

ПО ИТОГАМ ПРОЕКТОВ  
РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Проект РФФИ # 09-02-00166а

## Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в российско-американском эксперименте Конус-Винд

Е. П. Мазец, Р. Л. Аптекарь<sup>1)</sup>, С. В. Голенецкий, Т. Л. Клайн<sup>+</sup>, Ф. П. Олейник, Д. С. Свинкин, М. В. Уланов,  
Д. Д. Фредерикс, А. Е. Цветкова

Физико-технический институт им. Иоффе, 194021 С.-Петербург, Россия

<sup>+</sup>NASA's Goddard Space Flight Center, 8800 Greenbelt Road, Greenbelt, MD 20771, USA

Поступила в редакцию 24 августа 2012 г.

Кратко рассмотрены результаты исследований космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров, полученные в российско-американском эксперименте Конус-Винд на протяжении ряда последних лет. Эксперимент проводится с помощью российской научной аппаратуры Конус на американском космическом аппарате “Винд” непрерывно с 1994 г. в оптимальных условиях межпланетного пространства при отсутствии помех от радиационных поясов Земли и затенения детекторов. Два высокочувствительных детектора аппаратуры постоянно осматривают всю небесную сферу и регистрируют детальные временные и спектральные характеристики всплесков в широком диапазоне энергий (20 кэВ – 15 МэВ). Данные эксперимента Конус-Винд широко востребованы в современных всеволновых исследованиях гамма-всплесков.

**1. Введение.** Всплески космического гамма-излучения представляют собой распространяющиеся в межзвездном пространстве нашей Вселенной высокоинтенсивные импульсные потоки фотонов, основная доля энергии которых приходится на интервал от десятков кэВ до десятков МэВ. Когда такая очень тонкая волна фотонов движется сквозь Солнечную систему и регистрируется гамма-детекторами на борту космических аппаратов, наблюдатель видит то, что известно как космические гамма-всплески. Направление на источники всплесков заранее не известно. Длится он от десятков миллисекунд до тысяч секунд. Гамма-всплески были открыты в 1967–1973 гг. на американских спутниках “Вела” [1]. Одно из первых независимых подтверждений этого открытия было дано в наблюдениях на спутнике Космос-461 [2]. Первые всесторонние исследования этого необычного астрофизического явления были проведены в ФТИ им. А.Ф.Иоффе в экспериментах КОНУС на межпланетных станциях Венера 11–14 в 1979–1983 гг. [3–6]. В них впервые были определены основные характеристики временных профилей и энерге-

тических спектров гамма-всплесков. Было установлено, что распределение их источников по небесной сфере носит случайный характер. Был открыт новый редкий класс астрофизических объектов, позднее получивший название “мягкие гамма-репитеры” (Soft Gamma Repeaters, SGRs). Результаты эксперимента КОНУС были подтверждены на большей статистике событий в американском эксперименте BATSE (Burst And Transient Source Experiment) на орбитальной обсерватории Compton [7].

Принципиально важным в исследованиях гамма-всплесков стало обнаружение 28 февраля 1997 г. европейским спутником ВерроSAX рентгеновского послесвечения источника гамма-всплеска (GRB970228). Эти данные были переданы на Землю в режиме реального времени [8]. Исследования источника всплеска в широком диапазоне длин волн на наземных телескопах привели к обнаружению оптического послесвечения всплеска и к определению его красного смещения [9]. Результаты последующих наблюдений показали, что по крайней мере часть источников гамма-всплесков находится на космологических расстояниях с красным смещением  $z \sim 1$  и более [10]. Следовательно, наблюдаемые события имели место

<sup>1)</sup> e-mail: aptekar@mail.ioffe.ru

в ранней Вселенной миллиарды лет назад. Оценки энергии всплесков в предположении изотропности излучения составляют  $\sim 10^{52} - 10^{54}$  эрг, что сравнимо с массой покоя Солнца.

Задача выяснения природы космических гамма-всплесков как источников экстремального взрывного выделения гигантских потоков электромагнитной энергии является одной из приоритетных в программах фундаментальных космических исследований многих стран. В 2004 г. был запущен американский спутник Swift, телескоп BAT которого локализует источники гамма-всплесков с точностью в несколько угловых минут и транслирует эти данные на Землю в режиме реального времени [11]. Два других телескопа этой миссии – рентгеновский телескоп XRT и ультрафиолетовый телескоп UVOT – оперативно (в течение примерно 1 мин) автоматически наводятся на источник всплеска и начинают его исследование. Успешное многолетнее функционирование спутника Swift оказало кардинальное влияние на развитие современных всеволновых исследований источников космических гамма-всплесков на широкой сети наземных телескопов. С 2008 г. успешно работает американская миссия Fermi, в составе которой имеются гамма-телескоп высоких энергий LAT и набор спектрометрических детекторов гамма-всплесков GBM [12, 13]. Тем самым диапазон исследования гамма-излучения всплесков расширен до  $\sim 300$  ГэВ.

По распространенным представлениям излучение коротких (с длительностью менее 2 с) гамма-всплесков связано с коллапсом релятивистских объектов, в роли которых рассматриваются две нейтронные звезды или нейтронная звезда и черная дыра. Длинные гамма-всплески (с длительностью более 2 с) связываются с коллапсом ядер массивных звезд с образованием черной дыры или магнитара. Обзор современных теоретических моделей источников гамма-всплесков и механизмов генерации в них электромагнитного излучения содержится в [14–16]. Результаты и ключевые проблемы экспериментальных исследований гамма-всплесков рассмотрены в [17, 18]. С увеличением числа обнаруженных гамма-всплесков с известным красным смещением стало интенсивно развиваться направление исследований, связанное с их использованием для анализа процессов, происходивших на ранних стадиях развития Вселенной [19, 20].

Исследования космических гамма-всплесков в экспериментах ФТИ им. А.Ф.Иоффе были продолжены в российско-американском эксперименте Конус-Винд на околоземных космических аппаратах

Космос-2326, Космос-2367 и Космос-2421, а также астрофизических солнечных космических обсерваториях Коронас-И, Коронас-Ф и КОРОНАС-ФОТОН. Краткий обзор результатов этих наблюдений содержится в [21, 22]. В настоящей статье рассматриваются результаты эксперимента Конус-Винд, полученные на протяжении нескольких последних лет.

**2. Методика наблюдений гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд.** Российско-американский эксперимент по исследованию космических гамма-всплесков успешно проводится на американском космическом аппарате Wind с помощью научной аппаратуры КОНУС ФТИ им. А.Ф.Иоффе непрерывно с ноября 1994 г. Орбита и условия наблюдения гамма-всплесков в эксперименте исключительно благоприятны. Детекторы аппаратуры постоянно осматривают всю небесную сферу в оптимальных условиях межпланетного пространства при стабильном радиационном фоне и в отсутствие помех от радиационных поясов и затенения Землей.

