

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ

---

На правах рукописи

Фредерикс Дмитрий Дмитриевич

**НАБЛЮДЕНИЯ МЯГКИХ ГАММА-РЕПИТЕРОВ  
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ КОНУС И ГЕЛИКОН**

(специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель доктор физико-математических наук  
член-корреспондент РАН Мазец Е.П.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук  
академик РАН Варшалович Д.А.

доктор физико-математических наук  
профессор Гнедин Ю.Н.

Ведущая организация Институт космических исследований РАН

Защита состоится 24 мая 2007 г. в 14-30 на заседании Диссертационного совета Д 002.205.03 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан 10 апреля 2007 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук \_\_\_\_\_ Орбели А.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

С момента открытия мягких гамма-репитеров исследование этого редкого класса компактных транзиентов является интереснейшей задачей современной наблюдательной астрофизики.

Основным типом активности, которым проявляют себя источники, является испускание коротких (длительностью менее секунды) всплесков электромагнитного излучения энергией до десятков кэВ и светимостью до  $10^{41}$  эрг сек<sup>-1</sup>. Вторым, несравненно более впечатляющим явлением, являются гигантские вспышки — весьма редкие события, по пиковой мощности излучения в источнике ( $10^{45}$ - $10^{47}$  эрг сек<sup>-1</sup>) сопоставимые со светимостью квазаров.

Сегодня известно четыре мягких гамма-репитера (Soft Gamma-Ray Repeaters, SGR) – SGR 0526-66 в Большом Магеллановом Облаке и три репитера в Галактике: SGR 1806-20, SGR 1900+14 и SGR 1627-41. Они ассоциированы со слабыми медленными рентгеновскими пульсарами в молодых остатках сверхновых. Предполагаемая связь SGR с магнитарами – изолированными нейтронными звездами, магнитные поля которых достигают  $10^{15}$  Гс, выводит проблему на передний край астрофизики высоких энергий.

### Цель работы

Целью диссертации является исследование активности мягких гамма-репитеров в жестком рентгеновском и гамма-диапазоне в ходе экспериментов по изучению космических гамма-всплесков Конус и Геликон на космических аппаратах Wind, Коронас-Ф и Космос-2326.

### Новизна работы

1. В период реактивации источника SGR 1900+14 в 1998 г. впервые зарегистрирована компактная серия повторных всплесков. Частота регистрируемых событий возросла по меньшей мере в  $10^4$  раз по сравнению с обычно наблюдаемой частотой появления всплесков в периоды реактивации SGR. В дальнейшем три подобных серии наблюдались от SGR 1806-20 в 2004 г. В обоих случаях появление серий предшествовало гигантским вспышкам в источниках.
2. Впервые зарегистрированы гигантские вспышки от SGR 1900+14 и SGR 1806-20. Временные, спектральные и энергетические характеристики этих событий свидетельствуют о единстве их природы со знаменитой вспышкой 5 марта 1979 г. в SGR 0526-66.

3. Во время гигантской вспышки 27 декабря 2004 г. в эксперименте Геликон-Коронас-Ф впервые осуществлена регистрация отраженного от Луны всплеска жесткого электромагнитного излучения, источник которого находится вне Солнечной системы. Это позволило впервые получить достоверные временные, спектральные параметры и оценки энергетики начального импульса гигантской вспышки от SGR в нашей галактике.
4. Зарегистрировано уникальное событие 18 июня 1998 г. от SGR 1627-41, по энергетике приближающееся к гигантским вспышкам, но не имеющее характерного для них затухающего "хвоста" излучения, модулированного вращением источника.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность и надежность полученных результатов обеспечивается:

1. Проверкой численных результатов с использованием различных методов и программ обработки экспериментальных данных.
2. Интенсивной кооперацией с другими космическими экспериментами, обменом и сравнением первичных данных, промежуточных и окончательных результатов.
3. Математическим моделированием и наземной экспериментальной отработкой ситуаций, в которых сцинтилляционные спектрометры работают в режиме перегрузки и наложения импульсов.

