

Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова

На правах рукописи  
УДК 52-645/52-17

Бадьин Дмитрий Алексеевич



**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ВТОРИЧНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ**

Специальность: 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии  
Физического факультета Московского государственного университета имени  
М. В. Ломоносова

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук Постнов  
Константин Александрович, профессор кафедры астрофизики и звёздной  
астрономии Физического Факультета МГУ.

**Официальные оппоненты:**

- доктор физико-математических наук Чугай Николай Николаевич,  
заведующий отделом нестационарных звезд и звездной спектроскопии  
Института астрономии РАН
- кандидат физико-математических наук Позаненко Алексей Степанович,  
старший научный сотрудник лаборатории №54 ИКИ РАН.

**Ведущая организация:** Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится 07 октября 2010 года в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационно-  
го совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте имени  
П. К. Штернберга по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект,  
дом 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ или в сети  
Интернет по адресу <http://www.sai.msu.ru/dissovet/2010.html> .

Автореферат разослан 7 сентября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук



С. О. Алексеев

## Общая характеристика работы

Гамма-всплески (ГВ) – самая мощная разновидность взрывных процессов во Вселенной – обнаруживаются космическими аппаратами по ярким коротким вспышкам гамма-излучения (обычно от десятков кэВ и выше). Они сопровождаются излучением и в других диапазонах от рентгеновского до радио (вторичное излучение или послесвечение), которое может наблюдаться спустя долгое время (свыше года) после самого ГВ. Этот факт, а также их высокая светимость, позволяют исследовать эти явления практически всеми доступными современной астрономии методами.

За 40 лет после открытия ГВ и за более чем 10 лет с момента обнаружения сопутствующего рентгеновского, оптического и радио- излучения (исторически называемого послесвечением, *afterglow*, хотя в последнее время границы между ним и первичным гамма-излучением, *prompt emission*, частично размываются) накоплено очень большое количество наблюдательной информации. Это позволило существенно продвинуться в теоретическом объяснении происходящего в окрестностях этих объектов, но всё же поставило едва ли не больше вопросов, чем дало ответов, так что мы всё ещё далеки от понимания природы ГВ. В частности, до сих пор предметом обсуждения остаётся вопрос об источнике и механизмах первичного гамма-излучения.

В основе общепринятых моделей ГВ лежит концепция ультрарелятивистского выброса вещества, возникающего либо при коллапсе вращающегося ядра массивной звезды в чёрную дыру, либо при слиянии двух нейтронных звёзд или нейтронной звезды с чёрной дырой. Внутри выброса могут развиваться внутренние ударные волны либо различные неустойчивости, которые могут ускорять заряженные частицы до достаточных энергий, чтобы излучать высокоэнергичные фотоны. В некоторых случаях (например, GRB 080319B [2]) одновременно с гамма-излучением может порождаться и оптическое излучение (коррелированное с ним), однако большая часть вторичного излучения генерируется при взаимодействии выброса со средой (с образованием т.н. головной ударной волны), окружающей источник гамма-всплеска. В последнем

случае основную роль играют только полная энергия выброса и параметры окружающей среды, и корреляции с гамма-излучением, как правило, не наблюдается.

При изучении процессов генерации первичного и вторичного излучения ГВ неизбежно приходится сталкиваться с набором неизвестных модельных параметров, которые пока ещё невозможно строго рассчитать “из первых принципов” (например, угол коллимации выброса, доля энергии магнитного поля и т.д.). Следовательно, необходимо либо стараться свести к минимуму модельную зависимость своих исследований, либо ограничиваться какими-то приближениями. В настоящей работе реализованы оба этих подхода.

В рамках первого из них выполнен сбор и статистический анализ доступной информации об излучении гамма-всплесков в жёстком и оптическом диапазонах при минимуме модельных предположений. Соответственно, для анализа отбирались наиболее общие и надёжно определяемые характеристики ГВ. В выборку включались только объекты с известными красными смещениями, чтобы перейти от потоков, измеряемых на земле к собственным светимостям ГВ. Этот подход позволяет ставить вопросы о космологической эволюции свойств излучения. Например, были обнаружены корреляции оптической светимости и длительности с красным смещением. Также оказалось, что у примерно половины объектов временной показатель степени спада потока оказывается существенно меньше единицы, что расходится с предсказаниями синхротронной модели послесвечения.