Аппаратура Конус-Винд представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр, состоящий из двух идентичных спектрометрических детекторов гамма-квантов и электронного блока для регистрации и предварительной обработки сигналов детекторов [23]. Каждый детектор содержит кристалл NaJ(Tl) диаметром 130 мм и высотой 75 мм, помещенный в тонкостенный алюминиевый контейнер с бериллиевым входным окном и выходным окном из свинцового стекла высокой прозрачности для защиты от фона космического аппарата в мягкой области спектра. Такой детектор обеспечивает низкий энергетический порог регистрации излучения (от 10–12 кэВ), диапазон регистрации гамма-квантов до 15 МэВ с энергетическим разрешением 8.5 – 9.0 % на линии 660 кэВ  $^{137}\text{Cs}$  и чувствительность обнаружения всплесков на уровне  $\sim 10^{-7}$  эрг · см $^{-2}$ . По ширине энергетического диапазона и степени защиты от фона космического аппарата эти детекторы не имеют аналогов в мировой практике наблюдений гамма-всплесков. Детекторы размещены на стабилизированном вращении космическом аппарате таким образом, что они непрерывно осматривают северную и южную полусферы эклиптики.

Аппаратура постоянно находится в режиме ожидания всплеска. Она начинает автоматически регистрировать с высоким временным разрешением информацию о гамма-всплеске, как только статистически значимое увеличение скорости счета гамма-квантов фиксируется ячейкой выделения всплеска. В настоящее время запись временных профилей всплес-

ков осуществляется в энергетических интервалах 20–80, 80–300 кэВ и 300–1200 кэВ с временным разрешением от 2 до 256 мс и общей длительностью записи 230 с. Стандартная программа регистрации временных профилей событий обеспечивает временное разрешение 2 мс на протяжении первых 0.5 с длительности всплеска и в течение 0.5 с “предыстории”. В аппаратуре имеются также два специальных временных анализатора (так называемые временные нониусы), которые позволяют регистрировать с высоким временным разрешением, равным 2 мс, любую часть профиля события, содержащую резко выраженные увеличения скорости счета гамма-квантов.

Энергетические спектры событий измеряются с помощью двух многоканальных амплитудных анализаторов с квазилогарифмической шкалой в двух интервалах энергии: 20–1100 кэВ и 350 кэВ–15 МэВ. Специальная адаптивная система автоматически регулирует время набора спектра в зависимости от интенсивности всплеска. Это позволяет получать данные о быстрой спектральной переменности даже для слабых событий в условиях ограниченной статистики. Номинальное значение нижних энергетических порогов детекторов в начале эксперимента составляло 12 кэВ. При многолетней непрерывной работе коэффициенты усиления детекторов медленно уменьшались из-за деградации катодов фотоэлектронных умножителей. Возможности их коррекции по командам с Земли были исчерпаны в 1997 г. По состоянию на июль 2012 г. нижний порог детектора, осматривающего южную небесную полусферу, составляет 21.5 кэВ, северную – 18.5 кэВ. Для удобства сравнения при обработке данные приводятся к порогу 20 кэВ в обоих детекторах. Опыт многолетних наблюдений гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд и их сравнение с данными других приборов подтвердили оптимальность выбранного алгоритма регистрации основных характеристик космических гамма-всплесков.

Методика восстановления исходного спектра гамма-излучения из инструментальных спектров, зарегистрированных аппаратурой Конус-Винд, содержится в [24]. В настоящее время эта методика усовершенствована путем использования более современной версии программы для расчета матрицы отклика детекторов (на базе пакета GEANT4) и программы XSPEC версия 12 для моделирования измеренных спектров гамма-излучения всплесков общепринятыми функциями степенной зависимости (PL-модель), степенной зависимости с экспоненциальным “завалом” (COMP-модель) и функцией Банда [25].

Измерения спектральных параметров гамма-всплесков существенны для понимания физики процессов, происходящих в источниках при генерации излучения. Наблюдения энергетических спектров космических гамма-всплесков в настоящее время осуществляются в различных экспериментах. Корректное сравнение их результатов необходимо для интерпретации многочисленных эмпирических соотношений, предложенных для описания гамма-излучения всплесков. Была выполнена совместная спектральная обработка (кросс-калибровка) спектральных измерений 14 гамма-всплесков, одновременно зарегистрированных аппаратурой Конус-Винд, BAT/Swift и WAM/Suzaku [26]. Все три перечисленных прибора отличаются по конструкции и методике регистрации гамма-излучения всплесков. Аппаратура Конус-Винд представляет собой традиционный сцинтилляционный гамма-спектрометр [23]. Телескоп BAT/Swift представляет собой уникальный по характеристикам детектор с кодированной апертурой и матрицей из большого числа детекторов теллурида кадмия, предназначенный для высокоточного определения координат источников всплесков [11]. Его энергетический интервал ограничен диапазоном 15–150 кэВ. В аппаратуре WAM/Suzaku для спектрометрии излучения всплесков используется набор сцинтилляционных детекторов системы защиты рентгеновского телескопа, функционирующий в режиме антисовпадений [27]. Он имеет большую площадь чувствительной поверхности в широком интервале энергий (50 кэВ–5 МэВ). Однако условия светосбора от различных частей детектора могут заметно отличаться. Результаты сравнения спектральных измерений показали, что хотя нормирующие постоянные факторы всех трех приборов совпадают в пределах 20 %, нормирующий фактор BAT/Swift примерно на 10–20 % меньше аналогичного фактора аппаратуры Конус-Винд. Имеется систематическая тенденция увеличения наклона низкоэнергетического показателя степени на 0.1–0.2 и пиковой энергии на 10–20 % при включении в совместное фитирование спектральной информации аппаратуры BAT/Swift. Фотонный индекс в области энергий от 1–2 до ~10 МэВ для всех трех приборов совпадает в пределах ~20 %. В настоящее время аналогичная процедура кросс-калибровки проводится для двух сходных по конструкции гамма-спектрометров всплесков – Конус-Винд и GBM/Fermi.

**3. Результаты наблюдений космических гамма-всплесков в эксперименте Конус-Винд, полученные на протяжении ряда последних**

лет. Основными преимуществами эксперимента Конус-Винд являются возможность постоянного обзора всей небесной сферы и широкий энергетический диапазон наблюдений в сочетании с оптимальной программой регистрации временных и спектральных характеристик гамма-всплесков. Этим определяется широкая востребованность данных эксперимента в современных всеволновых наблюдениях всплесков. Еще одну важную роль эксперимент Конус-Винд играет как базовый сегмент межпланетной сети космических аппаратов с детекторами гамма-излучения IPN (Interplanetary Network), которая локализует источники всплесков триангуляционным методом. Это был исторически первый и длительное время единственный метод локализации источников гамма-всплесков. В настоящее время сеть IPN включает в себя находящиеся на большом удалении миссии Mars Odyssey и MESSENGER. Благодаря этому в ряде случаев удается добиваться высокой точности локализации. Однако эти миссии работают по своим программам исследования планет Солнечной системы. Их данные не всегда доступны для задач оперативной локализации источников всплесков. Эксперимент же Конус-Винд постоянно отслеживает источники гамма-всплесков по всей небесной сфере. Его удаление от Земли может достигать 7 световых секунд.

