

На правах рукописи

**Свертилов Сергей Игоревич**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД,  
ПУЛЬСАРОВ И ГАММА-ВСПЛЕСКОВ ПО ДАННЫМ  
КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА  
МОНИТОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Нижний Архыз 2006

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В.Скобелева Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный консультант

Доктор физико-математических наук, профессор

**Денисов Виктор Иванович**  
физический факультет МГУ

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

**Гальпер Аркадий Моисеевич**  
МИФИ

Доктор физико-математических наук, профессор

**Грац Юрий Владимирович**  
физический факультет МГУ

Доктор физико-математических наук, профессор

**Панчук Владимир Евгеньевич**  
САО РАН

Ведущая организация:

**Институт астрономии РАН**

Защита состоится “\_11\_” \_\_\_\_октября\_\_\_\_ 2006 года, в \_9<sup>30</sup>\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.203.01 в Специальной астрофизической обсерватории РАН по адресу: 396167, Карачаево-Черкесская республика, пос. Нижний Архыз, САО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_4 сентября\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.203.01,  
кандидат физико-математических наук,

Е.К. Майорова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Цель работы.

Целью настоящей работы является исследование временных и спектральных характеристик астрофизических объектов, излучающих в жестком диапазоне электромагнитного спектра (тесные двойные звезды, пульсары, источники гамма-всплесков) методом мониторинжных наблюдений в космических экспериментах с использованием широкоапертурных детекторов рентгеновского и гамма-излучения.

### Актуальность проблемы.

За время, прошедшее с момента открытия в 1962 г. в эксперименте на ракете «Аэробы» первого источника жесткого излучения, находящегося за пределами солнечной системы (*Sco X-1*) [1], рентгеновская и гамма-астрономия добилась впечатляющих результатов. Эта, пожалуй, самая динамично развивающаяся область современной астрофизики охватывает явления, происходящие как на Солнце и в солнечной системе, так и в нашей Галактике и галактических объектах, а также далеко за ее пределами – вплоть до космологических расстояний.

Исследование космического рентгеновского и гамма-излучения тесно переплетается с основными фундаментальными проблемами современного естествознания - это проблемы космологии, темной материи и темной энергии, структуры пространства-времени и поведения материи в экстремальных условиях. Так, наблюдения астрофизических объектов, содержащих черные дыры, могут использоваться для изучения релятивистских эффектов в сильных гравитационных полях, проверки теорий гравитации и познания ее природы. Изучение рентгеновских и гамма-пульсаров позволяет судить о физических процессах в сверхсильных электромагнитных полях, поскольку некоторые из этих объектов обладают большими магнитными полями – вплоть до  $10^{15}$  Гс [2].

Процессы генерации высокоэнергичных фотонов тесно связаны с механизмами ускорения частиц, поэтому большинство космических источников рентгеновского и гамма-излучения могут также рассматриваться и как вероятные источники космических лучей, а, например, наблюдение линий гамма-излучения в галактическом диффузном фоне дает прямую информацию о взаимодействиях космических лучей в Галактике.

Наряду с рассмотренными общефизическими проблемами, рентгеновская и гамма-астрономия имеет ключевое значение и для решения многих собственно астрофизических проблем. Это проблема происхождения космических гамма-всплесков; проблема природы

метagalактического диффузного фона, в частности, выяснение роли квазаров и активных галактик в его образовании; проблема объяснения высокой светимости в жестком излучении активных ядер галактик; определение механизмов формирования аккреционных дисков и релятивистских струй – джетов в некоторых тесных двойных системах и ядрах активных галактик; выяснение природы светимости рентгеновских и гамма-пульсаров; определение роли тесных двойных систем и формирования релятивистских компактных объектов в процессе звездной эволюции; выяснение роли ядерных реакций в генерации гамма-излучения некоторых объектов.

Среди наблюдательных методов современной внеатмосферной астрономии высоких энергий можно выделить два, по-видимому, наиболее перспективных направления: детальные исследования физических характеристик уже известных объектов и мониторинговые наблюдения. Первое направление обеспечивают приборы с ограниченным полем зрения, или узконаправленные, основная задача которых - исследование известных точечных источников. Что касается мониторинговых наблюдений [3], то для них, как правило, используют патрульные приборы, которые отличаются от предыдущих тем, что обладают широкими полями зрения и не разделяют источники излучения внутри них.

Одним из определяющих факторов развития наблюдательной рентгеновской и гамма астрономии является увеличение чувствительности в обзорных экспериментах. С учетом ограниченности времени проведения эксперимента это может быть достигнуто именно максимально широким полем зрения аппаратуры, которое обеспечивает большую обзорность, длительность слежения за конкретным объектом и лучшую статистику по гамма - всплескам. Использование широкоапертурных детекторов в первую очередь необходимо для дальнейшего прогресса в изучении временных явлений. В частности, широкое поле зрения является необходимым элементом при исследовании гамма всплесков и вспыхивающих источников, так как события эти относительно редкие, и невозможно предсказать место их появления. Кроме того, при наблюдениях в режиме долговременного патруля неба также создаются условия для регулярных наблюдений периодических процессов в излучении таких объектов, как пульсары и тесные двойные системы, включая кандидатов в черные дыры.

С решением научных проблем рентгеновской и гамма-астрономии тесно связана методическая проблема улучшения чувствительности экспериментов, проводящих как поиск периодических процессов, так и транзиентных событий. Необходимость анализа фонообразующих факторов очевидна не только в плане более точного определения потока излучения от источника, но и с целью выяснения того, какое влияние оказывают всевозможные вариации фоновых компонентов на поиск

регулярных изменений и спорадических возрастаний счета детекторов астрофизической природы. В этом плане особую актуальность приобретает проблема имитаций астрофизических явлений, в частности всплесков, кратковременными высыпаниями магнитосферных электронов через генерацию тормозного излучения. Для решения этой проблемы большой интерес представляют данные одновременно работающих детекторов электронов, а также рентгеновского и гамма-излучения.

В настоящей работе представлены результаты наблюдений гамма-всплесков, а также периодических процессов в жестком рентгеновском излучении тесных двойных звезд в ходе мониторинговых экспериментов на спутнике «Прогноз-9» и орбитальной станции (ОС) «Мир» (аппаратура ГРИФ на модуле «Спектр»). В этих экспериментах наряду с долговременными наблюдениями различных областей неба широкоапертурными детекторами, с помощью специальных приборов также обеспечивалось детальное изучение основных компонентов аппаратного фона в детекторах рентгеновского и гамма-излучения, а также сопутствующих потоков электронов, протонов, нейтронов и ядер.

Кроме того, в работе проанализированы возможности мониторингового метода в плане наблюдений новых физических явлений, в частности, эффектов нелинейной электродинамики в вакууме в окрестности сильно намагниченных нейтронных звезд (гамма-пульсаров и магнетаров). Представлены результаты расчета нелинейно-электродинамических эффектов в сильных магнитных полях, а также влияния этих эффектов на характеристики рентгеновского и гамма-излучения пульсаров. Рассмотрены перспективы исследования нелинейно-электродинамических эффектов по данным наблюдений пульсаров в жестком излучении.

### **Новизна работы.**

Основные результаты, полученные в диссертации впервые:

1. Разработан и реализован в ряде космических экспериментов (ИСЗ «Прогноз-9», орбитальная станция «Мир») метод изучения периодических процессов в жестком излучении тесных двойных звезд, а также статистических характеристик космических гамма-всплесков с помощью широкоапертурных (поле зрения  $\sim 1$  ср) сцинтилляционных детекторов, обеспечивавших локализацию источников (в пределах  $10-15^\circ$ ) в ходе мониторинговых наблюдений, во время которых наряду с долговременными измерениями рентгеновских потоков от астрофизических объектов, также осуществлялась регистрация различных фоновых компонентов (заряженные частицы, нейтроны, локальные рентгеновские и гамма-фотоны).

2. Открыты новые периодические источники жесткого рентгеновского излучения в часовом и суточном диапазонах периодов в результате непрерывных длительных (~40 сут) наблюдений района центра Галактики в диапазоне энергий регистрируемых фотонов 10-200 кэВ.
3. Обнаружены орбитальные периодичности в жестком излучении некоторых вспыхивающих рентгеновских двойных систем – кандидатов в черные дыры: *GRO J 1655-40* (Новая Скорпиона 1993 г.), *H1705-25* (Новая Змееносца 1977г.), *4U1543-47*.
4. Получена оценка частоты регистрации со всего неба «космологических» мягких (характерная энергия менее 50 кэВ) гамма-всплесков, на основании которой для длительных (> 1 с) гамма-всплесков даны ограничения на диапазон возможных значений космологического красного смещения их источников.
5. Разработан метод выделения малоинтенсивных временных явлений (всплески, периодические процессы) на фоне вариаций потоков заряженных частиц на основе детальных измерений потоков и спектров основных компонентов фона в детекторах рентгеновского и гамма-излучения.
6. Определены условия наблюдений нелинейно-электродинамических эффектов по характеристикам жесткого рентгеновского и гамма-излучения пульсаров на основе расчетов нелинейно-электродинамического воздействия сильного магнитного поля нейтронных звезд на распространение электромагнитных волн.

### **Научная и практическая ценность работы.**

Исследование периодических составляющих в жестком рентгеновском излучении тесных двойных систем может способствовать идентификации оптического компонента, построению динамической модели системы, определению массы компактного объекта, а также дать информацию об энергетике процессов в таких объектах, о характере обмена энергией и импульсом между ее компонентами.

Поскольку исследования периодических процессов часового диапазона на космических аппаратах, имеющих низкие орбиты, на которых проводятся многие рентгеновские эксперименты, затруднены ввиду того, что в этом диапазоне, как правило, находятся периоды обращения низкоорбитальных спутников вокруг Земли, именно благодаря особенностям орбиты станции «Прогноз-9» (высокоапогейный ~700000 км космический аппарат с периодом обращения 27 сут и малым временем пребывания в областях захваченной радиации), в данном эксперименте были обеспечены благоприятные возможности для изучения подобных процессов.

Основная масса сведений о временных характеристиках рентгеновских звезд до сих пор получена из наблюдений в диапазоне энергий  $\sim 2.0\text{--}20$  кэВ и значительно меньше – в более жесткой области. Поэтому данные о спектральных характеристиках периодических источников в диапазоне  $10\text{--}200$ кэВ, полученные в эксперименте на станции «Прогноз-9» также представляются актуальными.

Полученная оценка частоты регистрации гамма-всплесков с полными потоками  $S \sim 10^{-7}$  эрг/см<sup>2</sup> позволяет заключить, что распределение гамма-всплесков по наблюдаемым потокам ( $\log N - \log S$ ) не противоречит предсказаниям модели с максимумом частоты звездообразования на  $z = 1.5\text{--}2$ . Сделанный на основе оценки частоты регистрации со всего неба «космологических» мягких гамма-всплесков ( $kT < 50$  кэВ) вывод о том, что основная доля источников гамма-всплесков относится к эпохе красных смещений  $1 < z < 5$ , позволяет существенно ограничить существующие теоретические модели, касающиеся, как собственно источников гамма-всплесков, так и первичного звездообразования.

Наблюдение интенсивных возрастаний потоков электронов в низкоширотных областях вне «зон высыпаний» - вплоть до геомагнитного экватора ( $L < 1.1$ ) подтверждает актуальность проблемы имитаций астрофизических всплесков высыпаниями электронов практически во всех областях околоземного пространства. Разработанные критерии идентификации космических гамма-всплесков на фоне имитаций вариациями потоков магнитосферных электронов могут применяться при анализе данных экспериментов по изучению гамма-всплесков на околоземных космических аппаратах.

