

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

УДК 520.8; 524.3; 52-732

На правах рукописи

*МИНАЕВ Павел Юрьевич*

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКИХ  
ТРАНЗИЕНТНЫХ СОБЫТИЙ В ГАММА-  
ДИАПАЗОНЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ  
INTEGRAL, SWIFT И FERMI**

Специальность: 01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук



Москва  
2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

**Научный руководитель:**

*Позаненко Алексей Степанович*  
кандидат физико-математических наук  
ИКИ РАН

**Официальные оппоненты:**

*Чечеткин Валерий Михайлович*  
доктор физико-математических наук,  
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша  
Российской академии наук

*Штерн Борис Евгеньевич*  
доктор физико-математических наук  
Институт ядерных исследований РАН (Троицк)

**Ведущая организация:**

Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе  
Российской академии наук (Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится **22 января 2015 года в 14 часов** на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при Государственном астрономическом институте имени П. К. Штернберга (ГАИШ) Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ) по адресу: 119992, Москва, Университетский пр-т, д. 13

С диссертацией можно ознакомиться в в Научной библиотеке МГУ (119991, Москва, Ломоносовский пр-т., д. 27, Фундаментальная библиотека) и на сайте <http://sai.msu.ru/dissovet/2015.html>

Автореферат разослан 21 ноября 2014 года

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 002.113.02  
доктор физико-математических наук



С. О. Алексеев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность**

Актуальная задача современной астрофизики — исследование коротких транзиентных событий в гамма-диапазоне. Космические гамма-всплески — одни из самых интересных представителей этого класса явлений, прежде всего, потому, что представляют собой наиболее мощные явления во Вселенной [1]. Несмотря на то, что с момента их открытия прошло более 50 лет [2], их природа до конца не выяснена. Предложено много теоретических моделей гамма-всплесков, однако ни одна из них не учитывает все наблюдаемые особенности этих явлений. Считалось, что распределение гамма-всплесков по длительности бимодально [3], и, как следствие, существует два типа гамма-всплесков — длинные [4, 5] и короткие [1, 6]. В последнее время эта классификация подвергается пересмотру, поскольку были обнаружены так называемые короткие гамма-всплески с продлённым излучением, которые по многим феноменологическим признакам напоминают короткие, но при этом имеют длительность, характерную для длинных гамма-всплесков [7, 8]. Таким образом, феноменологическое исследование и построение элементов модели гамма-всплесков различной природы — актуальная задача современной астрофизики.

### **Цель диссертационной работы**

Диссертация посвящена исследованию космических гамма-всплесков в гамма-диапазоне. В работе использовались данные космических обсерваторий INTEGRAL, Swift, Fermi. В рамках поставленной цели решены следующие задачи:

1. Составлен каталог коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL. Проведён поиск продлённого излучения коротких всплесков из каталога и сделана оценка их доли в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. Проведено сравнение с экспериментами IBIS/ISGRI/INTEGRAL, BAT/Swift, GBM/Fermi, RHESSI, BATSE, и другими.
2. Осуществлён поиск, классификация и исследование коротких гамма-событий в эксперименте SPI/INTEGRAL. Составлен каталог космических гамма-всплесков, а также вспышек источников повторного мягкого гамма-излучения и аномальных рентгеновских пульсаров по данным экспериментов SPI, SPI-ACS, IBIS/ISGRI. Выполнена классификация событий и исследование гамма-всплесков из этого каталога.
3. Разработан метод исследования спектральной эволюции гамма-всплесков и проведена интерпретация результатов, полученных с его помощью.
4. Проведены комплексные исследования индивидуальных, наиболее интересных гамма-всплесков по данным различных экспериментов.

## **Научная новизна**

- В настоящей работе впервые составлен каталог коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL, подтверждённых другими космическими экспериментами и зарегистрированных за период 2002–2008 гг.
- Впервые проведён поиск продлённого излучения у коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL.
- Впервые обнаружено продлённое излучение коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL как в кривых блеска индивидуальных событий, так и в их суммарной кривой.
- Впервые проанализированы данные эксперимента SPI/INTEGRAL с целью поиска и исследования коротких транзиентных событий на временной шкале 0,001...100 с.
- Впервые проведена классификация и интерпретация коротких транзиентных событий, зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL.
- Впервые составлен каталог коротких гамма-транзиентов (гамма-всплесков, вспышек источников SGR 1806-20 и AXP 1E\_1547.0-5408) в эксперименте SPI/INTEGRAL.