Ярким примером эффективного участия эксперимента Конус-Винд во всеволновых наблюдениях являются исследования гамма-всплеска 19 марта 2008 г. Его оптическая светимость в максимуме достигала 5.3 звездной величины [28]. Этот всплеск мог быть виден невооруженным глазом. Детекторами Конус-Винд измерена детальная кривая яркости этого всплеска в диапазоне гамма-излучения от 18 до 1160 кэВ. На рис. 1 она приведена совместно с данными двух оптических мониторов, причем данные отечественного монитора ТОРТОРА имеют рекордное для оптической области временное разрешение в 0.1 с. По данным эксперимента Конус-Винд этот всплеск имел пиковый поток гамма-излучения в диапазоне 20 кэВ – 7 МэВ  $(3.26 \pm 0.21) \cdot 10^{-5}$  эрг·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, интегральный поток энергии в том же диапазоне  $(6.23 \pm 0.13) \cdot 10^{-4}$  эрг·см<sup>-2</sup> и изотропный эквивалент выделившейся в виде гамма-излучения энергии  $E = 1.3 \cdot 10^{54}$  эрг (для  $z = 0.937$ ). GRB080319B явился одним из самых мощных по выделившейся энергии зарегистрированных гамма-всплесков. Кривая яркости всплеска в гамма-излучении демонстрирует множество коротких пиков, не коррелирующих с пиками в оптическом диапазоне. Тем не менее гамма-излучение и оптическое излучение этого всплеска на-

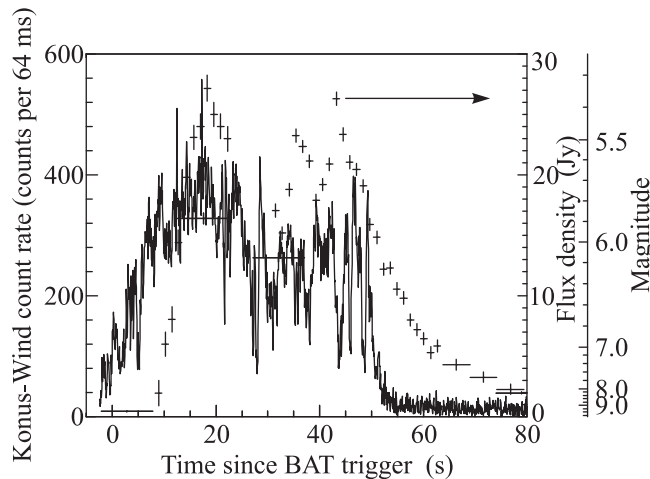


Рис. 1. Кривая яркости гамма-всплеска GRB080319B по данным эксперимента Конус-Винд в диапазоне энергий 18 – 1160 кэВ и данные оптических мониторов [28]

чинаются и заканчиваются практически в одно и то же время, предоставляя веское доказательство того, что они происходят из одной и той же области пространства. В эксперименте Конус-Винд были детально исследованы энергетические спектры гамма-излучения всплеска. Они демонстрируют сильную спектральную эволюцию в виде заметного смягчения излучения к концу основной фазы всплеска, регистрируемой по гамма-излучению (рис. 2). Усредненный по времени спектр гамма-излучения всплеска хорошо фитируется известной моделью Банда с коэффициентами наклона  $\alpha = -0.833$  в области низких энергий,  $\beta = -3.499$  в области высоких энергий и пиковой энергией  $E_p = 651 \pm 15$  кэВ. Сопоставление излучения этого всплеска в оптической, рентгеновской областях и гамма-области позволяет объяснить наблюдаемую картину с помощью двухкомпонентной модели релятивистского джета [29]. В соответствии с этой моделью гамма-излучение всплеска генерируется узким (с углом раствора  $\sim 0.4^\circ$ ) конусом ультра-релятивистских частиц, возникающих при образовании черной дыры. За послесвечение же всплеска отвечает окружающий его конус с углом раствора  $\sim 8^\circ$ .

Еще один исключительный по яркости гамма-всплеск был детально исследован в эксперименте Конус-Винд 18 сентября 2011 г. Всплеск был локализован сетью IPN, в которой для этого события были задействованы дальние миссии MESSENGER и Mars Odyssey. Специальная серия наблюдений телескопа XRT/Swift позволила обнаружить яркое рентгеновское послесвечение всплеска и наблюдать его эволюцию на протяжении более полутора месяцев. Затухание послесвечения GRB110918A описывается