### **Практическая значимость работы**

1. Полученные в ходе работы результаты важны для понимания природы магнитаров — редких компактных астрофизических объектов, магнитные поля в которых достигают  $10^{15}$  Гс, и поведения вещества в сверхсильных магнитных полях.
2. Регистрация гигантских вспышек, оценки их временных и спектральных характеристик, энергетики в источниках, определение наблюдаемого потока излучения исключительно важны для планирования будущих экспериментов в области исследования известных SGR и поиска подобных источников в нашей и соседних галактиках.
3. Каталог повторных всплесков SGR, зарегистрированных с 1979 г. в экспериментах Конус, составленный и опубликованный для использования астрофизическим сообществом в ходе данной работы, способствует дальнейшему прогрессу в исследовании мягких гамма-репитеров.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Наблюдения SGR 1900+14 в период реактивации источника с мая 1998 г. по январь 1999 г. Индивидуальные характеристики повторных всплесков: временные истории, энергетические спектры, максимальные и интегральные потоки энергии. Статистические распределения и зависимости, построенные на их основе. Серия всплесков 30 мая 1998 г. Сравнение всплесковой активности SGR 1900+14 до и после гигантской вспышки 27 августа 1998 г., не выявившее существенных изменений в поведении источника.
2. Регистрация в эксперименте Конус-Винд 27 августа 1998 г. гигантской вспышки от SGR 1900+14. Характеристики начального импульса вспышки: временная картина излучения, его спектральный состав, нижний предел пикового и интегрального потока, восстановленные с помощью лабораторных исследований сцинтилляционного детектора и математического моделирования поведения измерительного тракта спектрометра в условиях глубокой перегрузки мощным потоком излучения. Временные, спектральные и энергетические характеристики события, сравнительный анализ с гигантской вспышкой 5 марта 1979 г. в SGR 0526-66. Сходство вспышек, подчеркивающее общность механизма их генерации.
3. Наблюдения SGR 1627-41 в июне-июле 1998 г., позволившие подтвердить открытие нового репитера. Временные истории и энергетические спектры повторных всплесков, спектральная переменность излучения. Характеристики уникального события 18 июня 1998 г., по энергетике приближающегося к начальным импульсам гигантских вспышек, но не имеющего характерного «хвоста» излучения, модулированного вращением источника.
4. Регистрация гамма-спектрометром Конус-Винд 27 декабря 2004 г. гигантской вспышки в SGR 1806-20, существенно превосходящей по интенсивности две известные вспышки в SGR 0526-66 и SGR 1900+14. Временные и спектральные характеристики пульсирующего «хвоста» вспышки. Присутствие в его спектрах жесткой степенной компоненты, наблюдаемой до 10 МэВ. Свидетельства слабого послесвечения SGR 1806-20 в диапазоне до 1 МэВ на протяжении нескольких часов после вспышки.
5. Регистрация гамма-спектрометром Геликон на спутнике Коронас-Ф 27 декабря 2004 г. начального импульса гигантской вспышки в SGR 1806-20 в форме ослабленного сигнала комптоновского рассеяния Луной. Временные, энергетические и спектральные характеристики падающего импульса, восстановленные с помощью численного моделирования процесса взаимодействия излучения с лунной поверхностью.

## Апробация работы и публикации

Результаты работы были представлены автором на семинарах ФТИ РАН, ИКИ РАН, ГАИШ, Зимней школе ПИЯФ и международных конференциях: 4-th Huntsville Symposium on Gamma-Ray Bursts (США, 1997), Физика нейтронных звезд (NS-2001 Санкт-Петербург, приглашенный доклад), Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2003, HEA-2005, Москва, приглашенные доклады). Отдельные этапы работы были отмечены премиями Ученого совета ФТИ в 1999 г. и «Лучшая научная работа ФТИ» в 2005 г.

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ в реферируемых журналах.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 121 страницу печатного текста, в том числе 50 рисунков, четыре таблицы и список литературы, включающий 77 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой, **вводной** главе обоснована актуальность темы диссертации, раскрыты цели работы, ее новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 2** посвящена описанию космических гамма-спектрометров Конус и Геликон и условиям наблюдений. Сцинтилляционный гамма-спектрометр Конус-Винд [1] – прибор для изучения космических гамма-всплесков в области от 10 кэВ до 10 МэВ. Он установлен на космическом аппарате (КА) NASA GGS-Wind, запущенном в 1994 году на высокоапогейную орбиту. На КА, стабилизированном вращением вокруг оси, перпендикулярной плоскости эклиптики, размещены два детектора NaI(Tl) с диаметром кристаллов 130 мм и высотой 75 мм. Входные окна алюминиевых контейнеров кристаллов выполнены из бериллия. Оси детекторов S1 и S2 направлены на южный и северный полюс эклиптики, соответственно. Детекторы работают в двух режимах — фоновом и триггерном. В фоновом режиме с разрешением 2.944 сек измеряются скорости счета в трех энергетических окнах (10-50, 50-20 и 200-750 кэВ). При обнаружении всплеска детектором в момент  $T_0$  запускается программа всплескового режима. В указанных энергетических окнах производится запись временной истории всплеска на интервале от  $T_0-0.512$  сек до  $T_0+229.632$  сек с разрешением от 2 до 256 мс и измеряются 64

многоканальных спектра в области от 10 кэВ до 10 МэВ. Гамма-спектрометр Геликон является одним из приборов солнечной космической обсерватории Коронас-Ф, работавшей в 2001-2005 гг. на околоземной приполярной орбите с малым эксцентриситетом и стабилизированной вращением относительно оси, направленной на Солнце. По характеристикам своих двух детекторов и структуре представления информации гамма-спектрометр Геликон практически аналогичен спектрометру Конус-Винд. Часть информации получена прибором Конус-А, работавшим в 1995-97 гг. на КА Космос-2326, имевшем низкую (420 км) круговую орбиту наклоном  $65^\circ$ . Спектрометрический детектор аппаратуры также аналогичен детекторам аппаратуры Конус-Винд.

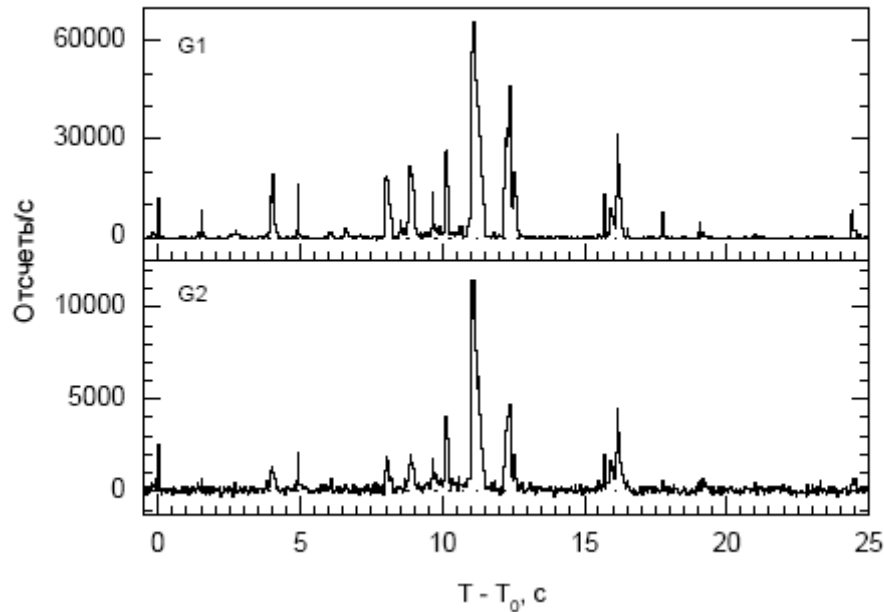
Рассчитанная методом Монте-Карло матрица отклика детекторов согласуется с результатами наземной калибровки, проведенной в широком спектральном диапазоне с применением стандартных радиоактивных источников и рентгеновского излучения мишеней.