Проведенный анализ влияния нелинейно-электродинамических эффектов в сверхсильных магнитных полях гамма-пульсаров и магнетаров позволил получить оценки наблюдаемости этих эффектов по временным, спектральным и поляризационным характеристикам жесткого рентгеновского и гамма излучения. Наблюдения нелинейно-электродинамических явлений в астрофизических объектах дает возможность проверки обобщений линейной электродинамики Максвелла.

Дополнительно можно отметить актуальность практического использования непараметрических методов поиска периодичностей, применявшихся в данной работе, чувствительность которых слабо зависит от формы фазовой кривой.

Разработанное в ходе подготовки диссертации программное обеспечение в части выработки критерия выделения периодического процесса и отбора всплеска при анализе временных рядов телеметрических данных использовалась при обработке данных приборов, установленных на спутнике «Коронас-Ф» и системы радиационного контроля СРК на Международной космической станции.

### **Достоверность результатов.**

Достоверность экспериментальных результатов, полученных в диссертации, подтверждается сравнением с данными различных космических экспериментов, в том числе: *Uhuru*, *Ariel-5*, *HEAO-1*, «Гранат», «Конус», *BATSE CGRO*, *OSSE CGRO*, *ASM RXTE*, «Коронас-И», «Прогноз-9» и др..

Достоверность результатов расчетов и аналитических вычислений подтверждается согласием с наблюдательными данными и выводами других авторов.

### **Личный вклад автора.**

Автор принимал участие в создании, настройке и калибровке основных рентгеновских и гамма-спектрометров в экспериментах на ИСЗ «Прогноз-9» и ОС «Мир». Автор разработал математическую модель рентгеновского спектрометра в эксперименте на ИСЗ «Прогноз-9», под его руководством была разработана математическую модель спектрометра жесткого рентгеновского и гамма-излучения в эксперименте на ОС «Мир». Автор разработал метод выделения периодических сигналов во временных рядах данных на основе непараметрической регрессии, под его руководством метод был модифицирован для выделения короткопериодических процессов. Под руководством автора разработаны критерии выделения космических гамма-всплесков в эксперименте на ОС «Мир». Автор провел работу по обработке данных эксперимента на ИСЗ «Прогноз-9» в части исследования периодических рентгеновских источников и гамма-всплесков. Автор руководил астрофизической частью научной программы эксперимента ГРИФ (станция «Мир»), под его руководством проведена обработка данных с целью изучения тесных двойных систем, пульсаров и гамма-всплесков. Под руководством автора также была проведена работа по созданию модели фона в рентгено и гамма-астрономических наблюдениях на орбитах станции «Мир». Под руководством автора осуществлялось моделирование и макетирование основных характеристик гамма-телескопа «Гаммаскоп». Автор провел теоретический анализ нелинейно-электродинамических эффектов в сильных магнитных полях нейтронных звезд и дал количественную оценку влияния этих эффектов на временные, спектральные и поляризационные характеристики жесткого электромагнитного излучения пульсаров и магнетаров.



## **Апробация работы.**

Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях по космическим исследованиям (COSPAR), международных конференциях по космическим лучам (ICRC), всероссийских конференциях “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, всероссийских конференциях по космическим лучам, научных сессиях МИФИ, на научных семинарах НИИЯФ МГУ, ГАИШ и ИКИ РАН, ежегодной конференции МГУ «Ломоносовские чтения».

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано около 90 работ. Основные результаты диссертации содержатся в 31 печатных работах, опубликованных в российских и международных рецензируемых журналах.

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 298 страниц, в том числе 99 рисунков, 10 таблиц, список литературы включает 350 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении**, исходя из анализа современного состояния проблемы, обосновывается актуальность темы исследования, и формулируются основные цели диссертационной работы, рассматриваются основные результаты, полученные впервые, перечисляются результаты, выносимые на защиту. Также подтверждается достоверность результатов, показывается личный вклад автора и приводятся данные об апробации результатов и публикациях.

**В главе 1** дается обзор современных представлений об основных астрофизических объектах и явлениях, изучаемых методом мониторинжных наблюдений на космических аппаратах: гамма-всплесков, тесных двойных звезд, рентгеновских и гамма-пульсаров. Рассматриваются методы наблюдений подобных объектов, обсуждаются космические эксперименты, в которых предполагаются или реализованы мониторинжные наблюдения астрофизических явлений. Глава состоит из пяти параграфов.

*Первый параграф* посвящен анализу временных явлений в жестком рентгеновском и гамма-излучении астрофизических объектов: спорадических возрастаний (всплески, транзиенты) и регулярных вариаций (периодические процессы) регистрируемого потока. Показано, что для изучения подобных явлений эффективен метод мониторинжных наблюдений.

*Во втором параграфе* рассматривается современное состояние проблемы космических гамма-всплесков, в нем описываются морфологические и статистические характеристики гамма-всплесков по данным экспериментов *BATSE CGRO*, «Конус», *Beppo-SAX*, *INTEGRAL* [4-7]. Также в этом параграфе рассматриваются основные модели источников гамма-всплесков [например, 8, 9] и анализируется их распределение в зависимости от величины, характеризующей космологическое красное смещение  $z$  [10-12]. Обсуждаются перспективные направления дальнейших исследований, в частности изучение статистических характеристик, анализ частоты регистрации слабых и относительно мягких событий.

*В третьем параграфе* рассматриваются характеристики тесных двойных звезд с точки зрения временных эффектов в их жестком электромагнитном излучении. Рассмотрены особенности периодических процессов в рентгеновских двойных, обусловленных как орбитальным движением компонентов, так и их вращением и прецессией. Обосновывается важность изучения периодических процессов в двойных системах для понимания природы этих объектов, дается анализ временных и спектральных характеристик двойных систем – рентгеновских пульсаров [13] и кандидатов в черные дыры [14].

*Четвертый параграф* посвящен анализу характеристик одиночных рентгеновских и гамма-пульсаров [2, 15]. Рассматриваются особенности жесткого излучения одиночных нейтронных звезд в остатках сверхновых, обладающих очень большим ( $>10^{12}$  Гс) магнитным полем – гамма-пульсаров, аномальных рентгеновских пульсаров [16], источников рекуррентных всплесков гамма-излучения (магнетаров) [17]. Обсуждается возможность использования гамма-пульсаров и магнетаров как природных лабораторий для изучения эффектов нелинейной электродинамики вакуума.

*Пятый параграф* посвящен возможностям мониторинжных наблюдений на космических аппаратах в плане изучения временных эффектов в жестком рентгеновском и гамма-излучении астрофизических объектов. Представлены данные об основных приборах и способах реализации мониторинжных наблюдений в экспериментах, осуществленных на космических аппаратах [4-6, 18-20], а также в современных и перспективных проектах. Рассматриваются основные типы современных патрульных детекторов.

**Глава 2** посвящена методу мониторинжных наблюдений с широкоапертурными приборами, который был реализован в рентгеновских экспериментах на космических аппаратах «Прогноз-9» и «Мир» (модуль «Спектр»), а также возможностям дальнейшего развития метода на примере проекта космического эксперимента с гамма-телескопом «Гаммаскоп». Глава состоит из пяти параграфов.

В *первом параграфе* показано развитие метода мониторинжных наблюдений, дается его общая характеристика. Отмечаются основные особенности метода применительно к настоящей работе:

- возможность длительных непрерывных наблюдений обширных областей неба;
- низкий уровень фона в рентгеновских каналах регистрирующей аппаратуры;
- постоянный контроль вариаций фоновых потоков.

В этом параграфе приводятся основные сведения о рентгеновском эксперименте на спутнике «Прогноз-9», эксперименте ГРИФ на орбитальной станции (ОС) «Мир», а также обсуждается дальнейшее развитие метода мониторинжных наблюдений в проекте космического эксперимента с широкоапертурным гамма-телескопом «Гаммаскоп».

Во *втором параграфе* рассматриваются особенности рентгеновского эксперимента на спутнике «Прогноз-9». Приводятся основные характеристики сцинтилляционного рентгеновского спектрометра, с помощью которого осуществлялись астрофизические наблюдения в этом эксперименте. Для регистрации фотонов в диапазоне энергий 10-200 кэВ использовался кристалл CsI(Tl) толщиной 0.25 см и эффективной площадью  $\sim 40$  см<sup>2</sup>. Для понижения уровня рентгеновского фона и исключения регистрации заряженных частиц в приборе была предусмотрена комбинация пассивной (свинцовое и бариевое стекла, свинцово-оловянный коллиматор) и активной защиты в виде «антисовпадательного» колпака из пластмассового сцинтиллятора, в который были помещены основной кристалл, а также элементы пассивной защиты и коллиматор. При этом оба сцинтиллятора просматривались одним фотоумножителем, разделение сигналов осуществлялось по времени высвечивания с помощью электроники (фосвич).

В этом параграфе также рассматриваются методы расчета диаграммы направленности (ширина на половине высоты  $\sim 45^\circ$ ) и эффективности регистрации, приводятся результаты моделирования взаимодействий рентгеновских фотонов в детекторе. На основе наземных калибровок спектрометра и результатов моделирования построена математическая модель прибора, позволяющая восстанавливать характеристики регистрируемых рентгеновских потоков по его выходным показаниям.

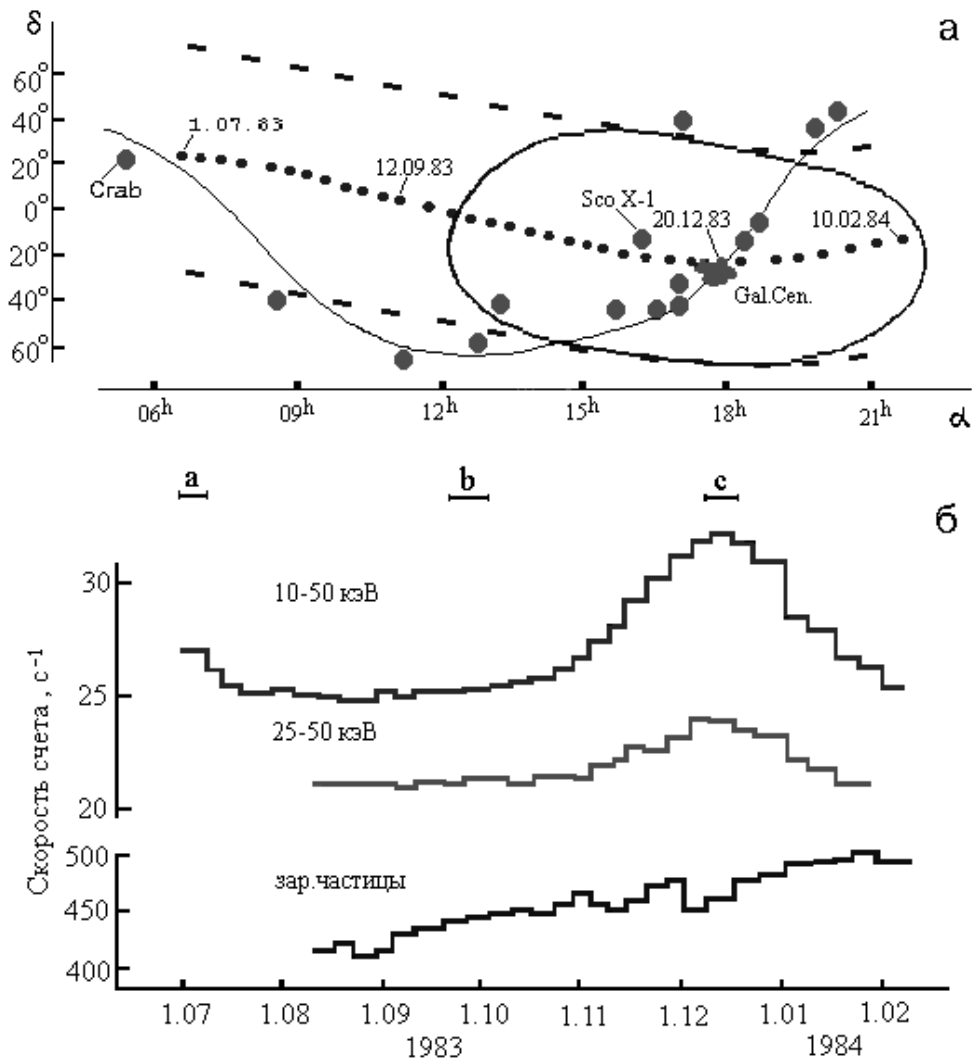


Рисунок. 1. Область неба, наблюдавшаяся в ходе эксперимента на станции «Прогноз-9» (а). Отмечены направления ориентации оси прибора, а также наиболее яркие рентгеновские источники. Временной ход средних за интервалы постоянной ориентации скоростей счета фотонов в диапазонах энергии 10-50 и 25-50 кэВ, а также счета заряженных частиц «антисовпадательным» колпаком из пластмассового сцинтиллятора (б).