- Усовершенствован метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, позволяющий количественно исследовать спектральную эволюцию.
- Впервые показано, что для всех гамма-всплесков (в том числе и коротких), зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL и состоящих из одного импульса, и для отдельных импульсов гамма-всплесков зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывается логарифмической функцией  $\text{lag} \approx A \log(E)$ , причём параметр  $A$  во всех случаях положителен. Это означает отсутствие отрицательной задержки отдельных импульсов гамма-всплесков.
- Впервые показано, что эволюция энергетического спектра гамма-всплесков от мягкого излучения к жёсткому, а также отрицательное значение спектрально-временной задержки, могут быть следствием эффекта «суперпозиции», который возникает при анализе гамма-всплесков, состоящих из нескольких перекрывающихся между собой импульсов.

### Практическая значимость

- Составленный каталог коротких гамма-всплесков и кандидатов в короткие гамма-всплески эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL будет использован для их поиска и подтверждения при анализе данных GBM/Fermi и RHESSI.
- Разработанная методика поиска и классификации событий в данных эксперимента SPI/INTEGRAL может быть применена к исследованию результатов других гамма-экспериментов, в частности, эксперимента RHESSI, детекторы которого аналогичны детекторам гамма-спектрометра SPI, а также для дальнейшего анализа поступающих с обсерватории INTEGRAL данных.
- Составленный каталог гамма-всплесков эксперимента SPI/INTEGRAL расширяет число событий, зарегистрированных обсерваторией INTEGRAL, в части количества, локализации и исследования спектров в диапазоне энергий 20 кэВ – 8 МэВ.
- Составленный каталог вспышек источников AXP 1E\_1547.0-5408 и SGR 1806-20 эксперимента SPI INTEGRAL может быть использован для статистического анализа вспышечной активности источников.

- Разработанный метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков может быть применён для анализа данных любых транзиентных событий, зарегистрированных гамма- и рентгеновскими телескопами, обладающими высокими временным и энергетическим разрешениями.
- Полученные результаты исследования спектральной эволюции гамма-всплесков будут использованы для проверки теоретических моделей спектральной эволюции гамма-всплесков (например, [9]).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Обнаружение продленного излучения коротких гамма-всплесков эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL в нескольких индивидуальных кривых блеска и в суммарной кривой.
2. Метод поиска и классификации событий в данных эксперимента SPI/INTEGRAL.
3. Каталог событий, связанных с космическими гамма-всплесками, вспышками источников SGR 1806-20 и AXP 1E\_1547.0-5408, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL и подтверждённых другими экспериментами.
4. Каталог коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL, подтверждённых другими экспериментами.
5. Метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, основанный на кросс-корреляционном анализе кривых блеска в узких энергетических каналах.
6. Результаты исследования спектральной эволюции гамма-всплесков в эксперименте SPI INTEGRAL, показавшие, что для всплесков с простой временной структурой и для отдельных импульсов многоимпульсных событий зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывается логарифмической функцией  $\text{lag} \approx A \log(E)$ , причём параметр  $A$  всегда имеет положительное значение.
7. Эволюция энергетического спектра гамма-всплесков от мягкого излучения к жёсткому может быть следствием эффекта «суперпозиции», который возникает при анализе гамма-всплесков со сложной спектрально-временной структурой.

## Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. *Минаев П. Ю., Позаненко А. С., Лозников В. М.* Пролётное излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL // Письма в Астрономический журн. 2010. Т. 36. С. 744.
2. *Минаев П. Ю., Позаненко А. С., Лозников В. М.* Короткие гамма-всплески в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL // Астрофизический бюллетень. 2010. Т. 65. С. 343.
3. *Минаев П. Ю., Гребенев С. А., Позаненко А. С., Мольков С. В., Фредерикс Д. Д., Голенецкий С. В.* GRB 070912 - необычный гамма-всплеск, зарегистрированный из направления на Галактический центр // Письма в Астрономический журнал. 2012. Т. 38. С. 687.
4. *Минаев П. Ю., Позаненко А. С., Гребенев С. А., Мольков С. В.* Каталог коротких гамма-транзиентов, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL // Письма в Астрономический журнал. 2014. Т. 40. С. 271.
5. *Volnova A.A., Pozanenko A.S., Gorosabel J., Perley D.A., Frederiks D.D., Kann D.A., Rumyantsev V.V., Biryukov V.V., Burkhonov O., Castro-Tirado A.J., Ferrero P., Golenetskii S.V., Kloze S., Loznikov V.M., Minaev P.Yu., Stecklum B., Svinkin D.S., Tsvetkova A.E., de Ugarte Postigo A., Ulanov M. V.* GRB 051008: A long, spectrally-hard dust-obscured GRB in a Lyman-Break Galaxy at  $z \approx 2.8$  // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS). 2014. V. 442. P. 2586.

В сборниках трудов конференций, препринтах и циркулярах:

1. *Minaev P., Pozanenko A., Grebenev S., Molkov S.* Investigation of the spectral lag-energy relation of GRBs registered by INTEGRAL // Proceedings of “An INTEGRAL View of the High-Energy Sky (the First 10 Years)” — 9<sup>th</sup> INTEGRAL Workshop and Celebration of the 10<sup>th</sup> Anniversary of the Launch (INTEGRAL 2012). 2013. id 127.
2. *Minaev P.Yu., Pozanenko A.S., Grebenev S.A., Molkov S.V.* Gamma-ray bursts: the dependence of the spectral lag on the energy // EAS Publications Series. 2013. V. 61. P. 75.
3. *Volnova A., Pozanenko A., Gorosabel J., Perley D., Kann D.A., Frederiks D., Rumyantsev V., Castro-Tirado A.J., Minaev P.* A case

study of dark GRB 051008 // EAS Publications Series. 2013. V. 61. P. 275.

4. *Minaev P.Yu.* Investigation of the spectral lag-energy relation of GRBs registered by INTEGRAL. arXiv:1304.0348.
5. *Pozanenko A., Minaev P., Volnova A.* GRB 130427A: SPI-ACS/INTEGRAL observations // GRB Coordinates Network. Circular Service. 2013. 14484. 1.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на конференциях:

1. *Минаев П. Ю.* Продлённое излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в ACSSPI INTEGRAL: устный доклад // Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва, Россия, ИКИ РАН, апрель 2008.
2. *Minaev P.Yu.* Searching for signature of extended emission in short GRBs registered by SPI-ACS of INTEGRAL observatory: постерный доклад // Конференция “Physics of Neutron Stars-2008”. Санкт-Петербург, Россия, июнь 2008.
3. *Минаев П. Ю.* Продлённое излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных в SPI-ACS INTEGRAL: постерный доклад // Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра». Москва, Россия, ИКИ РАН, декабрь 2008.
4. *Минаев П. Ю.* Сверхкороткие космические гамма-всплески в эксперименте SPI-ACS INTEGRAL: устный доклад // Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва, Россия, ИКИ РАН, апрель 2009.
5. *Minaev P.Yu.* Extended emission in short gamma-ray bursts registered by SPI-ACS of INTEGRAL observatory: постерный доклад // Конференция “Astrophysics and Cosmology after Gamow: recent progress and new horizons”. Одесса, Украина, август 2009.
6. *Minaev P.Yu.* Extended emission in short gamma-ray bursts registered by SPI-ACS of INTEGRAL observatory: устный доклад // Конференция “Many faces of GRB phenomena — optics vs high energy”. Нижний Архыз, Россия, октябрь 2009.