В главе 3 рассмотрены наблюдения мягкого гамма-репитера SGR 1900+14 с помощью спектрометра Конус-Винд в период реактивации источника с мая 1998 г по январь 1999 г.

Раздел 3.1 знакомит с проблемой исследования мягких гамма-репитеров. Основным типом активности, которым проявляют себя источники, является испускание коротких (длительностью менее секунды) всплесков электромагнитного излучения энергией до десятков кэВ и светимостью до  $10^{41}$  эрг. Вторым, несравненно более впечатляющим явлением, являются гигантские вспышки – редкие события, по пиковой мощности излучения в источнике ( $10^{45}$ - $10^{47}$  эрг сек $^{-1}$ ) сопоставимые со светимостью квазаров.

Сегодня известно четыре мягких гамма-репитера — источник SGR 0526-66 в Большом Магеллановом Облаке и три репитера в нашей галактике: SGR 1806-20, SGR 1900+14 и SGR 1627-41. Все они ассоциированы со слабыми рентгеновскими источниками в молодых остатках сверхновых. Согласно доминирующей сейчас магнитарной модели [3,4], SGR являются молодыми, медленно вращающимися нейтронными звездами, обладающими сверхсильными магнитными полями ( $\sim 10^{15}$  Гс) и быстро замедляющими свое вращение вследствие больших потерь на магнитно-дипольное излучение. Деформации и разломы коры нейтронной звезды под действием магнитных сил приводят к высвобождению и трансформации магнитной энергии в энергию частиц и жестких фотонов.

Разделы 3.2 и 3.3 посвящены результатам наблюдений. До 1998 г. повторные всплески из SGR 1900+14 наблюдались дважды: три события в 1979 г. [4] и три события в 1992 г. [5]. После долгого перерыва активность SGR 1900+14 возобновилась в мае 1998 г. [6] и продолжалась до января 1999 г. На этот раз частота повторных всплесков оказалась высокой и очень неравномерной.



**Рис. 1:** Участок с наиболее высокой частотой появления повторных всплесков в серии 30 мая 1998 г. G1 - скорость счета в энергетическом окне 15-50 кэВ, G2 – скорость счета в окне 50-250 кэВ. Фон вычтен.

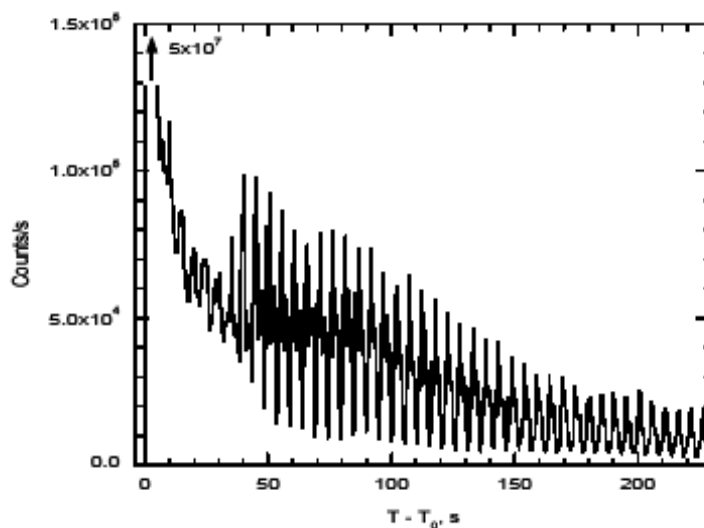
В частности, 30 мая 1998 г. произошла интенсивная серия повторных вспышек. В течение всего лишь трех минут было отмечено несколько десятков всплесков продолжительностью от 0.05 до 0.7 сек. Интервалы времени между всплесками сокращались до такой степени, что становились сопоставимы с продолжительностью самих событий. На рис. 1 показан наиболее населенный всплесками участок серии, интегральный поток в котором составил  $S = 4.2 \cdot 10^{-5}$  эрг см<sup>-2</sup>. Высокая частота появления всплесков может приводить к вынужденным потерям в получаемой информации. Такие случаи имели место, и, возможно, среди них были две-три более слабые серии повторных вспышек, в частности, 1 сентября ( $S \sim 2 \cdot 10^{-5}$  эрг см<sup>-2</sup>) и 24 октября 1998 г. ( $S \sim 1 \cdot 10^{-5}$  эрг см<sup>-2</sup>).

Все повторные всплески – кратковременные события с мягкими энергетическими спектрами, хорошо описываемыми моделью ОТТВ  $dN/dE \sim E^{-1} \exp(-E/kT)$  с характерной величиной параметра  $kT \sim 18-30$  кэВ. Спектральная эволюция в пределах одного события практически отсутствует. Максимальные значения потока для 80% наблюдавшихся событий сосредоточены в узкой области  $(1-3) \cdot 10^{-5}$  эрг см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>.