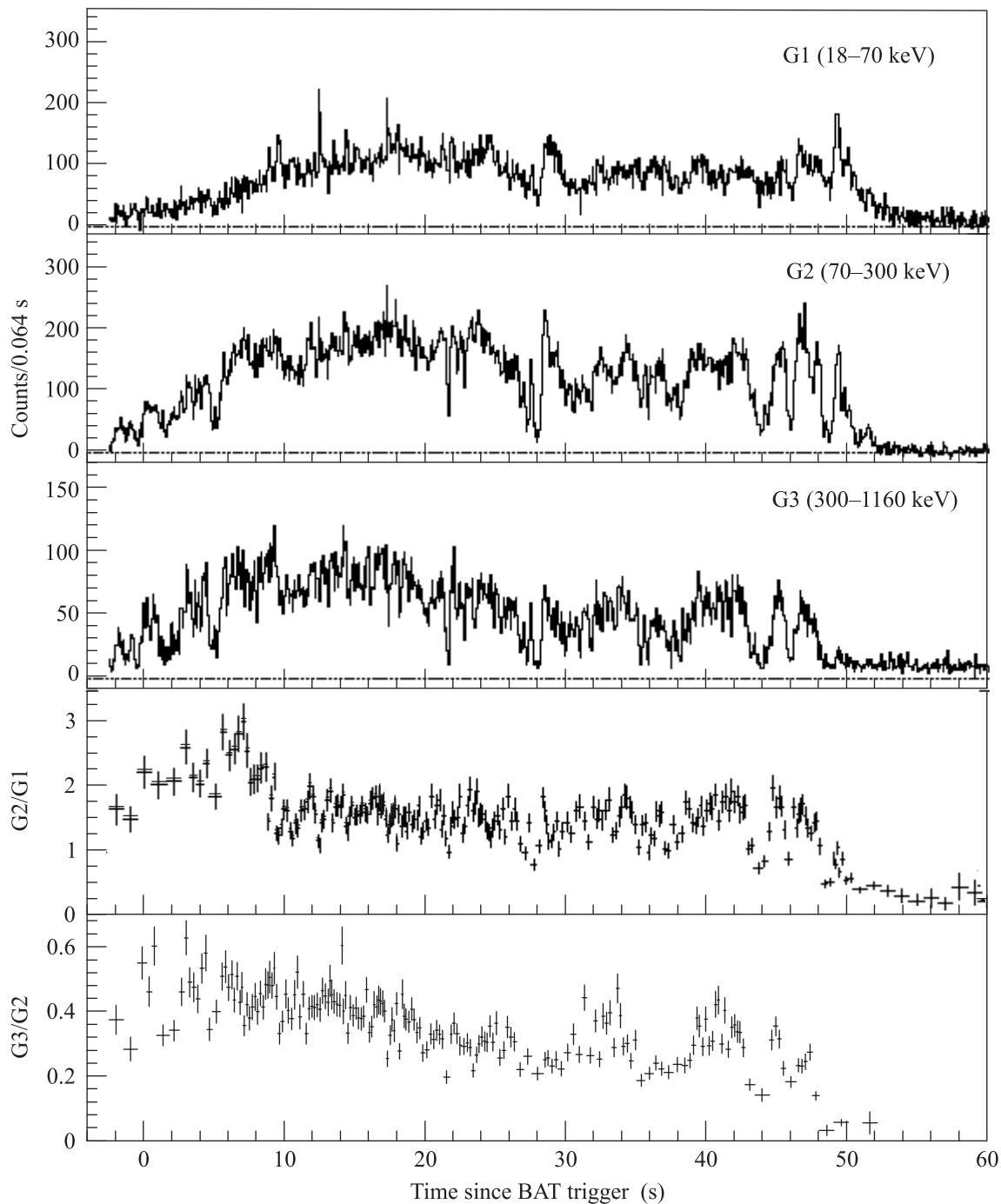


Рис. 2. Кривая яркости гамма-излучения GRB080319B в трех энергетических интервалах и данные об изменении жесткости излучения [28]

одним степенным законом с показателем  $\alpha = -1.62 \pm 0.03$ . По результатам наземных оптических наблюдений для этого события было определено  $z = 0.984 \pm 0.001$  [30]. По данным эксперимента Конус-Винд этот всплеск имел интегральный поток энергии в диапазоне 20 кэВ–7 МэВ  $(7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$  эрг·см $^{-2}$ ,

пиковую изотропную светимость в собственной системе отсчета  $4.4 \cdot 10^{54}$  эрг $^{-1}$  и изотропный эквивалент выделившейся в виде гамма-излучения энергии в диапазоне 20 кэВ–7 МэВ  $E = 1.9 \cdot 10^{54}$  эрг. Всплеск 18 сентября 2011 г. оказался самым интенсивным событием, зарегистрированным в эксперименте Конус-

Винд за более чем 17 лет непрерывных наблюдений в условиях межпланетного пространства.

Кривые яркости этого всплеска в трех энергетических окнах с временным разрешением 64 мс приведены на рис. 3. Всплеск начинается с резкого

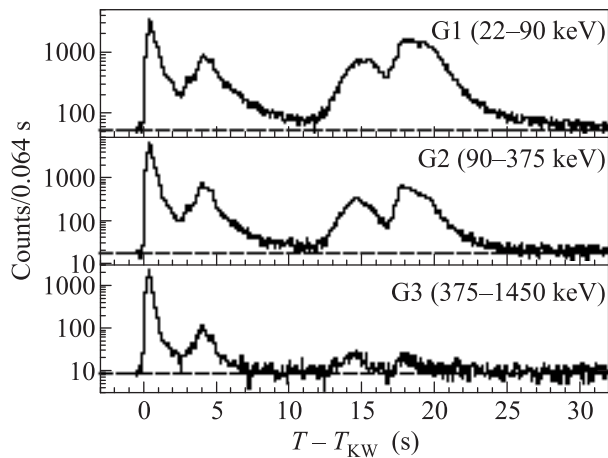


Рис. 3. Кривая яркости гамма-излучения GRB110918A, измеренная в эксперименте Конус-Винд с временным разрешением 64 мс в трех энергетических интервалах [31]. Четыре импульса события образуют две группы, различные по жесткости гамма-излучения

подъема интенсивности в виде короткого (с длительностью  $\sim 2$  с и передним фронтом  $\sim 350$  мс) жесткого импульса гамма-излучения. Скорость счета в пике этого импульса достигает величины  $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  и сохраняется на данном уровне в течение  $\sim 100$  мс. Второй, более слабый импульс длится до 7-й секунды всплеска. Третий и четвертый импульсы всплеска длятся с 13-й по 25-ю секунды события. Из сопоставления кривых блеска в разных энергетических окнах наглядно видно, что 3-й и 4-й импульсы события являются существенно более мягкими по энергии. Подробный анализ спектральной переменности всплеска приведен на рис. 4. На нем показаны кривые блеска с временным разрешением 16 мс и эволюция параметров модели гамма-всплеска Банда, полученных при фитировании индивидуальных спектров. На обеих фазах события наглядно видна корреляция интенсивности излучения с его жесткостью. В гигантском начальном импульсе пиковая энергия  $E_P$  удерживается в интервале 1–2 МэВ. С падением интенсивности она плавно уменьшается до 200–400 кэВ в области второго пика излучения. Вторая группа импульсов (правая панель) значительно мягче. Здесь  $E_P$  варьируется от 130 кэВ в максимуме третьего пика до 50 кэВ на спаде четвертого. Поведение фотонного индекса  $\alpha$  свидетельствует о значительном уплощении

мягкой части спектра в области передних фронтов и максимумов импульсов и об обратной тенденции на задних фронтах импульсов. “Жесткий” спектральный индекс  $\beta$ , испытывая слабые вариации, убывает по величине от  $-2$  в начале события до  $-3.5$  на его завершающей стадии. Результаты всеволновых исследований GRB110918A готовятся к публикации [31].

В синхронных наблюдениях миссии Swift и эксперимента Конус-Винд выполнено детальное исследование свойств необычного “двойного” всплеска 9 июля 2011 г. [32]. Это событие было зарегистрировано и локализовано телескопом BAT/Swift как два всплеска из одного источника с интервалом времени между ними около 500 с. Первый всплеск был зафиксирован детектором Конус-Винд в детальном режиме триггерного события с высоким временным разрешением. Второй всплеск был записан с помощью резервной фоновой программы, поскольку в это время происходил вывод в телеметрическую систему информации о первом событии. Кривые яркости этого события в интервале энергий от 0.3 до 1435 кэВ приведены на рис. 5 совместно с данными рентгеновского телескопа XRT/Swift. Совместный спектральный анализ данных по первому всплеску показал, что энергетические спектры на большей части временного профиля описываются степенной зависимостью с экспоненциальным “завалом”. Один интервал первого всплеска перед его завершением подчиняется простой степенной зависимости. Усредненные по времени спектры первого и второго импульсов с достаточной степенью точности также подчиняются степенной зависимости с экспоненциальным “завалом” с доминирующей тенденцией смягчения спектра к конечным стадиям первого и второго импульсов события. В соответствии с данными наблюдений в оптической области спектра, не выявившими оптического “напарника” этого необычного всплеска, делается вывод о том, что оба всплеска происходят из одного источника с впервые наблюдаемой “двухступенчатой” работой “центральной машины” всплеска, в предположении модели аккреции черной дыры и нейтронной звезды со сверхсильным магнитным полем.

