

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2018

Работа выполнена в лаборатории экспериментальной астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Научный руководитель: Фредерикс Дмитрий Дмитриевич,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаб. экспериментальной
астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: Блинников Сергей Иванович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник НИЦ «КИ» – ИТЭФ

Сазонов Сергей Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
зав. лабораторией экспериментальной астрофизики
отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН

Ведущая организация: Государственный Астрономический Институт
имени П. К. Штернберга Московского
государственного университета
имени М. В. Ломоносова

Защита состоится 5 июня 2018 г. в 16 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.205.03 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе, по адресу:
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и
на веб-сайте ФТИ www.ioffe.ru.

Автореферат разослан 4 мая 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.

А. М. Красильщиков

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Несмотря на то что с момента открытия космических гамма-всплесков (GRB, Gamma-Ray Burst), кратковременных (от десятков миллисекунд до нескольких часов) вспышек мягкого γ -излучения, 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 была достоверно установлена космологическая природа их источников [1]. К 2017 г. космологические красные смещения z были определены для ~ 450 гамма-всплесков и находятся в диапазоне от $z = 0.0087$ (GRB 980425) до $z = 9.4$ (GRB 090429B).

Энергия 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 высоких наблюдаемых потоков энергии гамма-всплесков и космологических расстояний до их источников, данные характеристики достигают гигантских величин: $E_{\text{iso}} \lesssim 10^{55}$ эрг (GRB 080916C, $z = 4.35$) и $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с^{-1} (GRB 110918A, $z = 0.981$). Огромное изотропное энерговыделение гамма-всплесков было впервые объяснено для GRB 970508 [2] предположением о высокой коллимации излучения (jet beaming). Ключевой характеристикой, позволяющей оценить угол коллимации гамма-всплеска θ_{jet} [3], 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 $\sim 10^{51}$ эрг, что сопоставимо с энерговыделением сверхновой [4].

Исследование корреляций между жёсткостью и энергетикой гамма-всплесков в космологической системе отсчёта (так называемые соотношения «Амати» [5], «Йонетоку» [6] и их «коллимированные» версии [7]) может способствовать разрешению вопроса о применимости гамма-всплесков в качестве «стандартных свечей» [8]. Положительное решение данного вопроса позволит наложить ограничения на параметры космологических моделей в диапазоне красных смещений до $z \sim 10$. Постепенное накопление статистики по наблюдениям гамма-всплесков с известными красными смещениями позволяет перейти к оценке таких характеристик их популяции, как функция светимости и темп образования источников гамма-всплесков (GRBFR, GRB Formation Rate), и их космологической эволюции. Оценки данных параметров важны для понимания природы центральной машины и механизмов генерации излучения GRB, а также исследования параметров популяций их прародителей в разные космологические эпохи.

Эксперимент *Конус-Винд* [9] успешно проводится с ноября 1994 г. и играет важную роль в исследовании гамма-всплесков благодаря уникальному сочетанию характеристик орбиты и аппаратуры: положение космического ап-

парата 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 *Конус-Винд* энергия обрезания спектра может быть определена непосредственно из спектральных данных прибора, и энерговыделение гамма-всплесков может быть оценено с минимальной экстраполяцией. К 2017 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.

Цель настоящей работы заключается в определении временных и спектральных характеристик, а также полных и пиковых потоков энергии гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд*; получении характеристик гамма-всплесков в космологической системе отсчёта, в том числе, с учетом коллимации излучения, и оценке на их основе параметров популяции гамма-всплесков. Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ данных о красных смещениях гамма-всплесков. Формирование выборки GRB с известными z , зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд*. Классификация отобранных GRB по критерию жёсткость-длительность.
2. Оценка фоновой обстановки, временной анализ кривых блеска гамма-всплесков, определение полных длительностей всплесков T_{100} , длительностей T_{90} и T_{50} . Вычисление спектральных задержек излучения.
3. Определение оптимальных временных интервалов для анализа энергетических спектров. Анализ интегральных и пиковых спектров с использованием стандартных для GRB моделей Банда [10] и CPL. Определение наилучшей модели для каждого исследованного энергетического спектра. Вычисление полного (S) и пикового (F_p) потока энергии гамма-всплесков в системе отсчёта наблюдателя.
4. Оценка, с учетом космологической k -коррекции, E_{iso} и L_{iso} в болометрическом диапазоне энергий 1 кэВ– $(1+z) 10$ МэВ в системе отсчета источника гамма-всплеска.
5. Анализ данных об ахроматических изломах кривых блеска послесвечений гамма-всплесков и формирование выборки GRB с надёжными оценками t_{jet} . Оценка полного энерговыделения и пиковой светимости гамма-всплесков с учётом коллимации излучения.
6. Оценка болометрической чувствительности эксперимента *Конус-Винд*. Оценка космологических пределов наблюдаемости гамма-всплесков в эксперименте *Конус-Винд*.

7. Оценка космологической эволюции энерговыделения гамма-всплесков, их функций светимости и энерговыделения. Оценка темпа образования источников гамма-всплесков.
8. Исследование корреляций жёсткости излучения гамма-всплесков и их энерговыделения в изотропном приближении и с учётом коллимации излучения.

Научная новизна

Следующие основные результаты получены впервые:

