

PACS numbers: 95.55.Ka, 95.85.Pw, 98.70.Rz
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004g.0420

Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в экспериментах ФТИ КОНУС

Р.Л. Аптечарь, С.В. Голенецкий,
Е.П. Мазец, В.Д. Пальшин, Д.Д. Фредерикс

В докладе представлены результаты многолетних исследований космических гамма-всплесков, выполненных Физико-техническим институтом (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе РАН на межпланетных космических станциях и искусственных спутниках Земли. На автоматических межпланетных станциях (АМС) "Венера-11, -12, -13, -14" впервые были определены основные характеристики временных профилей и энергетических спектров гамма-всплесков и распределения их источников на небесной сфере. В результате наблюдений гигантской вспышки 5 марта 1979 г. и последующих коротких гамма-всплесков из её источника был открыт новый редкий класс астрофизических объектов, получивших позднее название мягкие гамма-репитеры (Soft Gamma Repeaters, SGR). В последующих экспериментах КОНУС и ГЕЛИКОН исследование космических гамма-всплесков и гамма-репитеров были продолжены, были открыты новые источники, зарегистрированы и детально исследованы гигантские вспышки от других гамма-репитеров в нашей Галактике и впервые из источников в близких галактиках M81 и M31. В современную эпоху всеволновых исследований космических гамма-всплесков продолжающийся уже более 15 лет российско-американский эксперимент КОНУС–ВИНД предоставляет важные, часто уникальные данные о временных и энергетических свойствах их излучения в области 10 кэВ – 10 МэВ.

Проблема природы космических гамма-всплесков как источников экстремального взрывного выделения электромагнитной энергии находится в центре внимания астрофизиков с момента их открытия в 1967–1973 гг. на американских спутниках "Вела" [1]. Одно из первых независимых подтверждений открытия нового явления было дано в наблюдениях ФТИ на спутнике "Космос-461" [2]. Первый важнейший прорыв в исследованиях гамма-всплесков был осуществлён в длительных экспериментах КОНУС, проведённых ФТИ на межпланетных станциях "Венера 11"– "Венера 14" в 1978–1983 гг. В них впервые были определены основные наблюдательные свойства гамма-всплесков, которые позднее получили подтверждение в других экспериментах и которые до сих пор составляют основу современных представлений о гамма-всплесках. Было изучено многообразие временных структур гамма-всплесков и показано существование отдельного класса коротких всплесков (так называемого "бимодального распределения" всплесков по длительности), а использование массивов детекторов с анизотропной угловой чувствительностью и триангуля-

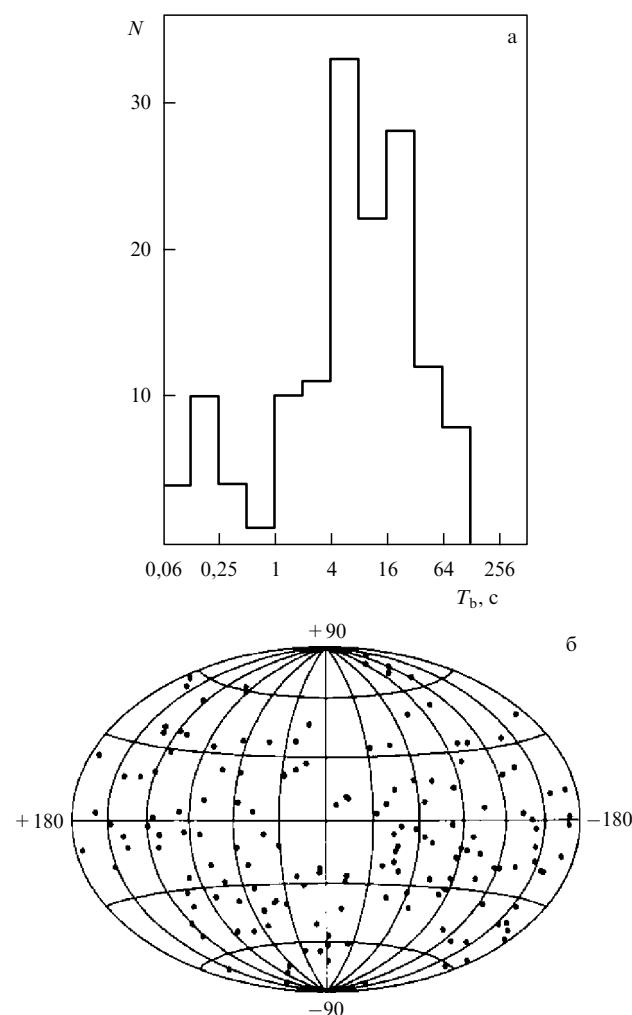


Рис. 1. Распределение гамма-всплесков по длительности (а) и распределение источников гамма-всплесков по небесной сфере (б) по наблюдениям в экспериментах КОНУС на АМС "Венера" (1978–1983 гг.). T_b — длительность всплеска, N — число событий.