Кроме того, во втором параграфе рассматриваются условия проведения эксперимента на спутнике «Прогноз-9». Благодаря параметрам орбиты (в начале полета период обращения вокруг Земли - 27 сут, наклонение -  $51^\circ$ , высота в апогее  $\approx 700\ 000$  км) прибор, с помощью которого проводились измерения, большую часть времени находился за пределами магнитосферы Земли. Ось детекторного блока составляла  $7.5^\circ$  с осью вращения (период  $\sim 120$  с) спутника, которая через каждые 5-7 суток переориентировалась в направлении на Солнце. Таким образом, центр поля зрения ( $\sim 0.7$  ср) прибора, усредненного по периоду вращения (2 мин) спутника, совпадал с направлением оси станции, а граница усредненного

поля зрения находилась на расстоянии около  $53^\circ$  от этой оси. Из-за движения спутника вместе с Землей вокруг Солнца в поле зрения прибора попадали участки неба, примыкающие к эклиптике ( $\pm 25^\circ$  - ширина на половине высоты диаграммы направленности), и в среднем осуществлялось медленное ( $\sim 1^\circ$  /сут) сканирование вдоль эклиптики (см. рис. 1). Были проведены наблюдения: района галактического антицентра (июль - август 1983 г.), областей неба, отстоящих от галактического экватора (сентябрь - октябрь 1983 г.), района центра Галактики (ноябрь 1983 - февраль 1984 гг.). Максимальное время непрерывной экспозиции источников, непосредственно расположенных вблизи эклиптики и, в частности, галактического центра составило около 100 сут. В течение всего эксперимента проводились измерения средних за 10 с скоростей счета рентгеновских фотонов в энергетических диапазонах 10-50, 25-50, 50-100 и 100-200 кэВ, а также сопутствующих заряженных частиц.

В ходе эксперимента осуществлялся постоянный контроль фоновых вариаций скоростей счета в рентгеновских каналах, обусловленных заряженными частицами. Для удаления вариаций, коррелированных с изменениями потоков заряженных частиц, использовался методический прием, основанный на регрессионном анализе показаний в рентгеновских каналах прибора и в канале счета заряженных частиц.

*Третий параграф* посвящен описанию регистрирующей аппаратуры и методики измерений в эксперименте ГРИФ на ОС «Мир». В нем дается описание принципа функционирования и основных характеристик спектрометра жесткого рентгеновского излучения РХ-2 – основного астрофизического прибора аппаратуры ГРИФ. Этот прибор состоял из 7 идентичных детекторных блоков и блока электроники, обрабатывавшего и преобразовывавшего информацию. Каждый детекторный блок по своему устройству был подобен рассмотренному выше рентгеновскому прибору в эксперименте на спутнике «Прогноз-9». Отличие состояло в использовании кристаллов CsI(Na) несколько большей толщины (0.35 см). В течение всего эксперимента велось измерение средних за 5 с скоростей счета рентгеновских фотонов в диапазонах энергии 10-50, 25-50, 50-100, 100-200 и 200-300 кэВ, а также сопутствующих заряженных частиц.

Детекторные блоки прибора РХ-2 были расположены на внешней панели модуля станции таким образом, что шесть блоков симметрично размещались вокруг одного центрального блока, оси всех семи детекторов были разнесены на  $5^\circ$  друг относительно друга. Вместе с довольно большим полем зрения каждого блока детектирования это обеспечивало перекрытие полей зрения всех блоков, что при наблюдении заданного источника давало возможность использовать суммарную рабочую площадь всех детекторов, а также возможность локализации источников путем сравнительного анализа выходных данных отдельных детекторов.

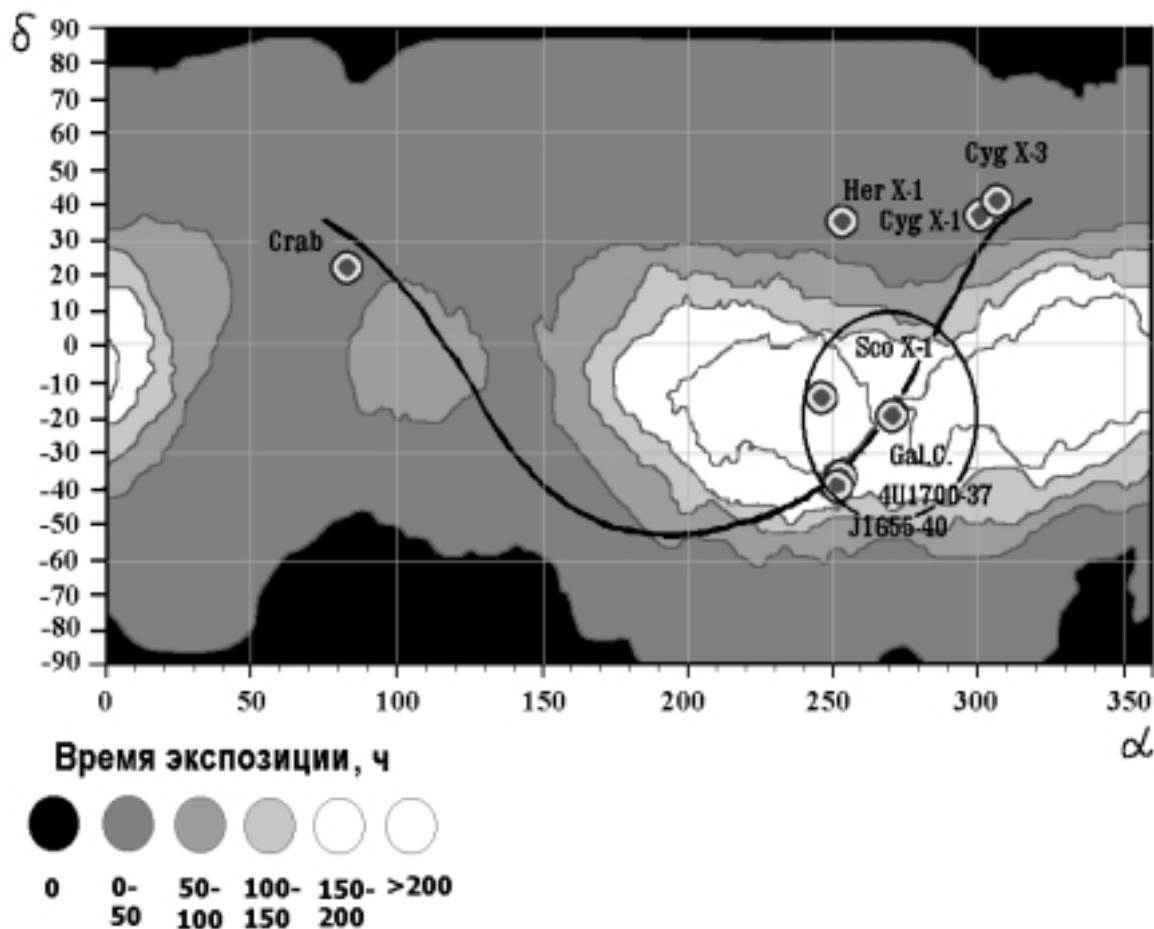


Рисунок. 2. Область звездного неба в экваториальных координатах, наблюдавшаяся в эксперименте «Гриф» на ОС «Мир». Разными оттенками отмечены участки неба, наблюдавшиеся с разным временем экспозиции. Указаны некоторые наиболее яркие источники жесткого излучения. Отмечена область, границы которой соответствуют ширине на половине высоты ( $FWHM$ ) диаграммы направленности прибора  $PX-2$  при его ориентации в район центра Галактики ( $\alpha = 18^h00^m00^s$ ,  $\delta = -22.0^\circ$ ).

Прибор был жестко закреплен на поверхности модуля таким образом, что ось его центрального детектора (которая совпадала с осью всего прибора) составляла  $45^\circ$  соответственно как с осью модуля «Спектр» (ось  $-Y$  станции), так и с главной осью станции (ось  $+X$ ). В ходе всего эксперимента имелась возможность наблюдать район галактического антицентра, регионы, отстоящие от галактического экватора, район центра Галактики. Область неба, наблюдавшаяся в ходе эксперимента, представлена в экваториальных координатах на рис. 2. На нем изображена окружность, радиус которой соответствует  $30^\circ$ , а центр совпадает с направлением на центр Галактики. В пределах этой окружности находятся источники, при наблюдении которых эффективная площадь прибора составляла не менее 50% его геометрической площади. Полное время наблюдения центра Галактики с  $\geq 50\%$  эффективностью составило  $\sim 200$  ч.

Одной из основных особенностей эксперимента ГРИФ была возможность одновременных мониторинговых измерений всех основных компонентов фонообразующих излучений в околоземном космическом пространстве на орбитах станции «Мир». Сцинтиляционные детекторы большого объема прибора НЕГА-1 обеспечивали независимую регистрацию локальных гамма-квантов и нейтронов, образующихся в результате взаимодействий космических лучей с веществом космического аппарата и атмосферы Земли. Для контроля спорадических возрастных потоков рентгеновских фотонов, обусловленных регистрацией тормозного излучения высыпающихся энергичных электронов магнитосферного происхождения, которые могли имитировать космические гамма-всплески, использовались показания чувствительного сцинтилляционного детектора электронов «Фон-1». Для регистрации больших потоков частиц в радиационных поясах использовался детектор электронов и протонов «Фон-2», состоявшего из двух идентичных пар полупроводниковых телескопов и двух пар счетчиков Гейгера. Благодаря показаниям указанных приборов было установлено, что, несмотря на достаточно интенсивные и разнообразные вариации интенсивности фоновых излучений, имитации космических гамма-всплесков в выходных показаниях прибора РХ-2 возможны только в случае пересечения областей с относительно высокой концентрацией энергичных электронов.