7. *Минаев П. Ю.* Пролётное излучение коротких гамма-всплесков, зарегистрированных с помощью SPI-ACS INTEGRAL: постерный доклад // Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра». Москва, Россия, ИКИ РАН, декабрь 2009.
8. *Минаев П. Ю.* Короткие гамма-всплески, их пролётное излучение и оценки для испаряющихся первичных черных дыр: устный доклад // «31-я Всероссийская конференция по космическим лучам». Москва, Россия, июль 2010.
9. *Минаев П. Ю.* Поиск транзиентных гамма-событий, зарегистрированных телескопом SPI обсерватории INTEGRAL: постерный доклад // Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра». Москва, Россия, ИКИ РАН, декабрь 2010.
10. *Минаев П. Ю.* Поиск транзиентных гамма-событий, зарегистрированных телескопом SPI обсерватории INTEGRAL: устный доклад // Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва, Россия, ИКИ РАН, апрель 2011.
11. *Минаев П. Ю.* Короткие гамма-всплески, их пролётное излучение и оценки для испаряющихся первичных черных дыр: устный доклад // «14-я Российская гравитационная конференция – Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике». Ульяновск, Россия, июнь 2011.
12. *Минаев П. Ю.* Исследование спектральной эволюции гамма-всплесков с помощью спектрально-временной диаграммы: постерный доклад // Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра». Москва, Россия, ИКИ РАН, декабрь 2011.
13. *Минаев П. Ю.* Особенности спектральной эволюции гамма-всплесков в гамма-диапазоне: устный доклад // Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва, Россия, ИКИ РАН, апрель 2012.
14. *Минаев П. Ю.* Гамма-всплески: наблюдаемые свойства и модели источников. Спектральная эволюция гамма-всплесков: устный доклад // «3-я Пулковская молодёжная астрономическая конференция-2012». Санкт-Петербург, Россия, сентябрь 2012.
15. *Минаев P.Yu.* Gamma-ray bursts: the dependence of the spectral lag on the energy: постерный доклад // Конференция “X-ray sky: from stars and black holes to cosmology. Science with eROSITA and ART-XC aboard Spectrum-RG”. Казань, Россия, сентябрь 2012.

16. *Minaev P.Yu.* Gamma-ray bursts: the dependence of the spectral lag on the energy: постерный доклад // Конференция “Fall 2012 Gamma-Ray Burst Symposium”. Малага, Испания, октябрь 2012.
17. *Minaev P.Yu.* Investigation of the spectral lag-energy relation of GRBs registered by INTEGRAL: постерный доклад // Конференция “An INTEGRAL view of the high-energy sky (the first 10 years). 9<sup>th</sup> INTEGRALWorkshop”. Париж, Франция, октябрь 2012.
18. *Минаев П. Ю.* Спектральная эволюция гамма-всплесков в гамма-диапазоне: постерный доклад // Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра». Москва, Россия, ИКИ РАН, декабрь 2012.
19. *Minaev P.Yu.* To the dichotomy of short gamma-ray bursts: устный доклад // Конференция “Galaxies meet GRBs at Cabo de Gata”. Лас-Неграс, Испания, сентябрь 2013.
20. *Minaev P.Yu.* GRB spectral evolution: from complex profile to basic structure: устный доклад // Конференция “Gamma-Ray Bursts: New Missions to New Science”. Москва, Россия, октябрь 2013.
21. *Minaev P.Yu.* GRB spectral evolution: from complex profile to basic structure: устный доклад // Конференция “Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013”. Киото, Япония, ноябрь 2013.
22. *Минаев П. Ю.* Декомпозиция сложных кривых блеска и спектральная эволюция гамма-всплесков: устный доклад // Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра». Москва, Россия, ИКИ РАН, декабрь 2013.
23. *Минаев П. Ю.* Каталог транзиентных гамма-событий, зарегистрированных в эксперименте SPI INTEGRAL: устный доклад // Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва, Россия, ИКИ РАН, апрель 2014.
24. *Minaev P.Yu.* Spectral evolution and pulse decomposition of Gamma-ray Burst light curves: постерный доклад // Конференция “Gamma-Ray Bursts in the Multi-messenger Era”. Париж, Франция, июнь 2014.

### **Личный вклад**

Соискатель совместно с научным руководителем А.С. Позаненко разработал методику поиска и классификации коротких событий в эксперименте SPI INTEGRAL, методику анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, методику поиска продленного

излучения коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. Соискателем самостоятельно был разработан пакет программ и выполнен анализ всех используемых в работе данных экспериментов SPI, SPI-ACS/INTEGRAL. Спектральный анализ данных эксперимента SPI выполнен с помощью программ XSPEC[10]. Анализ данных экспериментов IBIS/ISGRI и JEM-X проводился совместно с С. А. Гребеневым (ИКИ РАН) и С. В. Мольковым (ИКИ РАН). Обсуждение, интерпретация полученных результатов — в равных долях с А. С. Позаненко. Написание текстов публикаций — совместно с А. С. Позаненко, за исключением статьи “GRB 070912 — необычный гамма-всплеск, зарегистрированный из направления на Галактический центр”, написанной совместно с С. А. Гребеневым и А. С. Позаненко, а также статьи “GRB 051008: A long, spectrally-hard dust-obscured GRB in a Lyman-Break Galaxy at  $z \approx 2.8$ ”, написанной совместно с А. А. Вольновой (ИКИ РАН) и А. С. Позаненко.