ционного метода локализации источников всплесков позволило впервые установить, что их распределение по небесной сфере носит случайный характер (рис. 1) [3, 4]. Позднее эти результаты были подтверждены на большей статистике событий в известном американском эксперименте BATSE (Burst And Transient Source Experiment) на орбитальной обсерватории "Комптон" [5].

Интереснейшим и полностью неожиданным результатом стало открытие в экспериментах КОНУС на станциях "Венера" нового, очень редкого класса галактических источников повторяющихся, мягких по спектру всплесков — мягких гамма-репитеров (SGR). Гамма-репитеры проявляют два вида активности. Первый — испускание мягких повторных всплесков с длительностью $\sim 0,1$ с и изотропным энерговыделением $\sim 10^{39}–10^{41}$ эрг. Периоды вспышечной активности репитеров крайне неравномерны во времени, преимущественно источники находятся в стадии молчания, которая может длиться годами, прерываясь периодами интенсивной реактивации. Вторым, несравненно более впечатляющим, видом активности репитеров являются гигантские вспышки — крайне редкие события, по пикующей мощности энерговыделения ($10^{45}–10^{47}$ эрг с^{-1}), сопо-

Р.Л. Аптечарь, С.В. Голенецкий, Е.П. Мазец, В.Д. Пальшин, Д.Д. Фредерикс. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ. E-mail: aptekar@mail.ioffe.ru

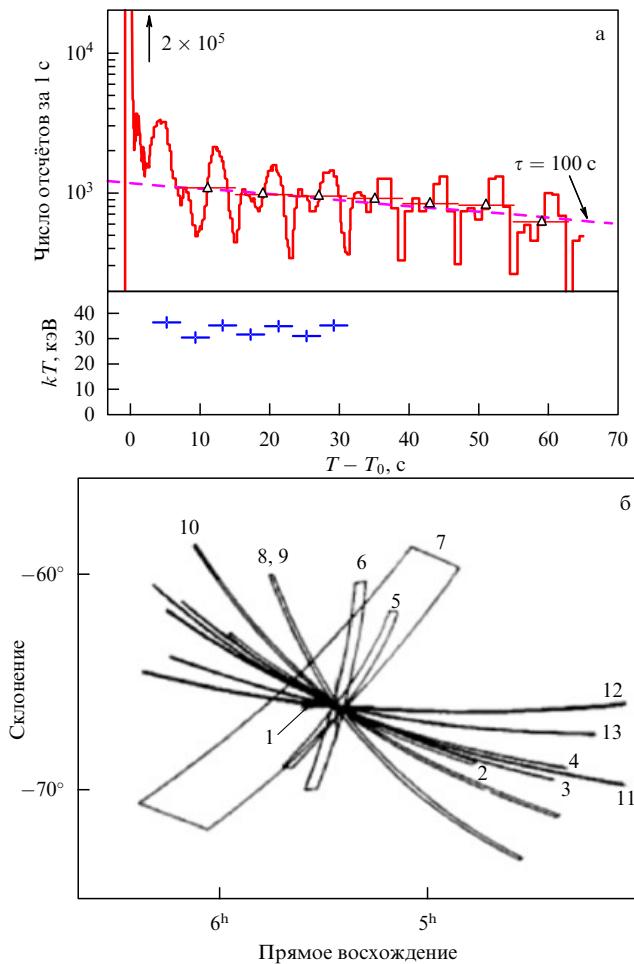


Рис. 2. Гигантский всплеск 5 марта 1979 г. (а) и повторные всплески (б) в SGR 0526-66 по данным аппаратуры КОНУС на АМС "Венера-11, -12". На рисунке а τ — постоянная времени затухания. На рисунке б числа 1, 2, ... обозначают порядковые номера повторных всплесков.