В четвертом параграфе рассматриваются характеристики фоновых потоков на орбитах станции «Мир». В нем приводятся характеристики фоновых компонентов, обусловленных собственным излучением станции, а также альбедного излучения атмосферы Земли. Рассматривается математическая модель, представляющая широтные и энергетические зависимости потоков гамма-квантов атмосферного альбедо, а также образующихся в веществе станции в результате взаимодействий галактических космических лучей. В рамках этой модели спектры локального гамма-излучения и гамма-излучения атмосферы Земли аппроксимировались степенной функцией, а наведенного излучения - экспоненциальной. Аналитическое представление спектральной плотности потока этих фоновых компонентов с учетом широтной зависимости имеет следующий вид:

$$\frac{dJ}{dE} = AR^{-1} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где  $E_0 = 1$  МэВ;  $A = (13.2 \pm 0.7)$  фот·ГВ/см<sup>2</sup>·с·МэВ,  $\gamma = 1.00 \pm 0.02$  - для локального гамма-излучения станции;  $A = (1.7 \pm 0.1)$  фот·ГВ/см<sup>2</sup>·с·МэВ,  $\gamma = 0.97 \pm 0.03$  - для альбедного гамма-излучения атмосферы Земли:

Спектр наведенного излучения:

$$\frac{dN}{dE} = B \exp \left( - \frac{E}{E_0} \right), \quad (2)$$

где  $B = (7 \pm 1)$  имп/см<sup>2</sup>·с·МэВ,  $E_0 = (0.6 \pm 0.2)$  МэВ. Приводится аналитическое представление широтной зависимости интегрального потока нейтронов с энергиями  $>30$  МэВ:

$$J(> E) = KR^{-1}, \text{ где } K = 48 \pm 6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \cdot \text{ГВ}.$$

Кроме того, в четвертом параграфе рассматриваются характеристики тормозного рентгеновского и гамма-излучения энергичных электронов в зонах захваченной радиации, а также высыпающихся и квазизахваченных электронов [21, 22]. Последние представляют особую опасность для астрофизических измерений, поскольку связанные с ними возрастания счета в рентгеновских каналах бывают относительно кратковременными и могут имитировать рентгеновские и гамма-всплески астрофизического происхождения. На основе данных прибора «Фон-1» в низкоширотных ( $L < 2$ ) областях околоземного пространства были выделены дрейфовые оболочки ( $L \sim 1.75, 1.4$  и  $1.1$ ), на которых наблюдаются устойчивые потоки электронов с энергиями  $>80$  кэВ. В районах пересечения орбитой станции указанных дрейфовых оболочек наблюдаются возрастания интенсивности электронов. При этом наиболее сильные возрастания, которые могут имитировать космические гамма-всплески посредством генерации тормозного излучения, наблюдаются на довольно низких широтах – вплоть до  $L \sim 1.35$ . Это свидетельствует о том, что проблема имитаций астрофизических всплесков высыпаниями электронов актуальна практически во всех областях околоземного пространства.

**Третья глава** посвящена результатам наблюдений астрофизических рентгеновских и гамма-всплесков в экспериментах ГРИФ (ОС «Мир») и на спутнике «Прогноз-9». Глава состоит из четырех параграфов.

В *первом параграфе* рассматриваются результаты наблюдений космических гамма-всплесков в эксперименте на станции «Прогноз-9». Анализируется критерий отбора гамма-всплесков в этом эксперименте, приводится распределение зарегистрированных всплесков по характерной энергии (эффективной температуре)  $kT$ . На основе полученной статистики дается оценка частоты регистрации всплесков со всего неба и делается вывод об отсутствии какой-либо концентрации источников гамма-всплесков к галактической плоскости и центру Галактики.

Во *втором параграфе* приводятся особенности регистрации гамма-всплесков в эксперименте ГРИФ. Рассмотрен алгоритм идентификации космических гамма-всплесков на фоне имитаций высыпающимися магнитосферными электронами и сильно ионизирующими ядрами. В этом параграфе приведена таблица, в которой представлены характеристики 24 событий, удовлетворивших критерию отбора и рассматривающиеся как кандидаты в астрофизические всплески. Было построено распределение



этих событий по характерной энергии  $kT$ , которое позволило сделать вывод о регистрации значимого количества событий, характеризующихся значениями  $kT$  в диапазоне 10-50 кэВ.

*Третий параграф* посвящен анализу данных эксперимента ГРИФ по статистике слабых событий. Приводятся результаты расчета эффективности регистрации гамма-всплесков со всего неба в эксперименте ГРИФ и дана оценка частоты регистрации слабых ( $\sim 10^{-7}$  эрг/см<sup>2</sup>) событий. Было построено интегральное распределение гамма-всплесков по полным потокам, при этом оценка частоты регистрации гамма-всплесков с полными потоками  $S \geq 10^{-7}$  эрг/см<sup>2</sup>, полученная по данным эксперимента ГРИФ -  $\sim 10^3$  год<sup>-1</sup> соответствует данным эксперимента *BATSE CGRO* [23].

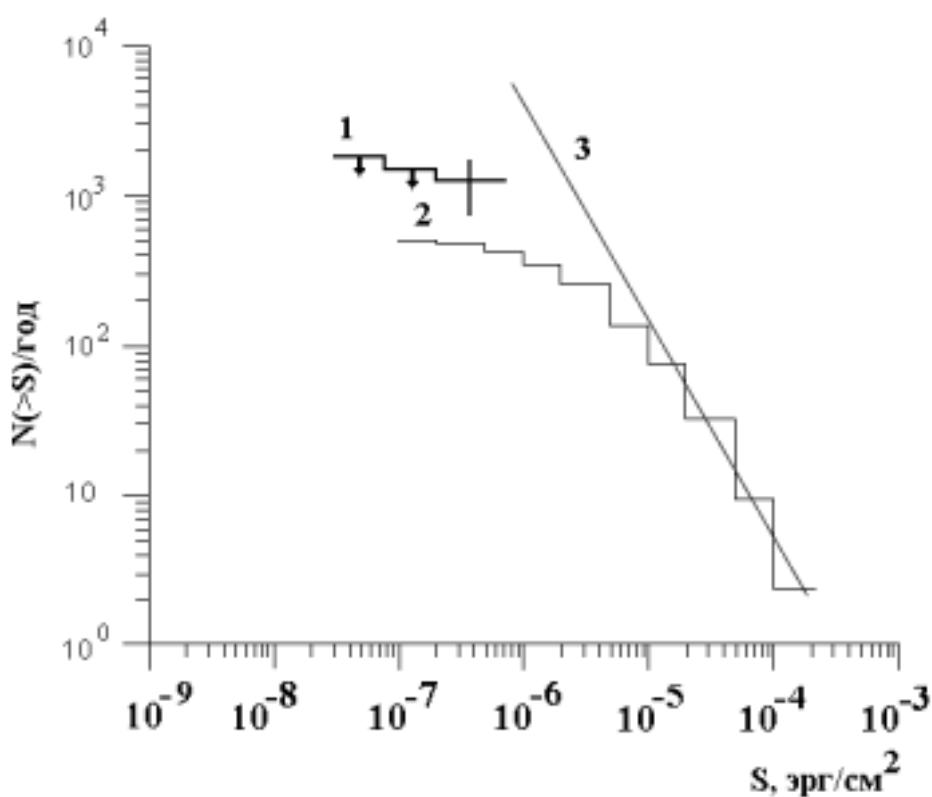


Рисунок 3. Интегральное распределение по полным потокам  $S$  гамма-всплесков со всего неба, построенное на основе данных эксперимента ГРИФ -1 и эксперимента *BATSE CGRO* [23] (длительные всплески,  $\Delta T > 1$  с - 2), а также зависимость  $N(>S) \sim S^{-3/2}$  - 3.

В *четвертом параграфе* представлены результаты по статистике мягких гамма- или жестких рентгеновских всплесков. Приведено совместное распределение "длительность - спектральная жесткость" астрофизических всплесков, зарегистрированных в экспериментах *BATSE CGRO* [23] и ГРИФ. Это распределение свидетельствует о том, что большинство наблюдавшихся в эксперименте ГРИФ «мягких гамма или

жестких рентгеновских» всплесков не являются космологическими, поскольку в противном случае их длительности в среднем должны быть больше, чем длительности гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте *BATSE CGRO* [23]. Тем не менее, количество зарегистрированных в эксперименте ГРИФ «мягких гамма или жестких рентгеновских» всплесков, которые заведомо не идентифицированы с известными галактическими источниками, в пересчете на все небо может рассматриваться в качестве верхней границы числа наблюдаемых космологических мягких гамма-всплесков, т.е. всплесков, которые могут относиться к продолжению популяции «типичных» гамма-всплесков в область значений  $kT < 50$  кэВ. Распределение длительных ( $> 1$  с) гамма-всплесков по полным потокам, построенное с учетом статистики мягких событий по данным эксперимента ГРИФ, приведено на рис. 3.

Из совместного распределения "длительность - спектральная жесткость" были установлены относительные границы возможного диапазона значений космологического красного смещения  $z_{\min} < z < z_{\max}$  для длительных ( $\Delta t > 1$  с) всплесков:

$$\frac{1 + z^{\max}}{1 + z^{\min}} < 3. \quad (3)$$

Абсолютные границы диапазона значений  $z$  были выбраны, исходя из данных по прямой идентификации гамма-всплесков с внегалактическими объектами. Имеющиеся на сегодняшний день результаты свидетельствуют о том, что значения  $z$  для всплесков, идентифицированных с внегалактическими объектами, лежат в диапазоне от  $\sim 0.4$  до  $\sim 4.5$ , при этом для большинства идентифицированных всплесков  $z \geq 1.0$  [24]. Таким образом, с учетом ограничения (3) для основной массы популяции источников гамма-всплесков может быть получена оценка:  $1 < z < 5$ .

**Четвертая глава** посвящена результатам наблюдений рентгеновских двойных систем на основе выделения орбитальных периодических процессов по данным экспериментов на космических аппаратах «Прогноз-9» и «Мир». Глава состоит из четырех параграфов.

В *первом параграфе* рассмотрен метод выделения периодических процессов по выходным показаниям рентгеновского прибора в эксперименте на станции «Прогноз-9». Для выявления периодических процессов данные эксперимента на станции «Прогноз-9» анализировались методом наложения эпох на основе непараметрического метода Уиттекера и Робинсона [25], модифицированного с учетом специфики информации с эксперимента на станции «Прогноз-9». Для каждого пробного периода исследуемый интервал наблюдений разбивался на отрезки, длительность которых равна величине пробного периода, после чего производилось наложение в одной фазе этих последовательных участков временного

ряда, с последующим усреднением значений, относящихся к одной фазе. Амплитуда процесса, соответствующего пробному периоду (реального периодического или имитируемого случайным образом), характеризовалась величиной среднего квадрата отклонения  $\sigma^2$  чисел, составляющих среднюю фазовую зависимость.

Для проведения поиска периодических составляющих выбиралась сетка пробных периодов  $T$ , равномерных по величине самого периода или по обратному значению (частоте). Для выбранных пробных периодов вычислялась величина  $\sigma^2$ , после чего строилась зависимость  $\sigma^2(T)$  - периодограмма. На рис. 4 приведен пример периодограммы, полученной для временного ряда среднечасовых скоростей счета фотонов в канале 25-50 кэВ, соответствующего интервалу наблюдений района центра Галактики (31.10.1983-12.01.1984). На периодограмме легко заметны дискретные пики, относящиеся к 82-ч периодическому процессу, соответствующему орбитальному периоду рентгеновской двойной 4U1700-37. При построении периодограмм исключались временные интервалы, в течение которых регистрировались солнечные вспышки. Для устранения вариаций, связанных с изменениями потока заряженных частиц использовался метод линейной регрессии показаний в рентгеновских каналах прибора и в канале счета заряженных частиц.

