BAND для спектрального анализа любого из трёх наборов данных не повышает значимость аппроксимации, не изменяет значения спектральных параметров E_p и α , и позволяет наложить лишь верхние пределы на фотонный индекс в жёсткой области спектра β .

Как видно из табл. 3.4, параметры модели CPL и нормировочный поток энергии, полученные при анализе данных Конус-Винд, Fermi-GBM и совместном анализе согласуются, причём более широкий спектральный диапазон Fermi-GBM в мягкой области спектра позволяет, при относительно низкой $E_{\rm p}$, наложить более жёсткие ограничения на α . Как интегральный, так и пиковый спектры хорошо аппроксимируются моделью CPL с пиковой энергией $E_{\rm p} \sim 110-130$ кэВ и «жёстким» фотонным индексом α . На рис. 3.8 представлены данные интегрального спектра, полученные в экспериментах Конус-Винд и Fermi-GBM, свёртка аппроксимации указанных спектральных данных моделью CPL (с параметрами $\alpha = -0.23$, $E_{\rm p} = 117$ кэВ и $F = 1.46 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹) с матрицами отклика детекторов, а также невязка модели с данными.

Фотонный индекс интегрального спектра ($\alpha \sim -0.23$) входит в число $\sim 4-5\%$ наиболее жёстких фотонных индексов, представленных в катало-



Рисунок 3.8: Совместный анализ данных интегрального спектра гаммавсплеска GRB 140801A, полученных в экспериментах Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM. Различными цветами показаны спектральные данные приборов: фиолетовым и жёлтым – Конус-*Винд* (детектор S2), чёрным, красным и зелёным – *Fermi*-GBM (детекторы NaI), синим и голубым – *Fermi*-GBM (детекторы BGO). Свёртка модели CPL с параметрами $\alpha = -0.23$, $E_{\rm p} = 117$ кэВ и $F = 1.46 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹ с матрицами отклика детекторов показана сплошными ступенчатыми линиями. На нижней панели показана невязка модели с данными.

ге гамма-всплесков, детектированных *Fermi*-GBM³ [114, 118], и в каталоге гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, представленном в настоящей работе. Схожая оценка имеет место и для фотонного индекса $\alpha \sim +0.11$, полученного для пикового спектра.

Интегральный энергетический поток за временной интервал T_{100} (от $T_0 - 1.422$ с до $T_0 + 6.608$ с), полученный в результате совместного временно́го и спектрального анализа, составляет $1.17^{+0.05}_{-0.05} \times 10^{-5}$ эрг см⁻², а пиковый энергетический поток, вычисленный на масштабе 64-мс (пиковая скорость счёта достигается в момент времени $T_0 + 0.146$ с), составляет $4.76^{+0.97}_{-0.95} \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹ (энергетика приведена в диапазоне 1 кэВ–10 МэВ). С учётом красного смещения источника всплеска z = 1.32 [120, 121] и стандартной космологической модели с параметрами $H_0 = 67.3$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ и $\Omega_M = 0.315$ [72], изотропные эквиваленты энерговыделения и пиковой светимости, вычисленные в болометрическом диапазоне 1 кэВ–10 МэВ в космологической системе отсчёта всплеска, составляют $E_{\rm iso} = 5.54^{+0.26}_{-0.24} \times 10^{52}$ эрг и $L_{\rm peak,iso} = 5.24^{+1.07}_{-1.05} \times 10^{52}$ эрг с⁻¹, соответственно.

3.10 Заключение

В данной главе представлен временной и спектральный анализ гаммавсплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд. На основании полученных результатов построено распределение гамма-всплесков выборки на плоскости жёсткость-длительность в системах отсчёта наблюдателя и источника всплеска. Также обсуждается распределение фотонных индексов в контексте синхротронной ударноволновой модели генерации излучения гаммавсплесков. Проведено сравнение полученных результатов с данными спектральных каталогов экспериментов *CGRO*-BATSE и *Fermi*-GBM. Представлены результаты совместного анализа гамма-всплеска GRB 140801А по данным экспериментов Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM.

Получены следующие результаты:

³http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/fermi/fermigbrst.html

- 1. В результате анализа кривых блеска определены длительности и спектральная задержка излучения гамма-всплесков.
- 2. Определены спектральные параметры гамма-всплесков для моделей BAND и CPL. Выбраны модели, наилучшим образом описывающие интегральный и пиковый спектр каждого всплеска.
- 3. Исследованы распределения жёсткость-длительность в системах отсчёта наблюдателя и источника гамма-всплеска. В системе отсчёта наблюдателя можно отметить кластеризацию гамма-всплесков: всплески типа I являются короткими/жёсткими, всплески типа II – длинными/мягкими. В космологической системе отсчёта наблюдается «размытие» границ кластеров за счёт большего разброса красных смещений всплесков типа II.
- 4. Проведено сравнение описательной статистики спектральных параметров гамма-всплесков по данным экспериментов Конус-*Винд*, *CGRO*-ВАТЅЕ и *Fermi*-GBM, установлено согласие параметров.
- 5. Установлено, что результаты спектрального анализа данных Конус-Винд, Fermi-GBM и совместного анализа данных обоих приборов по GRB 140801A согласуются, причём систематическая ошибка оценки эффективной площади в матрицах отклика детекторов двух экспериментов не превышает 5%.

По материалам Главы 3 на защиту выносится следующее положение:

• Временные и спектральные параметры 150 гамма-всплесков с известным космологическим красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд*.

Результаты отражены в публикациях:

- D. D. Frederiks, ..., A. E. Tsvetkova et al. The Ultraluminous GRB 110918A // Astrophys. J. 2013. Vol. 779. p. 151;
- 2. A. A. Volnova, ..., A. E. Tsvetkova et al. GRB 051008: a long, spectrally hard dust-obscured GRB in a Lyman-break galaxy at $z \approx 2.8$ // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2014. Vol. 442, p. 2586;

- V. M. Lipunov, ..., A. E. Tsvetkova et al. The optical identification of events with poorly defined locations: the case of the *Fermi* GBM GRB 140801A // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2016. Vol. 455, p. 712;
- A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii et al. The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode // Astrophys. J. 2017. Vol. 850 p. 161.

M_{MS}	t_0	t_{1000}	t_5	t_{90}	t_{25}	t_{50}	$ au_{ m lagG2G1}$	$ au_{ m lagG3G1}$	$\tau_{ m lagG3G2}$
всплеска	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)
GRB 970228	-0.456	56.584	-0.002 ± 0.024	53.442 ± 2.891	0.592 ± 0.048	$39.280{\pm}2.556$:	:	:
GRB 970828	-4.248	94.936	$0.864 {\pm} 0.112$	66.208 ± 2.781	$7.680{\pm}0.161$	17.792 ± 0.310		:	: :
GRB 971214	-9.060	16.564	-9.060 ± 2.082	15.892 ± 2.133	-3.172 ± 2.951	$6.724{\pm}2.970$:	:
GRB 990123	-17.312	111.200	1.600 ± 0.161	62.016 ± 1.179	$7.904{\pm}0.072$	$26.336 {\pm} 0.757$	$0.681 {\pm} 0.091$	0.619 ± 0.099	0.165 ± 0.050
GRB 990506	-0.390	164.742	1.952 ± 0.041	128.608 ± 0.654	12.032 ± 0.088	$83.392{\pm}2.565$:	:
GRB 990510	-0.320	69.568	$0.688 {\pm} 0.186$	55.888 ± 8.108	38.976 ± 1.735	$5.760{\pm}1.745$		÷	:
GRB 990705	-1.698	67.746	1.648 ± 0.066	33.232 ± 1.120	7.488 ± 0.096	$14.720{\pm}0.211$	$0.053 {\pm} 0.016$	0.103 ± 0.063	0.016 ± 0.014
GRB 990712	-1.637	18.821	-1.637 ± 0.862	16.629 ± 1.777	$0.784{\pm}0.173$	10.784 ± 0.470		:	
GRB 991208	-0.148	76.436	0.688 ± 0.016	63.056 ± 0.481	$5.136{\pm}1.562$	$53.680{\pm}1.567$:	
GRB 991216	-17.477	44.629	0.672 ± 0.032	14.528 ± 0.140	$3.264{\pm}0.025$	$4.704 {\pm} 0.154$:	:
GRB 000131	-77.719	105.735	-74.775 ± 2.944	96.471 ± 3.125	$-18.839{\pm}12.138$	$27.719{\pm}12.280$		÷	:
Пъли в передания.	 ;								
ипюгомидтт	л.								
1. Полоз	КИТеЛЬН	іые знач	іения 7 _{lag} сооті	SETCTBYIOT 3a,	тержке излуче:	ния в мягких	: Каналах от	носительно	излучения
л боло	אדיזמאג פנ	энел Анэ	о лепе						

Таблица 3.1: Длительности и спектральные задержки излучения гамма-всплесков.

- D UUILO MOULNIA NARANIAA.
- 2. В данной работе, для наглядности, представлены первые несколько строк таблицы. Полная версия данной таблицы размещена на сайте ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу http://www.ioffe.ru/LEA/zGRBs/ triggered/KW_GRBs_z_trig_tables.zip.

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана
2	0.096	5	1.50	1.32
T_{100} (c)	0.124	484.858	67.689	37.312
T_{90} (c)	0.070	440.826	46.557	21.664
T_{50} (c)	0.034	167.290	16.959	7.616
$T_{100,z}$ (c)	0.088	170.884	29.476	13.974
$T_{90,z}$ (c)	0.052	121.954	19.447	9.677
$T_{50,z}$ (c)	0.025	49.733	7.220	3.002
$ au_{ m lagG2G1}~(m mc)$	0.6	2495	292	150
$ au_{ m lagG3G1}~(m mc)$	4.8	5106	543	343
$ au_{ m lagG3G2}~(m mc)$	2.1	765	176	132
$ au_{ m lagG2G1,z}$ (MC)	0.4	1290	143	68
$ au_{ m lagG3G1,z}$ (MC)	3.7	2630	257	133
$ au_{ m lagG3G2,z}$ (MC)	1.4	388	85	68
$E_{\rm p,i}$ (кэВ), тип I	468	3516	953	640
$E_{\rm p,p}$ (кэВ), тип I	468	3386	966	671
$E_{\mathrm{p,i,z}}$ (кэВ), тип I	658	6691	1637	988
$E_{\mathrm{p,p,z}}$ (кэВ), тип I	658	6444	1647	991
$E_{\rm p,i}$ (кэВ), тип II	37	1083	298	238
$E_{\rm p,p}$ (кэВ), тип II	37	1511	360	271
$E_{\rm p,i,z}$ (кэВ), тип II	54	2703	775	661
$E_{\mathrm{p,p,z}}$ (кэВ), тип II	53	5137	931	752
$S \; (\text{эрг cm}^{-2})$	1.13×10^{-6}	2.86×10^{-3}	1.07×10^{-4}	2.51×10^{-5}
$F_{\text{peak},1024}$ (эрг см ⁻² с ⁻¹)	5.56×10^{-7}	5.08×10^{-4}	1.42×10^{-5}	3.45×10^{-6}
$F_{\rm peak, 64}~({\rm эрг~cm^{-2}~c^{-1}})$	9.51×10^{-7}	9.02×10^{-4}	2.55×10^{-5}	6.19×10^{-6}
$F_{\rm peak, 64, r}$ (эрг см ⁻² с ⁻¹)	6.89×10^{-7}	8.71×10^{-4}	2.33×10^{-5}	5.41×10^{-6}
$E_{\rm iso}$ (эрг)	4.18×10^{49}	5.81×10^{54}	5.55×10^{53}	1.93×10^{53}
$L_{\rm iso}~({\rm spr}~{\rm c}^{-1})$	2.94×10^{50}	4.65×10^{54}	2.55×10^{53}	8.32×10^{52}
Фактор коллимации	5.4×10^{-4}	3.0×10^{-2}	6.5×10^{-3}	3.2×10^{-3}
E_{γ} (эрг)	1.70×10^{49}	1.23×10^{52}	1.04×10^{51}	3.98×10^{50}
L_{γ} (эрг с ⁻¹)	4.22×10^{48}	5.50×10^{51}	4.39×10^{50}	1.62×10^{50}

Таблица 3.2: Описательная статистика параметров гамма-всплесков исследуемой выборки

	$1 t_{ m start}$	ΔT	Модель	σ	β	E_{p}	F	$\chi^2/d.o.f.$
всплеска спект	pa (c)	(c)				$(\mathrm{Ke}\mathrm{B})$	$(10^{-6} \ \mathrm{spr} \ \mathrm{cm}^{-2} \ \mathrm{c}^{-1})$	(Вероятн.)
GRB 970228 i	0.000	8.448	CPL^{\dagger}	$-1.27\substack{+0.24\\-0.22}$		$165\substack{+39\\-25}$	$0.53\substack{+0.06\\-0.05}$	$44.9/56 \ (0.86)$
1:			Band	$-1.24\substack{+0.31\\-0.22}$	$-2.82\substack{+0.60\\-7.18}$	159^{+38}_{-36}	$0.60\substack{+0.06\\-0.06}$	$44.5/55 \ (0.84)$
d	0.000	0.256	CPL^{\dagger}	$-0.81\substack{+0.32\\-0.27}$		309^{+102}_{-60}	$3.38\substack{+0.42\\-0.40}$	$13.3/24 \ (0.96)$
d			Band	$-0.76\substack{+0.49\\-0.29}$	$-2.64\substack{+0.70\\-7.36}$	286^{+102}_{-105}	$4.14_{-0.47}^{+0.47}$	$13.0/23 \ (0.95)$
GRB 970828 i	0.000	70.656	CPL	$-0.86\substack{+0.04\\-0.04}$:	346^{+19}_{-17}	$0.89\substack{+0.03\\-0.03}$	$72.6/66 \ (0.27)$
			$\operatorname{Band}^{\dagger}$	$-0.73\substack{+0.06\\-0.06}$	$-2.18\substack{+0.11\\-0.15}$	271^{+24}_{-22}	$1.33\substack{+0.05\\-0.05}$	$63.5/65 \ (0.53)$
d	17.920	5.120	CPL	$-0.91\substack{+0.05\\-0.05}$		355_{-25}^{+29}	$2.20\substack{+0.10\\-0.10}$	68.6/79 (0.79)
d			$\operatorname{Band}^{\dagger}$	$-0.78\substack{+0.08\\-0.07}$	$-2.18\substack{+0.12\\-0.15}$	271^{+31}_{-28}	$3.23\substack{+0.27\\-0.26}$	$57.6/78 \ (0.96)$
GRB 971214 i	0.000	8.448	CPL^{\dagger}	$-0.50\substack{+0.19\\-0.17}$		179^{+20}_{-16}	$0.39\substack{+0.03\\-0.03}$	$72.2/78 \ (0.66)$
1			Band	$-0.32\substack{+0.26\\-0.22}$	$-2.39_{-0.35}^{+0.23}$	154_{-19}^{+20}	$0.58\substack{+0.11\\-0.09}$	67.8/77 (0.77)

Таблица 3.3: Спектральные параметры гамма-всплесков

[†]Modenb «BEST».

Примечание — В данной работе, для наглядности, представлены первые несколько строк таблицы. Полная версия данной таблицы размещена на сайте ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу http://www.ioffe.ru/LEA/zGRBs/ triggered/KW_GRBs_z_trig_tables.zip.

Конус-Винд.	ı						ſ	
Данные	Модель	GBM-NaI	GBM-BGO	σ	β	E_{p}	F^1	$\chi^2/d.o.f.$
	1	норм. множитель	норм. множитель			$(\mathrm{Re}\mathrm{B})$	$(\times 10^{-6} \ \mathrm{3pr} \ \mathrm{cm}^{-2} \ \mathrm{c}^{-1})$	
			Интегральный сі	пектр (0-7.68	$0 c)^2$			
KW	CPL	:	:	$-0.44_{-0.17}^{+0.18}$:	108^{+5}_{-4}	$1.50\substack{+0.07\\-0.07}$	75/71
KW	Band	÷	:	$-0.44\substack{+0.17\\-0.15}$	< -4.2	108^{+5}_{-4}	$1.48\substack{+0.07\\-0.05}$	75/70
GBM	CPL	1	$1.52\substack{+0.34 \\ -0.32}$	$-0.27\substack{+0.07\\-0.07}$	÷	123^{+4}_{-4}	$1.44\substack{+0.04\\-0.03}$	318/465
GBM	Band	1	$1.47\substack{+0.35\\-0.33}$	$-0.26\substack{+0.08\\-0.07}$	< -3.5	$122\substack{+4\\-4}$	$1.47\substack{+0.09\\-0.06}$	317/464
$\mathrm{KW}\mathrm{+}\mathrm{GBM}^3$	CPL	$0.96\substack{+0.03\\-0.03}$	$1.64\substack{+0.36\\-0.34}$	$-0.23\substack{+0.06\\-0.06}$	÷	117^{+3}_{-3}	$1.46\substack{+0.05\\-0.05}$	421/538
$\mathrm{KW}\mathrm{+}\mathrm{GBM}^3$	Band	$0.96\substack{+0.03\\-0.03}$	$1.64\substack{+0.36\\-0.34}$	$-0.23\substack{+0.07\\-0.06}$	< -4.0	117^{+3}_{-3}	$1.46\substack{+0.07\\-0.05}$	420/537
			Пиковый спек	стр (0–0.256 с	$)^2$			
KW	CPL	÷	:	$+0.39\substack{+0.69\\-0.56}$:	121^{+13}_{-12}	$3.20\substack{+0.38\-0.36}$	27/24
KW	Band	:	:	$+0.49^{+0.94}_{-0.65}$	< -3.2	119^{+15}_{-15}	$3.25\substack{+0.46\\-0.40}$	27/23
GBM	CPL	1	$1.26\substack{+0.77\\-0.64}$	$-0.02\substack{+0.25\\-0.23}$:	140^{+15}_{-12}	$3.36\substack{+0.28\\-0.25}$	86/128
GBM	Band	1	$1.19\substack{+0.81\\-0.65}$	$+0.02\substack{+0.34\\-0.25}$	< -2.5	136^{+17}_{-19}	$3.55^{+1.32}_{-0.43}$	86/127
$\mathrm{KW}\mathrm{+}\mathrm{GBM}^3$	CPL	$0.96\substack{+0.11\\-0.09}$	$1.42\substack{+0.82\\-0.71}$	$+0.11\substack{+0.22\\-0.20}$	÷	131^{+10}_{-8}	$3.36\substack{+0.33\\-0.33}$	116/154
$\rm KW+GBM^3$	Band	$0.96\substack{+0.11\\-0.09}$	$1.42\substack{+0.82\\-0.71}$	$+0.11\substack{+0.23\\-0.20}$	< -3.4	131^{+9}_{-10}	$3.35_{-0.17}^{+0.45}$	116/153
Ļ	:							

Таблица 3.4: Спектральные параметры гамма-всплеска GRB 140801A по данным экспериментов *Fermi*-GBM и

¹ В диалазоне энергий 1 кэВ-10 МэВ.

 2 Относительно триггерного времени прибора Конус- $Bu h \partial.$

³ Нормировочный множитель данных эксперимента Конус-Винд равен единице.

Примечание — Все ошибки величин в данной таблице приведены на уровне значимости 90%.

Глава 4

Энергетика гамма-всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*

4.1 Введение

Настоящая глава посвящена определению энергетики 150 гаммавсплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, в системе отсчёта наблюдателя и космологической системе отсчёта всплеска. Исследуемая выборка всплесков представлена в Главе 2, методика и результаты временно́го и спектрального анализа выборки представлены в Главе 3.