1. В результате анализа 150 GRB с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте *Конус-Винд*, получены оценки длительности, спектральных параметров и энерговыделения в космологической системе отсчёта, для 32 GRB оценено энерговыделение с учётом коллимации излучения. Опубликованный каталог [A5] является наиболее полным набором характеристик GRB в собственной системе отсчёта, полученных в результате систематического анализа однородного массива наблюдений в широком диапазоне энергий γ -квантов.
2. Проведён совместный временной и спектральный анализ данных GRB 140801A, одновременно зарегистрированного в экспериментах *Конус-Винд* и *Fermi-GBM*, подтверждена согласованность методик анализа данных двух экспериментов. На основании совместного анализа результатов экспериментов *Конус-Винд* и *Fermi-GBM* по 26 гамма-всплескам показана согласованность полученных оценок E_{iso} .
3. Получены оценки чувствительности прибора *Конус-Винд* в космологической системе отсчёта гамма-всплесков и оценки космологических пределов наблюдаемости гамма-всплесков в эксперименте *Конус-Винд*.
4. Получены независимые оценки параметров космологической эволюции энерговыделения гамма-всплесков, функций изотропной светимости и энерговыделения в интервале $0.1 \leq z \leq 5$. На независимой выборке получены свидетельства в пользу экспоненциального завала функции изотропного энерговыделения GRB с параметром обрезания $E_{\text{cut}} \gtrsim 10^{54}$ эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с^{-1} .
5. Проведена независимая оценка космологической эволюции темпа образования источников гамма-всплесков в интервале $0.1 \leq z \leq 5$, и получены свидетельства в пользу относительного избытка GRBFR в сравнении с темпом звездообразования в области малых красных смещений ($z < 1$).
6. Получены независимые, наиболее надёжные оценки параметров корреляций жёсткости и энерговыделения гамма-всплесков в космологической системе отсчёта. Установлено, что учёт фактора коллимации излучения не повышает значимость исследованных корреляций. Показано, что уникальная яркость гамма-всплеска GRB 110918A обусловлена исключительно сильной коллимацией излучения.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

1. Использованием стандартных и апробированных методик обработки наблюдательных данных по гамма-всплескам.

2. Научной кооперацией с другими космическими экспериментами по изучению гамма-всплесков, совместным анализом общих событий, 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 от источников гамма-всплесков в различных спектральных диапазонах.
4. Оценка параметров космологической эволюции энерговыделения гамма-всплесков, 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 источников гамма-всплесков важна для проверки моделей прародителей гамма-всплесков.
6. Параметры корреляций жёсткости излучения гамма-всплесков и их энерговыделения 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. Временные и спектральные характеристики 150 гамма-всплесков с известным космологическим красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд*.
2. Изотропный эквивалент полного энерговыделения и пиковой светимости 150 гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте *Конус-Винд*. Полное энерговыделение и пиковая светимость с коррекцией на коллимацию излучения для 32 гамма-всплесков с надёжными оценками t_{jet} .
3. Эффекты селекции при наблюдениях гамма-всплесков в эксперименте *Конус-Винд* и соответствующие им ограничения в космологической системе отсчёта. Космологические пределы наблюдаемости гамма-всплесков в эксперименте *Конус-Винд*.
4. Оценка космологической эволюции энерговыделения гамма-всплесков, их функций светимости и энерговыделения по данным эксперимента *Конус-Винд*. Оценка относительного темпа образования источников гамма-всплесков.
5. Корреляции жёсткости излучения гамма-всплесков и их энерговыделения в изотропном приближении и с учётом коллимации излучения.

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2013 по 2017 годы и опубликованы в **пяти** статьях в реферируемых журналах, входящих в Перечень ВАК. Полученные результаты также доложены на **пяти** всероссийских и международных конференциях:

1. «Астрофизика высоких энергий» HEA2013, 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)
3. «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 и ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Полный объём диссертации составляет **146** страниц текста с **29** рисунками и **девятью** таблицами. Список литературы содержит **153** наименования.

Содержание работы

Во введении представлен краткий обзор истории наблюдения гамма-всплесков, описаны основные характеристики их излучения и наиболее вероятные модели источников. Обсуждаются методы и особенности определения красных смещений гамма-всплесков. Приведено возможное обоснование эволюции энерговыделения GRB. Поставлены задачи исследования и продемонстрирована их актуальность. Сформулированы основные результаты работы, их научная новизна и положения, выносимые на защиту. Приведен список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

В первой главе приведены характеристики эксперимента *Конус-Винд*, в ходе которого получены используемые в диссертационной работе наблюдательные данные. Эксперимент предназначен для исследования характеристик транзиентных астрофизических явлений в широком диапазоне энергий (~ 10 кэВ– 10 МэВ) и с высоким (до 2 мс) временным разрешением. Сцинтилляционный гамма-спектрометр *Конус*, разработанный и изготовленный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, установлен на борту космической обсерватории *GGS-Wind* (NASA, США), находящейся вблизи точки Лагранжа L1 системы Солнце-Земля, и оснащен двумя детекторами NaI(Tl) с эффективной площадью ~ 80 – 160 см² в зависимости от энергии падающего излучения и угла его падения к оси детектора. Детекторы работают независимо друг от друга в двух режимах наблюдений: фоновом и триггерном. Переход в триггерный режим происходит при статистически значимом превышении скорости счета над фоном на интервале 1 с или 140 мс в энергетическом диапазоне

50–200 кэВ. В фоновом режиме ведется непрерывный мониторинг в трёх широких энергетических каналах с временным разрешением 2.944 с. В триггерном режиме запись кривых блеска события ведется в тех же энергетических каналах с временным разрешением от 2 мс до 256 мс в интервале от -512 мс до 230 с относительно времени срабатывания триггера и измеряются многоканальные энергетические спектры в диапазоне энергий ~ 10 кэВ–10 МэВ.

Во **второй главе** описана выборка из 150 GRB с известным z , зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд* в период с февраля 1997 г по июнь 2016 г. [A5]. Приведены времена срабатывания триггера, z , статистика локализации источников всплесков по собственному излучению в жёстком рентгеновском и гамма-диапазонах, информация о наблюдениях GRB в других экспериментах.

На основе совместного анализа длительности GRB и жёсткости их излучения приведена классификация событий [11, 12] на всплески типа I (короткие/жесткие), источником которых, предположительно, является слияние компактных объектов, и типа II (длинные), вызванные, как предполагается, коллапсом ядер сверхмассивных звёзд. Из 150 событий 138 были отнесены к типу II, а 12 (8%) – к типу I. Отдельно описаны особенности классификации GRB 160410A и GRB 060614.

Красные смещения гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте *Конус-Винд*, лежат в диапазоне $0.1 \leq z \leq 5$, со средним и медианным значением ~ 1.5 и ~ 1.3 , соответственно. Доля всплесков с известным z , зарегистрированных в эксперименте *Конус-Винд*, составляет ~ 0.4 – 0.5 в области $z < 1$ и уменьшается с увеличением z . Для всплесков типа I указанное соотношение составляет ~ 0.5 .