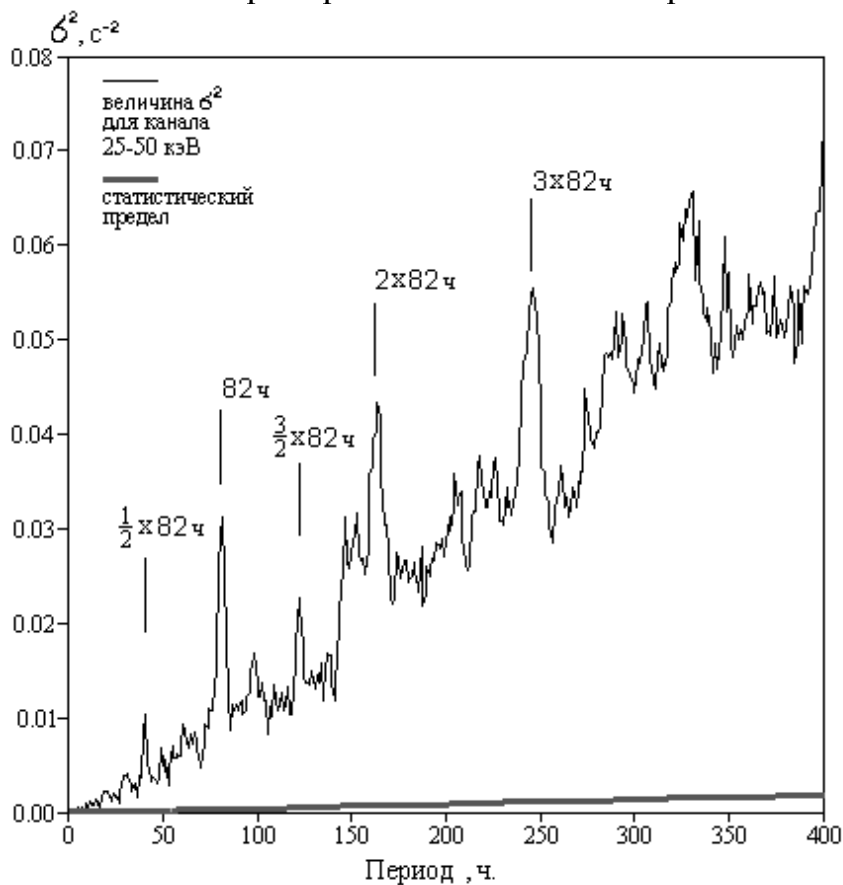


Рисунок 4. Периодограмма, построенная по среднечасовым значениям скорости счета в канале 25-50 кэВ, полученных в ходе наблюдений центра Галактики.

Периодограммы, полученные для интервалов наблюдений галактического антицентра и центра Галактики заметно отличаются от равномерных - для них характерно увеличение относительного вклада долго-периодических вариаций. Подобные спектры типа «фликкер-шум» обусловлены совокупным излучением галактических рентгеновских источников и могут быть аппроксимированы гладкой функцией. При этом разброс точек на реальном спектре относительно средних по частоте значений  $\sigma^2/T$  на шумовых участках в окрестности анализируемого пика задает дисперсию  $\sigma_\sigma$ , которая может использоваться для оценки достоверности периодического процесса, соответствующего данному пику. Поскольку при определении средних величин  $\sigma^2/T$  усреднение осуществлялось по большому числу точек на спектре, ошибкой самого среднего можно пренебречь, а достоверность выделения периодического процесса будет определяться отношением  $\sigma/\sigma_\sigma$ . Для слабых периодических процессов такой критерий был установлен, исходя из условия превышения среднего шумового значения  $\sigma_{\text{шум}}^2/T$  более чем на  $8\sigma_\sigma$ . При условии Гауссова распределения шумовых значений  $\sigma^2/T$  относительно средних этот критерий в случае поиска периодичностей по всем частотам и по всему интервалу наблюдений центра Галактики обеспечивает вероятность отбора 1 «случайного» пика на уровне  $\sim 1\%$ .

Дополнительную информацию относительно достоверности обнаруженных периодических процессов дает сравнительный анализ фазовых профилей, построенных при отдельном усреднении данных, соответствующих только «нечетным» и только «четным» временным отрезкам. Количественным параметром, характеризующим подобие «четных» и «нечетных» средних фазовых профилей, является коэффициент корреляции  $k$  между последовательностями чисел, составляющих эти профили. Поэтому полный критерий достоверности периодического процесса включает условие  $k \geq 0.5$  (40 бин на профиле).

Во *втором параграфе* четвертой главы анализируются характеристики периодических источников жесткого рентгеновского излучения, обнаруженных в экспериментах на спутнике "Прогноз-9" и ГРИФ. Список выделенных периодических процессов и некоторые их параметры представлены в табл. 1.

Для каждого из выделенных процессов были получены средние профили, полученные для различных энергетических каналов, а также «четный» и «нечетный» профили в том энергетическом интервале, в котором источник виден наиболее контрастно. Фазовые профили многих из обнаруженных процессов отличаются как от «затменной», так и от «простой» синусоидальной формы. У ряда объектов видна значимая сложная структура фазовых кривых - на их фазовых профилях присутствует более одного локального пика.

Среди выделенных периодических процессов три совпадают с орбитальными периодами известных двойных систем: 82 ч (*4U1700-37*), периодами 8.2 ч (*Cen X-4*) и 4.45 ч (*4U1755-33*). Остальные в жестком рентгеновском излучении ранее известны не были (152, 98, 67, 62, 13.3, 9.4, 8.04, 4.38, 3.4, 1.47 ч). По крайней мере, 3 из них были идентифицированы с рентгеновскими двойными – кандидатами в черные дыры: 152 ч (*H1705-25*), 62 ч (*GRO J 1655-40*) и 13.3 ч (*4U1543-47*).

Несмотря на широкое поле зрения, в эксперименте на спутнике «Прогноз-9» имелась возможность в некоторых случаях (длительное время наблюдений, относительное постоянство интенсивности) локализовать источники периодических процессов в пределах значительно меньших, чем поле зрения прибора. Таким образом, были ограничены области локализации на небе источников 9.36 и 8.04 ч периодичностей.

Таблица 1.

$T$ , ч	$kT$ , кэВ	интервал наилучшей видимости	Число периодов за интервал наилучшей видимости	идентификация
152±7	>40	31.10.83 - 12.01.84	11.5	<i>H1705-25</i> ( <i>Nov. Oph. 1977</i> )
98±7	13	08.12.83 - 06.01.84	7	
82±5	25	08.12.83 - 06.01.84	8.5 (всего ≈20)	<i>4U1700-37</i>
69±4	6	08.12.83 - 06.01.84	10	
62±2	10-20	13.11.83 - 20.12.83	14	<i>GRO J 1655-40</i> ( <i>Nov. Sco 1994</i> )
13.33±0.13	25	08.12.83 - 06.01.84	52	<i>4U1543-47</i>
9.36±0.07	10	28.10.83 - 25.11.83	71	
8.15±0.11	7	13.11.83 - 25.11.83	35	<i>Cen X-4</i>
8.04±0.04	20-45	08.12.83 - 12.01.84	104	
4.38±0.03	11	28.10.83 - 10.11.83	71	
4.35±0.05	<5	20.12.83 - 27.12.83	33	<i>4U1755-33</i>
3.45±0.04	5	07.12.83 - 13.12.83	42	
1.470±0.006	20	13.12.83 - 20.12.83	115	

Во втором параграфе приводятся также результаты наблюдений периодических процессов суточного диапазона в эксперименте ГРИФ на ОС «Мир».

В *третьем параграфе* рассматриваются временные и спектральные характеристики двойных систем с нейтронными звездами.

Как было отмечено выше, процесс с периодом 82 ч соответствует орбитальной периодичности затменной двойной системы *4U1700-37*, наблюдавшейся во многих экспериментах [26-28]. Этот хорошо изученный источник является удобным объектом для подтверждения корректности использованных в работе методов. Особенность данного источника состоит в том, что жесткость его излучения практически не зависит ни от его общей интенсивности, ни от орбитальной фазы. Это также подтверждается в настоящей работе: фазовые профили 82-ч процесса, полученные для различных энергетических каналов, хорошо совпадают по форме между собой. Анализ кривой блеска *4U1700-37* показывает наличие значимых особенностей - на ее участке вне области затмений видны максимумы, расположенные симметрично относительно середины того интервала фаз, на котором интенсивность излучения не равна нулю. Наличие данной структуры также подтверждается сравнением фазовых профилей, восстановленных для независимых энергетических каналов и для последовательных интервалов наблюдений. Подобная структура также заметна на кривой, построенной в результате сглаживания подробного (128 бин) профиля, полученного авторами эксперимента *BATSE* [28].

В этом параграфе также рассматриваются особенности кривых блеска и спектральные характеристики периодических компонентов 8.15 и 4.45 ч, идентифицированных с транзиентным источником *Cen X-4* [29] и маломассивной двойной *4U1755-33* [30] соответственно.

В *четвертом параграфе* более детально проанализированы орбитальные периодичности в жестком излучении рентгеновских двойных - кандидатов в черные дыры: *H1705-25* (152 ч), *GRO J1655-40* (62 ч), *4U1543-47* (13.3 ч).

По совокупности характеристик 152 ч периодического процесса (местоположение источника на небе, форма кривой блеска, энергетический спектр) был сделан вывод, что наиболее вероятным кандидатом на идентификацию с ним является яркий рентгеновский транзиент *H1705-25* (*Nov Oph* 1977). Так, корреляционный анализ средних фазовых профилей, построенных для 152-ч периодичности по данным эксперимента на спутнике «Прогноз-9» и кривых блеска *H1705-25*, полученных в результате наблюдений на *Ariel-5* (*SSI*) и *HEAO-1* (*MC*) [31] показал, что с вероятностью  $\geq 99.95\%$  эти профили совпадают не случайно и могут быть отнесены к одному и тому же астрофизическому объекту.

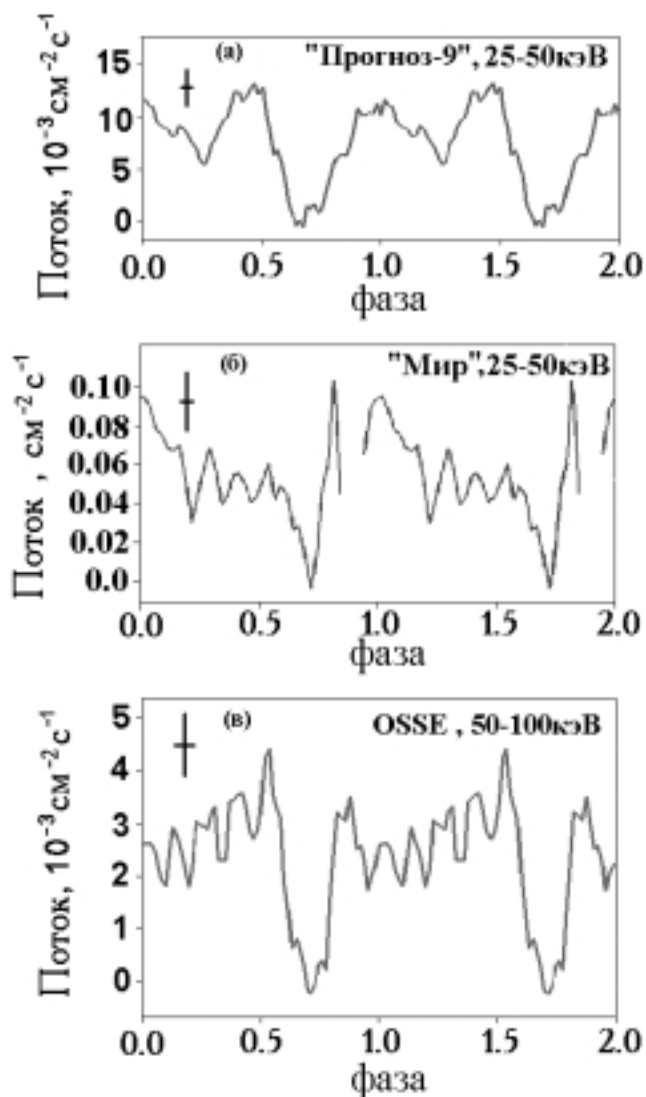


Рисунок 5. Средние фазовые профили жесткого излучения *GRO J 1655-40*, полученные в результате наблюдений в экспериментах на станции «Прогноз-9» в ноябре – декабре 1983 г. (а), ГРИФ на ОС «Мир» в ноябре 1995 – январе 1996 гг. (б), *OSSE CGRO* [34] в августе и декабре 1994 г. и марте – апреле 1995 г. (в).