Источник интенсивного гамма-всплеска GRB080721 и его послесвечение в рентгеновском и оптическом диапазонах длин волн наблюдали более месяца аппаратурой Конус-Винд, BAT/Swift, XRT/Swift, UVOT/Swift, европейским рентгеновским телескопом XMM-Newton и рядом наземных оптических телескопов [33]. Космологическое красное смещение этого всплеска составило  $z = 2.591$ . Для гамма-излучения всплеска был выполнен сов-

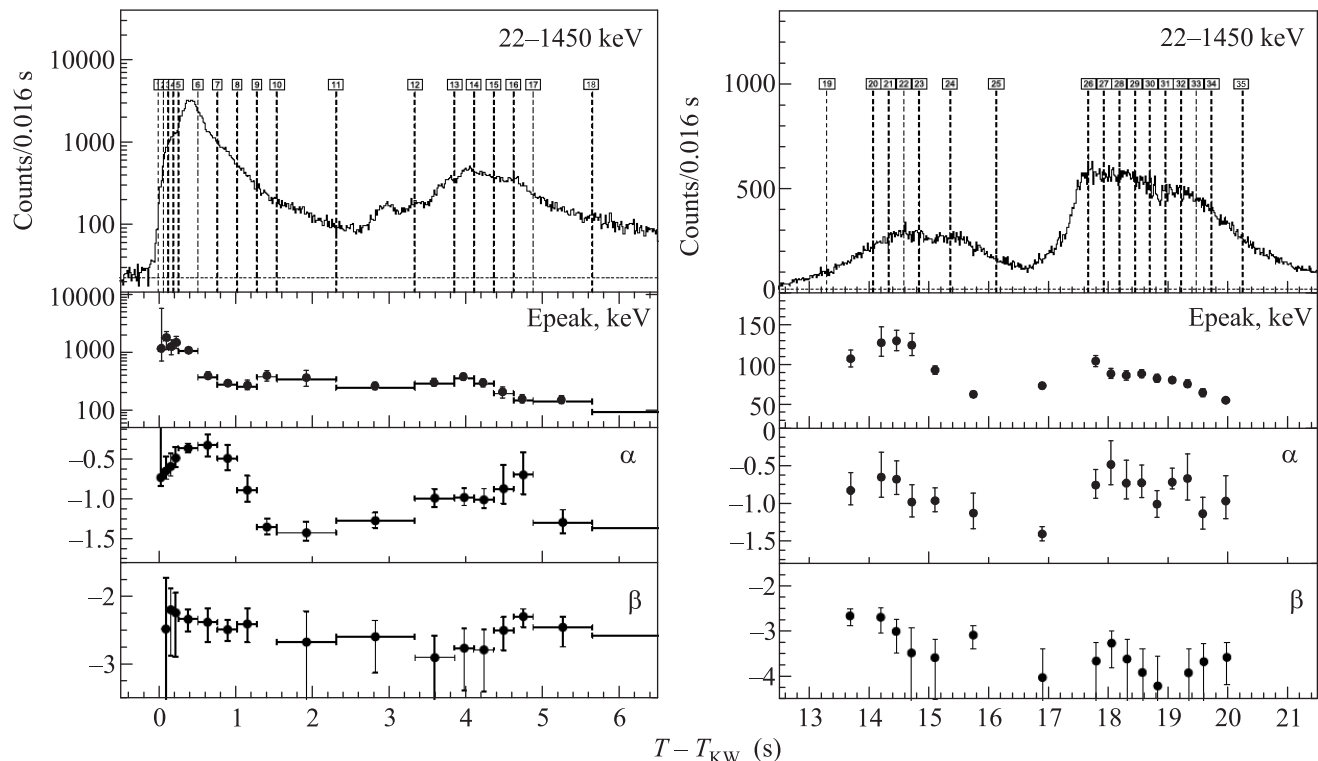


Рис. 4. Спектральная эволюция GRB110918A в первой (левая панель) и второй (правая панель) группе импульсов [31]

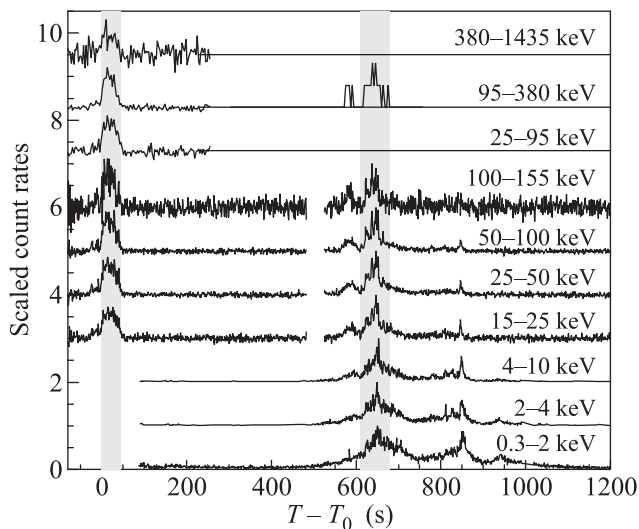


Рис. 5. Временной профиль “двойного” гамма-всплеска GRB110709B по данным эксперимента Конус-Винд и телескопов BAT/Swift и XRT/Swift [32]

местный спектральный анализ данных Конус-Винд и BAT/Swift в широком энергетическом диапазоне (20 кэВ – 7 МэВ), показавший, что оно следует функции Банда с индексами  $\alpha = -0.95$  и  $\beta = -2.42$  и пиковой энергией  $E_P = 497 \pm 62$  кэВ. Интегральный поток энергии этого всплеска в диапазоне 20 кэВ –

7 МэВ составлял  $(8.8 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$  эрг·см $^{-2}$ . Отсутствие излома в спектре послесвечения позволило в рамках модели фаербола поставить предел на угол коллимации, в котором генерируется гамма-излучение всплеска, в виде  $\theta_{jet} = 7.3^\circ$  и оценить энергетику всплеска как  $E_\gamma > 9.9 \cdot 10^{51}$  эрг.

Возможности постоянного мониторинга всей небесной сферы в эксперименте Конус-Винд позволяют исследовать такие необычные явления, как сверхдлинные гамма-всплески. Такие события регистрировались ранее по данным экспериментов Конус-Винд, BATSE и BAT/Swift и локализовались сетью IPN [34]. Сверхдлинный всплеск GRB080704, гамма-излучение которого регистрировалось на протяжении  $\sim 2100$  с и состояло из двух эпизодов, был локализован сетью IPN [35]. В этом случае область локализации второго эпизода включала в себя первый эпизод. Временной профиль всплеска показан на рис. 6. Второй эпизод был зарегистрирован в эксперименте Конус-Винд с помощью резервной фоновой программы, поскольку в это время происходил вывод в телеметрическую систему информации о первом эпизоде всплеска. Излучение в первом эпизоде фитируется моделью Банда с индексами  $\alpha = -1.02$  и  $\beta = -2.43$  и пиковой энергией  $E_P = 325$  кэВ в начальной стадии всплеска. В конечной стадии