Третья глава посвящена временному и спектральному анализу гамма-всплесков выборки [A5, A2, A3]. В разделе 3.2 описан анализ кривых блеска гамма-всплесков, заключающийся в вычислении полной длительности события T_{100} , времён накопления 50% (T_{50}) и 90% (T_{90}) отсчётов всплеска, а также спектральных задержек излучения, которые характеризует запаздывание более мягкого излучения по отношению более жёсткому. Приведена методика определения фона излучения, и обоснован выбор энергетического диапазона (~ 80 – 1200 кэВ), наиболее подходящего для определения длительности собственного излучения гамма-всплесков в эксперименте *Конус-Винд*. В разделе 3.3 приведены результаты временного анализа, а также статистика длительностей и спектральных задержек излучения в системах отсчёта наблюдателя и источника. Обсуждается эквивалентность T_{100} и T_{90} как мер оценки длительности всплеска. Показано, что для большинства событий T_{100} и T_{90} являются сходными мерами оценки длительности, а для особенно ярких всплесков T_{100} более чувствительна к наличию слабых импульсов-предшественников или длинных, медленно спадающих «хвостов».

В разделе 3.4 дано описание методики спектрального анализа гамма-всплесков. Для каждого GRB 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. Спектры были аппроксимированы методом χ^2 -минимизации в пакете XSPEC [13]. Использовались две стандартные для описания гамма-всплесков модели: эмпи-

рическая двухстепенная функция Банда [10] (BAND) и степенной закон с экспоненциальным обрезанием в области высоких энергий (CPL), параметризованные через пиковую энергию E_p , максимум EF_E -спектра. В единственном случае (GRB 080413B), где локализация E_p в спектральном диапазоне прибора оказалась невозможна, аппроксимация проведена простой степенной моделью (PL). Для нормировки спектральных моделей использовался падающий поток энергии (F) в диапазоне 10 кэВ–10 МэВ.

В разделе 3.5 приведены результаты спектрального анализа. Для каждого спектра указаны результаты аппроксимаций приемлемого качества (далее GOOD), для которых фотонный индекс в области низких энергий α и E_p ограничены (не являются верхними или нижними пределами). Для модели CPL значения α распределены вокруг ≈ -1.0 как для интегрального, так и для пикового спектров. Индексы α модели BAND распределены вокруг значений ≈ -1.0 и ≈ -0.85 для интегрального и пикового спектра, соответственно, а фотонные индексы в области высоких энергий β распределены вокруг значений ≈ -2.50 и ≈ -2.35 для интегрального и пикового спектра, соответственно. Для спектров, адекватно описываемых более чем одной моделью, была также определена «наилучшая» (BEST) модель. Критерием для предпочтения модели Банда, содержащей один дополнительный параметр, служило уменьшение статистики χ^2 : $\chi_{\text{CPL}}^2 - \chi_{\text{BAND}}^2 > 6$. Модель Банда наилучшим образом аппроксимирует 54 интегральных и 51 пиковый спектр, для остальных спектров BEST-моделью является CPL. Параметр E_p для BEST-моделей находится в диапазоне от ≈ 40 кэВ до ≈ 3.5 МэВ (GRB 090510). Для обеих спектральных моделей распределения E_p интегральных спектров достигают максимума при $E_{p,i} \sim 250$ кэВ, а для пиковых спектров – при $E_{p,p} \sim 300$ кэВ. Оценки параметра E_p в космологической системе отсчёта всплеска, $E_{p,i,z} = (1+z) E_{p,i}$ и $E_{p,p,z} = (1+z) E_{p,p}$, находятся в пределах от ≈ 50 кэВ до ≈ 6.7 МэВ (GRB 090510).

В разделе 3.6 рассмотрено распределение полученных временных и спектральных характеристик в плоскости жёсткость–длительность (рис. 1). Показано, что кластеризация гамма-всплесков на две группы (короткие/жёсткие и длинные/мягкие) при переходе в космологическую систему отсчета размывается, что может быть связано, в частности, с более широким диапазоном красных смещений всплесков типа II. Подчёркнуто, что к интерпретации данного распределения следует подходить с осторожностью, так как стандартный энергетический диапазон, используемый для определения длительности в эксперименте Конус-Винд, соответствует множеству индивидуальных, зависящих от z конкретного всплеска, диапазонов энергий в космологической системе отсчета, а форма и длительность гамма-всплеска в различных диапазонах могут существенно различаться.

В разделе 3.7 статистика спектральных параметров рассмотрена в контексте предсказаний синхротронной ударноволновой модели излучения гамма-всплесков (SSM, Synchrotron Shock Model [14]). Наблюдаемое отсутствие ярко выраженного пика распределения ($\alpha - \beta$) может означать наличие разброса показателей степени излучающих электронов и/или существование различных режимов охлаждения в источниках всплесков. Сделана оценка доли всплесков, нарушающих «линию смерти» ($\alpha = -2/3$) и предел охлаждения ($\alpha = -3/2$) в SSM. Для BEST-моделей доверительные интервалы α (на уровне 68%) для 8% интегральных и 21% пиковых спектров полностью