ставимой со светимостью квазаров. Открытие гамма-репитеров началось с регистрации 5 марта 1979 г. гигантской вспышки жёсткого рентгеновского и мягкого гамма-излучения от первого репитера, SGR 0526-66, расположенного в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии 55 кпк (рис. 2а [6, 7]). Вспышка представляла собой узкий, чрезвычайно интенсивный начальный пик излучения с жёстким энергетическим спектром, сопровождавшийся сравнительно более слабым и мягким по спектру "хвостом", который, пульсируя с периодом 8 с, затухал в течение нескольких минут. Уже на следующий день была зарегистрирована первая повторная вспышка от этого источника. На протяжении нескольких лет было зарегистрировано 17 таких повторных всплесков от SGR 0526-66 (рис. 2б [8]). Почти в течение 20 лет гигантская вспышка 5 марта 1979 г. оставалась уникальным событием. Только 27 августа 1998 г. в эксперименте КОНУС-ВИНД была зарегистрирована гигантская вспышка от SGR 1900+14, в которой проявились все основные особенности первой вспышки. Третья подобная, но ещё более интенсивная вспышка наблюдалась 27 декабря 2004 г. от SGR 1806-20. По общепринятым представлениям мягкие гамма-репитеры представляют собой молодые (возраст $\sim 10^3$ – 10^4 лет), быстро замед-

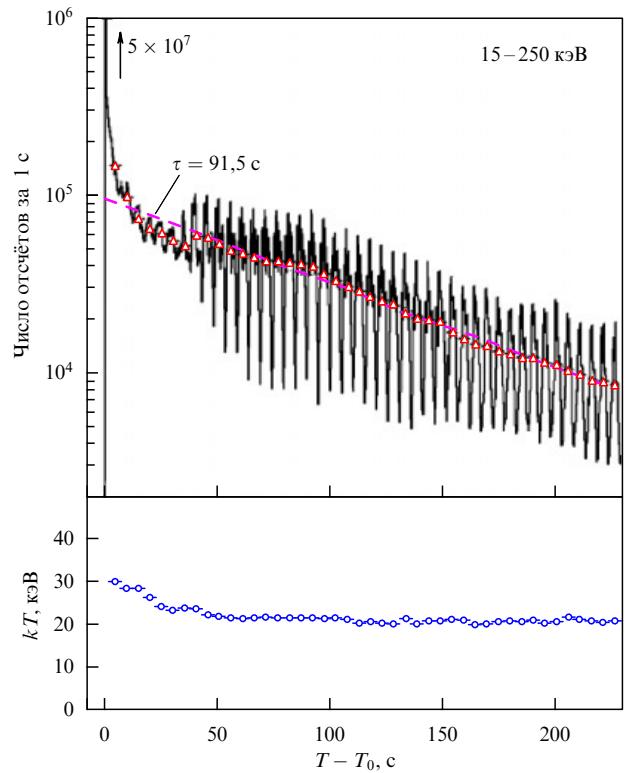


Рис. 3. Гигантский всплеск в SGR 1900+14 27 августа 1998 г. по данным аппаратуры КОНУС – ВИНД.

ляющие свое вращение нейтронные звёзды со сверхсильным ($\sim 10^{15}$ Гс) магнитным полем.

Новый важный этап проводимых ФТИ исследований космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров связан с проведением на американском космическом аппарате "Wind" совместного российско-американского эксперимента с помощью российской научной аппаратуры КОНУС. Сильно вытянутая и удалённая от Земли орбита КА "Wind" с апогеем 0,5–1,5 млн км обеспечивает обзор всей небесной сферы без существенных потерь экспозиции, что исключительно благоприятно для исследования непредсказуемых и транзитных источников. Два высокочувствительных детектора аппаратуры КОНУС – ВИНД постоянно наблюдают всю небесную сферу, и ни одно из важных для физики гамма-всплесков и гамма-репитеров событий не было пропущено за все годы наблюдений, которые успешно продолжаются уже более 15 лет.