## СТРУКТУРА И ОБЪЁМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объём диссертации 211 страниц, включая 57 рисунков, 17 таблиц. Библиография включает 225 наименований на 26 страницах.

Во **введении** приведён обзор литературы по рассматриваемой проблеме, обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Также сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту, приведён список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

**Глава 1** посвящена исследованию коротких гамма-всплесков в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL. В начале главы приводится описание феноменологической проблемы классификации гамма-всплесков, основанной на их длительности. Описан феномен продлённого излучения, наблюдающегося у части коротких гамма-всплесков, который существенно осложняет их классификацию. Природа продлённого излучения не выяснена, поэтому исследование коротких гамма-всплесков и продлённого излучения представ-

ляется актуальной задачей исследований, которому посвящена остальная часть главы.

Составлен каталог подтверждённых другими космическими обсерваториями коротких гамма-всплесков (далее в тексте — «подтверждённые гамма-всплески»), зарегистрированных в эксперименте SPI-ACS/INTEGRAL за период 2002–2008 гг. Приведено описание эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL. Помимо подтверждённых гамма-всплесков исследовались события, вероятно связанные с космическими гамма-всплесками (далее — «кандидаты в гамма-всплески») из работы [11] и события, вероятно связанные с взаимодействием детекторов с заряженными частицами. У нескольких коротких всплесков (GRB031214 и GRB060221) обнаружено значимое продлённое излучение. Оно также обнаружено в суммарных кривых блеска групп подтверждённых всплесков и кандидатов в гамма-всплески. Это может свидетельствовать, что продлённое излучение является общим свойством всех коротких гамма-всплесков, а часть кандидатов в гамма-всплески — реальные гамма-всплески. В суммарной кривой блеска контрольной группы событий, связанных с взаимодействием детекторов с заряженными частицами, продлённое излучение не обнаружено. Таким образом, доля коротких гамма-всплесков, обнаруженных с помощью SPI-ACS/INTEGRAL, значительно больше, чем считалось до сих пор, и может составлять от 30 до 45 % от всех гамма-всплесков, зарегистрированных в этом эксперименте.

В данной главе также приведено исследование распределений гамма-всплесков по длительности в экспериментах SPI-ACS/INTEGRAL, Swift, BATSE, и других. Как и следовало ожидать, доля коротких, более жёстких гамма-всплесков растёт с увеличением нижнего энергетического порога срабатывания детекторов.

При исследовании распределения длительностей и продлённого излучения коротких гамма-всплесков SPI-ACS/INTEGRAL не получено убедительных свидетельств в пользу существования отдельного класса сверхкоротких гамма-всплесков.

**Глава 2** посвящена поиску и исследованию гамма-всплесков, а также других транзиентных гамма-событий, в данных эксперимента SPI/INTEGRAL. В 1-й главе было показано, что доля коротких гамма-всплесков в SPI-ACS/INTEGRAL может составлять до 45 % от всех гамма-всплесков в этом эксперименте. В то же время доля коротких гамма-всплесков в IBIS/ISGRI, также размещённом на обсерватории INTEGRAL, составляет всего 10 %. Иными

словами, в SPI-ACS наблюдается избыток, а в эксперименте IBIS/ISGRI — недостаток коротких гамма-всплесков. На обсерватории INTEGRAL размещён ещё один гамма-телескоп — спектрометр SPI. Система автоматического отбора событий IBAS используется только для анализа данных инструментов IBIS/ISGRI и SPI-ACS. Поэтому в данных эксперимента SPI/INTEGRAL могут присутствовать неидентифицированные гамма-события. Спектрометр SPI более чувствителен к жёсткому гамма-излучению (по сравнению с IBIS/ISGRI), которое наблюдается от коротких гамма-всплесков. Таким образом, основная цель данной главы — поиск коротких гамма-всплесков в данных SPI/INTEGRAL. Помимо коротких гамма-всплесков, в работе также проводился поиск других коротких транзитных явлений, таких, как длинные гамма-всплески, источники мягкого повторного гамма-излучения, аномальные рентгеновские пульсары.