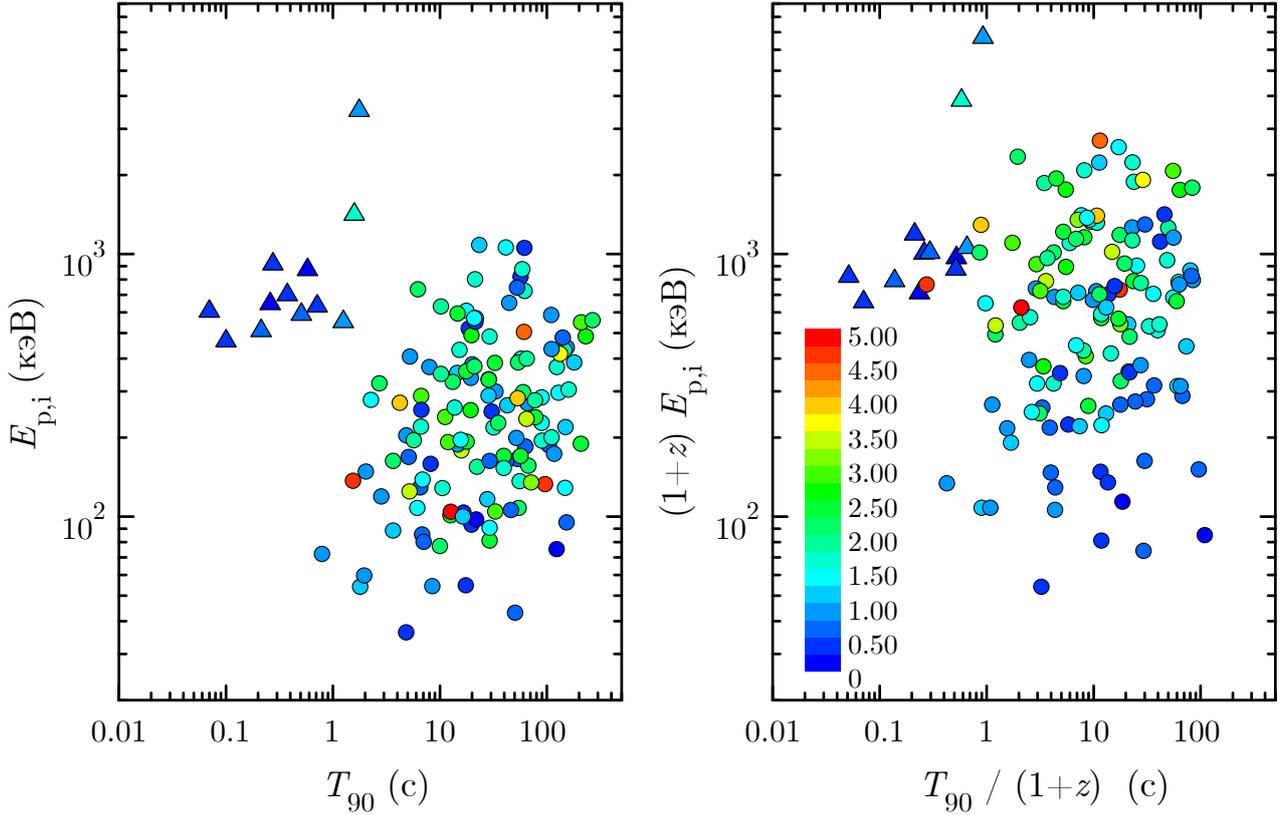


Рис. 1: Распределение жёсткость–длительность в системах отсчёта наблюдателя (слева) и источника всплеска (справа). Всплески типа I обозначены треугольниками, всплески типа II – окружностями. Цветом показано красное смещения всплесков.

попадают в область $\alpha > -2/3$, а доверительные интервалы α для 5% интегральных и 2% пиковых спектров полностью попадают в область $\alpha < -3/2$.

В разделе 3.8 проведено сравнение спектральных параметров BEST-моделей с каталогами экспериментов BATSE 5B [15] и *Fermi*-GBM [16]. Обнаружено, что средние и медианные значения параметров, 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 разделе 3.9 приведены методика и результаты совместного анализа всплеска GRB 140801A по данным экспериментов *Конус-Вунд* и *Fermi*-GBM. Установлено, что результаты временного и спектрального анализа данных согласуются, причём систематическая ошибка оценки эффективной площади в матрицах отклика детекторов двух экспериментов не превышает 5% [A3].

Четвёртая глава посвящена оценке энерговыделения гамма-всплесков [A5,A2,A3,A4]. По результатам временного и спектрального анализа определены полные потоки энергии S в интервале 10 кэВ–10 МэВ и пиковые потоки энергии F_p в том же диапазоне энергий на временных масштабах 1024 мс, 64 мс и «космологической» шкале $(1+z)$ 64 мс. Последняя позволяет компенсировать эффект космологического растяжения кривой блеска всплеска в системе отсчёта наблюдателя и оценивать пиковую светимость

всплеска на стандартной шкале 64 мс в космологической системе отсчёта. Параметры E_{iso} и L_{iso} были оценены, с учетом фотометрического расстояния $D_L(z)$ и космологической k -коррекции, в болометрическом диапазоне энергий 1 кэВ– $(1+z)$ 10 МэВ в системе отсчёта источника. Среди всплесков исследуемой выборки можно отметить GRB 130427A – всплеск с наибольшим $S = 2.86 \times 10^{-3}$ эрг см $^{-2}$ и GRB 090323, характеризующийся наибольшим $E_{\text{iso}} = 5.81 \times 10^{54}$ эрг. GRB 110918A [A1] является самым ярким, в терминах как пикового энергетического потока, так и изотропной пиковой светимости ($F_{p,64} = 9.02 \times 10^{-4}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$; $L_{\text{iso}} = 4.65 \times 10^{54}$ эрг с $^{-1}$).

Для 32 гамма-всплесков (30 типа II и двух типа I) получены оценки энерговыделения (E_γ) и пиковой светимости (L_γ) с учётом коллимации излучения. Для оценки фактора коллимации были использованы наиболее надёжные оценки t_{jet} , определённые по кривым блеска в видимом/инфракрасном диапазоне, либо в двух различных диапазонах (например, рентгеновском и радио), то есть максимально удовлетворяющие критерию ахроматичности излома. Для части событий в литературе приводится наиболее вероятный профиль плотности среды, окружающей источник всплеска, от которого зависит методика оценки угла коллимации θ_{jet} [3, 17]: для 14 – гомогенная среда, схожая с межзвездной, и для 9 – неоднородная среда с градиентом плотности, характерным для звёздного ветра, $n(r) \propto r^{-2}$. Для остальных событий θ_{jet} были определены по обоим методикам. Оцененные углы θ_{jet} находятся в диапазоне от 1.9° до 25.5°, а соответствующие факторы коллимации $(1 - \cos\theta_{\text{jet}})$ – от 5.5×10^{-4} до 0.098. С учетом коллимации, самым ярким всплеском является GRB 090926A ($E_\gamma \simeq 1.23 \times 10^{52}$ эрг, $L_\gamma \simeq 5.50 \times 10^{51}$ эрг с $^{-1}$, $\theta_{\text{jet}} \simeq 6.20^\circ$). Коррекция на коллимацию излучения сдвигает пик распределений энерговыделения на ~ 2.5 порядка величины, при этом ширина распределений на логарифмической шкале сужается на $\lesssim 0.4$ порядка. Подчеркнуто, что истинное распределение энерговыделения, скорректированного на коллимацию излучения, может быть шире, чем наблюдаемое, в связи с трудностью измерения момента t_{jet} на поздних стадиях послесвечения и соответствующим уменьшением относительной доли всплесков с широкими углами коллимации в силу наблюдательной селекции.

