

**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор-начальник Управления  
научной политики и организации  
научных исследований  
МГУ имени М.В.Ломоносова  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
А.А.Федянин  
"16" мая 2018г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования **"Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова"** на диссертацию *Цветковой Анастасии Евгеньевны на тему «НАБЛЮДЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ С ИЗВЕСТНЫМ КОСМОЛОГИЧЕСКИМ КРАСНЫМ СМЕЩЕНИЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОНУС-ВИНД», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия» (отрасль наук: «физико-математические»)*

Тема исследования гамма-всплесков является одной из наиболее актуальных задач современной астрофизики. 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.

Работа Цветковой А.Е. посвящена исследованию выборки из 150 гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд: отбору событий эксперимента Конус-Винд и анализу данных о красных смещениях выбранных гамма-всплесков; проведению систематического анализа кривых блеска и энергетических спектров гамма-всплесков; определению временных, спектральных и энергетических параметров событий; исследованию корреляций жёсткости и интенсивности излучения гамма-всплесков; применению непараметрических методов к данным эксперимента Конус-Винд; оценке эффектов селекции и космологических пределов детектирования.

#### **Актуальность для науки и практики**

Несмотря на то, что с момента открытия космических гамма-всплесков прошло более полувека, многие аспекты данного явления остаются неизвестными. К 2017 г. космологические красные смещения  $z$  были определены для  $\sim 450$  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 ( $E_{\text{iso}}$ ), характеристику энергии, выделенной центральной машиной всплеска, и изотропный эквивалент пиковой светимости ( $L_{\text{iso}}$ ), 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:  $E_{\text{iso}} \sim 10^{55}$  эрг (GRB 080916C,  $z = 4.35$ ) и  $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{54}$  эрг  $\text{c}^{-1}$  (GRB 110918A,  $z = 0.981$ ). Огромное изотропное энерговыделение гамма-всплесков было впервые объяснено для GRB 970508 предположением о высокой коллимации излучения (jet beaming). Ключевой характеристикой,

позволяющей оценить угол коллимации гамма-всплеска  $\theta_{\text{jet}}$ , является время наблюдения ахроматического излома (jet break) в кривой блеска послесвечения  $t_{\text{jet}}$ . Для типичных углов коллимации в несколько градусов истинное энерговыделение большинства гамма-всплесков составляет  $\sim 10^{51}$  эрг, что сопоставимо с энерговыделением сверхновой.

Исследование корреляций между жёсткостью и энергетикой гамма-всплесков в космологической системе отсчёта (так называемые соотношения «Амати», «Йонетоку» и их «коллимированные» версии) может способствовать разрешению вопроса о применимости гамма-всплесков в качестве «стандартных свечей». 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 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 ( $\sim 10$  кэВ– $\sim 10$  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  $\sim 2700$  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. Таким образом, исходя из сказанного, тема рассматриваемой диссертации несомненно является актуальной и практически важной.

### **Научная новизна исследований и полученных результатов**

В результате выполнения работы над представленной диссертацией 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 является наиболее полным набором характеристик GRB в собственной системе отсчёта, полученных в результате систематического анализа однородного массива наблюдений в широком диапазоне энергий  $\gamma$ -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  $E_{\text{iso}}$ .

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  $\text{с}^{-1}$ .

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.

#### **Научная и практическая значимость диссертации**

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.

#### **Достоверность полученных результатов, подтверждается:**

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

2. Совместным с другими космическими экспериментами по изучению гамма-всплесков анализом общих событий, показавшим применимость используемых методик.

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

**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 ( $\sim 10$  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  $\sim 80$ – $160$  см<sup>2</sup> 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  $\sim 10$  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. 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 на всплески типа I (короткие/жёсткие), 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  $\sim 1.5$  и  $\sim 1.3$ , соответственно. Доля всплесков с известным  $z$ , зарегистрированных в эксперименте Конус-Винд, составляет  $\sim 0.4$ – $0.5$  в области  $z < 1$  и уменьшается с увеличением  $z$ . Для всплесков типа I указанное соотношение составляет  $\sim 0.5$ .