Интегральные потоки изменяются в более широких пределах — от  $10^{-7}$  до  $4 \cdot 10^{-5}$  эрг  $\text{см}^{-2}$ . Это означает, что выход энергии в значительной степени определяется продолжительностью процесса эмиссии в источнике. Распределение всплесков в плоскости интегральный поток–длительность демонстрирует сильную корреляцию между этими величинами ( $\rho=0.8$ ), которая означает, что выход энергии в источнике пропорционален длительности эмиссии при малом разбросе светимости. Единственным существенным отличием в поведении источника после гигантской вспышки 27 августа 1998 г., рассмотренной в следующей главе, стало появление нескольких продолжительных (до 4 сек) всплесков с высоким полным потоком энергии, до  $5 \cdot 10^{-5}$  эрг  $\text{см}^{-2}$ . Из полученных данных следует, что при удаленности SGR 1900+14 на 10 кпк [7] и изотропной эмиссии максимальная светимость источника в повторных всплесках сосредоточена в области  $(1 - 3) \cdot 10^{41}$  эрг  $\text{сек}^{-1}$ , а энергия повторного всплеска составляет  $10^{39} - 5 \cdot 10^{41}$  эрг. Временные профили и спектральные характеристики всех рассмотренных повторных всплесков приведены в едином каталоге активности репитеров по результатам экспериментов Конус [8].

Открытие источников мягких повторных всплесков началось с наблюдения знаменитого сверхмощного гамма-всплеска 5 марта 1979 г. [9] в SGR 0526-66. Однозначный ответ на вопрос, являются ли такие события типичными и закономерными для всех SGR или же эта гигантская вспышка была уникальным эпизодом в истории только одного объекта, был получен 27 августа 1998 г., когда несколько космических аппаратов зарегистрировали [10, 11, 12] гигантскую вспышку в SGR 1900+14, поразительно похожую на вспышку 5 марта 1979 г. в SGR 0526-66. Наблюдениям события 27 августа 1998 г. в эксперименте Конус-Винд посвящена **глава 4**.



**Рис. 2:** Гигантская вспышка 27 августа 1998 г. Интенсивность излучения с  $E_{\gamma} > 15$  кэВ

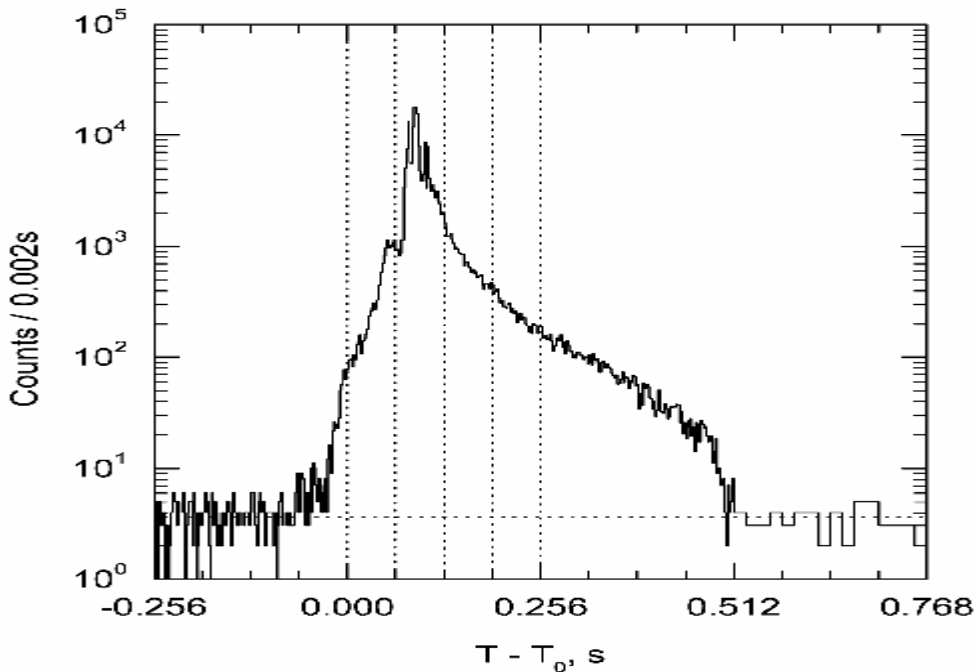
Общий вид временного профиля вспышки представлен на рис. 2. Как и в событии 5 марта 1979 г., вспышка начинается гигантским узким жестким импульсом, который быстро спадает и переходит в затянутый, медленно затухающий и пульсирующий «хвост». Вспышка 27 августа 1998 г. была беспрецедентна по своей интенсивности, пиковое значение потока жестких фотонов существенно превосходило величину, когда-либо наблюдавшуюся для любого из известных космических источников. Такой поток приводит к перекрытию импульсов в детекторе и насыщению в измерительном тракте. Наземные исследования запасного комплекта аппаратуры с использованием мощных радиоактивных источников и рентгеновской установки позволили воспроизвести жесткие условия наблюдения, а математическое моделирование поведения измерительного тракта спектрометра при больших нагрузках – восстановить временную картину начального импульса вспышки и определить нижний предел пикового и интегрального потока излучения и его спектральный состав.

Результаты приведены в таблице 1 вместе с характеристиками события 5 марта 1979 г. и данными по третьей гигантской вспышке, 27 декабря 2004 г. в SGR 1806-20. Из них следует, что вспышки в SGR 0526-66 и SGR 1900+14 сходны по характеристикам как жесткого короткого начального импульса, так и мягкого пульсирующего протяженного «хвоста», что подчеркивает общность механизмов их генерации.