Обилие наблюдательной информации позволило сделать изучаемую выборку достаточно репрезентативной. Найденные корреляции имеют высокую статистическую значимость, обнаруженные закономерности подтверждаются и при добавлении в базу данных новых объектов. Как и у моделирования, у статистического анализа есть свои принципиальные сложности: построение однородной выборки и учёт эффектов селекции. Этим факторам в работе также уделялось значительное внимание.

Статистическое исследование оптических кривых блеска поставило и зада-

чу для физического моделирования: было обнаружено, что у значительной части послесвечений наблюдаются иррегулярные отклонения от степенного закона спада потока (который должен иметь место при синхротронном излучении частиц, ускоряемых на фронте ударной волны), имеющие сходную морфологию, сходные энергетические и временные характеристики. Были отмечены значительные вариации наклона энергетического спектра и показателей цвета послесвечений в оптике, не согласующиеся с традиционной синхротронной моделью излучения от внешней ударной волны. Поскольку в литературе ([7], [6]) также сообщалось, об обнаружении эмиссионных и абсорбционных линий в рентгеновских спектрах послесвечений, было высказано предположение ([3]), что вокруг источника гамма-всплеска могут находиться довольно плотные структуры вещества, нагреваемые нетепловым излучением ГВ, и переизлучающие свою тепловую энергию.

Для моделирования спектральных и фотометрических характеристик этого излучения был применён радиационно-гидродинамический код STELLA ([4]), который потребовалось модифицировать для расчётов такого существенно нестационарного процесса, как нагрев среды импульсами гамма-излучения.

При расчётах изучались кривые блеска, спектры излучения, а также гидродинамические характеристики нескольких условных моделей структур среды, окружающей ГВ. За основу этих моделей брались результаты расчётов (см. работу Вусли и др. [5]) поздних стадий эволюций массивных звёзд, которые являются главными кандидатами в прародители длинных гамма-всплесков. Оказалось, что некоторые особенности оптических и рентгеновских послесвечений действительно могут интерпретироваться как проявление теплового излучения среды, нагретой первичным гамма-излучением всплеска. В связи с этим обсуждаются направления для дальнейшего совершенствования модели. В частности, необходимо более реалистичное моделирование взаимодействия самого релятивистского выброса с окружающим веществом. Это существенно неоднородная задача.

## **Актуальность темы**

Ввиду обилия как наблюдательных данных, так и нерешённых важных проблем, касающихся физики гамма-всплесков, сбор, систематизация и модельно независимый анализ результатов наблюдений имеет большое значение для поиска возможных закономерностей и предъявления требования к разрабатываемым теоретическим моделям. Модификация радиационно-гидродинамического кода для расчётов нестационарных процессов является необходимым шагом для расширения приложений этого кода к новым астрофизическим объектам.

## **Цели работы**

Создание как можно более полной и однородной выборки характеристик оптического и гамма-излучения гамма-всплесков с известными красными смещениями при минимизации модельной зависимости этих параметров.

Изучение распределений параметров и поиск корреляций между ними с целью поиска ранее не выявлявшихся закономерностей.

Построение расчётного аппарата для моделирования взаимодействия гамма-излучения со структурами околозвёздной среды, процессов нестационарного нагрева вещества в соединении с радиационно-гидродинамическими расчётами. Учёт воздействия релятивистского выброса гамма-всплеска.

Получение с помощью этого аппарата кривых блеска и спектров теплового излучения в различных моделях оболочек околозвёздной среды, определение возможностей наблюдательного обнаружения, сравнение с наблюдениями послесвечений реальных объектов. Оценка эффективности и перспектив дальнейшего применения и совершенствования построенного аппарата.