**Третья глава** посвящена временному и спектральному анализу гамма-всплесков выборки. Представлен 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 диапазона  $\sim 80$ – $1200$  кэВ, наиболее подходящего для определения длительности собственного излучения гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд.

**Четвёртая глава** посвящена оценке энерговыделения гамма-всплесков.

**Пятая глава** посвящена исследованию влияния эффектов наблюдательной селекции на совокупности параметров гамма-всплесков, полученные в настоящей работе.

**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.

**В седьмой главе** рассмотрены корреляции жёсткости и энергетики в космологической системе отсчета.

**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).
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.
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.
4. Определены полные и пиковые потоки энергии гамма-всплесков в системе отсчёта наблюдателя. С учётом красного смещения и  $k$ -коррекции получены оценки  $E_{\text{iso}}$  и  $L_{\text{iso}}$  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  $\sim 2.5$  порядка величины.
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  $E_{\text{iso}}$  двумя экспериментами не превышает 25%. В случае использования одинаковой модели для аппроксимации интегрального спектра данное различие составляет  $<15\%$ .
6. Установлено, что отсутствие детектирований ярких ( $F \sim 5 \times 10^{-6}$  эрг  $\text{см}^{-2}$   $\text{с}^{-1}$ ) 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  $\text{см}^{-2}$   $\text{с}^{-1}$ , 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  $\text{см}^{-2}$ . Действие эффектов селекции на плоскости  $z$ – $E_{p,z}$  ограничивается областью  $E_{p,z} (1+z)^2 \cdot 25$  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  $z = 0.981$ ).
7. С учетом эффектов селекции оценены степенные индексы космологической эволюции  $L_{\text{iso}}$  ( $\delta_L = 1.7(+0.9, -0.9)$ ) и  $E_{\text{iso}}$  ( $\delta_E = 1.1(+1.5, -0.7)$ ), при невысокой, на уровне  $\sim 1.7\sigma$ , 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  $E_{\text{cut}} \sim 10^{54}$  эрг и отсутствия такого обрезания у функции светимости вплоть до верхней границы исследованной выборки  $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{54}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ .

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 ( $z < 1$ ).

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.

Существенных недостатков представленная диссертация не содержит. Замечания: интересно было бы увидеть оценку темпа образования источников гамма-всплесков типа I (коротких/ жёстких), не приведённую в диссертационной работе; в тексте используется "темп образования гамма-всплесков" вместо "темпа образования источников гамма-всплесков".

Выводы и положения диссертации соответствуют представленным результатам. Настоящая работа является законченным научно-квалифицированным исследованием, которое выполнено на высоком научном уровне и вносит значительный вклад в развитие актуального направления современной астрофизики: исследование гамма-всплесков. Автореферат диссертации достаточно полно отображает содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ, предъявляемыми к авторефератам диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук. Требования ВАК к публикациям по теме диссертации полностью выполнены: результаты работы опубликованы в рецензируемых журналах – 3 статьи в *ApJ* (импакт-фактор 5.53) и две статьи в *MNRAS* (импакт-фактор 4.96).

Диссертация Цветковой Анастасии Евгеньевны «НАБЛЮДЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ С ИЗВЕСТНЫМ КОСМОЛОГИЧЕСКИМ КРАСНЫМ СМЕЩЕНИЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОНУС-ВИНД» полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 (в ред. Постановлений Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 г. N 335; от 02.08.2016 г. N 748; от 29.05.2017 г. N 650; от 28.08.2017 г. N 1024) а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия.

Диссертация обсуждена и одобрена на заседании Общественного семинара астрофизики имени Я.Б.Зельдовича ГАИШ МГУ 27 апреля 2018 года. Отзыв на диссертационную работу А.Е.Цветковой составлен директором Государственного Астрономического Института имени П.К.Штернберга Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова, академиком Черепашуком Анатолием Михайловичем (академик РАН по специальности физика, астрономия, отделение физических наук РАН: Постановление общего собрания РАН N10 от 25.05.2006), обсужден и утвержден на Координационных советах ГАИШ по звездной астрономии и по астрофизике 16 мая 2018г.

Директор ГАИШ МГУ,  
Академик РАН

Черепашук А.М.