Глава организована следующим образом. В разделе 4.2 дано описание методики расчёта потоков энергии гамма-всплесков системе отсчёта наблюдателя. В разделе 4.3 описана методика вычисления изотропного эквивалента энергетики гамма-всплесков в космологической системе отсчёта с учётом *k*коррекции. В разделе 4.4 описывается методика оценки энергетики всплесков в космологической системе с учётом коллимации излучения. В разделе 4.5 приведены результаты вычисления энергетики гамма-всплесков исследуемой выборки. В разделе 4.6 представлено сравнение энергетики 26 гаммавсплесков, зарегистрированных в триггерном режиме в экспериментах Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM.
4.2 Интегральные и пиковые энергетические потоки гамма-всплесков в системе отсчёта наблюдателя

Интегральные энергетические потоки (S) и пиковые энергетические потоки (F_{peak}) были вычислены из нормировочных потоков (в диапазоне 10 кэВ– 10 МэВ) интегральных и пиковых спектров, соответственно, причём использовались только результаты наилучших аппроксимаций (см. Главу 3). Поскольку временной интервал накопления интегрального спектра, как правило, не охватывает полностью интервал T_{100} , проводилась коррекция интегрального потока S, учитывающая излучение гамма-всплеска вне интервала накопления интегрального спектра. Для вычисления пикового потока $F_{\rm peak}$ были использованы три временных масштаба ΔT_{peak} : наряду с двумя часто используемыми в литературе шкалами, 1024 мс и 64 мс, была также введена «космологическая» шкала (1 + z) 64 мс – она позволяет компенсировать эффект космологического растяжения кривой блеска всплеска в системе отсчёта наблюдателя и использовалась для вычисления изотропной пиковой светимости L_{iso} в космологической системе отсчёта. Пиковые потоки F_{peak} были рассчитаны путём домножения нормировочных потоков на отношение пиковой скорости счёта на временном масштабе ΔT_{peak} к средней за пиковый спектр скорости счёта. Как правило, для коррекции интегральных и пиковых потоков использовались кривые блеска в канале G2+G3. В некоторых случаях, в зависимости от жёсткости излучения и интенсивности конкретного всплеска, использовались данные в каналах G1+G2, G2 или G1+G2+G3.

4.3 *k*-коррекция и энергетика гамма-всплесков в космологической системе отсчёта

Энергетика гамма-всплесков в космологической системе отсчёта, а именно, изотропный эквивалент энерговыделения E_{iso} и изотропный эквивалент пиковой светимости L_{iso} , может быть вычислена с учётом k-коррекции как $E_{\rm iso} = \frac{4\pi D_{\rm L}^2}{1+z} \times S \times k$ и $L_{\rm iso} = 4\pi D_{\rm L}^2 \times F_{\rm peak} \times k$, где $D_{\rm L}$ – фотометрическое расстояние. Коэффициент коррекции k, приводящий диапазон вычисления энергетики в космологической системе к унифицированному интервалу энергий (см., например, [122] или [123]), в терминах нормировочного энергетического потока F наилучшей спектральной модели можно рассчитать как

$$k = \frac{F[E_1/(1+z), E_2/(1+z)]}{F[e_1, e_2]},$$

где $[e_1 = 10 \text{ кэВ}, e_2 = 10 \text{ МэВ}]$ – диапазон вычисления потоков в системе отсчёта наблюдателя, а $[E_1, E_2]$ – «болометрический» в космологической системе отсчёта диапазон вычисления энергетики. В качестве нижней границы болометрического диапазона в космологической системе отсчёта было принято использованное в [67] и многих последующих работах значение $E_1 = 1 \text{ кэВ}$, а в качестве E_2 была выбрана энергия $(1 + z) e_2 = (1 + z) 10 \text{ МэВ}$. Таким образом, принятая в настоящей работе верхняя граница диапазона энергий в космологической системе отсчёта выше, чем широко используемый предел 10 МэВ. Это связано с тем, что верхняя граница спектрального диапазона прибора Конус-*Винд* является достаточно высокой (> 10 МэВ), и ограничение диапазона вычисления энергетики значение $E_2 = 10 \text{ МэВ}$ ввело бы дополнительную погрешность в вычисление энергетики за счёт искусственного сужения болометрического диапазона в космологической системе отсчёта.

4.4 Энергетика гамма-всплесков, скорректированная на коллимацию излучения

Зная время ахроматического излома кривой блеска послесвечения гаммавсплеска t_{jet} (jet break time), можно оценить энерговыделение и пиковую светимость всплеска с учётом коррекции на коллимацию излучения: $E_{\gamma} = E_{iso} \cdot f_b$ и $L_{\gamma} = L_{iso} \cdot f_b$, соответственно, где $f_b = (1 - \cos \theta_{jet}) - \phi$ актор коллимации, а θ_{jet} – угол коллимации.

Темп торможения ультрарелятивистского файербола за счет взаимодействия с окружающей источник гамма-всплеска средой определяется, в значительной мере, градиентом её плотности. В случае, когда окружающая источник среда схожа с межзвёздной и характеризуется постоянной плотностью *n* (далее – гомогенная среда «HM»), угол коллимации можно вычислить по формуле [66]:

$$\theta_{\text{jet,HM}} = \frac{1}{6} \left(\frac{t_{\text{jet}}}{1+z} \right)^{3/8} \left(\frac{n\eta_{\gamma}}{E_{\text{iso},52}} \right)^{1/8}, \qquad (4.1)$$

где η_{γ} – эффективность превращения файерболом кинетической энергии выброса вещества в собственное гамма-излучение всплеска, $E_{\rm iso,52}$ – энерговыделение собственного излучения в единицах 10^{52} эрг, а $t_{\rm jet}$ измеряется в днях. В настоящей работе для расчётов были использованы значения величин $\eta_{\gamma} = 0.2$ и n = 1 см⁻³ [52].

В случае, когда источник всплеска окружён неоднородной средой с градиентом плотности, характерным для звёздного ветра, $n(r) \propto r^{-2}$ (далее – «WM»), угол коллимации можно вычислить по формуле [124]:

$$\theta_{\rm jet,WM} = 0.2016 \left(\frac{t_{\rm jet}}{1+z}\right)^{1/4} \left(\frac{\eta_{\gamma} A_*}{E_{\rm iso,52}}\right)^{1/4},$$
(4.2)

где $A_* = (\dot{M}_w/(4\pi v_w)/(5\times 10^{11} \ {\rm r} \ {\rm cm}^{-1})$ – параметр звёздного ветра, \dot{M}_w – темп потери массы вследствие звёздного ветра, а v_w – скорость ветра. Следуя [125], в настоящей работе принимается значение $A_* = 1$ ($A_* \sim 1$ является типичным значением для звёзд Вольфа-Райе).

Для вычисления фактора коллимации излучения в настоящей работе были отобраны наиболее надёжные оценки t_{jet} , определённые по кривым блеска послесвечения в видимом/инфракрасном диапазоне длин волн, либо в двух различных диапазонах длин волн одновременно (например, рентгеновском и радио), то есть максимально удовлетворяющие критерию ахроматичности излома. Для выборки гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, в литературе встречаются оценки t_{jet} для ~60 всплесков, из которых только 32 удовлетворяют указанному выше критерию. Не использованные оценки t_{jet} были сделаны по наблюдениям только в рентгеновском диапазоне или являются верхними (нижними) пределами. Из 32 отобранных значений t_{jet} два относятся ко всплескам типа I (GRB 051221А и GRB 030603В), 30 – к типу II. Для 23 событий в литературе приводится наиболее вероятный профиль среды, окружающей источник гамма-всплеска (для 14 – HM и для девяти – WM).

4.5 Результаты

В табл. 4.1 приведены вычисленные значения наблюдаемых потоков энергии для 150 исследованных событий и оценки изотропного эквивалента их энергетики в космологической системе отсчёта. В первых двух колонках приведён идентификатор гамма-всплеска и его красное смещение z. Далее следуют интегральные потоки S, пиковые энергетические потоки на трёх шакалах времени: $F_{\text{peak},1024}$ (1024 мс), $F_{\text{peak},64}$ (64 мс) и $F_{\text{peak},64,r}$ ((1 + z) 64 мс). Также для каждого пикового потока приведено время начала интервала кривой блеска, на котором достигается пиковая скорость счёта на соответствующем масштабе. Колонки E_{iso} и L_{iso} содержат изотропное энерговыделение и изотропную пиковую светимость, определенную, с использованием $F_{\text{peak},64,r}$, на шкале 64 мс в космологической системе отсчёта всплеска. При необходимости, приведённые в таблице значения L_{iso} могут быть пересчитаны на шкалы $\Delta T = 64$ мс или 1024 мс (в системе отсчёта наблюдателя) следующим образом:

$$L_{\rm iso}(\Delta T) = \frac{F_{\rm peak}(\Delta T)}{F_{\rm peak,64,r}} L_{\rm iso}$$

В двух последних колонках таблицы приведены параметры, важные для учёта влияния эффектов наблюдательной селекции: пороговый болометрический энергетический поток F_{lim} и z_{max} , космологический предел (горизонт) детектирования гамма-всплеска в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд* (см. Главу 5).

На рис. 4.1 представлены распределения полученных значений энергетики в системах отсчёта наблюдателя и всплеска. Среди гамма-всплесков исследуемой выборки можно отметить GRB 130427A – всплеск с наибольшим интегральным потоком ($S = 2.86 \times 10^{-3}$ эрг см⁻²) и GRB 090323, характеризующийся наибольшим изотропным энерговыделением ($E_{\rm iso} = 5.81 \times 10^{54}$ эрг). GRB 110918A [64] является самым ярким, в терминах как пикового энергетического потока, так и изотропной пиковой светимости ($F_{\rm peak,64} = 9.02 \times 10^{-4}$ эрг см⁻² с⁻¹; $L_{\rm iso} = 4.65 \times 10^{54}$ эрг с⁻¹).

Данные об энергетике, поправленной на коллимацию излучения, для подвыборки 32 гамма-всплесков с надёжными оценками t_{jet} сведены в таблицу 4.2. Первая колонка содержит идентификатор гамма-всплеска. Затем при-



Рисунок 4.1: Распределение энергетики гамма-всплесков: интегральные энергетические потоки S – а); пиковые энергетические потоки F_{peak} – б); изотропный эквивалент энерговыделения E_{iso} и энерговыделение с учётом коллимации излучения E_{γ} – в); изотропная пиковая светимость L_{iso} и пиковая светимость с поправкой на коллимацию излучения L_{γ} – г).

ведены t_{jet} (время ахроматического излома кривой блеска послесвечения) и тип среды, окружающей источник гамма-всплеска (HM или WM). Две следующие колонки содержат углы коллимации θ_{jet} и соответствующие факторы коллимации f_b , а в последних двух колонках представлена поправленная на коллимацию энергетика E_{γ} и L_{γ} . Всплески, для которых наиболее вероятный тип окружающей среды неизвестен, занимают две строчки в табл. 4.2: расчёт был произведён для обоих вариантов. Ссылки на публикации, содержащие информацию о t_{jet} и параметрах окружающей источники всплесков среды, можно найти в табл. 5 работы [77].

Для исследуемой подвыборки всплесков оцененные в настоящей работе углы коллимации находятся в диапазоне от 1.9° до 25.5° , а соответствующие факторы коллимации – от 5.5×10^{-4} до 0.098. Самым ярким всплеском, как в терминах энерговыделения, так и пиковой светимости, скорректированных на коллимацию излучения, является GRB 090926A ($E_{\gamma} \simeq 1.23 \times 10^{52}$ эрг, $L_{\gamma} \simeq 5.50 \times 10^{51}$ эрг с⁻¹, $\theta_{jet} \simeq 6.20^{\circ}$). Распределения энергетики с поправкой на коллимацию излучения, E_{γ} и L_{γ} , приведены на рис. 4.1. Описательная статистика энергетики, определённой для гамма-всплесков исследуемой выборки, приведена в табл. 3.2.

Коррекция на коллимацию излучения сдвигает пик распределения энергетики гамма-всплесков на ~ 2.5 порядка величины, при этом ширина распределений на логарифмической шкале сужается на ≤ 0.4 порядка. Отметим, что истинное распределение энергетики, скорректированной на коллимацию излучения, может быть шире, чем наблюдаемое, в силу наблюдательной селекции. Данный эффект вызван трудностью измерения момента t_{jet} на поздних стадиях послесвечения и соответствующим уменьшением относительной доли всплесков с широкими углами коллимации в силу наблюдательной селекции [126].

4.6 Сравнение энергетики 26 гамма-всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме в экспериментах Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM

В рамках работы, посвященной исследованию предельного изотропного энеровыделения гамма-всплесков по данным экспериментов Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM [127, 128], основные результаты которой не входят в настоящую диссертационную работу, было проведено сравнение оценок энергетики 26 длинных ($T_{90} > 2$ с) гамма-всплесков с известным красным смещением, полученных в обоих экспериментах.

В указанной работе, помимо ограничения на минимальную длительность всплеска, был использован ряд дополнительных критериев для отбора событий: длительность всплеска также не должна была превышать 1000 с; спектральная модель, наилучшим образом описывающая данные, должна содержать излом или обрезание в области больших энергий (то есть не должна быть простой степенной функцией); пиковый фотонный поток всплеска должен быть достаточно высоким (в 1.5 раза превышать пороговый), чтобы избежать влияния триггерного порога детекторов: $P_{\rm f} > 1.05$ фотонов см⁻² с⁻¹ (в диапазоне энергий 50–300 кэВ) для данных прибора *Fermi*-GBM и $P_{\rm f} > 3.5$ фотона см⁻² с⁻¹ (в диапазоне энергий 50–200 кэВ) для данных прибора Конус-*Винд* (потоки приведены на временно́м масштабе 1 с); наконец, красное смещение всплесков должно лежать в диапазоне 1 < z < 5. Изотропное энерговыделение $E_{\rm iso}$ вычисляется в «стандартном» болометрическом диапазоне 1–10⁴ кэВ в космологической системе отсчёта, то есть *k*коррекция отличается от описанной в Разделе 4.3 настоящей главы.

Набор гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в эксперименте *Fermi*-GBM с 2008 г. по середину 2016 г., был сформирован на основании таблицы Й. Грайнера¹. Параметры и тип спектральных моделей, наилучшим образом описывающих данные *Fermi*-GBM, были взяты из каталогов [114, 118]. Пороговый поток детектирования гамма-всплесков в эксперименте *Fermi*-GBM был принят на уровне 0.7 фотонов см⁻² с⁻¹ [129].

¹http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html

Параметры моделей, наилучшим образом описывающих интегральные спектры гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд*, были получены в ходе настоящей диссертационной работы (Глава 3).

После применения указанных выше критериев отбора гамма-всплесков был сформирован набор из 52 всплесков, зарегистрированных в эксперименте *Fermi*-GBM, и 69 всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд, причём 26 гамма-всплесков из указанных выборок были зарегистрированы в обоих экспериментах. На рис. 4.2 представлено сравнение изотропного энерговыделения общих всплесков по данным двух экспериментов. Следует отметить, что для большинства из них (24 из 26) разница в оценке энергетики не превышает 25%. Наименьшие различия (<15%) наблюдаются для всплесков, интегральные спектры которых наилучшим образом аппроксимируются одной и той же спектральной моделью в обоих экспериментах. В редких случаях существенного расхождения в энергетике по данным двух приборов, энерговыделение, измеренное в эксперименте Fermi-GBM выше, чем по данным Конус-*Винд*. Наибольшее различие в энергетике достигается для двух всплесков: 30% для GRB 081222 ($E_{\rm iso} = 2.4 \times 10^{53}$ эрг по данным Fermi-GBM и $E_{iso} = 1.7 \times 10^{53}$ эрг по данным Конус-Винд); и 35% для GRB 110731A ($E_{\rm iso} = 4.6 \times 10^{53}$ эрг по данным Fermi-GBM и $E_{\rm iso} = 3.0 \times 10^{53}$ эрг по данным Конус-Buhd). Указанные различия уменьшаются до значений 21% и 30%, соответственно, при использовании одинаковых моделей для аппроксимации спектральных данных.

Хорошее согласие и отсутствие систематических различий энергетики гамма-всплесков, вычисленной по данным двух приборов с различными триггерными порогами и различающимися методиками спектрального анализа, указывает на достоверность анализа данных эксперимента Конус-*Винд*, осуществлённого в настоящей работе.

80



Рисунок 4.2: Сравнение изотропного энерговыделения гамма-всплесков по данным экспериментов Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM из работы [127, 128]. Показанный на рис. набор содержит 26 всплесков, зарегистрированных в обоих экспериментах. Красными кругами обозначены всплески, для которых модели, наилучшим образом аппроксимирующие интегральные спектры, по данным обоих приборов, совпадают. Синими ромбами обозначены всплески, для которых наилучшие спектральные модели не совпадают. Типичные ошибки энерговыделения на уровне 90% совпадают с размером символов. Штриховая линия обозначает равное энерговыделение по данным обоих приборов.

4.7 Заключение

В данной главе изложена методика вычисления энергетики гаммавсплесков с учётом космологической *k*-коррекции. Приведены результаты применения описанной методики к выборке гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*. Для 32 всплесков выборки с известным временем ахроматического излома кривой блеска послесвечения оценена энергетика с учётом коррекции на коллимацию излучения. Также проведено сравнение энергетики 26 гамма-всплесков, зарегистрированных в экспериментах Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM.

Получены следующие результаты:

- 1. Определены полные и пиковые потоки энергии 150 гамма-всплесков исследуемой выборки в системе отсчёта наблюдателя.
- 2. Для них же, с учётом красного смещения и *k*-коррекции, получены оценки изотропного эквивалента энерговыделения и пиковой светимости в болометрическом диапазоне в космологической системе отсчёта.
- 3. Для 32 событий выборки проведена оценка энергетики гамма-всплесков в космологической системе отсчёта с учётом коллимации излучения. Коррекция на коллимацию излучения уменьшает значения энергетики гамма-всплесков на ~2.5 порядка величины по сравнению с изотропным эквивалентом, при этом ширина распределений на логарифмической шкале сужается на ≲0.4 порядка величины.
- 4. Проведено сравнение энергетики для выборки из 26 гамма-всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме как в эксперименте Конус-Винд, так и в эксперименте Fermi-GBM. Установлено, что разница в оценке двумя экспериментами изотропного энерговыделения для >90% всплесков выборки не превышает 25%. В случае использования одинаковой модели для аппроксимации интегрального спектра данное различие составляет <15%.</p>

По материалам Главы 4 на защиту выносится следующее положение:

• Изотропный эквивалент полного энерговыделения и пиковой светимости 150 гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд*. Значения полного энерговыделения и пиковой светимости с коррекцией на коллимацию излучения для 32 гамма-всплесков выборки.

Результаты отражены в публикациях:

- D. D. Frederiks, ..., A. E. Tsvetkova et al. The Ultraluminous GRB 110918A // Astrophys. J. 2013. Vol. 779. p. 151;
- 2. A. A. Volnova, ..., A. E. Tsvetkova et al. GRB 051008: a long, spectrally hard dust-obscured GRB in a Lyman-break galaxy at $z \approx 2.8$ // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2014. Vol. 442, p. 2586;
- V. M. Lipunov, ..., A. E. Tsvetkova et al. The optical identification of events with poorly defined locations: the case of the *Fermi* GBM GRB 140801A // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2016. Vol. 455, p. 712;
- J.-L. Atteia, ..., A. E. Tsvetkova et al. The Maximum Isotropic Energy of Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. 2017. Vol. 837 p. 119;
- A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii et al. The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode // Astrophys. J. 2017. Vol. 850 p. 161.