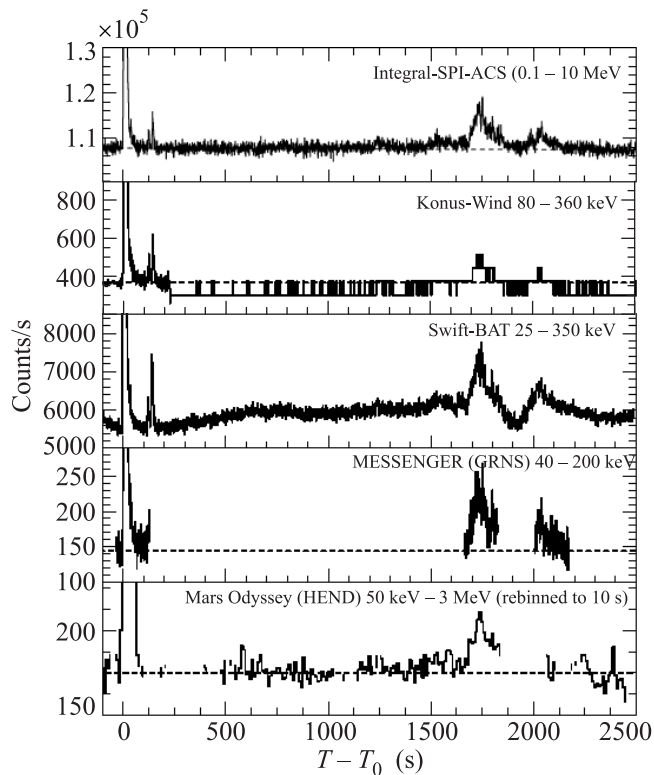


Рис. 6. Временной профиль первого эпизода GRB080704 по данным сети IPN [34]

первого эпизода излучение становится значительно мягче ( $E_p = 114$  кэВ). Интегральный поток энергии GRB080407 в диапазоне 20 кэВ–1 МэВ составляет  $4.4 \cdot 10^{-4}$  эрг·см $^{-2}$ . Сравнение с другими сверхдлинными всплесками показывает их подобие: достаточно длинные (до  $\sim 1500$  с) интервалы между эпизодами, заметная спектральная эволюция от начального жесткого импульса в первом эпизоде к заметно более мягкому излучению в последующих эпизодах и большой интегральный поток энергии, обусловленный длительностью всплесков.

Таким образом, в современную эпоху интенсивных всеволновых исследований космических гамма-всплесков эксперимент Конус-Винд предоставляет важные, часто уникальные данные о временных и энергетических свойствах их излучения в области 20 кэВ–15 МэВ.

**4. Результаты наблюдений мягких гамма-репитеров в эксперименте Конус-Винд.** Гамма-репитеры представляют собой редкий класс галактических источников повторяющихся мягких по спектру гамма-всплесков. Мягкие гамма-репитеры (SGRs) были открыты в 1979 г. в экспериментах КО-НУС на межпланетных станциях Венера 11–12 [36, 37]. Гамма-репитеры проявляют два вида активнос-

ти. Во-первых, это испускание мягких повторных всплесков с длительностью  $\sim 0.1$  с и с изотропным энерговыделением в источнике  $\sim 10^{39} - 10^{41}$  эрг. Периоды вспышечной активности репитеров крайне неравномерны во времени. Источники преимущественно находятся в стадии молчания, которая может длиться годами, прерываясь периодами интенсивной реактивации. Вторым, гораздо более впечатляющим видом активности репитеров являются гигантские вспышки – крайне редкие события, по пиковой мощности энерговыделения ( $10^{45} - 10^{47}$  эрг·с $^{-1}$ ) сопоставимые со светимостью квазаров. По общепринятым представлениям источниками излучения мягких гамма-репитеров являются молодые изолированные нейтронные звезды со сверхсильными магнитными полями (см. недавний обзор [38]). Краткий обзор результатов исследований мягких гамма-репитеров в экспериментах ФТИ им. А.Ф. Иоффе приведен в [21, 22]. Ниже приводятся результаты наблюдений мягких гамма-репитеров, полученные в эксперименте Конус-Винд на протяжении нескольких последних лет.

В августе 2008 г. американской миссией Swift был открыт новый мягкий гамма-репитер SGR0501+4516 [39, 40]. Всплески, которые были при этом зарегистрированы, оказались слишком мягкими и слабыми и не детектировались аппаратурой Конус-Винд в триггерном режиме. На протяжении нескольких последующих дней в эксперименте было зафиксировано и детально исследовано пять интенсивных всплесков от нового источника в диапазоне энергий 20–300 кэВ [41]. На рис. 7 приведены их временные профили. Для одного из этих событий на рис. 8 показано изменение жесткости в ходе всплеска, наглядно иллюстрирующее корреляцию жесткость–интенсивность. Анализ данных показал, что для всех пяти зарегистрированных всплесков от нового источника характерна сильная спектральная переменность, которая проявляется в виде изменений отношения скоростей счета в каналах G1 (20–70 кэВ) и G2 (70–300 кэВ) в ходе всплеска. Спектры всплесков достаточно хорошо описывались степенной зависимостью с экспоненциальным “завалом” и соответствовали модели тормозного теплового излучения оптически тонкой плазмы, которая широко используется для описания спектров повторных всплесков гамма-репитеров. Длительности, профили и энергетические спектры всплесков от нового источника SGR0501+4516 являются типичными для повторных всплесков репитеров. Необычным в их поведении оказалась сильная спектральная переменность излучения повторных всплесков нового репитера. По-



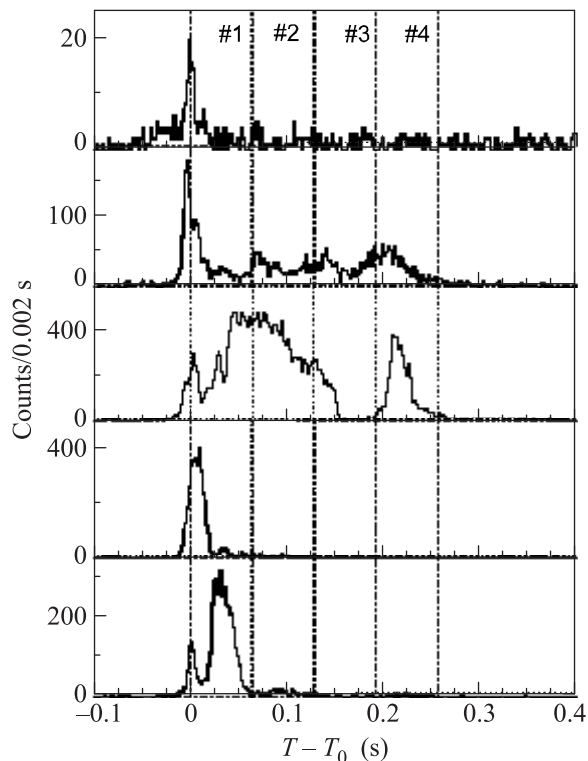


Рис. 7. Временные профили 5 повторных всплесков от репитера SGR0501+4516 по данным эксперимента Конус-Винд с временным разрешением 2 мс [41]