## **Научная новизна работы**

1. Создана и опубликована в статье база данных параметров оптического и гамма-излучения 58 гамма-всплесков с известными красными смещениями и оптическими послесвечениями.

2. По результатам статистического анализа параметров впервые обнаружены корреляции максимальной оптической светимости, оптической длительности и красного смещения. У половины объектов выборки обнаружена малость степенного показателя спада оптического потока по сравнению с тем, который должен следовать из общепринятой модели синхротронного послесвечения от внешней ударной волны. Даются интерпретации корреляций оптических и гамма-параметров между собой.
3. Разработана модификация радиационно-гидродинамического кода STELLA, позволяющая рассчитывать процессы нестационарного и неравновесного нагрева структур околосвёздного вещества жёстким излучением одновременно с процессами гидродинамики и переноса излучения. В результате использования этого расчётного аппарата предложена интерпретация особенностей кривых блеска оптических и рентгеновских послесвечений на временах  $\sim 10^2 \div 10^5$  с.

### **Практическая ценность**

1. Построенная база данных может быть использована в дальнейших статистических исследованиях или как источник справочной информации по характеристикам гамма-излучения всплесков их послесвечений.
2. Разработанный на базе кода STELLA программный аппарат может использоваться и для расчёта процессов при взрывах сверхновых, где рентгеновское и гамма-излучение также могут играть большую роль.

### **На защиту выносятся**

1. Результаты анализа выборки 58 ГВ с известными красными смещениями и оптическими послесвечениями. Обнаружение статистически значимой и не вызванной эффектами селекции корреляции максимальной светимости послесвечения и антикорреляции длительности оптического послесвечения с красным смещением, которые могут свидетельствовать

о космологической эволюции среды, окружающей гамма-всплески. Обнаружение статистически значимого количества объектов (30 всплесков из 58 исследованных) со степенным показателем спада потока оптического послесвечения, заметно меньшим 1, что можно интерпретировать наличием более жёсткого спектра ускоряемых на ударной волне электронов (по сравнению с общепринятым  $N_E \propto E^{-p}$ , где  $p \approx 2.2 \div 2.4$ ), либо введения дополнительного источника излучения послесвечений. Интерпретация корреляций параметров внутри подвыборок гамма- и оптического диапазонов как следствия преимущественно экспоненциального (в гамма) и степенного (в оптике) характера затухания блеска.

2. Создание и описание модификаций расчётного аппарата STELLA, сущностью которых являются моделирование тепловой мощности, передаваемой веществу при взаимодействии с гамма-лучами за счёт фотоионизации и комптоновского рассеяния, расчёт изменения ионизационного состояния среды по нестационарной системе уравнений, ограниченный учёт воздействия релятивистского выброса гамма-всплеска в рамках методологии “квазивыброса”, учёт при построении кривых блеска и спектров задержки времени, связанной с геометрической кривизной оболочки. Модифицированный код STELLA позволяет в рамках сделанных оправданных допущений (одномерность, однотемпературность, пренебрежение многократным рассеянием гамма-фотонов) осуществлять моделирование нестационарного нагрева и изменения ионизационного состояния околозвёздного вещества под воздействием гамма- и жёстких рентгеновских лучей одновременно с процессами гидродинамики и переноса излучения. .
3. Интерпретация особенностей кривых блеска послесвечений: резко обрывающиеся плато (до  $10^4$  секунд) в рентгеновском диапазоне, “горбы” и долгие плато (сутки и десятки суток) в оптическом – как проявления исследуемых тепловых эффектов. Интерпретация особенностей рентгеновских (резко обрывающиеся плато на  $10^2 \div 10^4$  с после начала всплеска) и оптических (горбовидные отклонения от закона степенного спада



потока на  $10^3 - 10^5$  с) кривых блеска послесвечений некоторых конкретных гамма-всплесков (GRB 050904, 070110, 090423) как возникающих в результате нагрева окружающей тонкой плотной оболочки первичным гамма-излучением и взаимодействием с релятивистским выбросом.

## Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались на научных семинарах ИКИ, ГАИШ МГУ и следующих международных конференциях:

1. Физика нейтронных звёзд (г. Санкт-Петербург, Россия, 22-28 июня 2008)
2. Астрофизика высоких энергий (г. Москва, Россия, 20-23 декабря 2008)
3. Астрофизика высоких энергий (г. Москва, Россия, 21-24 декабря 2009)
4. NANJING GAMMA-RAY BURST CONFERENCE (г. Нанкин, КНР, ноябрь 2008)

## Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации изложены в 3 работах, опубликованных в печатных изданиях.

1. *Greco, G.; Bad'in, D.; Beskin, G. et al.*, GRBs with optical afterglow and known redshift: A statistical study, // *Il Nuovo Cimento B*, vol. 121, Issue 12, p.1487-1488 (2006).
2. *Д.А. Бад'ин, Г.М. Бескин, Дж. Греко*, Исследование гамма-всплесков с известными красными смещениями: статистический анализ параметров, // *Письма в Астрономический Журнал*, том 35, вып. 1, стр.7-24, 2009
3. *Бад'ин, Д.А., Блинников С.И., Постнов К.А.*, ПРОГРЕВ ОКОЛОЗВЁЗДНОЙ СРЕДЫ ЖЁСТКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГАММА-ВСПЛЕСКА. *Письма в Астрономический Журнал*, том **36**, вып. 10, стр. 723, 2010

В перечисленных работах автору принадлежит: В работах [1,2] – создание и пополнение базы данных гамма-всплесков, статистический анализ полученных данных, идеи научной интерпретации. Несмотря на похожие названия статей, они различаются составом выборки, значимостью и набором исследованных корреляций, интерпретация которых была предпринята в основном во второй работе. В работах [3] – модификация кода STELLA, разработка теоретической базы, выбор приближений, написание кода, численное моделирование, интерпретация результатов.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 95 страниц, 26 рисунков, 9 таблиц. Список литературы насчитывает 114 наименований.

В **первой главе** излагаются принципы построения базы данных параметров излучения гамма-всплесков, описываются методики расчёта этих параметров. Приводятся результаты анализа распределений параметров, парных корреляций между ними, обсуждается интерпретация этих корреляций, обосновывается незначительность влияния эффектов наблюдательной селекции на обнаруженные закономерности.

Во **второй главе** приводится описание математического аппарата модифицированного кода STELLA, который использовался для расчётов ионизационного состояния и мощности нагрева околозвёздного вещества при взаимодействии его с гамма-излучением. Обосновываются и обсуждаются принятые приближения, обсуждается возможность и методика оценки (с помощью упомянутого кода) влияния релятивистского выброса на вещество.

В **третьей главе** приведены результаты расчётов с помощью модифицированного кода STELLA кривых блеска и спектров теплового излучения вещества, нагретого гамма-излучением, а также воздействием выброса гамма-всплеска. Расчёты проведены для различных моделей среды, отличающихся геометрическими размерами, профилем плотности, массой, химическим со-

ставом. Обсуждаются свойства теплового излучения, возможность его обнаружения на фоне синхротронного послесвечения, различие свойств теплового излучения, связанного с лучистым нагревом и с нагревом от взаимодействия с выбросом. Предлагается возможная интерпретация особенностей оптических и рентгеновских послесвечений как проявление исследуемых эффектов.

В **заключении** приводятся выводы, выносимые на защиту, и обсуждаются основные результаты работы.

В **приложении** представлены ссылки на источники, использовавшиеся при составлении базы данных параметров (глава 1), таблицы и графики, которые в целях удобства восприятия и сравнения автор вынес из основного текста.

## Содержание работы по главам

### **Глава 1: Исследование гамма-всплесков с известными красными смещениями: статистический анализ параметров**

Рост наблюдательных данных о гамма-всплесках и их послесвечениях позволяет применять статистические методы для поиска возможных ранее не известных закономерностей. Наиболее известным результатом такого подхода следует считать корреляцию Аматти (между максимумом спектра  $EF_E$  и полной излучённой энергией, [1]). Предметом первой главы является максимально модельно независимый статистический анализ как можно более полной выборки параметров оптического и гамма-излучения с целью поиска связей между ними, а также возможной зависимости от красного смещения. Это обсуждается в разделах 1.1.