Таблица 4.1: Эне	ргетин	ka ram	а-всплес	KOB.								
Идентификатор всплеска		S^a	$T_{ m peak,1024}{}^{b}$	$F_{ m peak,1024}{}^c$	$T_{ m peak, 64}{}^b$	$F_{ m peak,64}{}^c$	$T_{ m peak, 64, r}^{} b$	$F_{ m peak, 64, r}{}^c$	$E_{ m iso}{}^d$	$L_{ m iso}{}^e$	$F_{\lim}{}^{c}$	$z_{ m max}$
GRB 970228 0.	69 8.($07^{+0.49}_{-0.41}$	-0.512^{\dagger}	$2.24\substack{+0.43\\-0.34}$	0.106	$4.59\substack{+0.80\\-0.78}$	0.118	$4.12\substack{+0.66\\-0.64}$	12.01 ± 0.93	9.6 ± 1.5	0.92	1.32
GRB 970828 0.	96 10	$1.8^{+3.5}_{-3.6}$	20.256	$4.30\substack{+0.46\\-0.44}$	20.416	$6.16\substack{+0.88\\-0.87}$	20.416	$6.11\substack{+0.71\\-0.71}$	262.2 ± 9.1	30.9 ± 3.6	1.1	1.85
GRB 971214 3.	42 5.7	$72\substack{+0.24\\-0.22}$	2.752	$0.604\substack{+0.071\\-0.068}$	5.664	$0.99\substack{+0.25\\-0.25}$	-0.280	$0.69\substack{+0.12\\-0.11}$	146.3 ± 6.1	78 ± 13	0.44	4.05
GRB 990123 1.	60 31($0.6^{+8.0}_{-7.8}$	5.872	$25.6^{+1.1}_{-1.1}$	6.048	$29.1\substack{+2.3\\-2.3}$	5.984	$27.7^{+1.6}_{-1.6}$	2133 ± 54	490 ± 29	3.1	5.04
GRB 990506 1.	31 26.	$1.0^{+8.8}_{-8.8}$	87.040	$9.32\substack{+0.47\\-0.46}$	90.048	$13.8^{+1.1}_{-1.1}$	87.360	$12.13\substack{+0.69\\-0.68}$	1255 ± 43	134.2 ± 7.6	0.92	3.80
GRB 990510 1.	62 21.7	$72\substack{+0.89\\-0.82}$	44.160	$3.56\substack{+0.35\\-0.33}$	44.224	$5.57\substack{+0.80\\-0.78}$	44.544	$4.35\substack{+0.52\\-0.50}$	174.2 ± 8.1	81.0 ± 9.6	0.77	3.37
GRB 990705 0.	84 109	$9.0^{+3.8}_{-3.8}$	14.000	$4.80\substack{+0.44\\-0.42}$	15.856	$8.92\substack{+0.96\\-0.96}$	15.824	$8.36\substack{+0.76\\-0.76}$	218.1 ± 7.7	30.7 ± 2.8	0.84	2.02
† Так как запись кр	ивой бл	леска в	тригтерно	м режиме н	ачинаетс	зя со врем	ени $T_0 - 0$.512 с, шик	ЭВЫЙ ПОТОК М	ожет быть 1	тедооог	ценён
вследствие отсутсти	зия дан	HbIX C BI	ысоким вр	еменным ра	азрешени	ем до вре	мени T_0 —	0.512 c.				
^а В единицах 10 ⁻⁶ з)pr cm [−]	<u>م</u> .										
^ь Время начала бин	а кривс	ой блеск	са, содержа	ащего пико	вую скор	ость счёта	а на соотве	етствующе	1 macurra6e bj	ремени (в се	кундау	٤).
^с В единицах 10 ⁻⁶ з	$pr cm^{-5}$	$^{2} c^{-1}$.										
^d В единицах 10 ⁵¹ э	pr.											
^е В единицах 10 ⁵¹ э	pr c^{-1} .											
Примечание — Е	даннс	ой рабо	эте, для 1	нагляднос	ти, пре,	дставлен	ы первы	е несколь	ко строк та	блицы. Пс	лная	Bep-
сия данной табл	ицы ра	азмеще	ена на са	ійте ФТИ	им. А.	Φ. Moф	фе по ад	qpecy htt	p://www.ic	offe.ru/Ll	EA/zG	RBs/

triggered/KW_GRBs_z_trig_tables.zip.

Таблица 4.2: Энергетика гамма-всплесков, скорректированная на коллимацию излучения.

Идентификатор всплеска	$t_{ m jet}$ (дни)	$Cреда^a$	$ heta_{ m jet}$ (градусы)	$f_{ m b}$ $(imes 10^{-3})$	E_{γ} (10 ⁴⁹ эрг)	$L_{\gamma} \ (10^{49} \ { m spr} \ { m c}^{-1})$
GRB 990123	$2.06^{+0.83}_{-0.83}$	WM	$1.91 {\pm} 0.19$	$0.55 {\pm} 0.12$	118 ± 24	27.2 ± 5.7
GRB 990510	$1.31_{-0.07}^{+0.07}$	HM	$4.21 {\pm} 0.09$	$2.70 {\pm} 0.11$	47.1 ± 3.2	21.9 ± 1.0
GRB 990705	1^b	HM^{c}	$4.23 {\pm} 0.32$	$2.72 {\pm} 0.42$	$59.3 {\pm} 9.1$	8.36 ± 1.26
		WM	$3.07 {\pm} 0.16$	$1.43 {\pm} 0.15$	31.3 ± 3.2	$4.41 {\pm} 0.41$
GRB 990712	$1.61^{+0.19}_{-0.19}$	HM^{c}	$9.20 {\pm} 0.42$	12.9 ± 1.2	$4.96 {\pm} 0.68$	$1.54{\pm}0.28$
		WM	$10.1 {\pm} 0.4$	15.5 ± 1.1	$5.98 {\pm} 0.60$	1.85 ± 0.34
GRB 991216	$1.1_{-0.13}^{+0.13}$	WM	$2.16 {\pm} 0.06$	$0.71 {\pm} 0.04$	63.1 ± 3.9	36.3 ± 2.7
GRB $000301C$	$7.3_{-0.5}^{+0.5}$	HM	$9.33 {\pm} 0.30$	$13.2 {\pm} 0.9$	44.6 ± 7.2	75.0 ± 8.1
GRB 000418	$7.85_{-2.71}^{+2.71}$	$\mathrm{H}\mathrm{M}^{c}$	$9.62{\pm}1.25$	14.1 ± 3.9	135 ± 45	53.4 ± 16.3
		WM	$6.09{\pm}0.53$	$5.65 {\pm} 1.03$	$54.0{\pm}12.1$	21.4 ± 4.7
GRB 000926	$2.1_{-0.15}^{+0.15}$	WM	$3.07 {\pm} 0.06$	$1.43 {\pm} 0.06$	$39.8 {\pm} 2.5$	16.2 ± 2.1
GRB 010222	$0.93\substack{+0.15 \\ -0.06}$	WM	$1.88{\pm}0.06$	$0.54{\pm}0.03$	57.6 ± 3.8	12.6 ± 1.2
GRB 010921	35^{+5}_{-5}	HM	25.5 ± 1.4	$97.5 {\pm} 10.6$	$106 {\pm} 16$	17.0 ± 2.4
GRB 011121	$1.54_{-0.22}^{+0.22}$	WM	$4.49{\pm}0.16$	$3.07 {\pm} 0.23$	30.4 ± 2.3	$4.09 {\pm} 0.42$
GRB 020405	$2.4_{-0.45}^{+0.45}$	WM	$4.56{\pm}0.21$	$3.16{\pm}0.30$	37.1 ± 3.7	$5.45 {\pm} 0.74$
GRB 020813	$0.77\substack{+0.25 \\ -0.25}$	HM	$3.04{\pm}0.37$	$1.41 {\pm} 0.36$	107 ± 27	22.2 ± 5.5
GRB 030329	$0.69\substack{+0.08\\-0.06}$	HM	$6.02{\pm}0.23$	$5.51 {\pm} 0.43$	$9.11{\pm}0.87$	$1.23 {\pm} 0.10$
GRB 041006	$0.23_{-0.04}^{+0.04}$	WM	$5.13{\pm}0.23$	$4.00 {\pm} 0.37$	$2.75 {\pm} 0.26$	2.15 ± 0.42
GRB 050401	$1.5_{-0.5}^{+0.5}$	$\mathrm{H}\mathrm{M}^{c}$	$3.38 {\pm} 0.42$	$1.74{\pm}0.46$	80.6 ± 21.3	$37.0{\pm}10.1$
		WM	$2.33 {\pm} 0.20$	$0.83 {\pm} 0.14$	$38.4 {\pm} 6.8$	17.6 ± 3.5
GRB 050525A	$0.152_{-0.008}^{+0.008}$	$\mathrm{H}\mathrm{M}^{c}$	$2.83{\pm}0.06$	$1.22 {\pm} 0.05$	$3.43 {\pm} 0.17$	$2.33 {\pm} 0.10$
		WM	$3.31{\pm}0.05$	$1.67 {\pm} 0.05$	$4.68 {\pm} 0.16$	$3.18 {\pm} 0.19$
GRB 050820A	18^{+2}_{-2}	HM	$7.99 {\pm} 0.33$	$9.70 {\pm} 0.83$	1005 ± 95	$134{\pm}12$
GRB $051221A$	5^b	HM	14.0 ± 1.1	$29.9 {\pm} 4.7$	$9.20{\pm}1.51$	$67.6 {\pm} 10.5$
GRB 060614	$1.31_{-0.03}^{+0.03}$	HM	$9.72 {\pm} 0.11$	$14.30 {\pm} 0.32$	$3.89 {\pm} 0.31$	0.42 ± 0.02
GRB 061121	1.16^{b}	HM	$3.94{\pm}0.30$	$2.36 {\pm} 0.37$	71.7 ± 11.5	53.4 ± 8.3
GRB 070125	3.78^{b}	HM	$4.94{\pm}0.37$	$3.71 {\pm} 0.58$	474 ± 75	108 ± 17
GRB 071010B	$3.44_{-0.39}^{+0.39}$	$\mathrm{H}\mathrm{M}^{c}$	$9.22 {\pm} 0.41$	12.9 ± 1.2	18.7 ± 2.7	8.55 ± 1.06
		WM	8.12 ± 0.30	$10.0 {\pm} 0.7$	14.5 ± 1.6	6.62 ± 1.22
GRB 080319B	11.6^{+1}_{-1}	WM	$3.41 {\pm} 0.07$	$1.77 {\pm} 0.08$	278 ± 12	21.0 ± 1.3
GRB 090328	$9^{+11.6}_{-6}$	HM	10.7 ± 4.1	17.5 ± 16.0	190 ± 149	59.6 ± 46.1
GRB 090618	$0.5_{-0.11}^{+0.11}$	HM	$3.42 {\pm} 0.28$	$1.78 {\pm} 0.31$	45.0 ± 8.1	$4.74 {\pm} 0.79$
GRB 090926A	10^{+2}_{-2}	HM	$6.20 {\pm} 0.47$	$5.85 {\pm} 0.91$	1234 ± 189	550 ± 83
GRB 091127	$0.39_{-0.02}^{+0.02}$	HM^{c}	$4.46 {\pm} 0.09$	3.02 ± 0.13	$4.82 {\pm} 0.63$	3.45 ± 0.29
		WM	$4.92 {\pm} 0.10$	$3.68 {\pm} 0.15$	$5.87 {\pm} 0.63$	$4.20 {\pm} 0.74$

Таблица 4.2: Продолжение

Идентификатор всплеска	$t_{ m jet}$ (дни)	C реда a	$ heta_{ m jet}$ (градусы)	$\begin{array}{c} f_{\rm b} \\ (\times 10^{-3}) \end{array}$	E_{γ} (10 ⁴⁹ эрг)	L_{γ} (10 ⁴⁹ эрг с ⁻¹)
GRB 110503A	$1.06\substack{+0.14 \\ -0.14}$	$\mathrm{H}\mathrm{M}^{c}$	$3.80{\pm}0.19$	$2.20{\pm}0.23$	$46.8 {\pm} 5.1$	42.9 ± 4.3
		WM	$2.87 {\pm} 0.10$	$1.26{\pm}0.09$	$26.7 {\pm} 1.9$	24.5 ± 2.3
GRB 130427A	$0.43_{-0.05}^{+0.05}$	HM	$2.91{\pm}0.13$	$1.29{\pm}0.12$	115 ± 10	35.6 ± 3.1
GRB 130603B	$0.47\substack{+0.02 \\ -0.06}$	$\mathrm{H}\mathrm{M}^{c}$	$6.43 {\pm} 0.23$	$6.29 {\pm} 0.46$	$1.23 {\pm} 0.10$	18.8 ± 1.4
		WM	$8.90 {\pm} 0.24$	$12.0 {\pm} 0.7$	$2.36 {\pm} 0.13$	36.0 ± 3.0
GRB 151027A	2.3^{b}	WM	$6.08{\pm}0.36$	$5.63{\pm}0.68$	$18.6 {\pm} 2.7$	$4.41 {\pm} 0.73$

^а Тип среды, окружающей источник гамма-всплеска.

^b В случаях, когда ошибка $t_{\rm jet}$ неизвестна, для расчётов используется средняя по подвыборке всплесков с $t_{\rm jet}$ ошибка $\sim 0.2 \cdot t_{\rm jet}$.

^с В случаях, когда наиболее вероятный тип среды, окружающей источник гамма-всплеска, неизвестен, предлагаются оценки энергетики с коррекцией на коллимацию излучения для обоих типов среды: НМ и WM.

Полная версия данной таблицы размещена на сайте ФТИ им. А. Ф. Иоффе по aдресу http://www.ioffe.ru/LEA/zGRBs/triggered/KW_GRBs_z_trig_ tables.zip.

Глава 5

Эффекты наблюдательной селекции и космологический горизонт детектирования гамма-всплесков

5.1 Введение

Эффекты наблюдательной селекции в астрофизических исследованиях являются следствием широкого круга ограничений, связанных с особенностями методики, условий и аппаратуры, используемой для наблюдений. Они приводят к смещению наблюдательных оценок, не отражающих, в результате, истинное распределение параметров исследуемой совокупности объектов. Эффекты селекции играют ключевую роль при изучении гамма-всплесков [112, 130], в силу широкого диапазона красных смещений особенно подверженных смещению Малмквиста, приводящему к недетектированию далёких событий с низкой энергетикой. Учёт эффектов селекции критически важен в контексте использования гамма-всплесков для оценки расстояний (в качестве стандартных свечей) и уточнения космологических параметров, а также при построении физических моделей гамма-всплесков, их источников и прародителей.

Для исследуемой выборки гамма-всплесков с известным красным смещением эффекты наблюдательной селекции можно разделить на две категории: присущие НА Конус-*Винд* и «внешние», связанные с процессом локализации гамма-всплесков и определением красного смещения их источников. В настоящей главе рассматривается влияние условий наблюдения, параметров собственного излучения и красного смещения гамма-всплесков на детектирование событий в эксперименте Конус-*Винд*. Несмотря на важность второй

87

категории эффектов селекции, её исследование выходит за рамки настоящей работы.

Тесно связанный с наблюдательной селекцией космологический горизонт или предел детектирования гамма-всплеска, $z_{\rm max}$, – максимальное красное смещение, на котором всплеск со схожими параметрами может быть зарегистрирован в конкретном эксперименте. Знание горизонта детектирования может быть полезно при решении ряда задач, например, для вычисления статистики $V/V_{\rm max}$ [131] или для учёта инструментальных эффектов селекции при исследовании истинного (несмещённого) распределения параметров гамма-всплесков [127, 128].

5.2 Эффекты наблюдательной селекции гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд

Наблюдательная селекция гамма-всплесков в рассматриваемой выборке эксперимента Конус-*Винд* вызвана, в первую очередь, ограничениями, присущими триггерному алгоритму прибора. НА Конус-*Винд* переходит в триггерный режим работы при статистически значимом превышении скорости счёта над фоном в энергетическом окне G2 (50–200 кэВ номинально, ~80– 300 кэВ на 2016 г.) на интервале времени $\Delta T_{\rm trig}$ 1 с (для подавляющего большинства всплесков типа II) либо 140 мс (для всплесков типа I). Порог срабатывания триггера установлен на уровне $\approx 9\sigma$, обеспечивающем отсечение ложных срабатываний в условиях жёстких ограничений на суточный объем передаваемых на Землю данных. Таким образом, статистическую значимость детектирования всплеска можно охарактеризовать отношением пиковой скорости счёта (за интервал времени $\Delta T_{\rm trig}$) к стандартному отклонению фона.

Несмотря на то что указанному критерию срабатывания триггера НА Конус-*Винд* нельзя напрямую сопоставить характеристики собственного излучения всплеска (например, длительность, время нарастания импульса, форму спектра или энергетический поток), возможно исследовать, как сочетание указанных факторов может повлиять на чувствительность триггера

88

к событию с конкретным набором характеристик, наблюдавшемуся в определённой фоновой обстановке.

Чувствительность срабатывания триггера Конус-*Винд* к падающему энергетическому потоку была исследована по методике, предложенной Д. Бандом в работе [132]. В рамках данной методики «пороговый» поток – минимальный энергетический поток, детектируемый в триггерном режиме, можно вычислить по формуле:

$$F_{\rm lim} = \frac{kF\sqrt{R_{\rm bg}}/\Delta T_{\rm trig}}{R_{\rm GRB}},$$

где k = 9 – порог срабатывания триггера в единицах σ ; F [эрг см⁻² с⁻¹] – падающий поток энергии; $R_{\rm bg}$ – фоновая скорость счёта в канале G2; $R_{\rm GRB}$ – скорость счёта от гамма-всплеска в канале G2. Формула представляет собой пересчёт порогового числа отсчётов в энергетический поток. Поток F вычисляется с учётом параметров спектральной модели (см. Главу 3) как

$$F = \int_{e_{\min}}^{e_{\max}} E \, \frac{dN}{dE}(E) \, dE,$$

где $e_{\min} = 10$ кэВ и $e_{\max} = 10$ МэВ. Таким образом, F_{\lim} также оценивается в широком спектральном диапазоне 10 кэВ–10 МэВ. Методика оценки уровня фона (R_{bg}) на определённую эпоху наблюдений описана в Главе 3. Наблюдаемая скорость счёта в триггерном энергетическом окне G2 (R_{GRB}) зависит, в частности, от формы падающего энергетического спектра и текущей калибровки детектора. Данная величина оценивается посредством свёртки спектральной модели с матрицей отклика детектора

$$R_{\rm GRB} = \int_{E'_{\rm min}}^{E'_{\rm max}} \int_{e_{\rm min}}^{e_{\rm max}} \frac{dN}{dE}(E) \ DRM(\theta_{\rm inc}, E, E') \ dE \ dE',$$

где θ_{inc} – угол падения излучения к оси детектора, а E'_{min} и E'_{max} – энергетические границы диапазона G2 в текущей калибровке. Поскольку нормировка спектральной модели входит в выражения для F и R_{GRB} одинаковым образом, в оценках в настоящей работе она принята единичной.