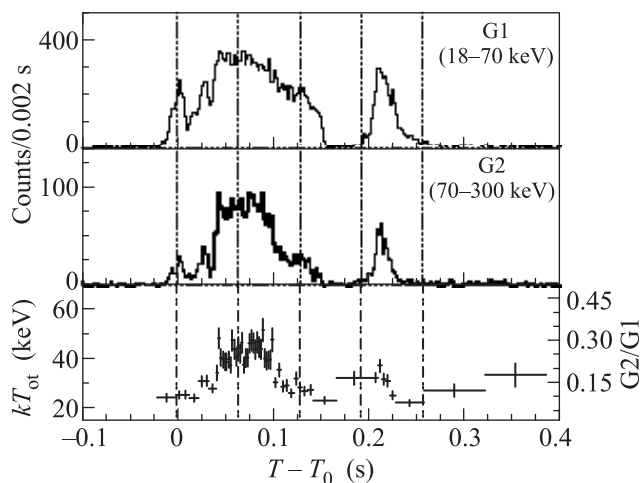


Рис. 8. Временной профиль и вариации параметра  $kT$  для повторного всплеска от репитера SGR0501+4516 24 августа 2008 г. по данным эксперимента Конус-Винд [41]

добная корреляция жесткости излучения повторных всплесков и их интенсивности ранее наблюдалась для гамма-репитера SGR1627-41 также в эксперименте Конус-Винд [42].

Длительные многолетние наблюдения в оптимальных условиях межпланетного пространства обеспечили эксперименту Конус-Винд важное преимущество в исследованиях таких чрезвычайно редких событий, как гигантские всплески мягких гамма-репитеров. В эксперименте были зарегистрированы и детально изучены как гигантские вспышки SGR1900+14 в августе 1998 г. [43-45] и SGR1806-20 в декабре 2004 г. [46], так и периоды повышенной всплесковой активности репитеров. Недавно были опубликованы результаты синхронных наблюдений в экспериментах Конус-Винд, RXTE и Chandra периодов активности SGR1806-20 за 6 и 1.5 месяца до гигантской вспышки в декабре 2004 г. [47]. Были исследованы интенсивные повторные всплески 22 июня и 17 октября 2004 г. и их рентгеновское послесвечение. На рис. 9 показан профиль события 22 июня

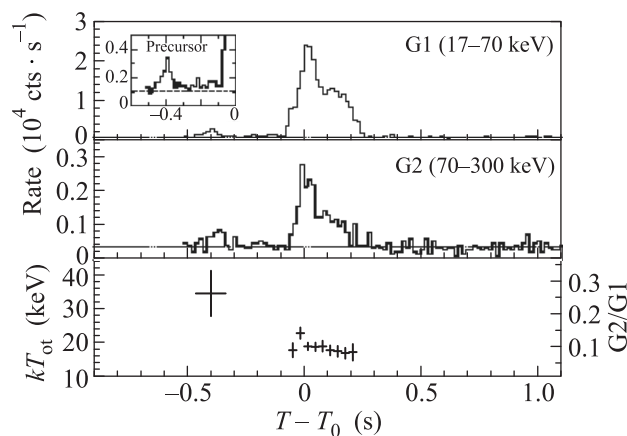


Рис. 9. Временной профиль и вариации параметра  $kT$  для повторного всплеска от репитера SGR1806-20, зарегистрированного в эксперименте Конус-Винд 22 июня 2004 г. [47]

2004 г. по данным Конус-Винд в двух энергетических окнах: 17-70 и 70-300 кэВ. Спектр излучения этого всплеска хорошо описывается моделью теплового тормозного излучения оптически тонкой плазмы с  $kT = 18$  кэВ. Основному всплеску предшествует более жесткий по спектру прекурсор с  $kT \sim 30$  кэВ. На протяжении основной части этого всплеска заметной спектральной эволюции не наблюдалось. Полная энергия всплеска составила  $(1.66 \pm 0.08) \cdot 10^{41}$  эрг. Пиковая светимость  $L_{\text{peak}} = (1.03 \pm 0.09) \cdot 10^{42}$  эрг  $\cdot$  с $^{-1}$  в предположении изотропного излучения и расстояния до источника 15 кпс. Пропорциональными детекторами RXTE для этого всплеска измерено рентгеновское послесвечение в диапазоне энергий 2-26 кэВ, длившееся  $\sim 530$  с. Временной профиль всплеска 17 октября 2004 г. от SGR1806-20 по данным Конус-

Винд в энергетическом интервале 17–300 кэВ приведен на рис. 10. Всплеск демонстрирует сильную

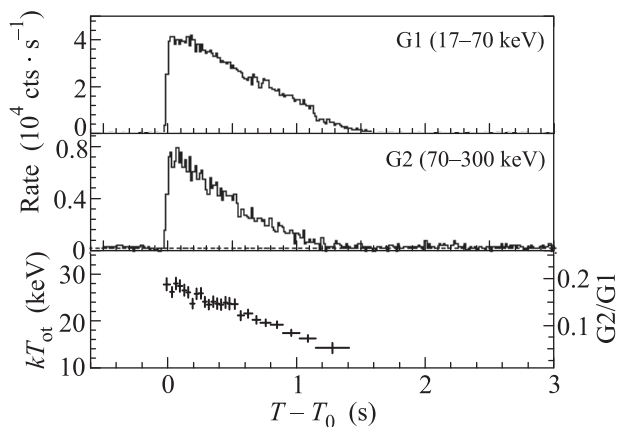


Рис. 10. Временной профиль и вариации параметра  $kT$  для повторного всплеска от репитера SGR1806–20, зарегистрированного в эксперименте Конус-Винд 17 октября 2004 г. [47]

спектральную переменность. Его энергетические спектры также хорошо описываются моделью теплового тормозного излучения оптически тонкой плазмы с  $kT = 26$  кэВ в начальной стадии события и  $kT = 18$  кэВ в конечной. Полная энергия этого всплеска составила  $(1.35 \pm 0.03) \cdot 10^{42}$  эрг. Пиковая светимость  $L_{\text{peak}} = (1.81 \pm 0.12) \cdot 10^{42}$  эрг·с<sup>-1</sup>. Рентгеновское послесвечение этого всплеска в энергетическом интервале 2.5–25 кэВ составило величину  $(4.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-7}$  эрг·см<sup>2</sup>, что соответствует изотропному выделению энергии  $1.3 \cdot 10^{40}$  эрг. Было найдено, что рентгеновское послесвечение обоих всплесков согласуется с моделью охлаждения абсолютно черного тела постоянного радиуса. Результаты спектрального анализа всплесков показали, что они подобны аналогичным событиям, зарегистрированным для SGR1900+14 и SGR1550–5418. Вместе с тем было показано, что соотношение между энергиями всплесков и их рентгеновским послесвечением для SGR1900+14 и SGR1806–20 отличается на порядок величины. Предполагается, что такая разница может быть объяснена различием механизмов перестройки коры нейтронных звезд и разницей в геометрии излучающих областей.