Преимущество эксперимента КОНУС – ВИНД проявилось, в первую очередь, в наблюдениях таких редких событий, как всплески гамма-репитеров. В 1998 г. было зарегистрировано два гигантских всплеска. Первым 18 июня наблюдался исключительно мощный, но без пульсирующего хвоста всплеск от источника SGR 1627-41 [9]. Затем наблюдалась гигантская вспышка 27 августа от SGR 1900+14 (рис. 3 [10]), в которой видны все типичные признаки этого явления: короткий, исключительно большой по интенсивности начальный импульс гамма-излучения, сменяющийся более слабым, затухающим за ≈ 500 с "хвостом", пульсирующим с периодом вращения нейтронной звезды.

Поток гамма-квантов в начальных импульсах гигантских вспышек от SGR настолько велик, что чувстви-

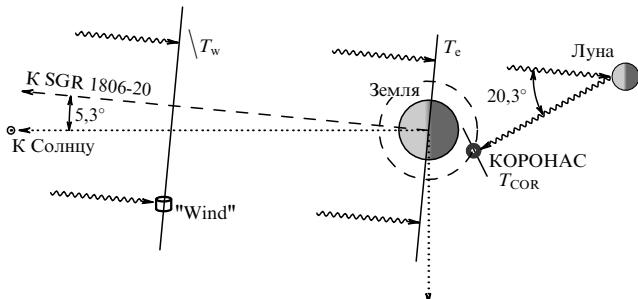


Рис. 4. Отражение начального импульса гигантской вспышки SGR 1806-20 от Луны и его детектирование аппаратурой ГЕЛИКОН на КА КОРОНАС-Ф.

тельные детекторы аппаратуры перегружаются, "зашкаливают" и точное измерение временных и энергетических характеристик начального импульса становится практически неразрешимой задачей, так как возможны только грубые оценки снизу. Для самой мощной из зарегистрированных вспышек, пришедшей от источника SGR 1806-20 27 декабря 2004 г., насыщение детектора КОНУС-ВИНД продолжалось более полутора секунд. Но для наблюдений этого события ситуация оказалась исключительно благоприятной, в это же время синхронные измерения проводились в другом эксперименте ФТИ, с использованием идентичного аппарата КОНУС-ВИНД спектрометра ГЕЛИКОН на солнечной космической обсерватории КОРОНАС-Ф (аббр. от Комплексные ОРбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца). Схема расположения космических аппаратов в момент регистрации этого всплеска показана на рис. 4 [11]. Детекторы аппаратуры ГЕЛИКОН оказались экранированы Землёй от прямого облучения начальным импульсом гигантского всплеска, но чётко зарегистрировали его отражение от поверхности Луны. Это позволило впервые надёжно восстановить временной профиль начального импульса гигантского всплеска гамма-репитера (рис. 5 [11]) и определить его энергетические характеристики: полное изотропное энерговыделение ($2,3 \times 10^{46}$ эрг) и пиковую светимость ($3,5 \times 10^{47}$ эрг с^{-1}). Таким образом, вспышка 27 декабря стала первым в истории внеатмосферной астрономии примером естественной локации Луны рентгеновским и гамма-излучением.

Наблюдения гигантских вспышек от SGR 1900+14 и SGR 1806-20 возродили на новом уровне интерес к выдвинутому Е.П. Мазеем и С.В. Голенецким в 1981–1982 гг. [3] предположению о том, что некоторые короткие жёсткие гамма-всплески могут представлять собой начальные импульсы гигантских вспышек от значительно более далёких гамма-репитеров. Определение энергетических характеристик начального импульса гигантской вспышки в SGR 1806-20 позволило оценить предельную дальность, на которой подобные вспышки могут быть зарегистрированы, для современных широконаправленных детекторов она составляет 30–50 Мпк. Имеющиеся данные о гигантских вспышках известных гамма-репитеров позволяют определить ожидаемые временные и спектральные характеристики коротких гамма-всплесков, которые могли бы свидетельствовать о приходе вспышки из другой галактики. Такой всплеск должен иметь вид одиночного импульса с крутым