На рис. 5.1 полученные оценки $F_{\rm lim}$ представлены как функция пиковой энергии спектральной модели $(E_{\rm p})$. Чувствительность триггера оценивалась

на масштабе $\Delta T_{\rm trig} = 1$ с для фоновой обстановки и калибровки каналов детектора S1, актуальных на середину 2015 г., при угле падения излучения на детектор, равном 60°. Можно заметить, что, при указанных условиях, пороговый энергетический поток F_{lim} близок к ~ 1×10^{-6} эрг см⁻² с⁻¹. Также следует отметить наличие инструментальной селекции всплесков, характеризующихся мягкими энергетическими спектрами (модель CPL с $E_{\rm p} \lesssim 70 - 80$ кэВ). В то же время диаграмма $F-E_{\rm p}$ демонстрирует отсутствие наблюдений ярких $(F\gtrsim 5\times 10^{-6}~{\rm spr~cm^{-2}~c^{-1}})$ всплесков с мягким $(E_{\rm p}\lesssim 100~{\rm ksB})$ спектром, которые должны быть легко детектируемы в триггерном режиме НА Конус-Винд. Так как граница данной области определяется всплесками с относительно высокой статистической значимостью детектирования, можно сделать вывод, что инструментальные эффекты селекции не влияют на данную область распределения. Таким образом, отсутствие наблюдений ярких мягких событий в рассмотренной выборке эксперимента Конус-Винд, по-видимому, обусловлено свойствами популяции гамма-всплесков, а не эффектами наблюдательной селекции (см. также Главу 7).

С использованием той же методики для каждого гамма-всплеска выборки были рассчитаны «индивидуальные» пороговые энергетические потоки срабатывания триггера на временной шкале 1 с для всплесков типа II и на обеих шкалах для всплесков типа I. В расчётах учитывались параметры наилучшей аппроксимации пиковых спектров, угол падения излучения на детектор, а также текущая калибровка детектора и соответствующая всплеску фоновая обстановка. Также по параметрам наилучшей спектральной модели была проведена *k*-коррекция пороговых потоков (см. Главу 4) с учётом красных смещений гамма-всплесков. Полученные болометрические пороговые потоки, $F_{\rm lim}$, приведены в табл. 4.1; среднее по выборке значение $F_{\rm lim}$ для всплесков типа II составляет 1.08×10^{-6} эрг см⁻² с⁻¹. При сравнении данных пороговых потоков с пиковыми потоками, рассчитанными на других шкалах времени ΔT , следует проводить коррекцию вида:

$$F_{\rm lim}(\Delta T) = \frac{F_{\rm peak}(\Delta T)}{F_{\rm peak,1024}}F_{\rm lim}.$$

На рис. 5.2 приведены распределения параметров гамма-всплесков в плоскостях $z-E_{iso}$, $z-L_{iso}$ и $z-E_{p,i,z}$, полученные в эксперименте Конус-*Винд*. Об-



Рисунок 5.1: Зависимость порогового энергетического потока в болометрическом диапазоне 10 кэВ–10 МэВ от пиковой энергии $E_{\rm p}$. Чувствительность триггера $F_{\rm lim}$ вычислена для модели CPL при $\alpha = -1$ (красная сплошная линия) и функции Банда при $\alpha = -1$, $\beta = -2.5$ (синяя штриховая линия). Кругами обозначены наблюдаемые данные для подвыборки всплесков типа II: $F_{\rm peak,1024}$ – пиковый энергетический поток на масштабе 1024 мс в диапазоне 10 кэВ–10 МэВ в зависимости от $E_{\rm p,p}$, пиковой энергии пикового спектра. Цвет символа соответствует логарифму статистической значимости всплеска.

ласть плоскости $z-L_{\rm iso}$, расположенная выше пороговой светимости, соответствующей $F_{\rm lim} \sim 1 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹, может считаться свободной от эффектов инструментальной селекции. В плоскости $z-E_{\rm iso}$ область, свободная от эффектов селекции, находится выше порогового изотропного энерговыделения, соответствующего $S_{\rm lim} \sim 3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻². Как было указано выше, чувствительность детекторов триггера Конус-Винд резко падает при приближении $E_{\rm p}$ к нижней границе спектрального диапазона прибора (~20–25 кэВ в 2015 г.), что выражается в отсутствии всплесков с $E_{\rm p,z} \leq E_{\rm p,z,lim} = (1+z)^2 \cdot 25$ кэВ на плоскости $z-E_{\rm p,z}$. Дополнительный фактор (1 + z) отражает чувствительность триггера к падающему фотонному потоку и является следствием космологического растяжения кривой блеска при переходе в систему отсчёта наблюдателя.

Наконец, следует отметить что в эксперименте Конус-*Винд* отсутствуют эффекты селекции, напрямую связанные с длительностью события. В то же время, прибор Конус-*Винд* может не переключиться в триггерный режим при регистрации относительно интенсивных всплесков, характеризующихся очень медленным нарастанием амплитуды кривой блеска. По нашим оценкам, число достаточно ярких всплесков с известным красным смещением, не зарегистрированных в триггерном режиме из-за медленного нарастания амплитуды кривой блеска, не превышает пяти (к середине 2016 г.). Указанные всплески, наряду с другими гамма-всплесками с известным космологическим красным смещением, зарегистрированными в режиме ожидания эксперимента Конус-*Винд*, будут рассмотрены во второй части каталога, публикация которой планируется на 2018-19 гг.

5.3 Космологический горизонт детектирования гамма-всплесков в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*

Принятый во многих работах подход к оценке космологического горизонта детектирования гамма-всплеска заключается в вычислении красного смещения $z_{\rm max,L}$, на котором пороговая для срабатывания триггера свети-



Рисунок 5.2: Зависимость изотропного энерговыделения, изотропной пиковой светимости и пиковой энергии интегрального спектра в космологической системе отсчёта от красного смещения гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд*. Всплески типа I обозначены треугольниками, всплески типа II – окружностями. Цвет символов соответствует логарифму статистической значимости всплеска в единицах *σ*. Штриховыми линиями обозначены пороговые значения энергетики и пиковой энергии, определяющие наблюдательную селекцию в космологической системе отсчёта.

мость всплеска $L_{\rm iso,lim} = 4\pi D_{\rm L}^2 \times F_{\rm lim}$, определяемая пороговым энергетическим потоком $F_{\rm lim}$, начинает превосходить изотропную пиковую светимость всплеска $L_{\rm iso}$ [133, 134, 135, 127]. Используемое в данном подходе значение «характеристического» порогового потока $F_{\rm lim}$ является обобщенной оценкой чувствительности прибора или описывает выборку данных эксперимента в целом. Корректность применения подобного подхода, не учитывающего индивидуальные характеристики события и условия его детектирования, к данным эксперимента Конус-*Винд* нуждается в дополнительном исследовании и обосновании.

При оценке возможности детектирования гамма-всплеска в тригтерном режиме при гипотетическом удалении его источника с красного смещения z на красное смещение z' следует учитывать, как минимум, три фактора. Во-первых, в предположении, что угол коллимации излучения не меняется, падающий на детектор болометрический фотонный поток P уменьшается на фактор $(D_M(z)/D_M(z'))^2$, где D_M – поперечное сопутствующее расстояние. Во-вторых, космологическое растяжение временного интервала приводит к уширению кривой блеска на фактор (1 + z')/(1 + z) и дополнительному уменьшению наблюдаемого фотонного потока. В-третьих, свойственное гамма-всплескам укручение спектра, характеризуемое параметром E_p , сдвигается в область более низких энергий и, как следствие, доля болометрического фотонного потока, попадающая в диапазон работы триггера (G2), уменьшается.

Горизонт детектирования гамма-всплеска в эксперименте Конус-*Винд* можно оценить как красное смещение $z' = z_{\rm max}$, при удалении источника на которое пиковая скорость счёта в окне G2 падает ниже триггерного порога 9σ на обоих триггерных масштабах времени (140 мс и 1 с). Пиковую скорость счёта для красного смещения z' и временного интервала срабатывания триггера $\Delta T_{\rm trig}$ можно рассчитать по формуле:

$$\operatorname{PCR}_{z'}(\Delta T_{\operatorname{trig}}) = a \times \operatorname{PCR}_{z}(a \cdot \Delta T_{\operatorname{trig}}) \times \frac{N_{\operatorname{G2}}(\alpha, \beta, a \cdot E_{\operatorname{p,p}})}{N_{\operatorname{G2}}(\alpha, \beta, E_{\operatorname{p,p}})} \times \left(\frac{D_{\operatorname{M}}(z)}{D_{\operatorname{M}}(z')}\right)^{2},$$

где z – измеренное красное смещение всплеска; a = (1 + z)/(1 + z');PCR_z $(a \cdot \Delta T_{\text{trig}})$ – пиковая скорость счёта в окне G2 на временном масштабе, скорректированном на изменение красного смещения; $N_{\text{G2}}(\alpha, \beta, E_{\text{p,p}})$ – число отсчётов от гамма-всплеска, рассчитанное в канале G2 по параметрам наилучшей аппроксимации пикового спектра с использованием матрицы отклика детектора; $N_{G2}(\alpha, \beta, a \cdot E_{p,p})$ – соответствующая величина для спектра, сдвинутого в «красную» область на фактор *a*.

Рассчитанные описанным выше методом пределы детектирования гаммавсплесков исследуемой выборки, $z_{\rm max}$, приведены в табл. 4.1 и на рис. 5.3. Можно заметить, что горизонты детектирования всплесков типа II распределены в узком диапазоне вокруг $z_{\rm max,L}$, оцененного по «характеристическому» болометрическому потоку $F_{\rm lim} = 1 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹. Распределение величины $(1 + z_{\rm max})/(1 + z_{\rm max,L})$ приведено на рис. 5.4, причём среднее значение и стандартное отклонение данного распределения составляют 1.01 и 0.12, соответственно. Таким образом, несмотря на то что в некоторых случаях предел $z_{\rm max,L}$, вычисленный посредством «характеристического» потока $F_{\rm lim}$, может отличаться от определённого по более точной методике горизонта $z_{\rm max}$, на фактор ~1.5, результаты вычислений подтверждают корректность метода оценки горизонта детектирования всплеска по «характеристическому» потоку.

Самым «далёким» горизонтом детектирования ($z_{\rm max} \approx 16.6$) среди всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в эксперименте Конус-*Винд*, характеризуется сверхяркий всплеск GRB 110918A (измеренное красное смещение z = 0.981). За ним следует GRB 050603 (z = 2.82), для которого регистрация в триггерном режиме была бы возможна вплоть до $z_{\rm max} \approx 12.5$.

Возраст Вселенной на красном смещении $z \approx 16.6$ составлял всего ~ 230 млн. лет. Таким образом, в триггерном режиме эксперимента Конус-*Винд* возможно детектирование гамма-всплесков, произошедших во времена, близкие к концу космологической «тёмной эпохи» («Dark Ages»).



Рисунок 5.3: Горизонты детектирования гамма-всплесков на плоскости $z-L_{\rm iso}$ в эксперименте Конус-*Винд*. Всплески типа I обозначены треугольниками, всплески типа II – окружностями. Измеренные красные смещения z отмечены символами без заливки, горизонты детектирования $z_{\rm max}$ – символами с заливкой. Измеренные красные смещения и горизонты детектирования соединены сплошными линиями. Горизонт детектирования $z_{\rm max,L}$, соответствующий пороговому потоку $F_{\rm lim} = 1 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹, показан штриховой линией.



Рисунок 5.4: Распределение $(1 + z_{\max})/(1 + z_{\max,L})$, характеризующее согласованность горизонтов детектирования гамма-всплесков типа II, вычисленных для каждого всплеска индивидуально (z_{\max}) и по «характеристическому» потоку, описывающему выборку в целом $(z_{\max,L})$. Красным цветом показана аппроксимация распределения функцией Гаусса с параметрами $\mu = 1.01$ и $\sigma = 0.12$.

5.4 Заключение

В данной главе исследованы особенности инструментальных эффектов селекции, характерные для НА Конус-*Винд*, и оценены пороги детектирования гамма-всплесков по падающему болометрическому потоку энергии. Также предложена методика оценки горизонта детектирования гамма-всплесков в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, и представлены результаты применения данной методики к исследуемой выборке гамма-всплесков. Проведено сравнение «индивидуальных» пределов детектирования, рассчитанных для каждого всплеска, с горизонтом детектирования, вычисленным по «характеристическому» для выборки пороговому потоку.

Получены следующие результаты:

- Проведено моделирование чувствительности триггера прибора Конус-Винд и сравнение полученных результатов с наблюдаемыми пиковыми потоками и пиковыми энергиями гамма-всплесков исследуемой выборки. Было установлено, что отсутствие на диаграмме F-E_p ярких (F ≥ 5 × 10⁻⁶ эрг см⁻² с⁻¹) всплесков с мягким (E_p ≤ 100 кэВ) спектром, которые должны быть легко детектируемы в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд, по-видимому, обусловлено свойствами популяции гамма-всплесков, а не инструментальными эффектами селекции.
- 2. Оценены пороговые значения интегральных и пиковых потоков, определяющих эффекты селекции на плоскостях $z-E_{\rm iso}$ и $z-L_{\rm iso}$, также рассмотрены эффекты селекции на плоскости $z-E_{\rm p,i,z}$. Было обнаружено, что область плоскости $z-L_{\rm iso}$, расположенная выше пороговой светимости, соответствующей $F_{\rm lim} \sim 1 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹, может считаться свободной от эффектов инструментальной селекции. В то же время в плоскости $z-E_{\rm iso}$ область, свободная от эффектов селекции, будет находиться выше порогового энерговыделения, соответствующего $S_{\rm lim} \sim 3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻². Кроме того, действие эффектов селекции на плоскости $z-E_{\rm p,z}$ ограничивается областью $E_{\rm p,z} \lesssim E_{\rm p,z,lim} = (1 + z)^2 \cdot 25$ кэВ.

3. Для всплесков выборки были оценены горизонты детектирования в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд как с учётом особенностей каждого всплеска, так и с использованием «характеристического» порогового энергетического потока, описывающего выборку в целом. Наиболее удалённый горизонт детектирования, $z_{\rm max} \approx 16.6$, соответствует сверхяркому GRB 110918А. Подтверждена корректность оценки горизонта детектирования гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд с использованием «характеристического» порогового энергетического потока $F_{\rm lim} \sim 1 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹.

По материалам Главы 5 на защиту выносится следующее положение:

 Эффекты селекции при наблюдениях гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд и соответствующие им ограничения в космологической системе отсчёта. Космологические пределы наблюдаемости гаммавсплесков в эксперименте Конус-Винд.

Результаты отражены в публикации:

 A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii et al. The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode // Astrophys. J. 2017. Vol. 850 p. 161.

Глава 6

Космологическая эволюция энергетики гамма-всплесков. Функции светимости и энерговыделения гамма-всплесков по данным эксперимента Конус-Винд. Темп образования гамма-всплесков

6.1 Введение

Функция светимости гамма-всплесков (GRB LF) – эмпирическая зависимость, характеризующая относительную долю событий с данной светимостью L_{iso} . Исторически функция светимости использовалась для описания популяций относительно стационарных источников, таких как звёзды и галактики. Не менее репрезентативной характеристикой таких катастрофических транзиентных явлений, как гамма-всплески, является функция изотропного энерговыделения (GRB EF), характеризующая относительную долю событий с данным изотропным энерговыделением E_{iso} . Впервые функция энерговыделения гамма-всплесков была получена в работе [136] для набора, состоящего из 95 гамма-всплесков с измеренными красными смещениями. Наконец, темп образования гамма-всплесков (GRBFR) – число событий на единицу сопутствующего объёма за единицу времени, характеристика, важная для понимания механизмов генерации излучения и моделей прародителей гаммавсплесков на различных этапах эволюции Вселенной.

Выборка всплесков с измеренным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, предоставляет возможность независимой оценки функций изотропной светимости, изотропного энерговыделения, а также темпа образования гамма-всплесков для одного из самых обширных на настоящее время наборов данных, полученных одним прибором в широком диапазоне энергий. Как было показано в Главе 5, набор данных Конус-*Винд* в плоскостях z- L_{iso} и z- E_{iso} подвержен искажению (смещению Малмквиста) вследствие эффекта селекции, обусловленного порогом детектирования гамма-всплесков в триггерном режиме эксперимента (рис. 5.2).

Истинные распределения параметров гамма-всплесков можно получить из усечённого (вследствие эффектов селекции) набора данных с помощью непараметрического C^- -метода Линден-Белла [137], развитого Эфроном и Петросяном [138]. Более того, как показано в работе [139], все непараметрические методы для определения истинных распределений параметров сводятся к C^- -методу Линден-Белла в случае, если набор данных усечён только с одной стороны. Данный метод, изначально разработанный для вычисления истинных распределений параметров квазаров, был впервые применён к данным гамма-всплесков Н. Ллойд-Роннинг [55].

Следует заметить, что космологическая эволюция изотропного эквивалента светимости и энерговыделения может быть обусловлена как эволюцией самой энергетики, так и эволюцией угла коллимации излучения (см., например, [55]). Для оценки влияния данного фактора на эволюцию энергетики для подвыборки из 30 всплесков типа II с надёжно измеренным временем ахроматического излома кривой блеска послесвечения была исследована корреляция между фактором коллимации и красным смещением. Было установлено отсутствие значимой корреляции: ранговый коэффициент корреляции Спирмена составил $\rho_S = -0.26$ (соответствующая вероятность случайной корреляции – *p*-value $P_{\rho_S} = 0.17$).

6.2 Методика непараметрического анализа

В настоящем разделе описана методика оценки функции светимости и темпа образования гамма-всплесков путём анализа данных на плоскости *z*-

 $L_{\rm iso}.$ Следует заметить, что эта методика полностью применима к данным на плоскости $z\text{-}E_{\rm iso}.$

Полная функция светимости $\Phi(L_{iso}, z)$ может быть, без потери общности, записана в виде $\Phi(L_{iso}, z) = \rho(z)\phi(L_{iso}/g(z), \alpha_s)/g(z)$, где $\rho(z)$ – темп образования гамма-всплесков; $\phi(L_{iso}/g(z))$ – локальная функция светимости; g(z)– эволюция светимости, параметризующая корреляцию L и z. Параметр α_s , характеризующий космологическую эволюцию формы функции светимости гамма-всплесков, наиболее сложен в оценке в силу малой статистики наблюдений, особенно в области больших z. В то же время, результаты исследования эволюции формы функции светимости на наборе из 700 гамма-всплесков с косвенной оценкой красных смещений (псевдо-z) [68] указывают на слабую зависимость α_s от z. Следуя данному выводу и подходу, принятому в ряде последующих публикаций (например, [136, 140]), в настоящей работе форма функции светимости гамма-всплесков полагается не зависящей от красного смещения.

Набор данных в плоскости красное смещение-светимость подвержен искажению вследствие присутствия эффекта селекции, обусловленного порогом детектирования гамма-всплесков в триггерном режиме (см. Главу 5), что приводит к усечению данных, заметному на рис. 5.2. Несмотря на то что аппроксимация пороговой светимости некоей «характеристической», соответствующей номинальному порогу детектирования, кривой является общепринятой, такая оценка не учитывает ряд важных факторов, например, спектральные параметры всплеска, фоновую скорость счёта, угол падения излучения на детектор, калибровку энергетического диапазона триггерного детектора, k-коррекцию потока, которая зависит от красного смещения. Поэтому для корректного учёта инструментальных эффектов селекции в эксперименте Конус-Винд был рассчитан «индивидуальный» болометрический пороговый поток каждого всплеска, учитывающий указанные выше факторы (см. Главу 5). Следует отметить, что результаты, полученные в настоящей главе с использованием «индивидуальных» пороговых потоков и аппроксимации чувствительности детекторов «характеристической» кривой, согласуются.