В разделе 4.6 проведено сравнение оценок E_{iso} для 26 гамма-всплесков с известным z , зарегистрированных как в эксперименте *Конус-Винд*, так и в эксперименте *Fermi-GBM* [A3]. Установлено хорошее согласие и отсутствие систематических различий E_{iso} , вычисленного по данным двух приборов: для 24 из 26 GRB E_{iso} согласуется в пределах 25%. Наименьшие различия (<15%) наблюдаются для всплесков, интегральные спектры которых наилучшим образом аппроксимируются одной и той же спектральной моделью в обоих экспериментах.

Пятая глава посвящена исследованию влияния эффектов наблюдательной селекции на совокупности параметров гамма-всплесков, полученные в настоящей работе [A5]. Описана методика определения чувствительности срабатывания триггера *Конус-Винд* к собственному излучению гамма-всплесков с определённым набором характеристик с учётом фоновой обстановки. На основании совместного анализа диаграммы $F-E_p$ и статистической значимости детектирования всплесков установлено, что отсутствие наблюде-

ний ярких мягких событий в рассмотренной выборке, по-видимому, обусловлено свойствами популяции гамма-всплесков, а не эффектами селекции.

В результате анализа распределений параметров в космологической системе отсчета (рис. 2) установлено, что: область плоскости $z-L_{\text{iso}}$, расположенная выше пороговой светимости, соответствующей «характеристическому» $F_{\text{lim}} \sim 1 \times 10^{-6}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в системе отсчета наблюдателя, может считаться свободной от эффектов инструментальной селекции; в плоскости $z-E_{\text{iso}}$ область, свободная от эффектов селекции, находится выше E_{iso} , соответствующего $S_{\text{lim}} \sim 3 \times 10^{-6}$ эрг см^{-2} ; падение чувствительности триггера при приближении E_p к нижней границе спектрального диапазона прибора выражается в отсутствии детектированных всплесков с $E_{p,z} \lesssim (1+z)^2 \cdot 25$ кэВ.

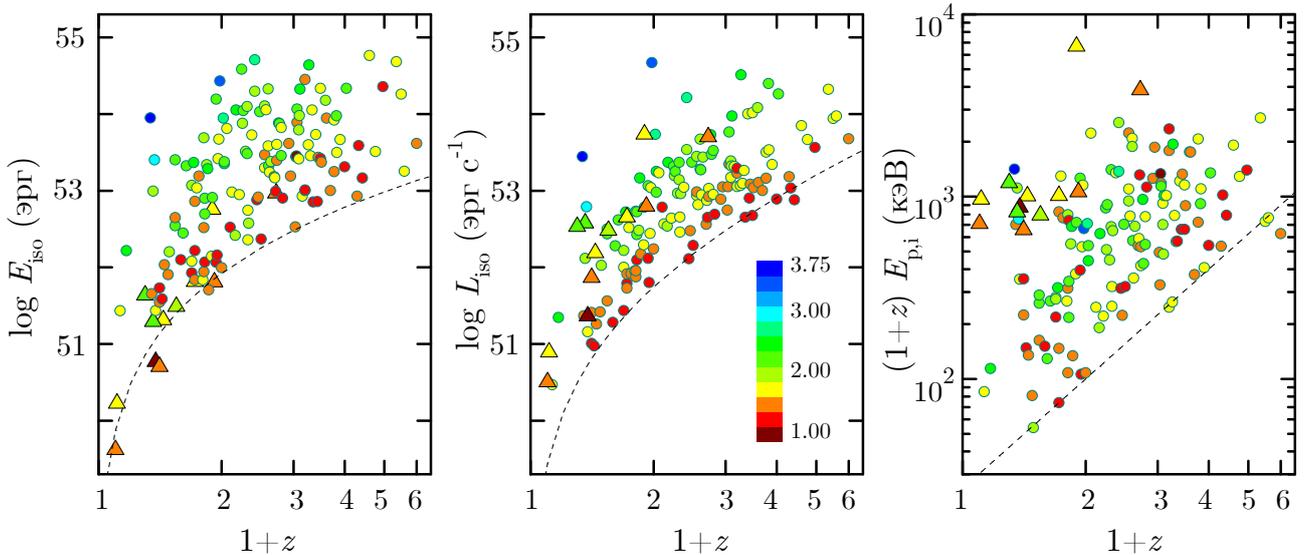


Рис. 2: Зависимость E_{iso} , L_{iso} и E_p в космологической системе отсчёта от z гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд. GRB типа I обозначены треугольниками, GRB типа II – окружностями. Цвет символов соответствует логарифму статистической значимости всплеска в единицах σ . Штриховыми линиями обозначены пороговые значения энерговыделения и пиковой энергии, определяющие наблюдательную селекцию в космологической системе отсчёта.

В разделе 5.3 описана методика определения космологического предела наблюдаемости гамма-всплесков в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд как с учетом индивидуальных характеристик всплеска, так и с использованием характеристического порогового потока. Самым «далёким» горизонтом детектирования (~ 17 , что соответствует возрасту Вселенной ~ 230 млн. лет) среди всплесков с известным z , зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, обладает сверхяркий GRB 110918A (измеренное $z = 0.981$).