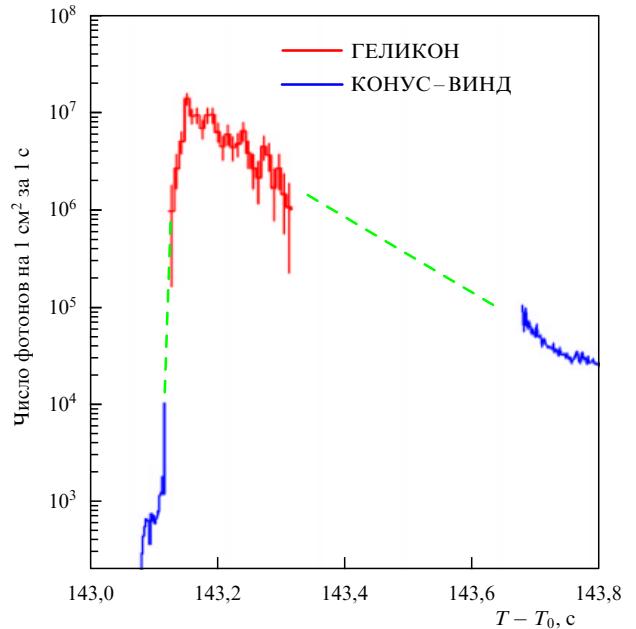


Рис. 5. Восстановленный временной профиль начального импульса гигантской вспышки SGR 1806-20, по данным КОНУС-ВИНД и ГЕЛИКОН.

передним фронтом длительностью $\approx 5-15$ мс и с экспоненциальным спадом с постоянной $\approx 50-70$ мс при общей длительности импульса около 200–300 мс. Энергетический спектр излучения должен быть весьма жёстким в начальной части, и по ходу всплеска он должен быстро эволюционировать, заметно смягчаясь к концу импульса. Анализ характеристик коротких всплесков по данным эксперимента КОНУС-ВИНД показал, что доля событий с указанными характеристиками в общем числе коротких всплесков не превышает нескольких процентов.

3 ноября 2005 г. КОНУС-ВИНД зарегистрировал интенсивный короткий и жёсткий гамма-всплеск GRB 051103 [12]. Локализация всплеска межпланетной сетью IPN (Interplanetary Network), в которую входит большинство работающих на орбите экспериментов по наблюдению гамма-всплесков, показала, что его источник располагается близко к группе галактик M81, находящейся от нас на расстоянии $\approx 3,6$ Мпк. Кривая блеска события, зарегистрированная с временным разрешением 2 мс, представляла собой одиночный импульс с крутым передним фронтом (≤ 6 мс) и экспоненциальным спадом ≈ 55 мс. Полная длительность всплеска составила 170 мс. Изменения жёсткости во времени указывали на явное смягчение спектра излучения. Из трёх детальных энергетических спектров, снятых со временем накопления 64 мс, только первый спектр содержал интенсивную жёсткую компоненту с энергией до 10 МэВ. Сравнение результатов исследования распределения вещества в группе галактик M81, полученных методами оптической, рентгеновской и радиоастрономии, с данными локализации источника гамма-всплеска свидетельствовало в пользу его ассоциации с гигантской вспышкой от расположенного в ней гамма-репитера. Энергия вспышки в этом случае составила бы $\sim 7 \times 10^{46}$ эрг. Эта величина сравнима с энергией гигантской вспышки в SGR 1806-20 [11].