102

Поскольку C^- -метод применим только для независимых переменных, анализ данных следует начинать с проверки и устранения, в случае наличия, корреляции между красным смещением и изотропной пиковой светимостью. В подходе, предложенном Эфроном и Петросяном, в качестве тестовой статистики для определения наличия либо отсутствия корреляции в усечённом (наблюдаемом) наборе данных используется модифицированная версия рангового коэффициента корреляции Кендалла (τ -статистика Кендалла), при этом ранги точек определяются не отностительно всего набора (что, обычно, применимо к неусечённым данным), а относительно связанных с данной точкой поднаборов (так называемых «ассоциированных наборов»), которые включают только наблюдаемые события.

Рассмотрим набор наблюдаемых светимостей $L_i \equiv L_{iso,i}$ и красных смещений z_i , где i – номер всплеска. Для каждого всплеска можно построить ассоциированный с ним набор данных:

$$J_i = \{j | L_j > L_i, L_i > L_j^{\lim}\}$$

где L_j^{\lim} – минимальная наблюдаемая светимость всплеска при заданном z_j с учётом эффектов селекции. Данное определение может также быть переформулировано в виде:

$$J_i = \{ j | L_j > L_i, z_j < z_i^{\lim} \},\$$

где z_i^{lim} – максимальное красное смещение на котором всплеск с заданной светимостью L_i наблюдаем с учётом эффектов селекции. Обе формулировки определяют один и тот же набор данных при условии, что эффект селекции является монотонной функцией. Пример ассоциированного набора для *i*-го всплеска показан на рис. 6.1.

Пусть N_i – число всплесков в наборе, ассоциированном с *i*-м всплеском (что соответствует параметру « C^- » в [137]), а R_i – число всплесков в данном наборе, красное смещение z_j которых меньше, чем z_i (что является аналогом ранга *i*-го всплеска в ассоциированном с ним наборе):

$$N_i = \operatorname{Number} \{J_i\},$$

 $R_i = \operatorname{Number} \{j \in J_i : z_j < z_i\}.$



Рисунок 6.1: Пример ассоциированных с *i*-ым всплеском наборов. Данные приведены с коррекцией на эволюцию светимости с индексом $\delta_L = 1.7$. Граница эффекта селекции, также скорректированная с учётом эволюции светимости, показана чёрной линией. Красным цветом показан ассоциированный набор, использованный для вычисления функции светимости (« N_i »), синим цветом – ассоциированный набор, использованный для вычисления темпа образования гамма-всплесков (« M_i »).

Тогда степень корреляции между красным смещением и изотропной пиковой светимостью гамма-всплеска может быть оценена посредством τ -статистики, параметризованной как

$$\tau = \frac{\sum_i (R_i - E_i)}{\sqrt{\sum_i V_i}},$$

где $E_i = (N_i + 1)/2$ – математическое ожидание, а $V_i = (N_i^2 - 1)/12$ – дисперсия равномерного распределения. В случае не подверженного эффектам селекции набора τ -статистика эквивалентна непараметрическому коэффициенту корреляции Кендалла. Если z_i и L_i являются независимыми величинами, то ранги R_i равномерно распределены между 1 и N_i , вследствие чего подвыборки $R_i \leq E_i$ и $R_i \geq E_i$ содержат примерно равное число точек и значение τ -статистики будет близко к нулю.

Следуя [55], [68], [136], [140] и [141], функциональная форма эволюции светимости параметризуется как $g(z) = (1 + z)^{\delta}$. В этом случае степенной индекс эволюции δ варьируется таким образом, чтобы обеспечить равенство τ -статистики нулю при некотором $\delta = \delta_L$, что будет означать независимость переменных $L' = L_{\rm iso}/(1 + z)^{\delta_L}$ и z, то есть отсутствие эволюции светимости L'. Поскольку τ -статистика нормализована на квадратный корень из дисперсии, доверительный интервал δ_L на уровне 1 σ определяется при $\tau = \pm 1$ (см. рис. 6.2), а статистическая значимость гипотезы об эволюции светимости оценивается как $\tau_0 \equiv \tau(\delta = 0)$. По той же методике определяется индекс эволюции изотропного энерговыделения δ_E , при котором достигается независимость переменных $E' = E_{\rm iso}/(1 + z)^{\delta_E}$ и z в плоскости z- $E_{\rm iso}$.

В случае, когда для описания границы эффекта селекции используется «характеристическая» кривая, определенные описанным выше методом индексы эволюции δ_L и δ_E демонстрирует сильную зависимость от выбора порогового значения энергетического потока (рис. 6.3). Проведенное исследование зависимости δ_L и δ_E от соответствующих пороговых значений энергетического потока F_{lim} и интегрального энергетического потока S_{lim} для набора всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, позволило определить пороговые значения болометрических потоков $F_{\text{lim}} \simeq 2 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹ и $S_{\text{lim}} \simeq 4.3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻², выше которых указанная зависимость ослабевает и индексы эволюции начинают флуктуи-



Рисунок 6.2: Зависимость модифицированной τ -статистики Кендалла от индексов эволюции изотропной светимости (δ_L) и изотропного энерговыделения (δ_E). Красными окружностями показаны данные, соответствующие «индивидуальным» триггерным порогам в плоскости z-L, красными кругами – «характеристической» кривой триггерного порога в плоскости z-L, соответствующей болометрическому потоку $F_{\text{lim}} = 2 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹, зелёными квадратами – «характеристической» кривой триггерного порога в плоскости z-E, соответствующей болометрическому интегральному потоку $S_{\text{lim}} = 4.3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻². Значения δ , соответствующие $\tau = 0$, являются индексами эволюции, при которых достигается независимость энергетики от красного смещения, а $\tau = \pm 1$ определяют границы доверительных интервалов индексов эволюции энергетики на уровне 1σ . ровать вокруг «устойчивых» значений $\delta_L \sim 1.7$ и $\delta_E \sim 1.1$. Следует отметить, что схожее значение индекса эволюции светимости δ_L (~1.7) достигается при использовании «индивидуальных» для каждого всплеска значений порогового потока.

Определив индекс эволюции светимости, можно перейти из пространства наблюдаемых изотропных светимостей L_{iso} в пространство локальных (неэволюционирующих) светимостей L' и, следуя непараметрической C^- -методике, получить локальную кумулятивную функцию светимости $\psi(L')$ как функцию единственной переменной L':

$$\ln \psi(L'_i) = \sum_{j=2}^i \ln \left(1 + \frac{1}{N'_j}\right),\,$$

где N'_j –это число точек на плоскости z-L' в наборе, ассоциированном с i-ым всплеском.

Для оценки темпа образования гамма-всплесков по данным на плоскости z-L' требуется вычислить соответствующее кумулятивное распределение красных смещений $\psi(z)$. С этой целью для каждого всплеска формируется ассоциированный с ним набор всплесков

$$J'_{i} = \{ j | z_{j} < z_{i}, L_{j} > L_{i}^{\lim}, L_{i} > L_{j}^{\lim} \},\$$

содержащий M_i точек (на рис. 6.1 приведён пример ассоциированного со всплеском набора в случае, когда для описания границы эффектов селекции была использована «характеристическая» кривая). Следует отметить, что ассоциированные наборы для вычисления функции светимости и темпа образования гамма-всплесков различаются. Условие $L_j > L_i^{\text{lim}}$ может быть переформулировано как $z_j^{\text{lim}} > z_i$, однако оценка z^{lim} может быть затруднена, если пороговый поток не описывается аналитической функцией, как, например, при использовании «индивидуальных» пороговых потоков. Кроме того, в случае, когда граница эффекта селекции задается «индивидуальными» пороговыми потоками, для формирования ассоциированного со всплеском набора следует применить дополнительный критерий $L_i > L_j^{\text{lim}}$. С использованием полученных ассоциированных наборов кумулятивное распределение красных



Рисунок 6.3: Зависимость значений δ_L (красные круги) и δ_E (зелёные квадраты) от выбора «характеристических» триггерных порогов F_{lim} и S_{lim} , соответственно. Штриховой и пунктирной линиями показаны уровни δ_L и δ_E , соответствующие $F_{\text{lim}} \gtrsim 2 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹ и $S_{\text{lim}} \gtrsim 4.3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻², области, где зависимость δ_L и δ_E от значений пороговых потоков становится мала.
смещений определяется, согласно С⁻-методике, как

$$\ln \psi(z_i) = \sum_{j=2}^{i} \ln \left(1 + \frac{1}{M_j}\right).$$

Следуя той же методике, распределение $\psi(z)$ может быть оценено, независимым образом, по данным на плоскости z-E'.

6.3 Функции изотропной светимости и изотропного энерговыделения

В результате применения описанной методики с использованием «индивидуальных» триггерных порогов к набору из 137¹ всплесков типа II, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*, для данных в плоскости $z-L_{iso}$ была установлена корреляция переменных на уровне значимости $\tau_0 \sim 1.7\sigma$, при этом индекс эволюции изотропной светимости составляет $\delta_L = 1.7^{+0.9}_{-0.9}$ (на уровне значимости 1σ). Схожие результаты были получены с использованием «характеристической» кривой, соответствующей $F_{lim} = 2 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹: уровень значимости корреляции и индекс эволюции светимости составляют $\tau_0 \sim 1.2\sigma$ и $\delta_L = 1.7^{+0.9}_{-1.1}$, соответственно.

Данная методика, применённая на плоскости $z-E_{\rm iso}$ с эффектом селекции в виде «характеристической» кривой, соответствующей $S_{\rm lim} = 4.3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻², выявила отсутствие независимости переменных на уровне ~ 1.6 σ , причём $\delta_E = 1.1^{+1.5}_{-0.7}$. Таким образом, значимости эволюции $E_{\rm iso}$ и $L_{\rm iso}$ невелики, < 2 σ , и эволюция энерговыделения менее выражена. Определённые в настоящей работе индексы эволюции энергетики оказались более пологими, чем полученные в более ранних работах, однако сравнимы в пределах ошибок: $\delta_L = 2.60^{+0.15}_{-0.20}$ [68], $\delta_L = 2.30^{+0.56}_{-0.51}$ [136], $\delta_L = 2.43^{+0.41}_{-0.38}$ [141] и $\delta_E = 1.80^{+0.36}_{-0.63}$ [136].

После коррекции энергетики на эволюцию путём перехода в пространство $L' = L_{iso}/(1+z)^{\delta_L}$ либо $E' = E_{iso}/(1+z)^{\delta_E}$, следуя C^- -методике Линден-Белла,

¹Исследуемая выборка гамма-всплесков включает 138 всплесков типа II, однако, поскольку для GRB 081203A доступны лишь спектральные данные с грубым временным разрешением, указанное событие было исключено из исследуемого в данной главе набора всплесков.

были получены локальные кумулятивные функции светимости и энерговыделения: $\psi(L')$ и $\psi(E')$. Дисперсия $\psi(L')$ была оценена посредством бутстрэпа начального набора данных, который был осуществлён следующим образом. Из начального набора, содержащего 137 точек (z, L'), случайным образом генерировался новый набор, содержащий также 137 точек, причём некоторые точки исходного набора могли попасть в новый набор несколько раз, а некоторые – не попасть вовсе. Для каждого из 1000 наборов, сгенерированных указанным способом, по C^- -методике были вычислены функции изотропной светимости, и дисперсия функции светимости была оценена как дисперсия выборки функций $\psi(L')$, полученной в результате процедуры бутстрэпа. Аналогичным образом была оценена дисперсия кумулятивной функции изотропного энерговыделения $\psi(E')$.

Затем функции светимости и энерговыделения, полученные из исходного набора гамма-всплесков, были аппроксимированы двумя функциями – степенным законом с изломом (BPL):

$$\psi(x) \propto \begin{cases} x^{\alpha_1}, & x \le x_b, \\ x_b^{(\alpha_1 - \alpha_2)} x^{\alpha_2}, & x > x_b, \end{cases}$$

где α_1 и α_2 – показатели степени в области низкой и высокой энергетики, соответственно, а x_b – светимость либо энерговыделение, при котором возникает излом; и степенной функцией с экспоненциальным обрезанием (CutoffPL) в области высокой энергетики: $\psi(x) \propto x^{\alpha} \exp(-x/x_{\text{cut}})$, где x_{cut} – светимость либо энерговыделение, при котором возникает обрезание.

Аппроксимация была проведена путём минимизации статистики χ^2 , причём дисперсия кумулятивного распределения, полученная посредством бутстрэпа, использовалась в качестве весовых коэффициентов точек. Результаты аппроксимаций приведены в табл. 6.1 и на рис. 6.4 б). Полученные показатели степени BPL для функций светимости и энерговыделения близки как в области низкой энергетики, так и в области высокой энергетики. Таким образом, можно отметить сходство степенных аппроксимаций функций светимости и энерговыделения. Также можно заметить, что показатели степени приблизительно согласуются с полученными в работах [68] и [136]. Низкое значение приведённой статистики χ^2_r , полученное для обеих моделей, не позволяет исключить ни одну из них, однако сравнение статистики χ^2 для двух моделей демонстрирует, что модель с обрезанием аппроксимирует $\psi(L')$ существенно хуже, чем BPL: $\chi^2_{\text{CutoffPL}} - \chi^2_{\text{BPL}} > 16$. Распределение $\psi(E')$, напротив, лучше аппроксимируется моделью CutoffPL с параметрами $\alpha \sim -0.35$ и $E'_{\text{cut}} \sim 1.2 \times 10^{54}$ эрг нежели моделью BPL: $\chi^2_{\text{CutoffPL}} - \chi^2_{\text{BPL}} \sim -5.5$.

Для проверки данных результатов дополнительно были аппроксимированы (с единичными весами точек) функции $\psi(L')$ и $\psi(E')$ для каждого из 1000 симулированых ранее наборов всплесков. Полученные распределения параметров аппроксимации моделями BPL и CutoffPL хорошо согласуются с соответствующими параметрами и их ошибками, определенными для исходного набора. Также следует заметить, что ~ 90% функций $\psi(L')$ для симулированных наборов всплесков наилучшим образом аппроксимируются моделью BPL, а ~ 60% функций $\psi(E')$ симулированных наборов лучше аппроксимируются моделью CutoffPL.

Функции $\psi(L')$ и $\psi(E')$ соответствуют распределениям энергетики в настоящее время (при z = 0) и, следовательно, функции светимости и энерговыделения в сопутствующей источнику всплеска системе отсчёта можно приблизительно оценить как $\psi(L')(1+z)^{\delta_{\rm L}}$ и $\psi(E')(1+z)^{\delta_{\rm E}}$, соответственно. С учётом того, что эволюция изотропной светимости и изотропного энерговыделения установлена на уровне $< 2\sigma$, имеет смысл также рассмотреть функции светимости и энерговыделения, вычисленные без использования поправки на эволюцию энергетики: $\psi(L_{\rm iso})$ и $\psi(E_{\rm iso})$. Данные функции были получены с помощью непараметрической методики, описанной в разделе 6.2 настоящей Главы, при фиксированных значениях $\delta_L = 0$ и $\delta_E = 0$. Результаты аппроксимации функций $\psi(L_{\rm iso})$ и $\psi(E_{\rm iso})$ моделями BPL и CutoffPL приведены в табл. 6.1. Форма функций светимости и энерговыделения с коррекцией и без коррекции на эволюцию энергетики демонстрирует сходство, ожидаемые различия наблюдаются только в параметрах энергетики, характеризующих положение излома (обрезания) распределений (рис. 6.4).

Таким образом, получены свидетельства в пользу экспоненциального обрезания функции изотропного энерговыделения гамма-всплесков с $0.1 \leq z \leq 5$ с параметром $E_{\rm cut} \gtrsim 10^{54}$ эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки $L_{\rm iso} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с⁻¹. Существование резкого экспоненциального обрыва



Рисунок 6.4: Кумулятивные функции изотропной светимости и изотропного энеровыделения. Слева: функции светимости (красная гистограмма) и энерговыделения (зелёная гистограмма), полученные без коррекции на эволюцию энергетики. Справа: функции светимости (красная гистограмма) и энерговыделения (зелёная гистограмма), полученные с учётом коррекции на эволюцию энергетики: $L' = L_{\rm iso}/(1+z)^{1.7}$ и $E' = E_{\rm iso}/(1+z)^{1.1}$. Распределения нормированы на единицу в точках, соответствующих наименьшей энергетике. Для каждого распределения указана типичная величина погрешности. Штриховой линией обозначены наилучшие аппроксимации моделями BPL и CutoffPL для $\psi(L)$ и $\psi(E)$, соответственно.

в распределении изотропного энерговыделения в области $\sim 1 - 3 \times 10^{54}$ эрг было исследовано ранее по данным экспериментов Конус-*Винд* и *Fermi*-GBM для гамма-всплесков с $1 \le z \le 5$ в работе [127].

6.4 Темп образования гамма-всплесков

Кумулятивное распределение красных смещений $\psi(z)$ было вычислено, с использованием непараметрической методики, описанной в разделе 6.2 настоящей главы. Дифференциальная форма данного распределения является более информативной, так как она, в частности, даёт возможность сравненить темп образования гамма-всплесков с темпом звездообразования (SFR):

$$\rho(z) = \frac{d\psi}{dz} (1+z) \left(\frac{dV(z)}{dz}\right)^{-1},$$

где дополнительный фактор (1+z) появляется вследствие космологического замедления времени, которое следует учитывать при оценке темпа образования, а dV(z)/dz – сопутствующий дифференциальный объём:

$$\frac{dV(z)}{dz} = \frac{4\pi D_{\rm H} D_{\rm M}^2}{E(z)}$$

где $D_{\rm M}$ – поперечное сопутствующее расстояние, $D_{\rm H} = c/H_0$ – хаббловское расстояние, а $E(z) = \sqrt{\Omega_{\rm M}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda}}$ – нормированная постоянная Хаббла.

На рис. 6.5 приведено сравнение скорости звездообразования по данным работ [142, 143, 144, 145, 146] и четырёх вариантов GRBFR, полученных в настоящей работе из распределений на плоскости $z-L_{iso}$ и $z-E_{iso}$ с коррекцией и без коррекции на эволюцию энергетики. Без подробных данных о коллимации излучения гамма-всплесков нормировка GRBFR исключительно сложна в оценке и, как правило, является относительной. В настоящей работе использована нормировка, при которой темп образования гамма-всплесков и темп звездообразования совпадают в области максимума SFR ($(1 + z) \sim 3.5$).

В данной нормировке темп образования гамма-всплесков, оценённый по данным на плоскости z-L' (скорректированным на эволюцию светимости), превышает темп звездообразования при z < 1 и приблизительно следует SFR



Рисунок 6.5: Сравнение темпа образования гамма-всплесков по данным эксперимента Конус-Винд со скоростью звездообразования (SFR) по данным из литературы. Темп образования гамма-всплесков вычислен по четырём наборам данных: $z-L_{iso}$ (без коррекции на эволюцию светимости; красные окружности), z-L' ($\delta_L = 1.7$; красные круги), $z-E_{iso}$ (без коррекции на эволюцию энерговыделения; зеленые квадраты без заливки) и z-E' ($\delta_E = 1.1$; зелёные квадраты с заливкой). Серыми точками обозначена скорость звездообразования из работ [142, 143, 144, 145]. Сплошной чёрной линией обозначена аппроксимация скорости звездообразования из работы [146]. Нормировка темпа образования гамма-всплесков соответствует скорости звездообразования при $(1 + z) \sim 3.5$.