В **шестой главе** с учетом эффектов селекции оценены параметры эволюции энерговыделения, функции изотропного энерговыделения и изотропной пиковой светимости, а также темп образования источников гамма-всплесков [A5]. Космологическая эволюция энерговыделения GRB, параметризованная как $g(z) = (1+z)^\delta$, была оценена методом модифицированной τ -статистики Эфрона и Петросяна [18]. Для L_{iso} и E_{iso} степенные индексы эволюции составляют $\delta_L = 1.7_{-0.9}^{+0.9}$ и $\delta_E = 1.1_{-0.7}^{+1.5}$, при невысокой значимости корреляций $L_{\text{iso}}-z$ и $E_{\text{iso}}-z$ на уровне $\lesssim 1.7\sigma$. Кумулятивные распределения $\psi(L')$

и $\psi(E')$ для изотропной энергии, поправленной на эволюцию ($L' = L_{\text{iso}}/g(z)$ и $E' = E_{\text{iso}}/g(z)$), были оценены непараметрическим C^- -методом Линден-Белла [19] и аппроксимированы двумя функциями (рис. 3), степенным законом с изломом (BPL) и степенной функцией с экспоненциальным обрезанием (CutoffPL). Показано, что аппроксимации обеими функциями дают удовлетворительный результат, при этом $\psi(L')$ лучше аппроксимируется моделью BPL ($\Delta\chi^2 > 5$), а $\psi(E')$ – моделью CutoffPL ($\Delta\chi^2 > 16$). Таким образом, получены свидетельства в пользу экспоненциального обрезания функции изотропного энерговыделения гамма-всплесков на $0.1 \leq z \leq 5$ с параметром $E'_{\text{cut}} \gtrsim 10^{54}$ эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с^{-1} . Качественно и количественно схожие результаты получены для кумулятивных распределений $\psi(L_{\text{iso}})$ и $\psi(E_{\text{iso}})$ для изотропного энерговыделения и светимости без коррекции на эволюцию.

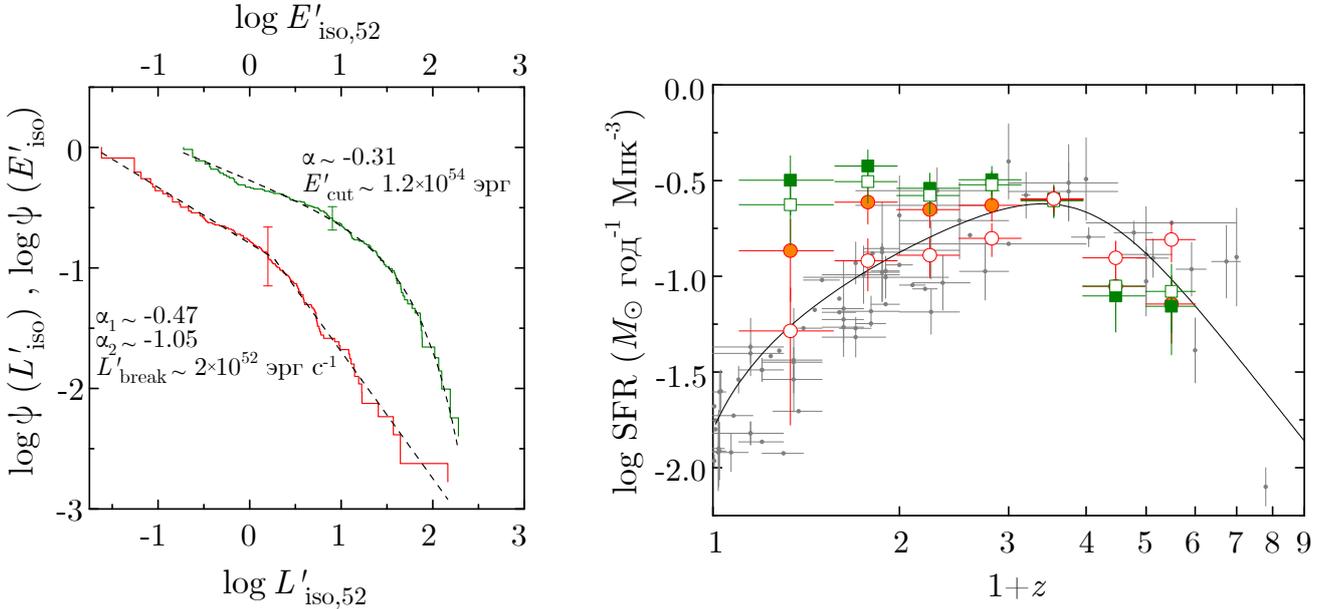


Рис. 3: Функции светимости и энерговыделения и темп образования источников гамма-всплесков по данным эксперимента *Конус-Винд*. Слева: кумулятивные функции светимости (красная гистограмма) и энерговыделения (зелёная гистограмма). Показаны наилучшие аппроксимации моделями BPL и CutoffPL для $\psi(L')$ и $\psi(E')$, соответственно. Справа: сравнение темпа образования источников гамма-всплесков со скоростью звездообразования. GRBF вычислен по четырём наборам данных: $z-L_{\text{iso}}$ (красные окружности), $z-L'$ (красные круги), $z-E_{\text{iso}}$ (зеленые квадраты без заливки) и $z-E'$ (зелёные квадраты с заливкой). Серыми точками и сплошной чёрной линией обозначена скорость звездообразования (ссылки в работе [A5]).

С использованием C^- -методики было оценено кумулятивное распределение красных смещений $\psi(z)$ и GRBF $\rho(z) = d\psi/dz (1+z) (dV(z)/dz)^{-1}$, где $dV(z)/dz$ – сопутствующий дифференциальный объём. В отсутствие подробных данных о коллимации излучения оценить нормировку $\rho(z)$ не представляется возможным, но можно провести качественное сравнение GRBF со скоростью звездообразования (SFR), рис. 3. В нормировке, при которой GRBF и SFR совпадают в области максимума SFR ($(1+z) \sim 3.5$), оценка

$\rho(z)$ по данным на плоскости $z-L'$ (скорректированным на эволюцию светимости), превышает SFR при $z < 1$ и следует SFR на больших красных смещениях. Оценка $\rho(z)$ по данным на плоскостях $z-E_{\text{iso}}$ и $z-E'$ демонстрирует схожее поведение. Из четырёх рассмотренных вариантов $\rho(z)$, только один, полученный по данным на плоскости $z-L_{\text{iso}}$, то есть без коррекции на эволюцию светимости, следует SFR во всём диапазоне $0.1 \leq z \leq 5$.