В главе приведено также краткое описание обсерватории INTEGRAL и размещённых на ней экспериментов SPI, SPI-ACS, IBIS/ISGRI. Описан разработанный метод поиска событий в архивных данных эксперимента SPI/INTEGRAL на масштабах времени 0,001...10 с с различными порогами значимости. Данный метод применен к данным эксперимента SPI, охватывающих период с 12 июля 2003 г. по 23 января 2010 г. (91–888 витки обсерватории).

На основе наблюдаемых свойств обнаруженных алгоритмом событий (длительность, жёсткость спектра, распределение отсчётов по детекторам, и др.) построена классификация событий. Обнаружено три типа взаимодействий детекторов с заряженными частицами, связанных, предположительно, с высокоэнергичными протонами, пучками электронов магнитосферы Земли, а также с высокоэнергичными частицами Галактических космических лучей. Составлен каталог из 48, 223 и 23 событий, связанных с космическими гамма-всплесками, вспышками источников SGR 1806-20 и AXP 1E\_1547.0-5408, соответственно, зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL и подтверждённых другими экспериментами.

В главе 3 проведено исследование спектральной эволюции 28 ярких гамма-всплесков по данным экспериментов SPI и IBIS/ISGRI. Помимо длительности и жёсткости спектра в исследованиях гамма-всплесков применяется параметр, характеризующий эволюцию спектра — спектрально-временная задержка (лаг). Лаг представляет собой смещение по времени профилей кривых блеска

в различных энергетических каналах и считается положительным, если временной профиль в более мягких энергетических каналах «запаздывает» относительно профиля в жёстких каналах. Предложено несколько теоретических моделей спектральной эволюции гамма-всплесков, однако ввиду сильного различия её характера для отдельных гамма-всплесков, ни одна из них не может удовлетворительно описать наблюдательные данные любого гамма-всплеска. Главная цель главы — провести детальное исследование спектральной эволюции гамма-всплесков и объяснить различные наблюдательные особенности этого явления.

Впервые предложен метод анализа спектральной эволюции гамма-всплесков, основанный на кросскорреляционном анализе кривых блеска в большом числе узких энергетических каналов, который позволяет исследовать спектральную эволюцию количественно. Показано, что для всплесков с простой временной структурой и для отдельных импульсов многоимпульсных событий зависимость спектрально-временной задержки от энергии описывается логарифмической функцией  $\text{lag} \approx A \log(E)$ , при этом параметр  $A$  (индекс задержки) всегда имеет положительное значение.

Обнаружена корреляция между индексом задержки и длительностью импульса, причём зависимость одинакова для исследованных коротких и длинных гамма-всплесков, что, по-видимому, может свидетельствовать о едином механизме излучения. Однако для подтверждения последнего предположения требуется исследование большего числа коротких всплесков.

Описана предложенная нами модель, объясняющая эволюцию энергетического спектра гамма-всплесков от мягкого к жёсткому эффектом «нагромождения» — наложения отдельных импульсов, составляющих гамма-всплеск, друг на друга.

Проведённые исследования спектральной эволюции гамма-всплесков позволяют значительно упростить существующую неоднозначность в характере спектральной эволюции, проявляющуюся при исследовании гамма-всплесков со сложной структурой кривой блеска, и тем самым позволяют сделать ограничения на модели спектральной эволюции. Показано, что спектральная эволюция отдельных импульсов гамма-всплесков, в том числе и коротких, носит универсальный характер.

**Глава 4** посвящена исследованию двух гамма-всплесков: GRB070912 и GRB051008.

Гамма-всплеск GRB070912 обнаружен в эксперименте SPI/INTEGRAL и также зарегистрирован в поле зрения телескопов IBIS/ISGRI и JEM-X. GRB070912 — один из немногих гамма-всплесков, для которых удалось получить широкополосный (3 кэВ — 8 МэВ) спектр рентгеновского и гамма-излучения во время его активной фазы и проследить спектральную эволюцию. В первые секунды после начала всплеска его спектр имел степенной вид с фотонным индексом 0,8, но отличался заметным дефицитом фотонов на энергиях ниже 20 кэВ. Спектральная эволюция этого всплеска подчиняется закону  $\log \approx A \log(E)$  в широком диапазоне энергий (3 кэВ — 8 МэВ). Спектр на затухающей стадии хорошо описывался чёрнотельным законом, что позволяет оценить максимальное расстояние (красное смещение) до источника всплеска.