на бо́льших красных смещениях. Темп образования гамма-всплесков, оценённый по данным на плоскости $z-E_{iso}$ как с коррекцией, так и без коррекции на эволюцию энерговыделения, демонстрирует схожее поведение. Избыток темпа образования гамма-всплесков относительно скорости звездообразования в области низких красных смещений согласуется с результатами более ранних работ, например, [141, 140].

Из четырёх рассмотренных вариантов темпа образования гаммавсплесков, только один, полученный по данным на плоскости $z-L_{iso}$, то есть без коррекции на эволюцию светимости, следует форме скорости звездообразования во всём диапазоне красных смещений ($0.1 \le z \le 5$). Такое поведение темпа образования гамма-всплесков относительно скорости звездообразования также известно из [136], однако, в указанной работе он был оценен по данным на плоскости $z-E_{iso}$ без учёта эволюции энерговыделения.

6.5 Заключение

В данной главе описана непараметрическая методика получения истинных (скорректированных на эффекты селекции) распределений энергетики и темпа образования гамма-всплесков из наблюдаемых распределений. Данная методика была применена к набору 137 гамма-всплесков типа II, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*.

Получены следующие результаты:

1. Оценена эволюция изотропной светимости и изотропного энерговыделения. Выявлена эволюция изотропной пиковой светимости на уровне $\tau_0 \sim 1.7\sigma$ (при использовании «индивидуальных» пороговых потоков) и $\tau_0 \sim 1.2\sigma$ (при использовании «характеристического» порогового потока $F_{\rm lim} = 2 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹). Индексы эволюции изотропной пиковой светимости составляют $\delta_L = 1.7^{+0.9}_{-0.9}$ и $\delta_L = 1.7^{+0.9}_{-1.1}$ для первого и второго случая, соответственно. Также обнаружена эволюция изотропного энерговыделения на уровне $\tau_0 \sim 1.6\sigma$ (при использовании «характеристического» порогового интегрального потока $S_{\rm lim} = 4.3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻²). Индекс эволюции изотропного энерговыделения составляет $\delta_E = 1.1^{+1.5}_{-0.7}$.

- 2. Определены функции (кумулятивные распределения) изотропной светимости и изотропного энерговыделения гамма-всплесков. Проведена аппроксимация указанных распределений двумя моделями: степенным законом с изломом с изломом и степенным законом с экспоненциальным обрезанием. Установлено, что функция светимости наилучшим образом аппроксимируется степенным законом с изломом с индексами ~ -0.5 и ~ -1.0 в области низкой и высокой светимости, соответственно. Функция энерговыделения, напротив, лучше аппроксимируется степенным законом с издежение с индексом $\alpha \sim -0.35$ и параметром $E'_{\rm cut} \sim 1.2 \times 10^{54}$ эрг. Таким образом, получены свидетельства в пользу экспоненциального завала функции изотропного энерговыделения гамма-всплесков с $0.1 \le z \le 5$ с параметром обрезания $E_{\rm cut} \gtrsim 10^{54}$ эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки $L_{\rm iso} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с⁻¹.
- 3. Оценён темп образования гамма-всплесков. Выявлен избыток темпа образования гамма-всплесков относительно скорости звездообразования в области низких красных смещений (z < 1) в случаях, когда темп образования гамма-всплесков рассчитывался по данным на плоскости z-E как с коррекцией, так и без коррекции на эволюцию энерговыделения, а также по данным на плоскости z-L с коррекцией на эволюцию светимости. В области бо́льших красных смещений темп образования гамма-всплесков повторяет форму кривой звездообразования. Также обнаружено, что темп образования гамма-всплесков, определённый по данным на плоскости z-L без коррекции на эволюцию светимости, повторяет форму скорости звездообразования во всём диапазоне красных смещений.

По материалам Главы 6 на защиту выносится следующее положение:

• Оценка космологической эволюции энергетики гамма-всплесков, их функций светимости и энерговыделения по данным эксперимента Конус-*Винд*. Оценка темпа образования гамма-всплесков.

Результаты отражены в публикации:

 A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii et al. The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode // Astrophys. J. 2017. Vol. 850 p. 161.

Таблица 6.1: Аппроксимация функций изотропной светимости и изотропного энерговыделения моделями BPL и CutoffPL.

Данные	Индекс эволюции энергетики	Модель	χ^2 (d.o.f.)	$lpha$ либо $lpha_1$	α_2	$\log x_b$ либо $\log x_{ m cut}$
$\psi(L')$	$\delta_L{=}1.7$	BPL	2.05(133)	-0.47 ± 0.06	-1.05 ± 0.11	0.27 ± 0.12
$\psi(L')$	$\delta_L{=}1.7$	CutoffPL	18.5(134)	-0.60 ± 0.04		2.10 ± 0.15
$\psi(E')$	$\delta_E{=}1.1$	BPL	19.2(126)	-0.36 ± 0.01	-1.28 ± 0.11	1.30 ± 0.04
$\psi(E')$	$\delta_E{=}1.1$	CutoffPL	12.7(127)	-0.31 ± 0.02		2.09 ± 0.04
$\psi(L_{\rm iso})$	эволюции нет	BPL	2.32(133)	-0.48 ± 0.06	-1.00 ± 0.10	0.96 ± 0.15
$\psi(L_{\rm iso})$	эволюции нет	$\operatorname{CutoffPL}$	8.90 (134)	-0.54 ± 0.04		2.58 ± 0.11
$\psi(E_{\rm iso})$	эволюции нет	BPL	17.2(126)	-0.35 ± 0.01	-1.29 ± 0.12	1.80 ± 0.05
$\psi(E_{\rm iso})$	эволюции нет	CutoffPL	15.4(127)	-0.32 ± 0.01	•••	2.63 ± 0.04

Глава 7

Корреляции спектральной жёсткости излучения и энергетики гамма-всплесков

7.1 Введение

Широкий диапазон энергетики гамма-всплесков в собственной космологической системе отсчёта, в том числе с коррекцией на коллимацию излучения, не позволяет использовать эти явления в качестве стандартных свечей в «классическом» смысле этого понятия. В то же время, наличие корреляций между параметрами собственного излучения и энергетикой гамма-всплесков [67, 68, 99] предоставляет возможность построения «Хаббловской диаграммы» для гамма-всплесков и оценки эволюции параметров космологических моделей в широком диапазоне красных смещений [147, 148, 149]. В рамках данного подхода подразумевается взаимно однозначное соответствие между некоторым параметром собственного излучения ($E_{\rm p}$, $\tau_{\rm lag}$ и др.) и энергетикой гамма-всплесков, выраженное степенной зависимостью с показателем (индексом корреляции), обусловленным механизмом генерации излучения.

Следует заметить, что наличие корреляции между параметрами не гарантирует взаимно однозначного соответствия между ними в силу ненулевой, а иногда и значительной, дисперсии корреляции, обусловленной как статистическими и систематическими ошибками оценки наблюдаемых параметров, так и присущим самим гамма-всплескам разбросом параметров генерации излучения (внутренняя дисперсия). Благодаря широкому спектральному диапазону эксперимента Конус-*Винд* параметр жёсткости E_p и энергетика гамма-всплесков в космологической системе отсчёта могут быть определены

118

с незначительной экстраполяцией, минимизируя, тем самым, вклад систематической составляющей в дисперсию исследуемых корреляций.

В настоящей работе для гамма-всплесков исследуемой выборки были оценены параметры корреляциий их жёсткости и энергетики в изотропном приближении и с коррекцией на коллимацию излучения. Соотношение Амати [67], корреляция $E_{\rm iso}-E_{\rm p,i,z}$, связывает усреднённые по времени характеристики всплеска, выражаемые через пиковую энергию интегрального спектра в космологической системе отсчёта и изотропное энерговыделение всплеска. Связь между пиковой энергией пикового спектра в космологической системе отсчёта и изотропной пиковой светимостью, то есть связь между «пиковыми» характеристиками всплеска, описывается соотношением Йонетоку, корреляцией $L_{\rm iso}-E_{\rm p,p,z}$ [68]. «Коллимированные» соотношения $E_{\gamma}-E_{\rm p,i,z}$ и $L_{\gamma} E_{\rm p,p,z}$ [69], являются аналогами соотношений Амати и Йонетоку для энергетики, скорректированной на коллимацию излучения гамма-всплеска.

7.2 Методика

Значимость корреляции параметров оценивалась с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмана (ρ_S) и соответствующей ему вероятности случайной корреляции (вероятность нулевой гипотезы P_{ρ_S} [150]). Нулевая гипотеза состоит в том, что корреляции между переменными нет, следовательно, низкое значение P_{ρ_S} означает наличие значимой корреляции.

Для определения параметров линейной регрессии $y = a \cdot x + b$ минимизировалась статистика «Nukers' estimate» [151]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(y_i - ax_i - b)^2}{a^2 \sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2 + \sigma_{\text{int}}^2},$$

где σ_{xi}^2 и σ_{yi}^2 – ошибки измерений. Следует заметить, что в данной статистике, являющейся модифицированной версией статистики χ^2 , учитываются ошибки измерений по обеим осям, и отсутствует необходимость в выборе зависимой и независимой переменной. Несмотря на то что значимость корреляции может быть высокой, приведённая статистика χ_r^2 может быть $\gg 1$, что указывает либо на недооценку ошибок точек, либо на высокую внутреннюю дисперсию корреляции. Для оценки внутренней дисперсии корреляции в знаменатель статистики χ^2 вводится дополнительный член σ_{int}^2 . В данном подходе значение σ_{int}^2 является параметром регрессии, обеспечивающим равенство χ_r^2 единице. В настоящей работе линейная регрессия между логарифмом энергетики и логарифмом жёсткости была построена двумя способами: с учётом и без учёта σ_{int} .

7.3 Соотношения Амати и Йонетоку

Результаты исследования корреляций жёсткость–энергетика в системах отсчёта наблюдателя и источника гамма-всплеска по данным эксперимента Конус-*Винд* сведены в табл. 7.1. Приведены параметры корреляций для трёх подвыборок гамма-всплесков: всплесков типа I, всплесков типа II и всплесков типа II с надёжно измеренными временами t_{iet} .

В первой колонке таблицы указан тип корреляции, в следующих трёх – число всплесков в подвыборке, коэффициент ранговой корреляции Спирмена и вероятность случайной корреляции. В последующих колонках указаны коэффициенты линейной регрессии *a* и *b*, а также внутренняя дисперсия корреляции σ_{int} . При фиксированном параметре $\sigma_{int} = 0$ приведённая статистика регрессии χ^2_r для всех исследованных кореляций принимает значения $\gg 1$ и в таблице не приводится. При регрессии со свободным параметром σ_{int} статистика $\chi^2_r \equiv 1$.

При переходе из системы отсчёта наблюдателя в космологическую систему отсчёта корреляция жёсткости и энергетики усиливается ($\Delta \rho_S \ge 0.1$) как в соотношении Амати, так и соотношении Йонетоку для подвыборок всплесков типа I и типа II, причём наклон линейной регрессии меняется незначительно. Следует заметить, что корреляции всплесков типа II характеризуются существенно более высокой значимостью ($P_{\rho_S} < 2 \times 10^{-21}$), чем корреляции всплесков типа I. Индексы соотношений Амати и Йонетоку для подвыборки всплесков типа II очень близки: a = 0.469 ($\rho_S = 0.70$, 138 всплесков) и a = 0.494($\rho_S = 0.73$, 137 всплесков), соответственно. Указанные значения согласуются с результатами, полученными в пионерских работах [67] и [68], а также с результатами более поздних работ (например, [152]). При оценке параметров корреляции с учётом её внутренней дисперсии наклон регрессии уменьшается с $a \sim 0.5$ до $a \sim 0.35$ при $\sigma_{int} \sim 0.25$.

7.4 Эффекты наблюдательной селекции

На рис. 7.1 представлены соотношения Амати и Йонетоку по данным эксперимента Конус-Винд. Цветом отмечена значимость детектирования всплеска (верхний ряд) либо красное смещение источника всплеска (нижний ряд). Поскольку граница соотношений Амати и Йонетоку в области мягких и ярких всплесков определяется всплесками с относительно высокой значимостью детектирования и, как было показано в Главе 5, отсутствие детектирований ярких мягких всплесков в эксперименте Конус-Винд не является следствием наблюдательной селекции, отсутствие всплесков ниже указанной границы, по-видимому, обусловлено свойствами самих гамма-всплесков.

В то же время, выбросы в соотношениях Амати и Йонетоку для всплесков типа II лежат в области относительно жёстких и неярких событий, то есть «выше» соотношений Амати и Йонетоку. Почти все такие события были зарегистрированы на низком уровне значимости, и можно ожидать, что с увеличением чувствительности наблюдений в гамма-диапазоне и ростом количества измеренных красных смещений верхняя граница соотношений будет «размываться» вследствие возрастания числа детектирований слабых, в наблюдательном смысле, всплесков с высоким отношением жёсткости излучения к энергетике в собственной системе отсчёта.

Таким образом, получено свидетельство в пользу вывода о том, что резкая граница соотношения Амати в области относительно мягких событий с относительно высоким энерговыделением определяется свойствами популяции гамма-всплесков, в то время как граница в области относительно жёстких всплесков с низкой энергетикой, обусловлена, в существенной мере, эффектами наблюдательной селекции [153]. Аналогичные рассуждения, по результатам эксперимента Конус-*Винд*, применимы и к соотношению Йонетоку.



Рисунок 7.1: Корреляции жёсткость–энергетика. Слева приведены данные для соотношения Амати, справа – для соотношения Йонетоку. Гаммавсплески типа I обозначены треугольниками, типа II – окружностями. Цветом отмечена значимость детектирования всплеска в единицах стандартного отклонения (в верхнем ряду) либо красное смещение всплеска (в нижнем ряду). Пунктирной линией показана линейная регрессия, вычисленная при $\sigma_{int} = 0$ для подвыборки всплесков типа II, всплески типа I показаны для информации. Сплошными и штриховыми линиями показаны интервалы предсказаний (prediction intervals) на уровне 68% и 90%, соответственно.

7.5 Корреляции с учётом коллимации излучения

Для подвыборки из 30 гамма-всплесков типа II с надёжно измеренными временами ахроматического излома кривой блеска t_{jet} были исследованы соотношения жёсткости и энергетики, поправленной на коллимацию излучения. В случае, когда наиболее вероятный тип среды, окружающей источник всплеска, не известен (см. Главу 4), для расчётов использовалось геометрическое среднее факторов коллимации для сред HM и WM.

Результаты представлены в табл. 7.1 и на рис. 7.2. Из сравнения параметров соотношений Амати/Йонетоку и их «коллимированных версий» для данной подвыборки всплесков следует, что учёт коллимации излучения при вычислении энергетики не приводит ни к повышению статистической значимости корреляций, ни к уменьшению внутренней дисперсии соотношений.

Наклоны соотношений Амати/Йонетоку для энергетики, оцененной с учётом коллимации излучения, выше, чем для корреляций, построенных для изотропных эквивалентов. Данный результат согласуется с выводами раздела 4, где было показано, что поправка на коллимацию излучения сужает ширину распределений энергетики на ≲0.4 порядка величины.

7.6 Оценка энергетики GRB 110918A с коррекцией на коллимацию излучения

По методике, приведённой в Главе 4, была оценена энергетика сверхяркого GRB 110918A с поправкой на коллимацию излучения. Для расчётов было использовано значение времени ахроматического излома кривой блеска $t_{jet} =$ 0.2 ± 0.13 дней, оцененное в работе [64] путём экстраполяции наблюдений ранней стадии послесвечения в γ -диапазоне в экспериментах Конус-*Винд* и *INTEGRAL*-SPI-ACS, и более поздних наблюдений рентгеновском диапазоне телескопом *Swift*-XRT.

Энергетика всплеска с учётом коллимации излучения составляет $E_{\gamma} \approx 1.1 \times 10^{51}$ эрг и $L_{\gamma} \approx 1.9 \times 10^{51}$ эрг с⁻¹ и, как видно из рис. 7.2, хорошо



Рисунок 7.2: Корреляции жёсткость–энергетика с учётом коллимации излучения гамма-всплесков. Всплески типа I обозначены красными треугольниками, типа II – синими кругами. Сверхяркий всплеск GRB 110918A отмечен звёздочкой. Пунктирной линией показана линейная регрессия, вычисленная при $\sigma_{int} = 0$ для подвыборки всплесков типа II, всплески типа I показаны для информации. Сплошными и штриховыми линиями показаны интервалы предсказаний на уровне 68% и 90%, соответственно.

согласуется с полученными в настоящей работе соотношениями $E_{\gamma}-E_{\rm p,i,z}$ и $L_{\gamma}-E_{\rm p,p,z}$ для подвыборки всплесков типа II с надёжными оценками $t_{\rm jet}$.

Данный результат подтверждает корректность оценки $t_{\rm jet}$ в [64] и предположение о том, что сильная коллимации излучения ($\theta_{\rm jet} \sim 1.6^{\circ}$) является одним из ключевых факторов в механизме генерации необычайно яркого потока γ -излучения во всплеске GRB 110918А.

7.7 Корреляции для всплесков типа I

Корреляции Амати и Йонетоку для подвыборки из 12 всплесков типа I являются статистически менее значимыми, чем для подвыборки всплесков типа II. Линейные регрессии, вычисленные для подвыборки всплесков типа I, имеют меньшие, чем по данным всплесков типа II, угловые коэффициенты: 0.364 и 0.396 для соотношений Амати и Йонетоку, соответственно.

Следует отметить, что пиковая энергия всплесков типа I в космологической системе отсчёта демонстрирует лишь слабую зависимость от изотропного энерговыделения всплеска при $E_{\rm iso} \lesssim 10^{52}$ эрг (рис. 7.1), аналогичное утверждение верно и для соотношения Йонетоку при $L_{\rm iso} \lesssim 5 \times 10^{52}$ эрг с⁻¹. Для энергетики, превышающей указанные значения, угловые коэффициенты обоих соотношений для подвыборки всплесков типа I сопоставимы с угловыми коэффициентами, вычисленными для подвыборки всплесков типа II.

Как можно заметить из рис. 7.1, все всплески типа I характеризуются высокой пиковой энергией и низким изотропным энерговыделением, тем самым выделяясь на фоне соотношения Амати для всплесков типа II. На плоскости $E_{\rm p,p,z}-L_{\rm iso}$ картина несколько отличается: при изотропных светимостях $L_{\rm iso} \gtrsim 10^{52}$ эрг с⁻¹ всплески типа I располагаются вдоль верхней границы соотношения Йонетоку для всплесков типа II.

Наконец, два гамма-всплеска типа I с известными углами коллимации лежат вне интервала предсказаний на уровне 90% соотношения $E_{\rm p,i,z} - E_{\gamma}$ для подвыборки всплесков типа II. В то же время указанные всплески лежат внутри интервала предсказаний на уровне 68% соотношения $E_{\rm p,p,z}-L_{\gamma}$ (рис. 7.2).

7.8 Заключение

В данной главе рассмотрены корреляции жёсткости и энергетики гаммавсплесков. Проведено сравнение параметров корреляций в системах отсчёта наблюдателя и источника всплеска, также параметров корреляций для подвыборок всплесков типа I и типа II. Исследован вопрос обусловленности корреляций эффектами наблюдательной селекции. Также рассмотрены корреляции жёсткость–энергетика с учётом коллимации излучения.