В **седьмой главе** рассмотрены корреляции жёсткости и энергетики в космологической системе отсчета [A5,A1]. Значимость корреляций оценена ранговым коэффициентом Спирмана ρ_S , а для определения параметров линейной регрессии в двойной логарифмической шкале минимизировалась статистика [20], позволяющая учитывать ошибки обеих величин и внутреннюю дисперсию корреляции σ_{int} . Показано, что при переходе из системы отсчёта наблюдателя в космологическую систему отсчёта корреляция жёсткости и энергетики усиливается ($\Delta\rho_S \geq 0.1$) как в соотношении Амати ($E_{\text{iso}}-E_{\text{p},i,z}$), так и соотношении Йонетоку ($L_{\text{iso}}-E_{\text{p},p,z}$), причём наклон линейной регрессии меняется незначительно. Индексы соотношений Амати и Йонетоку (рис. 4) для всплесков типа II очень близки: 0.47 ($\rho_S=0.70$, 138 всплесков) и 0.49 ($\rho_S=0.73$, 137 всплесков), соответственно.

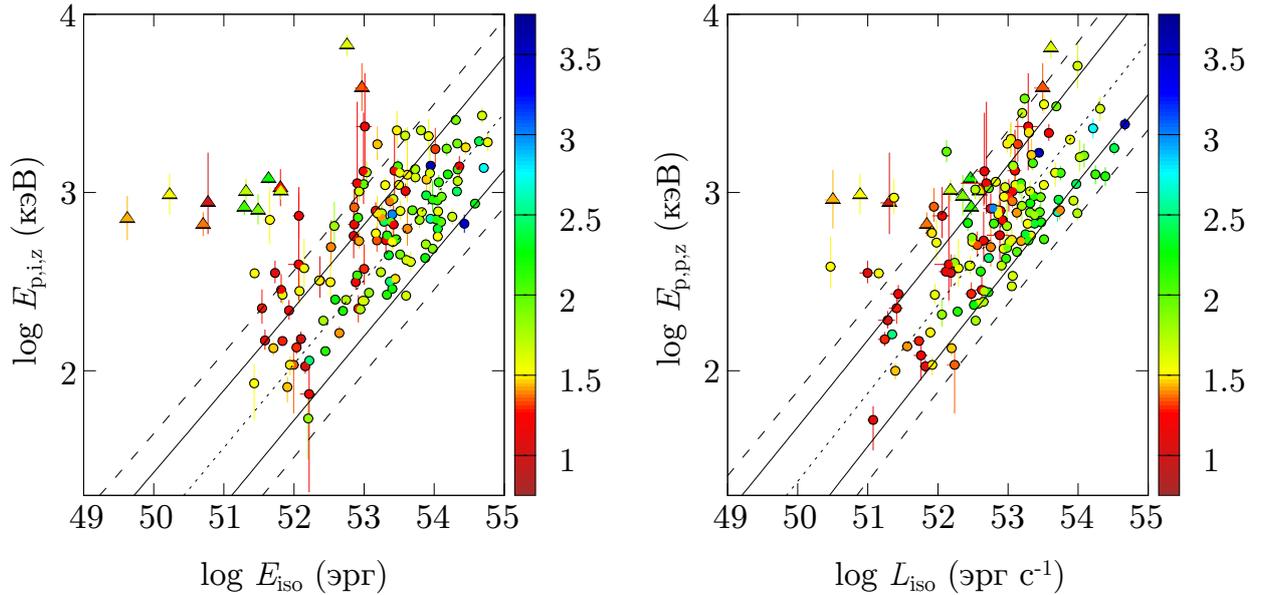


Рис. 4: Корреляции жёсткость–энергетика. Слева приведены данные для соотношения Амати, справа – для соотношения Йонетоку. Гамма-всплески типа I обозначены треугольниками, типа II – окружностями. Цветом показан логарифм значимости детектирования всплеска в единицах стандартного отклонения. Пунктирной линией показана линейная регрессия, вычисленная при $\sigma_{\text{int}} = 0$ для подвыборки всплесков типа II, всплески типа I показаны для информации. Сплошными и штриховыми линиями показаны интервалы предсказаний на уровне 68% и 90%, соответственно.

Поскольку граница соотношений Амати и Йонетоку в области мягких и ярких всплесков определяется событиями с высокой значимостью детектирования, и отсутствие детектирований ярких мягких всплесков в эксперименте Конус-Винд не является следствием эффектов селекции, отсутствие всплес-

ков ниже указанной границы обусловлено свойствами самих гамма-всплесков. В то же время, выбросы в соотношениях Амат и Йонетоку для всплесков типа II лежат в области относительно жёстких и неярких событий. Большинство из них 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 детектированных неярких всплесков с высоким отношением жёсткости излучения к энерговыделению.