В 1994 г. в результате наблюдений на обсерватории *CGRO* в созвездии Скорпиона был открыт транзиентный источник *GRO J1655-40*, также известный как рентгеновская новая *XN Sco 1994* [32]. Из оптических наблюдений для системы *GRO J1655-40* определен орбитальный период – 2.62 сут = 62.9 ч [33], который в пределах ошибок совпадает с периодом 62 ч. Как отмечают авторы эксперимента *OSSE CGRO*, для этого источника в рентгеновских вариациях потока можно проследить квазипериодическую составляющую с подобным периодом. На рис. 5 представлены кривые блеска 62-ч периодичности, наблюдавшейся в экспериментах на спутнике «Прогноз-9» и ГРИФ, а также кривая блеска, полученная в результате обработки методом наложения эпох данных *OSSE CGRO* [34]. Кривые блеска были совмещены по фазе, исходя из максимума коэффициента

корреляции между кривыми в диапазоне 50-200 кэВ (“Прогноз-9”) и 50-100 кэВ (*OSSE CGRO*), который составил 0.7. Видно, что в основных чертах средние фазовые кривые, полученные в экспериментах на ИСЗ “Прогноз-9” и *CGRO* совпадают. Энергетический спектр 62 ч периодического компонента имеет степенной вид близкий по наклону к спектру полного излучения *GRO J1655-40*.

Наблюдение 62-ч периодичности в жестком рентгеновском излучении *GRO J 1655-40* в разные эпохи свидетельствует о том, что даже в период между всплесками его активности, в рентгеновском диапазоне источник не являлся полностью спокойным. В частности, имела место его активность между интенсивными возрастаниями рентгеновского потока в августе 1995 и феврале 1996 гг. Это дает основание, по крайней мере, вдвое уменьшить типичное время рекуррентности. Данные эксперимента ГРИФ также свидетельствуют о том, что с учетом расстояния до источника  $\sim 3.5$  кпк [35] его светимость в период между всплесками рентгеновской активности в периодическом компоненте жесткого излучения при энергиях  $\geq 25$  кэВ составляет  $\sim 4 \cdot 10^{35}$  эрг/с, что более чем на 3 порядка выше светимости [36], которая до сих пор считалась характерной для «спокойного» состояния подобных объектов.

Периодический процесс 13.33 ч был идентифицирован с двойной системой *4U1543-47*. В пользу такой идентификации свидетельствует то, что *4U1543-47* является одним из немногих ярких объектов, попадающих в область локализации этого периодического процесса, а также совпадение в пределах ошибок удвоенного периода  $2 \times 13.33$  ч с орбитальным периодом *4U1543-47* ( $T = 1.123 \pm 0.008$  сут), измеренным по кривой лучевых скоростей оптического компонента [37]. Фотометрический период, наблюдаемый в оптическом излучении данного источника - 0.5605 сут. (13.45 ч) Еще один важный факт состоит в том, что по данным спутников *Tenra* и *EXOSAT* в период наблюдений на спутнике «Прогноз-9» в источнике *4U1543-47* имела место вспышка, начавшаяся 21.08.1983 и наблюдавшаяся в течение 185 дней.

В пятой главе рассматриваются возможности мониторинжных наблюдений по изучению характеристик пульсаров, обусловленных нелинейно-электродинамическими явлениями в вакууме. Глава состоит из трех параграфов.

В первом параграфе анализируются особенности распространения сигналов в сверхсильных магнитных и гравитационных полях. Нелинейно-электродинамические эффекты становятся существенными в магнитных полях, превышающих характерное значение  $B_q = m^2 c^3 / e \eta = 4.41 \cdot 10^{13}$  Гс. Подобными величинами характеризуются магнитные поля некоторых гамма-пульсаров, для таких же объектов, как магнетары они могут



достигать еще больших значений ( $B \sim 10^{15}$  Гс). Наблюдая проявления нелинейно-электродинамических эффектов в жестком излучении пульсаров и магнетаров, можно не только получить важную информацию о природе этих объектов, но и сделать выбор между различными обобщениями линейной электродинамики Максвелла. В рамках теоретико-полевых подходов рассматриваются различные обобщения уравнений Максвелла в вакууме. Наиболее известные среди них – это нелинейная электродинамика Борна-Инфельда (БИ) [38] и, соответственно, Гейзенберга-Эйлера (ГЭ) [39]. Наиболее общим подходом в нелинейной электродинамике вакуума является пост-Максвелловский параметризованный формализм, основанный на представлении полевого лагранжиана в виде аналитической функции инвариантов  $J_1 = (\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2)/B_q$  и  $J_2 = (\mathbf{E} \times \mathbf{B})^2/B_q^4$  [40]. Если ограничиться только слагаемыми малых степеней, то для относительно слабых полей обобщенный лагранжиан нелинейной электродинамики вакуума может быть представлен, как:

$$L = \frac{1}{8\pi} \left\{ [\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2] + \left[ \eta_1 (\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2)^2 + 4\eta_2 (\mathbf{E} \times \mathbf{B})^2 \right] / B_q^2 \right\} \quad (4)$$

где значения безразмерных пост-Максвелловских параметров  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  определяются выбором конкретной модели нелинейной электродинамики вакуума. В частности, в нелинейной электродинамике ГЭ  $\eta_1 = 5.1 \cdot 10^{-5}$ ,  $\eta_2 = 9.0 \cdot 10^{-5}$ , БИ -  $\eta_1 = \eta_2 = a^2 B_q^4 / 4$ , где  $1/a = 9.8 \cdot 10^{15}$  Гс.

В результате воздействия сильных магнитных полей пульсаров и магнетаров распространяющиеся в их окрестности электромагнитные лучи искривляются, потоки излучения рассеиваются, энергетические спектры и состояния поляризации изменяются. Оценки этих эффектов были сделаны для случая распространения слабых плоских электромагнитных волн в постоянном дипольном магнитном поле нейтронной звезды –  $\mathbf{B}_0$ . При этом использовалось приближение геометрической оптики. В результате было получено дисперсионное уравнение:

$$\omega_{1,2} = ck \left\{ 1 - \frac{2\eta_{1,2}}{k^2} \left[ (\mathbf{k} \times \mathbf{B}_0)^2 + o(\mathbf{B}_0^4/B_q^2) \right] \right\}. \quad (5)$$

Из дисперсионного уравнения (5) может быть получено уравнения эйконала ( $S$ ), если принять во внимание, что  $\omega = \partial S / \partial t$ ,  $\mathbf{k} = \nabla S$ . Поскольку рассмотренные выше особенности распространения электромагнитных сигналов в окрестности нейтронных звезд частично могут быть обусловлены гравитационным полем звезды, было получено уравнение эйконала и с учетом гравитационных эффектов.

Во *втором параграфе* рассматриваются нелинейно-электродинамические эффекты в окрестности релятивистских компактных объектов. В плане нелинейно-электродинамического воздействия сильное магнитное поле аналогично некоторой нелинейной среде. Поэтому

нелинейно-электродинамические эффекты в сильном магнитном поле аналогичны нелинейным эффектам в среде, основные из них это эффекты искривления луча, двойного лучепреломления, расщепления фотона и удвоения его частоты [41-44].

В общем случае решения этих уравнений неизвестны. Однако, в плане рассмотрения наблюдательных проявлений нелинейно-электродинамических эффектов было найдено решение уравнений эйконала для случая электромагнитных лучей, лежащих в плоскости экватора магнитного диполя. В частности, если источник жесткого излучения находится в непосредственной близости от нейтронной звезды на расстоянии  $l_1$ , для разных значений отношений  $B_0/B_q$  и  $l_1/b$  ( $b$  – прицельный параметр) при условии  $b < l_1$  были определены значения угла  $\delta\varphi$ , характеризующего нелинейно-электродинамическое искривление электромагнитных волн (см. рис. 6).

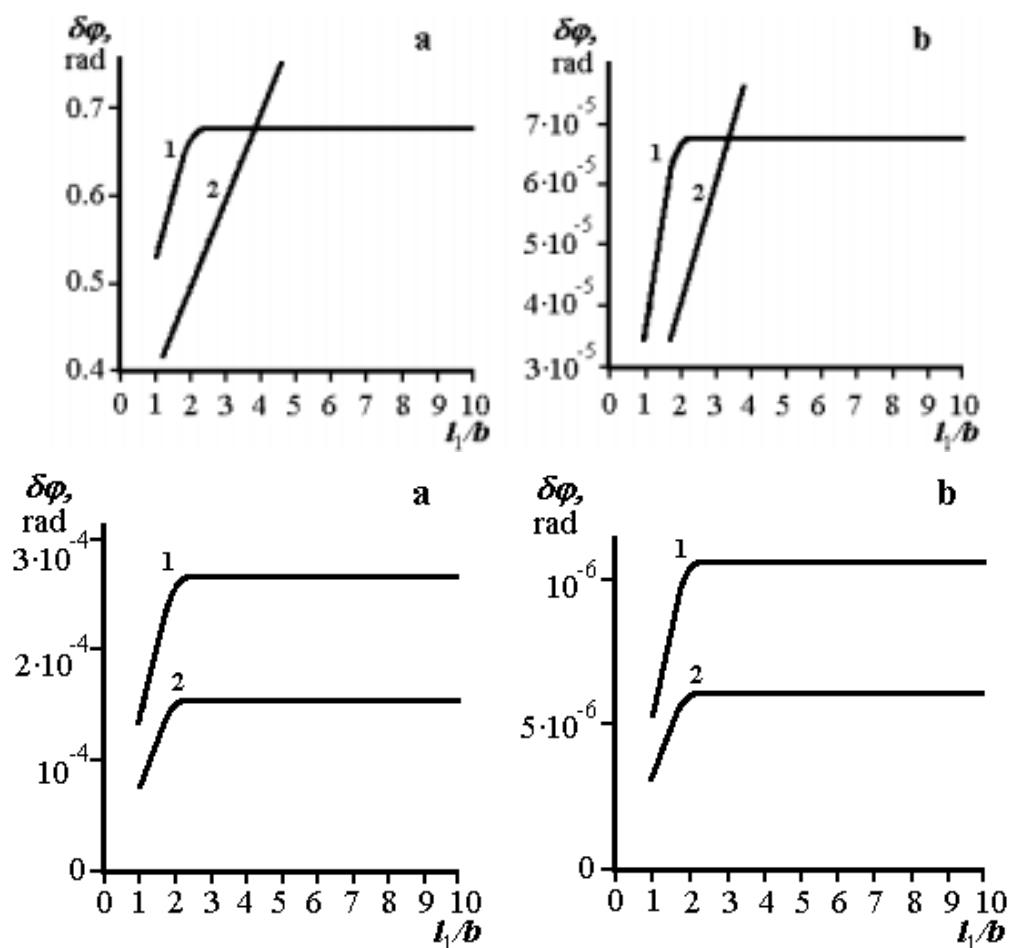


Рисунок 6. Зависимость угла искривления луча от параметра  $l_1/b$  в случае нелинейной электродинамики БИ (вверху, кривые 1, а -  $B_0/B_q = 10^2$ , б -  $B_0/B_q = 1$ , кривые 2 – зависимости для гравитационного искривления, а -  $r_g/l_1 = 0.1$ , б -  $r_g/l_1 = 10^{-5}$ ) и ГЭ (внизу, кривые 1, 2 соответствуют двум модам поляризации, а -  $B_0/B_q = 0.25$ , б -  $B_0/B_q = 10^2$ ).