**5. Заключение.** Российско-американский эксперимент Конус-Винд по важности, качеству и полноте получаемой информации является одним из мировых лидеров в исследованиях экстремальных взрывных явлений во Вселенной. Оптимальная программа временных и спектральных измерений параметров космических гамма-всплесков и практически идеаль-

ная орбита в межпланетном пространстве, благодаря которой высокочувствительные детекторы аппаратуры постоянно осматривают всю небесную сферу, определяют широкую востребованность данных эксперимента в современных всеволновых исследованиях космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров.

Работа выполнена при поддержке госконтракта Федерального космического агентства, а также грантов РФФИ # 09-02-00166-а, 09-02-12080-офи-м, 11-02-12082-офи-м-2011 и 12-02-00032-а.

1. R. W. Klebesadel, I. V. Strong, and R. A. Olson, *Ap. J. Lett.* **182**, L85 (1973).
2. Е. П. Мазец, С. В. Голенецкий, В. Н. Ильинский, *Письма в ЖЭТФ* **19**, 126 (1973).
3. Е. Р. Mazets and S. V. Golenetskii, *Astrophysics and Space Science* **75**, 1 (1981).
4. Е. П. Мазец, С. В. Голенецкий, в сб. *Астрофизика и космическая физика* (под ред. Р. А. Сюняева), М.: Физматлит, 1982, с. 216 [Е. Р. Mazets and S. V. Golenetskii, in *Soviet Scientific Reviews, sec. E. Astrophysics and Space Physics Reviews* (ed. by R. A. Syunyaev), Harwood Academic Publishers, 1981, v. 1, p. 205].
5. Е. П. Мазец, С. В. Голенецкий, в сб. *Итоги науки и техники, серия Астрономия*, вып. 32, *Астрофизика и космическая физика* (под ред. Р. А. Сюняева), М.: ВИНТИ, 1987, с. 16 [Е. Р. Mazets and S. V. Golenetskii, in *Soviet Scientific Reviews, sec. E, Astrophysics and Space Physics Reviews* (ed. by R. A. Syunyaev), Harwood Academic Publishers, 1988, v. 6, part 3, p. 283].
6. Е. Р. Mazets, S. V. Golenetskii, V. N. Plyinskii et al., *Astrophysics and Space Science* **80**, 1 (1981).
7. W. S. Paciesas, C. A. Meegan, G. N. Pendleton et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **122**, 465 (1999).
8. E. Costa, F. Frontera, J. Heise et al., *Nature* **387**, 783 (1997).
9. J. van Paradijs, P. J. Groot, T. Galama et al., *Nature* **386**, 686 (1997).
10. M. R. Metzger, S. G. Djorgovskii, S. R. Kulkarni et al., *Nature* **387**, 878 (1997).
11. N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi et al., *Astrophys. J.* **611**, 1005 (2004).
12. W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackerman et al., *Astrophys. J.* **716**, 1071 (2009).
13. C. Meegan, G. Lichti, P. N. Bhat et al., *Astrophys. J.* **702**, 791 (2009).
14. P. Mészáros, *Astropart. Phys.* (in print); arXiv:1204.1897 (2012).
15. E. Nakar, *Phys. Rep.* **442**, 166 (2007).

16. S. E. Woosley, *Gamma-Ray Bursts*, Cambridge Astrophysics **51**, (2010) (in press).
17. N. Gehrels, E. Ramirez-Ruiz, and D. B. Fox, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 567 (2009).
18. B. Zhang, *Comptes Rendus Physique* **12**, 206 (2011).
19. D. Gruber, in *Proceedings of the Gamma-Ray Burst 2012 Conference*, PoS (GRB 2012) 007; arXiv:1207.4620.
20. B. E. Robertson and R. S. Ellis, *Astrophys. J.* **744**, 95 (2012).
21. Р. Л. Аптекар, С. В. Голенецкий, Е. П. Мазец и др., *УФН* **180**, 420 (2010).
22. R. L. Aptekar, S. V. Golenetskii, D. D. Frederiks et al., in *Proceedings of the Gamma-Ray Burst 2012 Conference*, PoS (GRB 2012) 118; arXiv:1206.5636.
23. R. L. Aptekar, D. D. Frederiks, S. V. Golenetskii et al., *Space Science Review* **71**, 265 (1995).
24. M. M. Terekhov, R. L. Aptekar, D. D. Frederiks et al., *AIP Conference Proceedings* **428**, 894 (1998).
25. D. L. Band, J. Matteson, and L. Ford, *Astrophys. J.* **413**, 281 (1993).
26. T. Sakamoto, V. D. Pal'shin, K. Yamaoka et al., *Publ. of Astron. Soc. of Japan* **63**, 215 (2011).
27. K. Yamaoka et al., *Publ. of Astron. Soc. of Japan* **61**, 35 (2009).
28. J. L. Racusin, S. V. Karpov, M. Sokolowskii et al., *Nature* **455**, 183 (2008).
29. F. Peng, A. Königl, and J. Granot, *Astrophys. J.* **626**, 966 (2005).
30. A. J. Levan, N. R. Tanvir, and K. Wiersema, *GCN Circular* **12368** (2011).
31. D. D. Frederiks, K. Hurley, D. S. Svinkin et al. (in press).
32. B. B. Zhang, D. N. Burrows, B. Zhang et al., *Astrophys. J.* **748**, 132 (2012).
33. R. L. Starling, E. Rol, A. J. van der Horst et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **400**, 90 (2009).
34. V. Pal'shin, R. Aptekar, D. Frederiks, et al., *AIP Conference Proceedings* **1000**, 117 (2008).
35. V. Pal'shin, K. Hurley, J. Goldsten, et al., in *Proceedings of the Gamma-Ray Burst Conference*, PoS (GRB 2012) 040.
36. E. P. Mazets, S. V. Golenetskii, V. N. Ilyinskii et al., *Nature* **282**, 587 (1979).
37. S. V. Golenetskii, V. N. Ilyinskii, and E. P. Mazets, *Nature* **307**, 41 (1984).
38. S. Merghetti, *Astron. Astroph. Rev.* **15**, 4 (2008).
39. S. T. Holland, S. D. Barthelmy, W. H. Baumgarten et al., *GCN Circular* **8112** (2008).
40. E. Göğüş, P. Woods, and C. Kouveliotou, *GCN Circular* **8118** (2008).
41. R. L. Aptekar, T. L. Cline, D. D. Frederiks et al., *Astrophys. J. Letters* **698**, L82 (2009).
42. E. P. Mazets, R. L. Aptekar, B. S. Butterworth et al., *Astrophys. J. Letters* **519**, L151 (1999).
43. K. Hurley, T. L. Cline, E. P. Mazets et al., *Nature* **397**, 41 (1999).
44. Е. П. Мазец, Т. Л. Клайн, Р. Л. Аптекар и др., *ПАЖ* **25**, 727 (1999).
45. Е. П. Мазец, Т. Л. Клайн, Р. Л. Аптекар и др., *ПАЖ* **25**, 735 (1999).
46. Д. Д. Фредерикс, С. В. Голенецкий, В. Д. Пальшин и др., *ПАЖ* **33**, 3 (2007).
47. E. Göğüş, P. M. Woods, C. Kouveliotou et al., *Astrophys. J.* **740**, 55 (2011).