В разделе 1.2 приводится список исследуемых параметров: это красные смещения, потоки и полные потоки (проинтегрированные по времени, в эрг  $\text{см}^{-2}$ ), светимости и полные энергии (в изотропных эквивалентах), характерные длительности (время высвечивания 90% принятой энергии), времена оптических максимумов, показатели степени спада оптического потока. Там же описывается каким образом из обилия различных данных, полученных

разными инструментами, строилась более однородная выборка параметров. Также описана процедура исправления влияния космологических факторов (изменение шкалы времени, спектральный сдвиг, изменение полной энергии). Раздел 1.3 представляет набор статистических методов анализа распределений и парных корреляций.

Результаты исследования изложены в разделе 1.4. Обнаружено, что распределение степенных показателей затухания оптического потока демонстрирует значительную их часть (примерно половину объектов) меньше 1. Т.е. оптический поток (и светимость) спадает медленнее, чем  $F \sim t^{-1}$ , что требует либо более жёсткого спектра ускоренных электронов (в настоящее время считается, что  $N_e \sim E^{-p}$ , где  $p = 2.2 \div 2.4$ , для медленного затухания понадобится  $p < 2$ ), либо либо наложения какого-то дополнительного источника излучения.

Среди корреляций обращают на себя внимание впервые обнаруженные корреляции максимальной оптической светимости и красного смещения, а также антикорреляция оптической длительности и красного смещения. Очевидное предположение о наблюдательной селекции (более далёкие обнаруженные объекты более яркие) не подтверждается, однако, отсутствием зависимости максимального оптического потока и времени оптического максимума от красного смещения.

Связей между параметрами гамма- и оптического излучений не найдено, зато между собой (т.е. внутри соответствующих диапазонов) они образуют пары корреляций которые вполне удовлетворительно могут быть объяснены фактом преимущественно степенного затухания в оптике и экспоненциального – в гамма-диапазоне.

В разделе 1.5 на основании критериев однородности выборки (сравнение среднеквадратичных отклонений, непараметрический критерий Колмогорова-Смирнова) обсуждается правомочность включения в базу данных результатов из разных эпох развития наблюдательной техники. Различия между подвыборками оказываются гораздо менее существенными, чем то прибавле-

ние статистической значимости, которое даёт объединение всплесков “ранней” эпохи и “поздней” в одну выборку.

## **Глава 2: Методология расчётов прогрева околозвёздной среды жёстким излучением гамма-всплеска**

Несмотря на преимущественно степенной характер поведения кривых блеска оптических послесвечений, у них наблюдаются отклонения от этого закона (некоторые их особенности указаны в разделе 2.1). Рентгеновские послесвечения демонстрируют даже большее разнообразие форм. Во второй главе описывается методология расчётов, необходимых для проверки возможности порождения этих особенностей тепловым излучением вещества, нагретого гамма-всплеском. Необходимо учитывать гидродинамику структур вещества, перенос излучения в нём, процессы существенно нестационарного нагрева и изменения ионизационного состояния под действием гамма-излучения. В распоряжении автора имелся радиационно-гидродинамический код STELLA, который позволяет решать первые две задачи одновременно, и была проведена модификация для решения третьей.

Ввиду пространственной одномерности кода в качестве модели среды рассматриваются различные сферически симметричные оболочки вокруг источника гамма-всплеска. Условия, которым должны соответствовать эти структуры, чтобы обеспечивать достаточную светимость, приведены в разделе 2.2.

В разделах 2.3.-2.5 описывается, какие были сделаны упрощения (одномерность по координате, однотемпературность, пренебрежение многократным рассеянием гамма-фотонов), и какие эффекты были учтены: нагрев за счёт фотоионизации, комптоновского рассеяния на связанных и свободных электронах, расчёт ионизационного состояния по нестационарной системе уравнений. В разделе 2.6 обсуждается, как в рамках нерелятивистского формализма можно частично обойти проблему взаимодействия вещества с релятивистским выбросом. В разделе 2.7 излагается методика конечной обработки радиационно-гидродинамических расчётов и важность учёта геометрических

факторов (геометрической кривизны оболочки).