**Таблица 1.** Характеристики гигантских вспышек в SGR

Источник, расстояние	SGR 0526-66 (55 кпк)	SGR 1900+14 (10 кпк)	SGR 1806-20 (15 кпк)
Вспышка	5 марта 1979	27 августа 1998	27 декабря 1998
Диапазон наблюдений, кэВ	> 30	> 15	> 16.5
Жесткий начальный импульс			
Длительность, сек	~ 0.25	~ 0.35	~ 1
Время нарастания, мс	< 2 мс	~ 4 мс	~ 6 мс
Спектр. параметр кТ, кэВ	~ 500	~ 300	~ 700
Интегральн. поток, эрг см <sup>-2</sup>	~ 4.5·10 <sup>-4</sup>	> 5.5·10 <sup>-3</sup>	~ 0.9
Полн. энерговыделение, эрг	~ 2·10 <sup>44</sup>	> 1·10 <sup>44</sup>	~ 2.3·10 <sup>46</sup>
Пиковый поток, эрг см <sup>-2</sup> сек <sup>-1</sup>	~ 1·10 <sup>-3</sup>	> 3·10 <sup>-2</sup>	~ 13
Макс светимость, эрг сек <sup>-1</sup>	~ 4·10 <sup>44</sup>	> 6·10 <sup>44</sup>	~ 3.5·10 <sup>47</sup>
Мягкий пульсирующий «хвост»			
Длительность, сек	> 70	~ 300	~ 380
Период пульсаций, сек	8.0	5.16	7.56
Спектр. параметр кТ, кэВ	~ 20	~ 30	20-25
Интегральн. поток, эрг см <sup>-2</sup>	~ 1·10 <sup>-3</sup>	~ 4.2·10 <sup>-3</sup>	~ 1.2·10 <sup>-2</sup>
Полн. энерговыделение, эрг	~ 1.6·10 <sup>44</sup>	~ 7.5·10 <sup>43</sup>	~ 2.1·10 <sup>44</sup>

**Глава 5.** Регистрация в июне-июле 1998г. в эксперименте Конус-Винд серии всплесков от недавно обнаруженного [13, 14] в эксперименте BATSE четвертого мягкого гамма-репитера SGR 1627-41 подтвердила открытие нового источника. Изучение временных историй и энергетических спектров событий показало, что интегральный и пиковый поток регистрируемого излучения находятся в характерных для SGR интервалах,  $3 \cdot 10^{-7}$  -  $7 \cdot 10^{-6}$  эрг см<sup>-2</sup> и  $10^{-5}$  -  $10^{-4}$  эрг см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup> соответственно. Как и у других репитеров, энергетический спектр излучения повторных всплесков мягкий, спектральный параметр кТ лежит в интервале 15–25 кэВ. В части событий наблюдалась выраженная спектральная переменность.



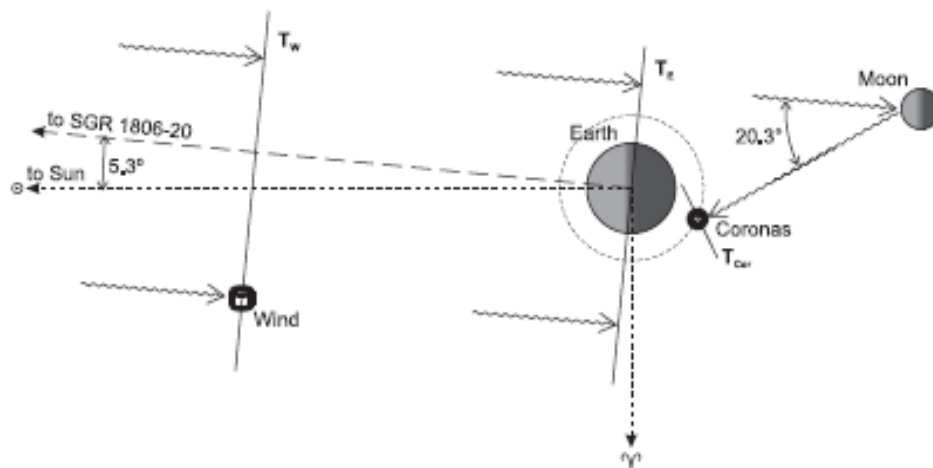
**Рис. 3:** Вспышка 18 июня 1998 г. в SGR 1627-41.  $T_0 = 6153.5$  сек UT.  
Интенсивность излучения с  $E_\gamma > 15$  кэВ

Одно из событий в SGR 1627-41, зарегистрированное 18 июня 1998 г. в 6153.5 сек UT, очевидно выделяется из общей совокупности своей интенсивностью. При длительности  $\sim 0.5$  сек (рис. 3) интегральный поток излучения составляет  $\sim 7 \cdot 10^{-4}$  эрг см<sup>-2</sup>, достигая пиковой величины  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  эрг см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>. Эти значения были получены с использованием методики восстановления характеристик излучения при перекрытии импульсов в детекторе, описанной в предыдущей главе. В предположении расстояния до репитера  $\sim 11$  кпк [15] оценка изотропного энерговыделения в источнике составляет  $\sim 1 \cdot 10^{43}$  эрг при максимальной светимости  $\sim 3 \cdot 10^{44}$  эрг сек<sup>-1</sup>, что близко к характеристикам начальных импульсов

событий 5 марта 1979 г. (SGR 0526-66) и 27 августа 1998 г. (SGR 1900+14). В то же время, отсутствие характерного для гигантских вспышек протяженного «хвоста», модулированного вращением нейтронной звезды, делает данное событие уникальным.