Гамма-всплеск GRB051008 обнаружен в данных эксперимента BAT/Swift и зарегистрирован также в экспериментах XRT/Swift, KONUS/WIND, SPIACS/INTEGRAL в рентгеновском и гамма-диапазоне. Всплеск не имел ни оптического, ни радиопослесвечения — оптический компонент не был обнаружен вплоть до 23,3 зв.вел. через полчаса после начала всплеска, что позволило отнести этот гамма-всплеск к классу оптически тёмных гамма-всплесков. В главе описаны исследования этого гамма-всплеска в гамма- и рентгеновском диапазонах. В данных эксперимента SPI-ACS/INTEGRAL обнаружено продлённое излучение длительностью 800 с. По результатам эксперимента KONUS/WIND сделан пересчёт данных эксперимента SPI-ACS в энергетические единицы, что позволило построить максимально детальную кривую блеска этого всплеска в энергетическом диапазоне (15, 50) кэВ, которую можно аппроксимировать степенным законом с изломом. Положение излома кривой блеска на временной шкале даёт возможность оценить угол раствора конуса джета источника гамма-всплеска, полная ширина которого составила  $\sim 4^\circ$ . Показано, что всплеск принадлежит к классу всплесков с рентгеновской кривой блеска, не содержащей фазы плато. По данным эксперимента SPIACS/INTEGRAL также была исследована кривая блеска главного эпизода всплеска GRB051008. Показано, что она состоит как минимум из 10 отдельных импульсов. Именно сложная структура кривой блеска этого всплеска может быть причиной отсутствия спектрального лага для всего события.

**В заключении** приведены основные результаты диссертации.

## Цитированная литература

1. *Paczynski B.* Gamma-ray bursters at cosmological distances // *Astrophysical J. Letters.* 1986. V. 308. P. L43–L46.
2. *Klebesadel R. W., Strong I. B., Olson R. A.* Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin // *Astrophysical J. Letters.* 1973. V. 182. P. L85.
3. *Mazets E. P., Golenetskii S. V., Ilinskii V. N.* et al. Catalog of cosmic gamma-ray bursts from the KONUS experiment data. I. // *Astrophysics and Space Science.* 1981. V. 80. P. 3–83.
4. *Woosley S. E.* Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes // *Astrophysical J.* 1993. V. 405. P. 273–277.
5. *Paczynski B.* Are Gamma-Ray Bursts in Star-Forming Regions? // *Astrophysical J. Letters.* 1998. V. 494. P. L45. astro-ph/9710086.
6. *Meszáros P., Rees M. J.* Tidal heating and mass loss in neutron star binaries — Implications for gamma-ray burst models // *Astrophysical J.* 1992. V. 397. P. 570–575.
7. *Connaughton V.* BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Tails // *Astrophysical J.* 2002. V. 567. P. 1028–1036. astro-ph/0111564.
8. *Gehrels N., Norris J. P., Barthelmy S. D.* et al. A new  $\gamma$ -ray burst classification scheme from GRB060614 // *Nature.* 2006. V. 444. P. 1044–1046. astro-ph/0610635.
9. *Peng Z. Y., Yin Y., Bi X. W.* et al. Spectral lag of gamma-ray bursts caused by the intrinsic spectral evolution and the curvature effect // *Astronomische Nachrichten.* 2011. V. 332. P. 92. arXiv:astro-ph.HE/1101.4062.
10. *Arnaud K. A.* XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / Ed. G. H. Jacoby, J. Barnes. 1996. V. 101. P. 17. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.*
11. *Rau A., Kienlin A. V., Hurley K., Lichti G. G.* The 1<sup>st</sup> INTEGRAL SPI-ACS gamma-ray burst catalogue // *Astronomy & Astrophysics (A&A).* 2005. V. 438. P. 1175–1183. astro-ph/0504357.