### **Глава 3: Результаты численных расчётов прогрева околозвёздной среды**

Результаты расчётов по методике из главы 2 составляют главу 3. Приводятся начальные параметры (раздел 3.1) набора моделей среды и гамма-излучения, а также графики расчётных кривых.

Эффекты взаимодействия вещества с собственно излучением обсуждаются в разделе 3.2. Указывается на важность решения нестационарной системы уравнений ионизационного состояния для корректного расчёта непрозрачности среды. Рассматриваются особенности кривых блеска и спектров теплового излучения, представленных на рисунках. В разделе 3.3 обсуждаются возможные проявления исследуемых эффектов на фоне нетепловых синхротронных послесвечений. В рентгеновском диапазоне это могут быть плато или замедления спада потока, за которыми следует резкий “завал”. В оптическом диапазоне в зависимости от красного смещения – плато или “горбы” на разных временах от нескольких десятых до десятков дней. При этом рост спектральной плотности в сторону ультрафиолетовой области (относительно оптической) и характер временной эволюции максимума спектра таковы, что компенсируют общее понижение потока с ростом красного смещения и фотометрического расстояния, в отличие от нетеплового послесвечения, у которого спектральная плотность растёт в инфракрасную сторону. Таким образом оказывается, что вероятность обнаружения тепловых эффектов излучения на фоне послесвечений в оптическом диапазоне растёт с увеличением красного смещения, а положение временного максимума при этом остаётся примерно постоянным.

Особенности взаимодействия оболочек с выбросом рассматривается в разделе 3.4. Видно, что выброс должен существенно исказить кривую блеска (увеличить светимость и длительность) особенно в ультрафиолетовом и более низкочастотных диапазонах. В рентгеновской области, однако, доминирует излучение от лучистого нагрева.

В разделе 3.5 рассмотренные ранее эффекты сравниваются с особенностями реальных гамма-всплесков. Можно сказать, что сделанные ранее выводы о возможном проявлении по крайней мере качественно верны. По энергетическим и некоторым временным характеристикам расчётные кривые блеска оказываются похожи на плато в рентгеновской области и иррегулярности в оптическом диапазоне. Разумеется, есть и несоответствия, однако, в данной работе не ставилась задача наилучшей количественной аппроксимации результатов наблюдений. Для этого скорее следует продолжить работу над совершенствованием расчётного аппарата, перспективы развития которого указываются в разделе 3.6.

## **Приложение**

В приложении приводятся ссылки на источники для базы данных параметров излучения (см. главу 1), таблицы параметров, а также рисунки, которые для сравнения лучше сгруппировать вблизи один от другого, чем раскидывать по тексту.

# Литература

- [1] *Амати и др.* (L. Amati, F. Frontera, M. Tavani et al.), *Astron. Astrophys.* **390**, 81 (2002).
- [2] *Бескин и др.* (G. Beskin, S. Karpov, S. Bondar et al.), preprint astro-ph.HE arXiv:0905.4431v1 (2009)
- [3] blinnikov-postnov97
- [4] *Блинников и др.* (S.I. Blinnikov, R. Eastman, O.S. Bartunov et al.), *Astrophys. J.* **496**, 454 (1998).
- [5] *Вусли и др.* (S.E. Woosley, S.I. Blinnikov, A. Heger) *Nature* **450**, 390 (2007).
- [6] *Герелс и др.* (N. Gehrels, E. Ramirez-Ruiz, D. B. Fox) препринт arXiv:0909.1531v1 (2009).
- [7] *Постнов и др.* (K.A. Postnov, S.I. Blinnikov, D.I. Kosenko, E.I. Sorokina), *Nucl. Physics B (Proc. Suppl.)*, **132** 327 (2004).