**Глава 6** посвящена наблюдениям гигантской вспышки 27 декабря 2004 г. в SGR 1806-20. По своему виду она аналогична ранее наблюдавшимся событиям в SGR 0526-66 (5 марта 1979 г.) и SGR 1900+14 (27 августа 1998 г.), значительно превосходя их по интенсивности. Полное насыщение сцинтилляционного детектора спектрометра Конус-Винд в начальном импульсе события длилось  $\sim 500$  мс (ср.  $\sim 200$  мс в событии 27 августа 1998 г.), что исключает возможность непосредственного измерения интенсивности, временного хода и энергетического спектра излучения в этот период. В такой ситуации исключительно благоприятным обстоятельством явилась регистрация гамма-спектрометром Геликон на спутнике Коронас-Ф ослабленного сигнала комптоновского обратного рассеяния излучения начального импульса Луной.

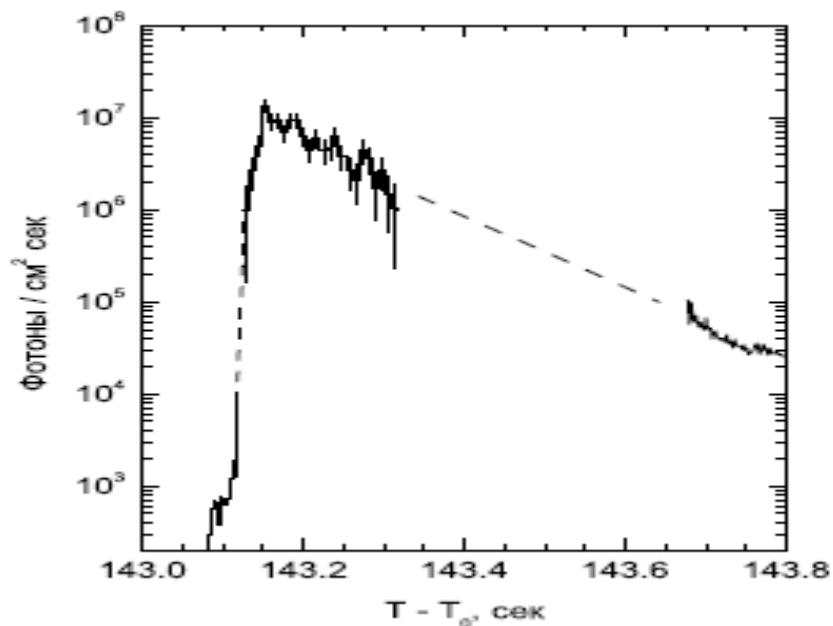
Схема, иллюстрирующая наблюдения гигантской вспышки приборами Конус-Винд и Геликон-Коронас-Ф, приведена на рис. 4. Фронт вспышки от SGR 1806-20 приходит на Wind в момент  $T_W$ , проходит Землю в момент  $T_E = T_W + 5.086$  сек, достигает Луны и отражается от нее. В момент  $T_{Cor} = T_W + 7.69$  сек Геликон, экранированный от прямого излучения SGR 1806-20 Землей, зарегистрировал в триггерном режиме с временным разрешением 2.048 мс слабый короткий всплеск отраженного от Луны излучения начального импульса вспышки, длившийся  $\sim 180$  мс. За это время были измерены два многоканальных спектра с накоплением по 65.536 мс.



**Рис. 4:** Схема наблюдения гигантской вспышки 27 декабря 2004 г. приборами Конус-Винд и Геликон-Коронас-Ф.

Таким образом, данные Геликона дают возможность определить по измеренному спектру рассеянного излучения спектр и интенсивность

начального импульса вспышки, а по профилю отраженного сигнала восстановить временную историю самой интенсивной части вспышки. С этой целью методом Монте-Карло проведено численное моделирование рассеяния плоского потока гамма-излучения энергией 20 кэВ – 12 МэВ в сферическом поверхностном слое Луны. Использовался пакет программ GEANT4, разработанный в ЦЕРНе [16]. Полученная матрица отклика была нормирована на телесный угол, под которым Луна наблюдалась со спутника, и свернута с матрицей отклика гамма-детектора Геликон. В таком виде матрица отклика системы Луна-Геликон преобразует дифференциальный фотонный спектр вспышки  $I(E)=A f(E)$  в спектр потерь энергии  $n_i(E')$ , измеряемый гамма-спектрометром. Для моделирования аппаратного спектра использовалась программа XSPEC v.11.3.2. Проверялись четыре спектральные модели: степенное распределение с экспоненциальным обрезанием, модель Банда, степенной закон и чернотельное излучение. Наилучшее согласие модельного спектра с измеренным дает первая модель:  $I(E)=A E^{-\alpha} \exp(-E/E_0)$ . Значение параметров, минимизирующих величину  $\chi^2 = 10.6/12 \text{ dof}$ , равны:  $A=(1.98\pm 0.45)\cdot 10^6 \text{ фот см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.73\pm 0.5$ ,  $E_0=666(-368/+1859) \text{ кэВ}$ .



**Рис. 5:** Восстановленная временная история начального импульса гигантской вспышки 27 декабря 2004 г. в SGR 1806-20. Верхняя часть графика восстановлена по данным Геликона, нижняя — по данным Конус-Винд. Штриховыми линиями обозначены интервалы, на которых интенсивность излучения такова, что уже насыщает детектор Конус-Винд, но недостаточна высока, чтобы отраженный сигнал был зарегистрирован Геликоном.

На рис. 5 приведен восстановленный по наблюдениям на Геликоне в интервале  $\Delta T=180 \text{ мс}$  участок временной истории начального импульса. Заключение в нем интегральный поток составляет  $\sim 0.9 \text{ эрг см}^{-2}$ . С

учетом экспоненциального спада интенсивности и смягчения спектра излучения эта величина характеризует всю энергию начального импульса.