Из уравнения эйконала, описывающего распространение электромагнитной волны в гравитационном и дипольном магнитном полях нейтронной звезды, следует, что в случае электродинамики ГЭ ( $\eta_1 \neq \eta_2$ ) волны, поляризованные линейно во взаимно перпендикулярных плоскостях, будут распространяться с разными групповыми скоростями (т.н. двойное лучепреломление). В случае электродинамики БИ скорость распространения волн одинакова для всех состояний поляризации. В общем случае распространения электромагнитной волны в окрестности нейтронной звезды с сильным магнитным полем получено аналитическое выражение для времени нелинейно-электродинамического запаздывания  $\Delta t$  электромагнитного сигнала, переносимого одной нормальной волной относительно электромагнитного сигнала, переносимого другой нормальной волной.

Рассмотрен также эффект нелинейно-электродинамического запаздывания электромагнитных сигналов в кулоновском поле заряженной черной дыры.

В *третьем параграфе* дан анализ наблюдательных проявлений нелинейно-электродинамических эффектов в жестком рентгеновском и гамма-излучении пульсаров. Среди рассмотренных эффектов наиболее реальным представляется обнаружить эффект двулучепреломления, проявляющийся как запаздывание друг относительно друга электромагнитных сигналов, линейно-поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Величина интервала  $\Delta t$ , характеризующего запаздывание сигнала, переносимого одной линейно поляризованной электромагнитной волной относительно сигнала, переносимого другой электромагнитной волной, поляризованной ортогонально первой, существенно зависит от разности  $\eta_1 - \eta_2$  постмаксвелловских параметров и поэтому различна в различных моделях нелинейной электродинамики вакуума. В частности, в нелинейной электродинамике ГЭ эта величина для типичных пульсаров может достигать значения  $\sim 1$  мкс, в то время как в теории БИ она строго равна нулю.

В случае узкой диаграммы направленности, временной профиль излучения пульсара может быть представлен как периодическая последовательность импульсов, длительность которых много меньше периода следования. В случае, если нелинейно-электродинамическое двулучепреломление имеет место, передний фронт импульсов должен характеризоваться линейной поляризацией. Длительность поляризованной части импульса будет зависеть от ориентации линии наблюдений относительно плоскости меридиана нейтронной звезды. Для того, чтобы экспериментально измерить такую задержку потребуются тщательные поляризационные измерения, позволяющие построить среднюю кривую пульсаций для линейно поляризованного и неполяризованного

компонентов импульса с высоким временным разрешением (не менее 1 мкс). При этом в течение всего эксперимента потребуется измерять с высокой точностью ( $\leq 1$  мкс) время прихода регистрируемых потоков и их поляризацию.

Учет реальной фоновой обстановки в космических экспериментах показывает, что оптимальным для регистрации подобного эффекта является диапазон 0.02-1.0 МэВ. При этом для регистрации эффекта на уровне тысячных долей интенсивности источника в Крабовидной туманности (мКраб) с помощью аппаратуры, имеющей эффективную площадь  $\sim 10^4$  см<sup>2</sup>, потребуется время экспозиции выбранного источника не менее нескольких мегасекунд, что свидетельствует о необходимости длительных мониторинговых наблюдений.

**В заключении** приведены основные выводы и результаты работы.

**В приложении А** рассмотрены математические модели и приведены аппаратурные функции рентгеновских приборов РХ-1 и РХ-2.

**В приложении Б** представлены выходные параметры и результаты калибровок приборов РХ-1 и РХ-2

**В приложении В** дан вывод дисперсионного уравнения и выражений для углов нелинейно-электродинамического искривления луча и времени запаздывания нормальных мод сигнала вследствие двулучепреломления в вакууме.

### **Основные результаты, выносимые на защиту.**

1. Обнаружены новые периодические источники жесткого рентгеновского излучения (10-200 кэВ) в районе центра Галактики (152, 98, 67, 62, 13.3, 9.4, 8.04, 4.4. 3.41 ч).
2. Осуществлена идентификация периодических процессов: 152 ч – *H1705-25*, 62 ч – *GRO J1655-40*, 13.3 ч – *4U1543-37* с источниками, являющимися кандидатами в черные дыры.
3. На долговременной базе (1983-84, 1995-87 гг.) подтверждено наблюдение орбитальной периодичности 62 ч в жестком излучении вспыхивающей двойной *GRO J1655-40*. Показано, что эта периодичность проявляется наиболее контрастно в период между вспышками активности источника.
4. Проведены долговременные наблюдения рентгеновской двойной *4U1700-37*. Получены средние кривые блеска в диапазонах энергии 10-25, 25-50, 50-100, 100-200, 200-300 кэВ, на которых обнаружены особенности типа симметричных максимумов. Подтверждено отсутствие пульсаций в широком диапазоне периодов.

5. Получены средние кривые блеска в разных энергетических диапазонах маломассивных двойных *Сен X-4* (8.02 ч), *4U1755-40* (4.4 ч).
6. Дана независимая оценка частоты регистрации со всего неба космических гамма-всплесков с полными потоками  $S \sim 10^{-7}$  эрг/см<sup>2</sup>, которая совпала с соответствующей величиной, полученной в эксперименте *BATSE CGRO*.
7. Получена оценка частоты регистрации со всего неба «космологических» мягких (характерная энергия менее 50 кэВ) гамма-всплесков, на основе совместного анализа данных экспериментов ГРИФ и *BATSE CGRO*, сделан вывод о том, что основная доля источников гамма-всплесков относится к эпохе красных смещений  $1 < z < 5$ .
8. Получены количественные оценки нелинейно-электродинамического воздействия сильного магнитного поля на временные, спектральные и поляризационные характеристики жесткого электромагнитного излучения пульсаров и магнетаров. Показано, что в случае справедливости теории Гейзенберга-Эйлера будет иметь место запаздывание  $\sim 1$  мкс сигналов, поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях.
9. На основе измерений характеристик потоков гамма-квантов построена модель спектров основных фоновых компонентов гамма-излучения на орбитах станции «Мир».
10. В различных областях околоземного пространства измерены характеристики распределений потоков электронов с энергиями 80 кэВ и их вариаций, которые могут имитировать космические гамма-всплески.

#### **Список основных работ по теме диссертации:**

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И. «Рентгеновский эксперимент на ИСЗ «Прогноз-9». Вестн. моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1984. Т.25, №5, с.81-88.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И. «Наблюдение космических гамма-всплесков на ИСЗ «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1988. Т.14, №3, с.216-223.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И. «Исследование гамма-всплеска 1 августа 1983 г. на ИСЗ «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1988. Т.14, №4, с.323-326.

Кудрявцев М.И., Логачев Ю.И., Свертилов С.И. «Периодические, суточного диапазона, источники жесткого рентгеновского излучения в районе центра Галактики по данным эксперимента на ИСЗ «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1988. Т.14, №10, с.893-901.

Кудрявцев М.И., Мамонтова Н.А., Свертилов С.И., Толстая Е.Д. «Указание на 62-часовую периодичность в Sco X-1 по данным рентгеновского эксперимента на ИСЗ «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1989. Т.15, №12, с.1072-1080.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И. «Наблюдения источника 4U1700-37 в рентгеновском эксперименте на ИСЗ «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1991. Т.17, №5, с.410-418.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И. «Периодические, часового диапазона, источники жесткого рентгеновского излучения в районе центра Галактики по данным эксперимента на ИСЗ «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1992. Т.18, №7, с.588-597.

Свертилов С.И. «Средние кривые блеска периодических источников жесткого рентгеновского излучения в районе центра Галактики, наблюдавшихся в эксперименте на ИСЗ «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1993. Т.19, №4, с.295-304.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. «Спектральные характеристики в жестком излучении (10-100 кэВ) периодических источников Cen X-4, 4U1755-33, 4U1700-37, MXB 1659-29, 4G1822-37: результаты наблюдений на станции «Прогноз-9». Письма в астроном. журн. 1995. Т.21, №4, с.256-262.

Кудрявцев М.И., Панков В.М., Богомолов А.В., Денисов Ю.И., Колесов Г.Я., Логачев Ю.И., Свертилов С.И. «Эксперимент “ГРИФ-1” на модуле “Спектр” ОКС “Мир”: исследование рентгеновского, гамма- и нейтронного излучений солнечных вспышек, а также связи солнечной активности с динамикой потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли». Известия Вузов. Сер. Радиофизика. 1996. Т.39, №11-12, с.1539-1545.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. «Идентификация с H1705-25 (Nov Oph) и динамика спектра 152-ч периодического источника, обнаруженного в рентгеновском эксперименте на станции “Прогноз-9” Письма в астроном. журнал. 1996. Т.22, №12, с.896-904.

Богомолов А.В., Богомолов В.В., Денисов Ю.И., Колесов Г.Я., Логачев Ю.И., Свертилов С.И., Кудрявцев М.И., Панков В.М. «Динамика потоков космических излучений в околоземном пространстве: предварительные результаты эксперимента “Гриф-1” на станции “Мир”». Известия РАН. Сер. физич. 1997. Т.61, №6, с.1129-1132.

Kudryavtsev M.I., Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Denisov Yu.I., Svertilov S.I. “Measurements of high-energy neutron and proton fluxes on-board “Mir-Spectr” orbital complex”. Adv.Space Res. 1998. V.21, №12, p.1785-1788.

Kudryavtsev M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V. “Temporal and spectral parameters of slow X-ray periodic sources observed during Prognoz 9 mission”. Adv.Space Res. 1998. V.22, №7, p.939-942.

Kudryavtsev M.I., Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Svertilov S.I. "X-ray timing in the astrophysical experiment on-board "Mir-Spectr" orbital complex". Adv.Space Res. 1998. V.22, №7, p.1053-1056.

Kudryavtsev M.I., Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Svertilov S.I. "The project of all-sky hard X-ray and soft gamma-ray monitoring on-board international space station". Adv.Space Res. 1998. V.22, №7, p.1057-1060.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. «Характеристики периодических источников жесткого рентгеновского излучения, обнаруженных в эксперименте на станции "Прогноз-9". Результаты дополнительного анализа». Письма в астрономический журнал. 1998. Т.24, №10, с.663-676.

Богомолов А.В., Бучик Р., Дементьев А.В., Дмитриев А.В., Кудела К., Кудрявцев М.И., Мягкова И.Н., Рюмин С.П., Свертилов С.И., Соболевский Н.М. «Потоки и спектры вторичных нейтронов с энергиями >20 МэВ и гамма-квантов с энергиями >0.12 МэВ на ИСЗ "Коронас-И", орбитальном комплексе "Салют-7"- "Космос-1686" и орбитальной станции "Мир"». Известия РАН. Сер. физич. 1999. Т.63, №8, с.1660-1664.

Богомолов А.В., Богомолов В.В., Денисов Ю.И., Кудрявцев М.И., Логачев Ю.И., Свертилов С.И. «Характеристики фонового гамма-излучения на орбитах станции "Мир"». Известия РАН. Сер. физич. 1999. Т.63, №8, с.1665-1669.

Богомолов А.В., Дементьев А.В., Кудрявцев М.И., Мягкова И.Н., Рюмин С.П., Свертилов С.И., Соболевский Н.М. «Потоки и спектры вторичных нейтронов с энергиями >20 МэВ на орбитальной станции "Мир", орбитальном комплексе "Салют-7"- "Космос-1686" и ИСЗ "Коронас-И". Сравнение экспериментальных данных и модельных расчетов». Космические исследования. 2000. Т.38, №1, с.31-36.

Богомолов А.В., Богомолов В.В., Денисов Ю.И., Кудрявцев М.И., Логачев Ю.И., Свертилов С.И. «Характеристики компонентов фонового гамма-излучения и нейтронов на орбитах станции «Мир». Космические исследования. 2000. Т.38, №4, с.377-387.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. «Наблюдения рентгеновских двойных 4U1700-37 и GRO J1655-40 в эксперименте «ГРИФ» на орбитальной станции "Мир"». Письма в астрономический журнал. 2001. Т.27, №10, с.762-773.