Показано, что учёт коллимации излучения для 30 гамма-всплесков типа II не приводит ни к повышению статистической значимости корреляций, ни к уменьшению внутренней дисперсии соотношений. В контексте данной подвыборки рассмотрена энергетика GRB 110918A, и получено свидетельство в пользу корректности косвенной оценки t_{jet} в работе [A1] и предположения о том, что сильная коллимация излучения ($\theta_{\text{jet}} \sim 1.6^\circ$) является одним из ключевых факторов в механизме генерации необычайно яркого потока γ -излучения во всплеске GRB 110918A. Наконец, два гамма-всплеска типа I с известными углами коллимации лежат выше соотношения $E_{\text{p},i,z} - E_\gamma$ для подвыборки всплесков типа II и внутри интервала предсказаний на уровне 68% соотношения $E_{\text{p},p,z} - L_\gamma$.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Сформирована выборка гамма-всплесков с надёжными оценками красных смещений, зарегистрированных в триггерном режиме эксперимента *Конус-Винд*. Проведена классификация гамма-всплесков по критерию жёсткость–длительность, 12 событий отнесены к типу I (короткие–жёсткие), а 138 – к типу II (длинные) [A5].
2. В результате анализа кривых блеска гамма-всплесков определены их полные длительности T_{100} , длительности T_{90} и T_{50} и спектральные задержки излучения. В ходе спектрального анализа определены параметры излучения гамма-всплесков для моделей Банда и CPL. Выбраны модели, наилучшим образом описывающие интегральный и пиковый спектры каждого всплеска. Проведён совместный временной и спектральный анализ данных GRB 140801A, одновременно зарегистрированного в экспериментах *Конус-Винд* и *Fermi-GBM*, подтверждена согласованность методик анализа данных двух экспериментов [A5, A2, A3].
3. Исследованы распределения жёсткость–длительность в системах отсчёта наблюдателя и источника гамма-всплеска. Показано, что при переходе в космологическую систему отсчёта наблюдается размытие границ кластеров всплесков типа I и типа II за счёт большего разброса красных смещений всплесков типа II [A5].
4. Определены полные и пиковые потоки энергии гамма-всплесков в системе отсчёта наблюдателя. С учётом красного смещения и k -коррекции получены оценки E_{iso} и L_{iso} в болометрическом диапазоне 1 кэВ– $(1+z)$ 10 МэВ в космологической системе отсчёта. Для 32 GRB проведена оценка энерговыделения с учётом коллимации излучения. Коррекция на коллимацию излучения сдвигает пик распределений энерговыделения на

- ~ 2.5 порядка величины, при этом ширина распределений на логарифмической шкале сужается на $\lesssim 0.4$ порядка [A5].
5. 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 $<15\%$ [A4].
 6. Установлено, что отсутствие детектирований ярких ($F \gtrsim 5 \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$) всплесков с мягким ($E_p \lesssim 100$ кэВ) спектром обусловлено свойствами популяции самих гамма-всплесков, а не инструментальными эффектами селекции. Установлено, что область плоскости $z-L_{\text{iso}}$ выше $L_{\text{iso,lim}}$, соответствующей наблюдаемому потоку энергии $F_{\text{lim}} \sim 1 \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$, может считаться свободной от эффектов инструментальной селекции. В плоскости $z-E_{\text{iso}}$ область, свободная от эффектов селекции, находится выше $E_{\text{iso,lim}}$, соответствующего $S_{\text{lim}} \sim 3 \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$. Действие эффектов селекции на плоскости $z-E_{p,z}$ ограничивается областью $E_{p,z} \lesssim (1+z)^2 \cdot 25$ кэВ. Оценен космологический предел наблюдаемости GRB в триггерном режиме в эксперименте *Конус-Винд*. Наиболее удалённый горизонт детектирования для всплесков выборки, $z_{\text{max}} \approx 17$, соответствует сверхяркому GRB 110918A (измеренное $z = 0.981$) [A5].
 7. С учетом эффектов селекции оценены степенные индексы космологической эволюции L_{iso} ($\delta_L = 1.7_{-0.9}^{+0.9}$) и E_{iso} ($\delta_E = 1.1_{-0.7}^{+1.5}$), при невысокой, на уровне $\lesssim 1.7\sigma$, значимости корреляций $L_{\text{iso}}-z$ и $E_{\text{iso}}-z$. Оценены кумулятивные функции светимости и энерговыделения гамма-всплесков. На независимой выборке получены свидетельства в пользу экспоненциального завала функции изотропного энерговыделения гамма-всплесков с параметром обрезания $E_{\text{cut}} \gtrsim 10^{54}$ эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с $^{-1}$ [A5].
 8. С учетом эффектов селекции оценён космологический темп образования источников гамма-всплесков. На независимой выборке получены свидетельства в пользу избытка GRBFR относительно скорости звездообразования в области малых красных смещений ($z < 1$) [A5].
 9. Установлено, что значимость корреляций жёсткости и энерговыделения GRB усиливается с переходом из системы отсчёта наблюдателя в космологическую систему отсчёта. Показано, что граница соотношений Амати и Йонетоку в области относительно мягких всплесков типа II с высоким энерговыделением обусловлена собственными свойствами излучения гамма-всплесков, в то время как граница в области относительно жёстких GRB с низким энерговыделением обусловлена, в значительной мере, эффектами селекции. Установлено, что поправка на коллимацию излучения не приводит ни к повышению значимости корреляций, ни к уменьшению их внутренней дисперсии. Показано, что уникальная яркость GRB 110918A обусловлена исключительно сильной коллимацией излучения.

10. Установлено, что соотношения Амати и Йонетоку для подвыборки из 12 всплесков типа I характеризуются меньшим наклоном, 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 [A5,A1].

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. D. D. Frederiks, . . . , A. E. Tsvetkova et al. The Ultraluminous GRB 110918A // *Astrophys. J.* 2013. Vol. 779. p. 151 (интерпретация свойств GRB 110918A была проведена на основании данных о гамма-всплесках с известным красным смещением, подготовленных соискателем);
- A2. 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 (соискатель, совместно с Д. Д. Фредериксом, провёл подготовку и анализ данных эксперимента *Конус-Винд*);
- A3. 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 (соискатель, совместно с Д. Д. Фредериксом, провёл подготовку и анализ данных гамма-всплеска, полученных в эксперименте *Конус-Винд*, также осуществил анализ данных *Fermi-GBM*, подготовленных В. Пелассой, и совместный анализ данных экспериментов *Конус-Винд* и *Fermi-GBM*);
- A4. J.-L. Atteia, . . . , A. E. Tsvetkova et al. The Maximum Isotropic Energy of Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J.* 2017. Vol. 837 p. 119 (соискатель осуществил подготовку данных эксперимента *Конус-Винд* для 69 ярких длинных гамма-всплесков 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);
- A5. 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 (основной вклад в работу).

Литература, цитируемая в автореферате

1. 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.
2. 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.
3. Sari R., Piran T., Halpern J. P. Jets in Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 519. — P. L17–L20.

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Atteia J.-L. Gamma-ray bursts: towards a standard candle luminosity // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 328. — P. L21–L24.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.