По данным прибора Конус-Винд были определены временные и спектральные характеристики пульсирующего с периодом 7.56 сек хвоста вспышки. Излучение наблюдалось в течение  $\sim 380$  сек, мягкая часть фотонных спектров хорошо описывается распределением ОТТВ. Значение параметра  $kT$  коррелирует с интенсивностью излучения, спадая от  $\sim 60$  кэВ до характерных для повторных всплесков  $\sim 20$  кэВ. Жесткая часть спектров пульсаций обнаруживают существенную особенность, не замеченную ранее в двух других гигантских вспышках: при энергии  $\sim 200$  кэВ экспоненциальный завал с  $kT \sim 30$  кэВ переходит в жесткую степенную компоненту с показателем  $\gamma \sim -1.7$ , наблюдаемую вплоть до энергий  $\sim 10$  МэВ. С учетом приведенных спектральных характеристик заключенный в пульсирующем хвосте события интегральный поток энергии составит величину  $\sim 8 \cdot 10^{-3}$  эрг  $\text{см}^{-2}$ .

Наблюдалась еще одна особенность поведения SGR 1806-20 после вспышки. Мерегетти и др. [17] сообщили о наблюдении на спутнике INTEGRAL системой SPI-ACS появления и затухания на интервале от  $\sim 400$  сек до  $\sim 4000$  сек после начала события достаточно жесткого послесвечения источника с интегральным потоком, сравнимым с энергией в пульсирующем хвосте вспышки. Анализ фоновых измерений прибора Конус-Винд, возобновившихся через  $\sim 5000$  сек после  $T_0$ , показал, что послесвечение прослеживается до момента времени  $T - T_0 \sim 12000$  сек. Отношение жесткости в окнах G3 и G2 соответствует показателю степенного спектра  $\gamma \sim -1.6$ . Интегральный поток в наблюдаемой стадии послесвечения оценивается величиной  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  эрг  $\text{см}^{-2}$  в диапазоне 80-750 кэВ.

Рассматривая повторные всплески в SGR 1806-20, следует отметить, что с момента реактивации в мае 2004 г. до гигантской вспышки прибором Конус-Винд наблюдались три серии из большого числа повторных всплесков, заполняющих временной интервал в несколько минут: 5 октября 2004 г. (83 дня до вспышки), 21 декабря 2004 г. (6 дней до вспышки), 25 декабря 2004 г. (2 дня до вспышки). Появление подобных серий (как и серии 30 мая 1998 г. в SGR 1900+14, за 89 дней до гигантской вспышки) может свидетельствовать о предвспышечном состоянии источника.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Таким образом, в ходе данной работы:

1. Проведены наблюдения SGR 1900+14 в период реактивации источника с мая 1998 г. по январь 1999 г. с помощью спектрометра космических гамма-всплесков Конус на борту космической станции Винд. Определены индивидуальные характеристики повторных всплесков – их временные истории, энергетические спектры, максимальные и интегральные потоки энергии. Построены статистические распределения и зависимости. Сходство рассмотренных событий с повторными всплесками из других SGR подчеркивает единообразие механизма их эмиссии. Сравнение всплесковой активности SGR 1900+14 до и после гигантской вспышки 27 августа 1998 г. не выявило существенных различий в поведении источника.
2. 27 августа 1998 г. эксперименте Конус-Винд зарегистрирована гигантская вспышка в SGR 1900+14. Наземные исследования запасного детектора и математическое моделирование поведения измерительного тракта сцинтилляционного спектрометра в условиях перегрузки мощным потоком излучения позволили восстановить временную картину начального импульса вспышки и определить нижний предел пикового и интегрального потока излучения и его спектральный состав. Исследованы временные, спектральные и энергетические характеристики события, проведен его сравнительный анализ с гигантской вспышкой 5 марта 1979 г. в SGR 0526-66. Сходство характеристик вспышек подчеркивает единство механизма их генерации.
3. Наблюдения источника SGR 1627-41 в июне-июле 1998 г., в первый и единственный до настоящего времени известный период его активации, позволили подтвердить открытие нового репитера. Исследованы временные истории и энергетические спектры повторных всплесков, спектральная переменность излучения. Зарегистрировано уникальное события 18 июня 1998 г., по энергетике приближающееся к начальным импульсам гигантских вспышек, но не имеющее характерного затухающего «хвоста» излучения, модулированного вращением источника.
4. 27 декабря 2004 г. зарегистрирована гигантская вспышка в SGR 1806-20. По своему виду вспышка аналогична двум известным вспышкам в SGR 0526-66 и SGR 1900+14, существенно превосходя

их по интенсивности. По данным Конус-Винд определены временные и спектральные характеристики пульсирующего хвоста вспышки. Обнаружено, что его мягкие спектры содержат также жесткую степенную компоненту, наблюдаемую до 10 МэВ. В диапазоне до 1 МэВ прослеживается слабое послесвечение SGR 1806-20, спадающее на протяжении нескольких часов. Рассмотрена общая картина активности SGR 1806-20 в испускании повторных всплесков до и после гигантской вспышки.