Получены следующие результаты:

- Значимость корреляций жёсткости и энергетики всплесков типа I и типа II усиливается с переходом из системы отсчёта наблюдателя в космологическую систему отсчёта.
- 2. Граница соотношений Амати и Йонетоку в области относительно мягких всплесков с высоким энерговыделением обусловлена собственными свойствами излучения гамма-всплесков, в то время как граница в области относительно жёстких всплесков с низкой энергетикой обусловлена, в значительной мере, эффектами наблюдательной селекции.
- 3. Установлено, что для подвыборки из 30 всплесков типа II поправка на коллимацию излучения не приводит ни к повышению значимости корреляций, ни к уменьшению их внутренней дисперсии. Наклоны соотношений Амати/Йонетоку для энергетики, оцененной с учётом коллимации излучения, выше, чем для корреляций, построенных для изотропных эквивалентов. Данный результат согласуется с выводами Главы 4, где было показано, что поправка на коллимацию излучения сужает ширину распределений энергетики на ≲0.4 порядка величины.
- 4. Скорректированная на коллимацию излучения энергетика сверхяркого GRB 110918A хорошо согласуется с полученными соотношениями $E_{\gamma}-E_{\rm p,i,z}$ и $L_{\gamma}-E_{\rm p,p,z}$, что подтверждает корректность сделанной в работе [64] косвенной оценки $t_{\rm jet}$ и вывода о том, что узкий угол коллимации излучения ($\theta_{\rm jet} \sim 1.6^{\circ}$) является одним из ключевых факторов в механизме генерации необычайно яркого потока γ -излучения.

- 5. Соотношения Амати и Йонетоку для подвыборки из 12 всплесков типа I характеризуются меньшим наклоном и являются статистически менее значимыми, чем для подвыборки всплесков типа II.
- 6. Параметры двух гамма-всплесков типа I с известными углами коллимации хорошо согласуются с коллимированной версией соотношения Йонетоку и лежат вне коллимированной версии соотношения Амати для всплесков типа II.

По материалам Главы 7 на защиту выносится следующее положение:

• Корреляции жёсткости излучения гамма-всплесков и их энергетики в изотропном приближении и с учётом коллимации излучения.

Результаты отражены в публикации:

 A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii et al. The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode // Astrophys. J. 2017. Vol. 850 p. 161.

Соотношение	N	$ ho_S$	P_{ρ_S}	a	b	$a_{\sigma_{ m int}}$	$b_{\sigma_{ m int}}$	$\sigma_{ m int}$				
Гамма-всплески типа I												
$S-E_{ m p,i}$	12	0.74	$5.8\cdot 10^{-3}$	0.408 ± 0.043	4.98 ± 0.22	0.496 ± 0.117	5.52 ± 0.62	0.135				
$E_{\mathrm{iso}} - E_{\mathrm{p,i},z}$	12	0.83	$9.5\cdot 10^{-4}$	0.364 ± 0.030	-15.7 ± 1.5	0.266 ± 0.068	-10.6 ± 3.5	0.181				
$F_{ m peak}-E_{ m p,p}$	12	0.54	$7.1\cdot 10^{-2}$	0.340 ± 0.045	4.39 ± 0.19	0.349 ± 0.161	4.52 ± 0.74	0.188				
$L_{ m iso}-E_{ m p,p,z}$	12	0.67	$1.7\cdot 10^{-2}$	0.396 ± 0.034	-17.7 ± 1.8	0.243 ± 0.078	-9.61 ± 4.07	0.200				
Гамма-всплески типа II												
$S-E_{ m p,i}$	137	0.59	$3.7\cdot 10^{-14}$	0.418 ± 0.002	4.06 ± 0.01	0.295 ± 0.031	3.66 ± 0.14	0.227				
$E_{\mathrm{iso}} - E_{\mathrm{p,i},z}$	137	0.70	$1.4\cdot 10^{-21}$	0.469 ± 0.003	-22.4 ± 0.1	0.338 ± 0.026	-15.3 ± 1.4	0.229				
$F_{ m peak}-E_{ m p,p}$	136	0.58	$2.2\cdot 10^{-13}$	0.453 ± 0.004	4.68 ± 0.02	0.363 ± 0.041	4.31 ± 0.21	0.253				
$L_{ m iso}-E_{{ m p,p},z}$	136	0.73	$1.6\cdot 10^{-23}$	0.494 ± 0.005	-23.3 ± 0.3	0.347 ± 0.029	-15.5 ± 1.5	0.251				
Гамма-всплески типа II с известным $t_{ m jet}$												
$E_{\rm iso} - E_{{\rm p},{\rm i},z}$	30	0.82	$4.1\cdot 10^{-8}$	0.536 ± 0.004	-27.3 ± 0.2	0.418 ± 0.053	-19.6 ± 2.8	0.233				
$E_{\gamma}-E_{\mathrm{p,i},z}$	30	0.76	$1.1\cdot 10^{-6}$	0.604 ± 0.008	-27.9 ± 0.4	0.499 ± 0.077	-22.7 ± 3.9	0.266				
$L_{ m iso} - E_{{ m p,p},z}$	30	0.75	$1.5\cdot 10^{-6}$	0.529 ± 0.008	-25.1 ± 0.4	0.373 ± 0.063	-16.9 ± 3.3	0.282				
$L_{\gamma}-E_{\mathrm{p,p},z}$	30	0.61	$3.1\cdot 10^{-4}$	0.731 ± 0.016	-33.9 ± 0.8	0.376 ± 0.097	-16.1 ± 4.9	0.343				

Таблица 7.1: Корреляции жёсткость-интенсивность

Примечание — N – число всплесков в подвыборке, ρ_S – ранговый коэффициент корреляции Спирмена, P_{ρ_S} – соответствующая вероятность случайной корреляции, $a(a_{\sigma_{int}})$ и $b(b_{\sigma_{int}})$ – угловой коэффициент и точка пересечения с осью ординат, соответственно, для линейных регрессий без учёта (с учётом) внутренней дисперсии корреляции σ_{int} .

Заключение

В настоящей работе была исследована выборка из 150 гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-*Винд*. Данная выборка покрывает диапазон красных смещений $0.1 \le z \le 5$ и является одним из наиболее обширных наборов всплесков с измеренным красным смещением, зарегистрированных одним прибором в широком энергетическом диапазоне (~10 кэB–10 МэВ).

Основные результаты, полученные в диссертации:

- Проведена классификация гамма-всплесков по критерию жёсткостьдлительность. Двенадцать событий отнесены к типу I (короткиежёсткие), 138 – к типу II (длинные).
- В результате анализа кривых блеска гамма-всплесков определены их полные длительности T₁₀₀, длительности T₉₀ и T₅₀ и спектральная задержка излучения. В ходе спектрального анализа определены параметры излучения гамма-всплесков для моделей Банда и CPL (α, β, E_p). Выбраны модели, наилучшим образом описывающие интегральный и пиковый спектры каждого всплеска.
- 3. Установлено, что результаты спектрального анализа данных Конус-Винд, Fermi-GBM и совместного анализа данных обоих приборов по общему GRB 140801A согласуются, а систематическая ошибка оценки эффективной площади в матрицах отклика детекторов двух экспериментов не превышает 5%.
- 4. Исследованы распределения жёсткость-длительность в системах отсчёта наблюдателя и источника гамма-всплеска. При переходе в космологическую систему отсчёта наблюдается «размытие» границ кластеров всплесков типа I и типа II за счёт большого разброса красных смещений всплесков типа II.

- 5. Определены полные (S) и пиковые (F_{peak}) потоки энергии гаммавсплесков в системе отсчёта наблюдателя. С учётом красного смещения и k-коррекции, получены оценки изотропного эквивалента энерговыделения (E_{iso}) и пиковой светимости (L_{iso}) в болометрическом диапазоне в космологической системе отсчёта.
- 6. Для 32 событий выборки проведена оценка энергетики гамма-всплесков в космологической системе отсчёта с учётом коллимации излучения. Коррекция на коллимацию излучения уменьшает значения энергетики гамма-всплесков на ~2.5 порядка величины по сравнению с изотропным эквивалентом, при этом ширина распределений на логарифмической шкале сужается на ≲0.4 порядка величины.
- 7. Проведено сравнение энергетики для выборки из 26 гамма-всплесков, зарегистрированных в триггерном режиме как в эксперименте Конус-Винд, так и в эксперименте Fermi-GBM. Установлено, что для >90% всплесков выборки разница в оценке E_{iso} двумя экспериментами не превышает 25%. В случае использования одинаковой модели для аппроксимации интегрального спектра данное различие составляет <15%.</p>
- 8. Проведено моделирование чувствительности триггера прибора Конус-Винд к параметрам излучения гамма-всплесков и сравнение полученных результатов с наблюдаемыми пиковыми потоками и пиковыми энергиями гамма-всплесков исследуемой выборки. Было установлено, что отсутствие на диаграмме $F-E_{\rm p}$ ярких ($F \gtrsim 5 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹) всплесков с мягким ($E_{\rm p} \lesssim 100$ кэВ) спектром, которые должны быть легко детектируемы в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд, по-видимому, обусловлено свойствами популяции самих гаммавсплесков, а не инструментальными эффектами селекции.
- 9. Установлено, что область плоскости $z-L_{\rm iso}$, расположенная выше пороговой светимости, соответствующей болометрическому потоку энергии $F_{\rm lim} \sim 1 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹, может считаться свободной от эффектов инструментальной селекции. В плоскости $z-E_{\rm iso}$ область, свободная от эффектов селекции, находится выше порогового энерговыделения, соот-

ветствующего полному энергетичкому потоку $S_{\text{lim}} \sim 3 \times 10^{-6}$ эрг см⁻². Действие эффектов селекции на плоскости $z - E_{\text{p,z}}$ ограничивается областью $E_{\text{p,z}} \lesssim E_{\text{p,z,lim}} = (1+z)^2 \cdot 25$ кэВ.

- 10. Оценен космологический горизонт детектирования гамма-всплесков в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд. Наиболее удалённый горизонт детектирования для всплесков выборки, $z_{\rm max} \approx 16.6$, соответствует сверхяркому GRB 110918А. Подтверждена корректность оценки горизонта детектирования гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд с использованием порогового болометрического потока $F_{\rm lim} \sim 1 \times 10^{-6}$ эрг см⁻² с⁻¹.
- 11. Выявлена космологическая эволюция изотропной пиковой светимости гамма-всплесков на уровне значимости ~ 1.7σ со степенным индексом эволюции $\delta_L = 1.7^{+0.9}_{-0.9}$. Также обнаружена эволюция изотропного энерговыделения на уровне ~ 1.6σ . Индекс эволюции изотропного энерговыделения составляет $\delta_E = 1.1^{+1.5}_{-0.7}$.
- 12. Установлено, что кумулятивная функция светимости гамма-всплесков наилучшим образом аппроксимируется степенным законом с изломом с индексами $\alpha_1 \sim -0.5$ и $\alpha_2 \sim -1.0$ в области низкой и высокой светимости, соответственно. Получены свидетельства в пользу экспоненциального завала функции изотропного энерговыделения гамма-всплесков с параметром обрезания $E_{\rm cut} \gtrsim 10^{54}$ эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки $L_{\rm iso} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с⁻¹.
- Оценён темп образования гамма-всплесков. Выявлен избыток темпа образования гамма-всплесков относительно скорости звездообразования в области низких красных смещений (z < 1).
- 14. Установлено, что значимость корреляций жёсткости и энергетики всплесков типа I и типа II усиливается с переходом из системы отсчёта наблюдателя в космологическую систему отсчёта. Показано, что граница соотношений Амати и Йонетоку в области относительно мягких всплесков с высоким энерговыделением обусловлена собственными

свойствами излучения гамма-всплесков, в то время как граница в области относительно жёстких всплесков с низкой энергетикой обусловлена, в значительной мере, эффектами наблюдательной селекции.

- 15. Установлено, что для подвыборки из 30 всплесков типа II поправка на коллимацию излучения не приводит ни к повышению значимости корреляций, ни к уменьшению их внутренней дисперсии, а наклоны соотношений Амати/Йонетоку для энергетики, оцененной с учётом коллимации излучения, выше, чем для корреляций, построенных для изотропных эквивалентов.
- 16. Показано, что скорректированная на коллимацию излучения энергетика сверхяркого GRB 110918А хорошо согласуется с полученными соотношениями E_γ-E_{p,i,z} и L_γ-E_{p,p,z}, что подтверждает корректность вывода о том, что узкий угол коллимации излучения (θ_{jet} ~ 1.6°) является одним из ключевых факторов в механизме генерации необычайно яркого потока γ-излучения.
- 17. Установлено, что соотношения Амати и Йонетоку для подвыборки из 12 всплесков типа I характеризуются меньшим наклоном и являются статистически менее значимыми, чем для подвыборки всплесков типа II. Параметры двух гамма-всплесков типа I с известными углами коллимации хорошо согласуются с коллимированной версией соотношения Йонетоку и лежат вне коллимированной версии соотношения Амати для всплесков типа II.

7.9 Благодарности

В первую очередь хотелось бы поблагодарить моего научного руководителя, Дмитрия Дмитриевича Фредерикса, за терпение и поддержку на всех этапах выполнения работы, а также за труд, который Дмитрий Дмитриевич вкладывал в мое образование на протяжении последних лет. Также я благодарна Е. П. Мазецу, С. В. Голенецкому и Р. Л. Аптекарю за создание НА Конус-Винд и руководство проведением эксперимента, без которого написание настоящей работы было бы невозможно. Я признательна сотрудникам лаборатории экспериментальной астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе, особенно, Д. С. Свинкину, М. В. Уланову и А. И. Репину за интересные дискуссии и помощь в решении научных и технических вопросов. Также я признательна Марии Дж. Дайнотти и профессору Вахе́ Петросяну за интерес к настоящей работе, в частности, к результатам, изложенным в Главе 6. Я выражаю благодарность моему супругу за поддержку и помощь в решении технических вопросов. Также я выражаю благодарность за поддержку И. И. Андрееву, Г. Д. Бессараб и В. С. Мутиной, а также моим друзьям М. Лагутиной, А. Марковой и Н. Панкратовой. Наконец, я выражаю признательность С. И. Блинникову и С. Ю. Сазонову, взявшим на себя труд быть официальными оппонентами настоящей работы.

Анастасия Цветкова

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.
- Strong I. B., Klebesadel R. W., Olson R. A. A Preliminary Catalog of Transient Cosmic Gamma-Ray Sources Observed by the VELA Satellites // Astrophys. J. - 1974. - Vol. 188. - P. L1.
- 3. 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.
- 4. 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 10. Burenin R. A. Early Afterglows of Short Gamma-Ray Bursts // Astr. Lett. 2000. Vol. 26. P. 269-276.
- 11. Mazets E. P., Aptekar R. L., Frederiks D. D. et al. Konus catalog of short GRBs // ArXiv astro-ph/0209219. 2002.

- 12. 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.
- 13. Norris J. P., Bonnell J. T. Short Gamma-Ray Bursts with Extended Emission // Astrophys. J. 2006. Vol. 643. P. 266-275.
- 14. Costa E., Frontera F., Heise J. et al. Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997 // Nature. 1997. Vol. 387. P. 783–785.
- 15. van Paradijs J., Groot P. J., Galama T. et al. Transient optical emission from the error box of the γ -ray burst of 28 February 1997 // Nature. 1997. Vol. 386. P. 686–689.
- 16. Bloom J. S., Djorgovski S. G., Kulkarni S. R. The Redshift and the Ordinary Host Galaxy of GRB 970228 // Astrophys. J. 2001. Vol. 554. P. 678-683.
- 17. Djorgovski S. G., Metzger M. R., Kulkarni S. R. et al. The optical counterpart to the γ -ray burst GRB 970508 // Nature. 1997. Vol. 387. P. 876–878.
- 18. Metzger M. R., Djorgovski S. G., Kulkarni S. R. et al. Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the γ -ray burst of 8 May 1997 // Nature. 1997. Vol. 387. P. 878–880.
- 20. 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.
- 21. Frail D. A., Kulkarni S. R., Nicastro L. et al. The radio afterglow from the γ -ray burst of 8 May 1997 // Nature. 1997. Vol. 389. P. 261–263.
- 22. Hjorth J., Bloom J. S. The Gamma-Ray Burst Supernova Connection // Chapter 9 in "Gamma-Ray Bursts", Cambridge Astrophysics Series 51, eds. C. Kouveliotou, R. A. M. J. Wijers and S. Woosley, Cambridge University Press (Cambridge), p. 169-190 / Ed. by C. Kouveliotou, R. A. M. J. Wijers, S. Woosley. — 2012. — P. 169–190.
- 23. Gehrels N., Sarazin C. L., O'Brien P. T. et al. A short γ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift z = 0.225 // Nature. 2005. Vol. 437. P. 851–854.

- 24. Ackermann M., Ajello M., Asano K. et al. Fermi-LAT Observations of the Gamma-Ray Burst GRB 130427A // Science. 2014. Vol. 343. P. 42–47.
- 25. Ackermann M., Ajello M., Asano K. et al. The First Fermi-LAT Gamma-Ray Burst Catalog // Astrophys. J. Suppl. — 2013. — Vol. 209. — P. 11.
- 26. Yassine M., Piron F., Mochkovitch R., Daigne F. Time evolution of the spectral break in the high-energy extra component of GRB 090926A // Astron. Astrophys. 2017. Vol. 606. P. A93.
- 27. 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.
- 28. Hurley K., Mitrofanov I. G., Golovin D. et al. The Interplanetary Network // EAS Publications Series / Ed. by A. J. Castro-Tirado, J. Gorosabel, I. H. Park. Vol. 61 of EAS Publications Series. 2013. P. 459–464.
- 29. 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.
- 30. 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.
- 31. Atteia J.-L. A simple empirical redshift indicator for gamma-ray bursts // Astron. Astrophys. 2003. Vol. 407. P. L1–L4.
- Ghisellini G., Haardt F., Campana S. et al. Redshift Determination in the X-Ray Band of Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. - 1999. - Vol. 517. -P. 168-173.
- 33. Foley S., Watson D., Gorosabel J. et al. The galaxies in the field of the nearby GRB 980425/SN 1998bw // Astron. Astrophys. - 2006. - Vol. 447. -P. 891-895.
- 34. Cucchiara A., Levan A. J., Fox D. B. et al. A Photometric Redshift of $z \sim 9.4$ for GRB 090429B // Astrophys. J. 2011. Vol. 736. P. 7.
- 35. Salvaterra R., Della Valle M., Campana S. et al. GRB090423 at a redshift of $z \sim 8.1$ // Nature. 2009. Vol. 461. P. 1258–1260.
- 36. Lamb D. Q., Reichart D. E. Gamma-ray bursts as a probe of cosmology // 20th Texas Symposium on relativistic astrophysics / Ed. by J. C. Wheeler, H. Martel. — Vol. 586 of American Institute of Physics Conference Series. — 2001. — P. 605–610.