Денисов В.И., Денисова И.П., Свертилов С.И. «Нелинейно-электродинамический эффект искривления луча в поле магнитного диполя». Доклады академии наук. 2001. Т.380, №6, с.754-756.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И., Морозов О.В. «Статистика слабых гамма-всплесков по данным эксперимента ГРИФ на орбитальной станции "Мир"». Письма в Астрономический журнал. 2002. Т.28, №5, с.331-340.

Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Denisov Yu.I., Logachev Yu.I., Svertilov S.I., Kudryavtsev M.I., Lyagushin V.I., Ershova T.V. "The properties

of gamma-radiation and high energy neutron fluxes in "MIR" station orbit". Radiation Measurements. 2002. V.35, p.473-483.

Denisov V.I., Svertilov S.I. «Vacuum nonlinear electrodynamics curvature of photon trajectories in pulsars and magnetars». Astronomy & Astrophysics. 2003. V.399, L39-L43.

Кудрявцев М.И., Свертилов С.И., Морозов О.В. «Наблюдения мягких гамма- или жестких рентгеновских всплесков в эксперименте ГРИФ на орбитальной станции "Мир"». Письма в астроном. журнал. 2003. Т.29, №5, с.323-333.

Денисов В.И., Денисова И.П., Свертилов С.И. «Нелинейно-электродинамическое запаздывание электромагнитных сигналов в кулоновском поле». Теор. и мат. физика. 2003. Т.135, №2, с.322-330.

Денисов В.И., Денисова И.П., Свертилов С.И. «Нелинейно-электродинамическое запаздывание электромагнитных сигналов, распространяющихся в плоскости магнитного меридиана пульсаров и магнетаров». Теор. и мат. физика. 2004. Т.140, №1, с.128-138.

Denisov V.I., Svertilov S.I. «Nonlinear electromagnetic and gravitational actions of neutron star fields on electromagnetic wave propagation». Phys.Rev.D. 2005. V.71, p.063002-1-063002-13.

Богомолов А.В., Денисов Ю.И., Колесов Г.Я., Кудрявцев М.И., Логачев Ю.И., Морозов О.В., Свертилов С.И. «Потоки квазизахваченных электронов с энергиями  $>0.08$  МэВ в околоземном пространстве на дрейфовых оболочках  $L < 2$ ». Космические исслед. 2005. Т.43, с.322-330.

### Список цитируемой литературы

1. Giacconi R., Gursky H., Paolini F. and B. Rossi, Evidence for X-Rays From Sources Outside the Solar System, Phys. Rev. Lett., 9, pp. 439-443, 1962.
2. Mereghetti S., The zoo of X-ray pulsars, Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics, Vulcano Workshop, Italy, 21-27 May, 2000, eds. F. Giovannelli and G. Mannocchi, Italian Physical Society 2001, pp. 239-250.
3. Holt S. and W. Priedhorsky, All-sky monitors for X-ray astronomy, Space Sci. Rev., 45, pp. 269-289, 1987.
4. Fishman G.J., Meegan C.A., Wilson R.B. et al., The first BATSE gamma-ray burst catalog, Astrophys. J. Suppl., 92, pp. 229-283, 1994.
5. Mazets E.P., Golenetskii S.V., Ilinskii V.N. et al., Catalog of cosmic gamma-ray bursts from the KONUS experiment data. I., Astrophys. Space Sci., .80, pp. 3-83, 1981.
6. Frontera F., Recent Results on Gamma-Ray Bursts with the BeppoSax Satellite, Proc 25th ICRC, 30 July - 6 August 1997, Durban, South Africa, eds. M.S. Potgieter, B.C. Raubenheimer & D.J. van der Walt, River Edge, Singapore, World Scientific, NJ, 8, pp. 307-315, 1997.
7. Gotz D., Mereghetti S., Beck M., Borowski J., Mowlavi N., GRB 031203: a long GRB detected with INTEGRAL. GRB Circular network 2459, 2003.



8. Narayan R., Paczynski B. and T.Piran, Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars, *Astrophys. J. (Lett.)*, 395, pp. L83-L86, 1992.
9. Paczynski B., Gamma-Ray Bursts as Hypernovae, in "Gamma-Ray Bursts: 4th Huntsville Symposium", Huntsville, AL, September 1997, eds C.A. Meegan, R.D. Preece & T.M. Koshut, AIP conf. Proc., Woodbury, New York 1998, p. 428.
10. Lipunov V.M., Postnov K.A., Prokhorov M.E., Panchenko I.E. and H.E. Jorgensen, Evolution of the Double Neutron Star Merging Rate and the Cosmological Origin of Gamma-Ray Burst Sources, *Astrophys. J.*, 454, pp. 593-596, 1995.
11. Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Anfimov D.S. et al., Comparison of redshift-known Gamma-Ray Bursts with the Main group of bright BATSE Events, *Astrophys. J.*, 584, pp. 904-910, 2003.
12. Firmani C., Avila-Rees V., Ghisellini G. and Tutukov A.V., The Luminosity Function and Formation Rate History of GRBs, *Nuovo Cim. C*, 28, pp. 665-668, 2005.
13. Corbet R.H.D., The three types of high-mass X-ray pulsator, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 220, pp. 1047-1056, 1986.
14. Черепашук А.М., Рентгеновские двойные системы с черными дырами, в сб. "Двойные звезды", Космосинформ, Москва, 1997, сс. 45-104.
15. Arons J., Pulsars as gamma ray sources, *Astron. & Astrophys. Suppl.*, 120, pp. 49-60, 1996.
16. Vasisht G. and F.V. Gotthelf, The Discovery of an Anomalous X-Ray Pulsar in the Supernova Remnant Kes 73, *Astrophys. J. (Letters)*, 486, pp. L129-L132, 1997.
17. Duncan R.C., and Thomson C., Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts, *Astrophys. J. (Letters)*, 392, pp. L9-L13, 1992.
18. Holt S.S., Temporal X-ray astronomy with a pinhole camera, *Astrophys. Space Sci.*, 42, pp. 123-141, 1976.
19. Levine A.M., Bradt H, Cui W. et al., First Results from the All-Sky Monitor on the Rossi X-Ray Timing Explorer, *Astrophys. J. (Letters)*, 469, pp. L33-L36, 1996.
20. Спектр - Рентген – Гамма (международная орбитальная астрофизическая обсерватория), сайт, [http://hea.iki.rssi.ru/SXG/sxg\\_00/rus/](http://hea.iki.rssi.ru/SXG/sxg_00/rus/)
21. Galper A.M., Koldashov S.V, Mikhailov V.V. and S.A. Voronov, Energy distributions of high energy electrons and positrons in the Earth's Magnetosphere, Proc. 23rd ICRC, Calgary, Canada, Calgary University 1993, 3, pp. 825-828.
22. Nagata K., Kohno T., Murakami H. et al., Electron (0.19-3.2 MeV) and proton (0.58-35 MeV) precipitations observed by OHZORA satellite at low latitude zones L = 1.6-1.8, *Planet. Space Sci.*, 36, pp. 591-606, 1988.
23. Pasiesas W.S., Meegan C.A., Pendleton G.N., et al., On-line BATSE Gamma-Ray Bursts Catalog (revised), <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/4b/>
24. Schaefer B.E., Deng M., and D.L Band, Redshifts and luminosities for 112 gamma-ray bursts, *Astrophys. J. (Letters)*, 563, pp. L123-L127, 2001.
25. Теребиж В.Ю., Анализ временных рядов в астрофизике, Наука, Москва, 1992.
26. Jones C., Forman W., Tananbaum H. et al., Evidence for the Binary Nature of 2U1700-37, *Astrophys. J. (Letters)*, 181, pp. L43-L49, 1973.

27. Ситдииков А.Ф., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А. и др., Наблюдения рентгеновского источника 4U1700-377/HD 153919 в диапазоне энергий 35-1300 кэВ телескопом СИГМА обсерватории «Гранат», Письма в астрон. журн., 19, сс. 483-499, 1993.
28. Rubin B.S., Finger M.H., Harmon B.A. et al., Observations of 4U1700-37 with BATSE, *Astrophys. J.*, 459, pp. 259-270, 1996.
29. Kaluzienski L.J., Holt S.S. and J.H. Swank, The 1979 X-Ray Outburst of Centaurus X-4, *Astrophys. J.*, 241, pp. 779-786, 1980.
30. White N.E., Parmar A.N., Sztajno M. et al., Evidence for 4.4 hour periodic dips in the X-ray flux from 4U 1755 – 33, *Astrophys. J. (Letters)*, 283, pp. L9-L12, 1984.
31. Watson M.G., Ricketts M.J and R.E. Griffiths, The X-Ray Light Curve of Nova Ophiuchi 1977 (H1705-25), *Astrophys. J. (Letters)*, 221, L69-L71, 1978.
32. Zhang S.N., Wilson C.A., Harmon B.A. et al., X-Ray Nova in Scorpius, *IAU Circ.* № 6046, 1994.
33. Bailyn C., Orosz J., McClintock J. and R. Remillard, Dynamical Evidence for a Black-Hole in the Eclipsing X-Ray Nova GRO:J1655-40, *Nature*, 378, pp. 157-159, 1995.
34. Kroeger R.A., Strickman M.S. and J.E. Grove, Gamma-ray observations of GRO J1655-40, *Astron. & Astrophys. Suppl. Ser.*, 120, pp. 117-120, 1996.
35. Hjellming R.M. and M.P. Rupen, Episodic Ejection of Relativistic Jets by the X-Ray Transient GRO:J1655-40, *Nature*, 375, p. 464-468, 1995.
36. Esin A.A., Lasota J.-P. and R.I. Hynes, The 1996 outburst of GRO J1655-40: disc irradiation and enhanced mass transfer, *Astron. & Astrophys.*, 354, pp. 987-994, 2000.
37. Orosz J.A., Jain R.K., Baylin C.D. et al., Orbital Parameters for the Soft X-Ray Transient 4U1543-47: Evidence for a Black Hole, *Astrophys. J.*, 499, pp. 375-384, 1998.
38. Born M. and L. Infeld, Foundations of the New Field Theory, *Proc. Roy. Soc. A*, 144, pp. 425-451, 1934.
39. Heisenberg W. and H. Euler, Consequences of Dirac's Theory of Positrons, *Z. Phys.*, 98, pp. 714-732, 1936.
40. Денисов В.И. и И.П. Денисова, Уравнение эйконала в параметризованной нелинейной электродинамике в вакууме, *ДАН*, 378, сс. 463-465, 2001.
41. Тернов И.М., Халилов В.Р., Родионов В.Н., Взаимодействие заряженных частиц с сильным электромагнитным полем, *Изд-во МГУ, Москва*, 1982.
42. Гриб А.А., Мамаев С.Г., Мостепаненко В.М., Квантовые эффекты в интенсивных внешних полях, *Атомиздат, Москва*, 1980.
43. Meszaros P. and J. Ventura, Vacuum-Polarization Effects on Thomson Cross Sections in a Magnetized Plasma, *Phys. Rev. Letters*, 41, pp. 1544-1547, 1978.
44. Gnedin Yu.N., Effect of vacuum polarization in a strong magnetic field and spectral features of X-ray source emission, in *High resolution X-ray spectroscopy of cosmic plasmas*, Cambridge, England and New York, Cambridge University Press 1990, pp. 78-84.

Типография ордена «Знак Почета» издательства МГУ  
119992, Москва, Ленинские горы  
Заказ №394 Тираж 100 экз.