5. Огромный поток рентгеновского и гамма-излучения в узком начальном импульсе гигантской вспышки 27 декабря 2004 г. от SGR 1806-20 приводит к практически мгновенному глубокому насыщению гамма-детекторов аппаратуры Конус-Винд, что исключает возможность непосредственного измерения параметров начального импульса. В этой ситуации исключительно благоприятным обстоятельством явилась регистрация гамма-спектрометром Геликон на спутнике Коронас-Ф ослабленного сигнала комптоновского рассеяния излучения начального импульса Луной. Моделирование процесса взаимодействия излучения с лунной поверхностью и последующая обработка отраженного сигнала впервые позволили получить достоверные временные, энергетические и спектральные характеристики начального импульса гигантской вспышки от мягкого гамма-репитера в нашей галактике.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Il'inskiy V.N., Mazets E.P., Panov V.N., Sokolova Z.Ya., Terekhov M.M., Sheshin L.O. **Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft** // Space Sci. Rev., v. **71**, p. 265-272 (1995)

Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Il'inskiy V.N., Mazets E.P., Pal'shin V.D., Butterworth P.S., Cline T.L. **Konus Catalog of Soft Gamma Repeater Activity: 1978 to 2000** // Astrophys. J. Suppl. Ser., v. **137**, p. 227-277 (2001)

Feroci M., Mereghetti S., Woods P., Kouveliotou C., Costa E., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Hurley K., Mazets E., Soffitta P., Tavani M. **The 2001 April Burst Activation of SGR 1900+14: X-Ray Afterglow Emission** // Astrophys. J., v. **596**, p. 470-476 (2003)



Hurley K., Cline T., Mazets E., Barthelmy S., Butterworth P., Marshall F., Palmer D., Aptekar R., Golenetskii S., Il'inskii V., Frederiks D., Mctiernan J., Gold R., Trombka J. **A giant periodic flare from the soft gamma-ray repeater SGR 1900+14** // Nature, v. **397**, p. 41-43 (1999)

Hurley K., Kouveliotou C., Woods P., Mazets E., Golenetskii S., Frederiks D., Cline T., van Paradijs J. **Precise Interplanetary Network Localization of a New Soft Gamma Repeater, SGR 1627-41** // Astrophys. J., v. **519**, p. L143-L145, (1999)

Hurley K., Kouveliotou C., Woods P., Cline T., Butterworth P., Mazets E., Golenetskii S., Frederiks D. **Reactivation and Precize Interplanetary Network Localization of Soft Gamma Repeater SGR 1900+14** // Astrophys. J., v. **510**, p. L107-L109 (1999)

Мазец Е.П., Клайн Т.Л., Аптекарь Р.Л., Баттерворт П.С., Голенецкий С.В., Ильинский В.Н., Пальшин В.Д., Фредерикс Д.Д. **Активность мягкого гамма-репитера SGR 1900+14 в 1998 г. по наблюдениям в эксперименте Конус-Винд. Короткие повторные всплески** // Письма в Астрон. журн., т. **25**, вып. 10, с. 727-734 (1999)

Мазец Е.П., Клайн Т.Л., Аптекарь Р.Л., Баттерворт П.С., Голенецкий С.В., Ильинский В.Н., Пальшин В.Д., Фредерикс Д.Д. **Активность мягкого гамма-репитера SGR 1900+14 в 1998 г. по наблюдениям в эксперименте Конус-Винд. Гигантская вспышка 27 августа** // Письма в Астрон. журн., т. **25**, вып. 10, с. 735-749 (1999)

Mazets E.P., Aptekar R.L., Butterworth P.S., Cline T.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Hurley K., Il'inskii V.N. **Unusual Burst Emission from the New Soft Gamma Repeater SGR 1627-41** // Astrophys. J., v. **519**, p. L151-L153 (1999)

Фредерикс Д.Д., Голенецкий С. В., Пальшин В.Д., Аптекарь Р.Л., Ильинский В.Н., Олейник Ф.П., Мазец Е.П., Клайн Т.Л. **Гигантская вспышка в SGR 1806-20 и ее комптоновское отражение от Луны** // Письма в Астрон. журн., т. **33**, вып. 11, с. 3-21 (2007)

## ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

1. Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., et al. // *Space Sci. Rev.*, **71**, 265 (1995)
2. Thompson C., Duncan R.C. // *MNRAS*, **275**, 255 (1995)
3. Thompson C., Duncan R.C. // *Astrophys. J.*, **473**, 322 (1996)
4. Мазец Е.П., Голенецкий С.В., Гурьян Ю.А. // *Письма в Астрон. жур*, **5**, 64 (1979)
5. Kouveliotou C., Fishman G.J., Meegan C.A. , et al. // *Nature*, **362**, 728 (1993)
6. Hurley K., Kouveliotou C., Mazets E., Cline T. // *IAU Circular* 6929 (1998)
7. Case G.L., Bhattacharya D. // *Astrophys. J.*, **504**, 761 (1998)
8. Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **137**, 227 (2001)
9. Mazets E.P., Golenetskii S.V., Il'inskii V.N. , et al. // *Nature*, **282**, 587 (1979)
10. Cline T.L., Mazets E.P., Golenetskii S.V. // *IAU Circular* 7002 (1998)
11. Hurley K., Cline T., Mazets E., et al. // *Nature*, **397**, 41 (1999)
12. Feroci M., Frontera F., Costa E., et al. // *Astrophys. J.*, **515**, L9 (1999)
13. Kouveliotou C., Dieters S., Strohmayer T., et al. // *Nature*, **393**, 235 (1998)
14. Woods P.M., Kouveliotou C., van Paradijs J., et al. // *Astrophys. J.*, **519**, L139 (1999)
15. Corbel S., Chapuis C., Dame T.M., et al. // *Astrophys. J.*, **526**, L29 (1999)
16. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. // *NIM A*, **506**, 250 (2003)
17. Mereghetti, S., Gotz, D., von Kienlin A., et al. // *Astrophys. J.*, 624, L105 (2005)