- 37. Cano Z., Wang S.-Q., Dai Z.-G., Wu X.-F. The Observer's Guide to the Gamma-Ray Burst Supernova Connection // Advances in Astronomy. 2017. Vol. 2017. P. 8929054.
- 38. Iwamoto K., Mazzali P. A., Nomoto K. et al. A hypernova model for the supernova associated with the γ -ray burst of 25 April 1998 // Nature. 1998. Vol. 395. P. 672–674.
- Berger E. Short-Duration Gamma-Ray Bursts // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2014. Vol. 52. P. 43–105.
- 40. Woosley S. E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes // Astrophys. J. 1993. Vol. 405. P. 273-277.
- 41. Paczyński B. Are Gamma-Ray Bursts in Star-Forming Regions? // Astrophys. J. — 1998. — Vol. 494. — P. L45–L48.
- MacFadyen A. I., Woosley S. E. Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in "Failed Supernovae" // Astrophys. J. 1999. Vol. 524. P. 262–289.
- 43. Woosley S. E., Bloom J. S. The Supernova Gamma-Ray Burst Connection // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2006. Vol. 44. P. 507–556.
- 44. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger // Astrophys. J. 2017. Vol. 848. P. L12.
- 45. LIGO Scientific Collaboration, Aasi J., Abbott B. P. et al. Advanced LIGO // Class. Quant. Grav. 2015. Vol. 32, no. 7. P. 074001.
- 46. 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.
- 47. Kumar P., Zhang B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets // Phys. Rep. 2014. Vol. 561. P. 1–109.
- 48. Zhang B., Fan Y. Z., Dyks J. et al. Physical Processes Shaping Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglow Light Curves: Theoretical Implications from the Swift X-Ray Telescope Observations // Astrophys. J. - 2006. - Vol. 642. -P. 354-370.
- 49. Rhoads J. E. The Dynamics and Light Curves of Beamed Gamma-Ray Burst Afterglows // Astrophys. J. 1999. Vol. 525. P. 737–749.

- 50. 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.
- 51. 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.
- 52. Frail D. A., Kulkarni S. R., Sari R. et al. Beaming in Gamma-Ray Bursts: Evidence for a Standard Energy Reservoir // Astrophys. J. - 2001. - Vol. 562. - P. L55-L58.
- 53. Mundell C. G., Kopač D., Arnold D. M. et al. Highly polarized light from stable ordered magnetic fields in GRB 120308A // Nature. 2013. Vol. 504. P. 119–121.
- 54. Troja E., Lipunov V. M., Mundell C. G. et al. Significant and variable linear polarization during the prompt optical flash of GRB 160625B. // Nature. 2017. Vol. 547. P. 425–427.
- 55. Lloyd-Ronning N. M., Fryer C. L., Ramirez-Ruiz E. Cosmological Aspects of Gamma-Ray Bursts: Luminosity Evolution and an Estimate of the Star Formation Rate at High Redshifts // Astrophys. J. - 2002. - Vol. 574. -P. 554-565.
- 56. Larson R. B. Early star formation and the evolution of the stellar initial mass function in galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 1998. - Vol. 301. -P. 569-581.
- 57. Malhotra S., Rhoads J. E. Large Equivalent Width Ly α line Emission at z=4.5: Young Galaxies in a Young Universe? // Astrophys. J. 2002. Vol. 565. P. L71-L74.
- 58. Meynet G., Maeder A., Schaller G. et al. Grids of massive stars with high mass loss rates. V. From 12 to 120 M_{sun-} at Z=0.001, 0.004, 0.008, 0.020 and 0.040 // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1994. Vol. 103. P. 97-105.
- 59. Langer N., Henkel C. The Synthesis of Helium and CNO Isotopes in Massive Stars // Space Sci. Rev. 1995. Vol. 74. P. 343-353.
- 60. Ramirez-Ruiz E., Dray L. M., Madau P., Tout C. A. Winds from massive stars: implications for the afterglows of γ -ray bursts // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2001. Vol. 327. P. 829–840.
- 61. Popham R., Woosley S. E., Fryer C. Hyperaccreting Black Holes and Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. 1999. Vol. 518. P. 356-374.

- Abdo A. A., Ackermann M., Arimoto M. et al. Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C // Science. - 2009. - Vol. 323. - P. 1688.
- 63. Greiner J., Clemens C., Krühler T. et al. The redshift and afterglow of the extremely energetic gamma-ray burst GRB 080916C // Astron. Astrophys. – 2009. – Vol. 498. – P. 89–94.
- 64. Frederiks D. D., Hurley K., Svinkin D. S. et al. The Ultraluminous GRB 110918A // Astrophys. J. 2013. Vol. 779. P. 151.
- 65. Waxman E., Kulkarni S. R., Frail D. A. Implications of the Radio Afterglow from the Gamma-Ray Burst of 1997 May 8 // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 497. – P. 288–293.
- 66. Sari R., Piran T., Halpern J. P. Jets in Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. - 1999. - Vol. 519. - P. L17-L20.
- 67. 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.
- 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.
- 69. Ghirlanda G., Ghisellini G., Lazzati D. The Collimation-corrected Gamma-Ray Burst Energies Correlate with the Peak Energy of Their νF_{ν} Spectrum // Astrophys. J. - 2004. - Vol. 616. - P. 331-338.
- 70. Atteia J.-L. Gamma-ray bursts: towards a standard candle luminosity // Astron. Astrophys. 1997. Vol. 328. P. L21–L24.
- 71. Friedman A. S., Bloom J. S. Toward a More Standardized Candle Using Gamma-Ray Burst Energetics and Spectra // Astrophys. J. – 2005. – Vol. 627. – P. 1–25.
- 72. Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al. Planck 2013 results.
 XVI. Cosmological parameters // Astron. Astrophys. 2014. Vol. 571. P. A16.
- 73. 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.

- 74. 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.
- 75. Sakamoto T., Pal'Shin V., Yamaoka K. et al. Spectral Cross-Calibration of the Konus-Wind, the Suzaku/WAM, and the Swift/BAT Data Using Gamma-Ray Bursts // Publications of the Astronomical Society of Japan. — 2011. — Vol. 63. — P. 215—.
- 76. Lipunov V. M., Gorosabel J., Pruzhinskaya M. V. et al. The optical identification of events with poorly defined locations: the case of the Fermi GBM GRB 140801A // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2016. - Vol. 455. - P. 712-724.
- 77. Tsvetkova A., Frederiks D., Golenetskii S. et al. The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode // Astrophys. J. 2017. Vol. 850. P. 161.
- 78. 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.
- 79. Blinnikov S. I., Novikov I. D., Perevodchikova T. V., Polnarev A. G. Exploding Neutron Stars in Close Binaries // Soviet Astronomy Letters. – 1984. – Vol. 10. – P. 177–179.
- 80. Paczynski B. Gamma-ray bursters at cosmological distances // Astrophys. J. — 1986. — Vol. 308. — P. L43–L46.
- Eichler D., Livio M., Piran T., Schramm D. N. Nucleosynthesis, neutrino bursts and gamma-rays from coalescing neutron stars // Nature. — 1989. — Vol. 340. — P. 126–128.
- 82. Paczynski B. Cosmological gamma-ray bursts // Acta Astron. 1991. Vol. 41. P. 257–267.
- 83. Narayan R., Paczynski B., Piran T. Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars // Astrophys. J. 1992. Vol. 395. P. L83–L86.
- 84. Свинкин, Д. С. Наблюдения коротких гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд. // Дис. канд. ф.-м. наук: 01.03.02 / ФТИ им. А. Ф. Иоф-фе РАН. СПб., 2016. 155 с.

- 85. Svinkin D. S., Frederiks D. D., Aptekar R. L. et al. The Second Konus-Wind Catalog of Short Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. Suppl. – 2016. – Vol. 224. – P. 10.
- 86. Gehrels N., Norris J. P., Barthelmy S. D. et al. A new γ-ray burst classification scheme from GRB060614 // Nature. — 2006. — Vol. 444. — P. 1044–1046.
- 87. Gal-Yam A., Fox D. B., Price P. A. et al. A novel explosive process is required for the γ -ray burst GRB 060614 // Nature. 2006. Vol. 444. P. 1053–1055.
- 88. Fynbo J. P. U., Watson D., Thöne C. C. et al. No supernovae associated with two long-duration γ -ray bursts // Nature. 2006. Vol. 444. P. 1047–1049.
- 89. Della Valle M., Chincarini G., Panagia N. et al. An enigmatic long-lasting γ -ray burst not accompanied by a bright supernova // Nature. 2006. Vol. 444. P. 1050–1052.
- 90. de Ugarte Postigo A., Castro-Tirado A. J., Guziy S. et al. GRB 060121: Implications of a Short-/Intermediate-Duration γ-Ray Burst at High Redshift // Astrophys. J. - 2006. - Vol. 648. - P. L83–L87.
- 91. Castro-Tirado A. J., Sanchez-Ramirez R., Lombardi G., Rivero M. A. GRB 150424A: 10.4m GTC spectroscopy. // GCN Circ. 2015. Vol. 17758.
- 92. Perley D. A., McConnell N. J. GRB 150424A: Keck detection of optical afterglow. // GCN Circ. 2015. Vol. 17745.
- 93. Tanvir N. R., Levan A. J., Fruchter A. S. et al. GRB 150424A: HST imaging. // GCN Circ. 2015. Vol. 18100.
- 94. Berger E., Kulkarni S. R., Fox D. B. et al. Afterglows, Redshifts, and Properties of Swift Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. 2005. Vol. 634. P. 501-508.
- 95. Coward D. M., Howell E. J., Branchesi M. et al. The Swift gamma-ray burst redshift distribution: selection biases and optical brightness evolution at high z? // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2013. Vol. 432. P. 2141–2149.
- 96. Fynbo J. P. U., Jakobsson P., Prochaska J. X. et al. Low-resolution Spectroscopy of Gamma-ray Burst Optical Afterglows: Biases in the Swift Sample and Characterization of the Absorbers // Astrophys. J. Suppl. 2009. Vol. 185. P. 526–573.

- 97. 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.
- 98. Band D. L. Gamma-Ray Burst Spectral Evolution through Cross-Correlations of Discriminator Light Curves // Astrophys. J. - 1997. - Vol. 486. - P. 928.
- 99. Norris J. P., Marani G. F., Bonnell J. T. Connection between Energydependent Lags and Peak Luminosity in Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. - 2000. -- Vol. 534. -- P. 248-257.
- 100. Racusin J. L., Karpov S. V., Sokolowski M. et al. Broadband observations of the naked-eye γ -ray burst GRB080319B // Nature. 2008. Vol. 455. P. 183–188.
- 101. Maselli A., Melandri A., Nava L. et al. GRB 130427A: A Nearby Ordinary Monster // Science. - 2014. - Vol. 343. - P. 48-51.
- 102. Frederiks D., Golenetskii S., Aptekar R. et al. Konus-Wind observation of GRB 160623A. // GCN Circ. 2016. Vol. 19554.
- 103. Svinkin D., Golenetskii S., Aptekar R. et al. Konus-Wind observation of GRB 160625B. // GCN Circ. 2016. Vol. 19604.
- 104. Zhang B.-B., Zhang B., Castro-Tirado A. J. et al. Transition from Fireball to Poynting-flux-dominated Outflow in Three-Episode GRB 160625B // ArXiv e-prints. — 2016.
- 105. 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.
- 106. 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.
- 107. Sakamoto T., Barthelmy S. D., Barbier L. et al. The First Swift BAT Gamma-Ray Burst Catalog // Astrophys. J. Suppl. — 2008. — Vol. 175. — P. 179–190.
- 108. Krimm H. A., Yamaoka K., Sugita S. et al. Testing the E _{peak}-E _{iso} Relation for GRBs Detected by Swift and Suzaku-WAM // Astrophys. J. – 2009. – Vol. 704. – P. 1405–1432.

- 109. Goldstein A., Burgess J. M., Preece R. D. et al. The Fermi GBM Gamma-Ray Burst Spectral Catalog: The First Two Years // Astrophys. J. Suppl. — 2012. — Vol. 199. — P. 19.
- 110. Preece R. D., Briggs M. S., Giblin T. W. et al. On the Consistency of Gamma-Ray Burst Spectral Indices with the Synchrotron Shock Model // Astrophys. J. 2002. Vol. 581. P. 1248-1255.
- 111. 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.
- 112. Turpin D., Heussaff V., Dezalay J.-P. et al. Investigating the Impact of Optical Selection Effects on Observed Rest-frame Prompt GRB Properties // Astrophys. J. 2016. Vol. 831. P. 28.
- 113. Goldstein A., Preece R. D., Mallozzi R. S. et al. The BATSE 5B Gamma-Ray Burst Spectral Catalog // Astrophys. J. Suppl. – 2013. – Vol. 208. – P. 21.
- 114. 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.
- 115. Meegan C., Lichti G., Bhat P. N. et al. The Fermi Gamma-ray Burst Monitor // Astrophys. J. 2009. Vol. 702. P. 791-804.
- 116. Pelassa V. GRB 140801A: Fermi GBM observation. // GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 16658, #1 (2014). 2014. Vol. 16658.
- 117. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E. et al. Master Robotic Net // Advances in Astronomy. 2010. Vol. 2010. P. 349171.
- 118. von Kienlin A., Meegan C. A., Paciesas W. S. et al. The Second Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Four Years // Astrophys. J. Suppl. 2014. Vol. 211. P. 13.
- 119. Golenetskii S., Aptekar R., Frederiks D. et al. Konus-Wind observation of GRB 140801A. // GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 16660, #1 (2014). - 2014. - Vol. 16660.
- 120. de Ugarte Postigo A., Gorosabel J., Thoene C. C. et al. GRB 140801A: Redshift from the 10.4m GTC telescope. // GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 16657, #1 (2014). — 2014. — Vol. 16657.

- 121. Moskvitin A., Komarova V., Sokolova T. et al. GRB 140801A: BTA confirmation of redshift. // GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 16663, #1 (2014). 2014. Vol. 16663.
- 122. Bloom J. S., Frail D. A., Sari R. The Prompt Energy Release of Gamma-Ray Bursts using a Cosmological k-Correction // Astron. J. - 2001. - Vol. 121. - P. 2879-2888.
- 123. Kovács A., Bagoly Z., Balázs L. G. et al. Cosmology with Gamma-Ray Bursts Using k-correction // Acta Polytechnica. — 2011. — Vol. 51, no. 2. — P. 68.
- 124. Li Z.-Y., Chevalier R. A. Wind-Interaction Models for the Early Afterglows of Gamma-Ray Bursts: The Case of GRB 021004 // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 589. – P. L69–L72.
- 125. Ghirlanda G., Nava L., Ghisellini G., Firmani C. Confirming the γ -ray burst spectral-energy correlations in the era of multiple time breaks // Astron. Astrophys. 2007. Vol. 466. P. 127–136.
- 126. Bouvier A. Gamma-Ray Burst Observations at High Energy with the Fermi Large Area Telescope // ArXiv e-prints. 2010.
- 127. Atteia J.-L., Heussaff V., Dezalay J.-P. et al. The Maximum Isotropic Energy of Gamma-ray Bursts // Astrophys. J. 2017. Vol. 837. P. 119.
- 128. Atteia J.-L., Heussaff V., Dezalay J.-P. et al. Erratum: "The Maximum Isotropic Energy of Gamma-Ray Bursts" // Astrophys. J. 2018. Vol. 852. P. 144.
- 129. Narayana Bhat P., Meegan C. A., von Kienlin A. et al. The Third Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Six Years // Astrophys. J. Suppl. 2016. Vol. 223. P. 28.
- 130. Dainotti M. G., Del Vecchio R. Gamma Ray Burst afterglow and promptafterglow relations: An overview // New Astron. Rev. - 2017. - Vol. 77. -P. 23-61.
- 131. Schmidt M., Higdon J. C., Hueter G. Application of the V/V(max) test to gamma-ray bursts // Astrophys. J. - 1988. - Vol. 329. - P. L85-L87.
- 132. Band D. L. Comparison of the Gamma-Ray Burst Sensitivity of Different Detectors // Astrophys. J. 2003. Vol. 588. P. 945-951.
- 133. Guetta D., Della Valle M. On the Rates of Gamma-Ray Bursts and Type Ib/c Supernovae // Astrophys. J. 2007. Vol. 657. P. L73-L76.
- 134. Coward D. M., Howell E. J., Piran T. et al. The Swift short gammaray burst rate density: implications for binary neutron star merger rates // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 425. — P. 2668–2673.
- 135. Svinkin D. S., Hurley K., Aptekar R. L. et al. A search for giant flares from soft gamma-ray repeaters in nearby galaxies in the Konus-WIND short burst sample // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Vol. 447. — P. 1028–1032.
- 136. Wu S.-W., Xu D., Zhang F.-W., Wei D.-M. Gamma-ray bursts: the isotropic-equivalent-energy function and the cosmic formation rate // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 423. — P. 2627–2632.
- 137. Lynden-Bell D. A method of allowing for known observational selection in small samples applied to 3CR quasars // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1971. — Vol. 155. — P. 95.
- 138. Efron B., Petrosian V. A simple test of independence for truncated data with applications to redshift surveys // Astrophys. J. - 1992. - Vol. 399. -P. 345-352.
- 139. Petrosian V. Luminosity function of flux-limited samples. // Statistical Challenges in Modern Astronomy / Ed. by E. D. Feigelson, G. J. Babu. – 1992. – P. 173–200.
- 140. Petrosian V., Kitanidis E., Kocevski D. Cosmological Evolution of Long Gamma-Ray Bursts and the Star Formation Rate // Astrophys. J. - 2015. --Vol. 806. -- P. 44.
- 141. Yu H., Wang F. Y., Dai Z. G., Cheng K. S. An Unexpectedly Low-redshift Excess of Swift Gamma-ray Burst Rate // Astrophys. J. Suppl. – 2015. – Vol. 218. – P. 13.
- 142. Hopkins A. M. On the Evolution of Star-forming Galaxies // Astrophys. J. - 2004. - Vol. 615. - P. 209–221.
- 143. Bouwens R. J., Illingworth G. D., Labbe I. et al. A candidate redshift z ~ 10 galaxy and rapid changes in that population at an age of 500Myr // Nature. -2011. Vol. 469. P. 504–507.
- 144. Hanish D. J., Meurer G. R., Ferguson H. C. et al. The Survey for Ionization in Neutral Gas Galaxies. II. The Star Formation Rate Density of the Local Universe // Astrophys. J. — 2006. — Vol. 649. — P. 150–162.
- 145. Thompson R. I., Eisenstein D., Fan X. et al. Star Formation History of the Hubble Ultra Deep Field: Comparison with the Hubble Deep Field-North // Astrophys. J. 2006. Vol. 647. P. 787–798.

- 146. Li L.-X. Star formation history up to z = 7.4: implications for gammaray bursts and cosmic metallicity evolution // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Vol. 388. — P. 1487–1500.
- 147. Bloom J. S., Frail D. A., Kulkarni S. R. Gamma-Ray Burst Energetics and the Gamma-Ray Burst Hubble Diagram: Promises and Limitations // Astrophys. J. - 2003. - Vol. 594. - P. 674-683.
- 148. Schaefer B. E. The Hubble Diagram to Redshift > 6 from 69 Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. 2007. Vol. 660. P. 16-46.
- 149. Amati L., Guidorzi C., Frontera F. et al. Measuring the cosmological parameters with the $E_{p,i} - E_{iso}$ correlation of gamma-ray bursts // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Vol. 391. — P. 577–584.
- 150. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes in C. The art of scientific computing. 1992.
- 151. Tremaine S., Gebhardt K., Bender R. et al. The Slope of the Black Hole Mass versus Velocity Dispersion Correlation // Astrophys. J. – 2002. – Vol. 574. – P. 740–753.
- 152. Nava L., Salvaterra R., Ghirlanda G. et al. A complete sample of bright Swift long gamma-ray bursts: testing the spectral-energy correlations // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 421. — P. 1256–1264.
- 153. Heussaff V., Atteia J.-L., Zolnierowski Y. The $E_{\text{peak}} E_{\text{iso}}$ relation revisited with Fermi GRBs. Resolving a long-standing debate? // Astron. Astrophys. — 2013. — Vol. 557. — P. A100.