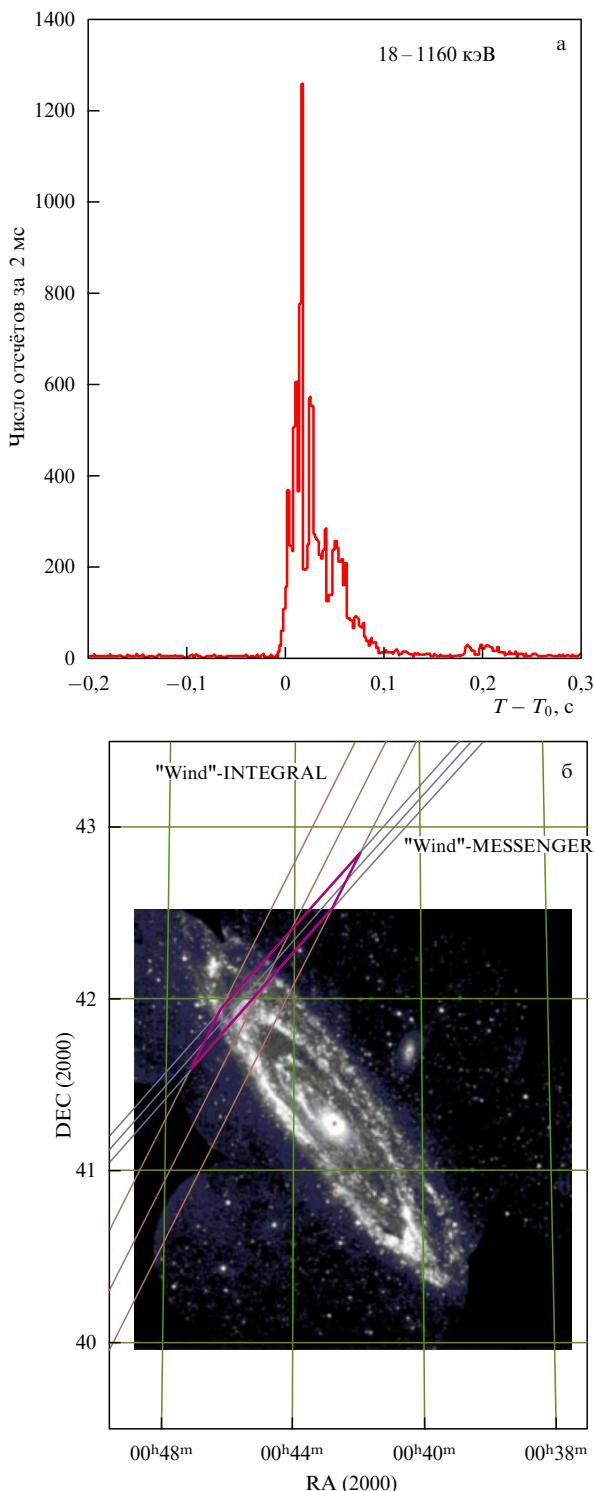


Рис. 6. GRB 070101 — гигантская вспышка от гамма-репитера SGR 0044+42 в туманности Андромеды: кривая блеска по данным КОНУС–ВИНД и локализация источника в сети IPN.

Ещё один короткий гамма-всплеск с жёстким спектром был зарегистрирован в эксперименте КОНУС–ВИНД 1 февраля 2007 г. (рис. 6а [13]). Он имел самую высокую интенсивность излучения за всю историю наблюдений. Временной профиль события представляет собой узкий импульс с передним фронтом ≈ 20 мс и более пологим спадом при общей длительности около 180 мс. Для всплеска характерна сильная спектральная

эволюция, показывающая, что жёсткая компонента излучения наблюдается в пределах первых 80 мс. Всплеск был также локализован сетью IPN. Область локализации, показанная на рис. 6б, совпадает с внешними рукавами галактики Андромеды (M31), расположенной на расстоянии ≈ 780 кпк. Детальное рассмотрение результатов наблюдений галактики Андромеды космическими инфракрасным, ультрафиолетовым и рентгеновским телескопами и сравнение характеристик всплеска GRB 070201 с характеристиками ранее наблюдавшихся гигантских вспышек от гамма-репитеров дали убедительные свидетельства тому, что это событие является гигантской вспышкой от гамма-репитера в галактике Андромеды. Источники всплесков 3 ноября 2005 г. и 1 февраля 2007 г., первые внегалактические мягкие гамма-репитеры, получили обозначения SGR 0952+69 (M81) и SGR 0044+42 (M31) [13].

В эксперименте КОНУС–ВИНД получены новые данные о сильной спектральной переменности нового источника мягких повторных всплесков SGR 0501+4516, открытого в августе 2008 г. телескопом BAT (Burst Alert Telescope) с борта космического аппарата "Swift". Пять всплесков от нового гамма-репитера были зарегистрированы и детально изучены с помощью гамма-спектрометра КОНУС–ВИНД [14]. Важной особенностью нового репитера явилась сильная спектральная переменность излучения повторных всплесков. Подобная корреляция жёсткости излучения повторных всплесков и их интенсивности ранее наблюдалась только для гамма-репитера SGR 1627-41 [9]. Из последних результатов, полученных в экспериментах КОНУС, следует отметить открытие 5 июня 2009 г. нового источника мягких повторных гамма-всплесков — гамма-репитера SGR 0418+5729 [15]. Эта работа была осуществлена в совместных наблюдениях детекторов GBM обсерватории Ферми, спектрометра КОНУС-РФ обсерватории КОРОНАС–ФОТОН и телескопа BAT обсерватории "Swift".

Эксперимент КОНУС–ВИНД, благодаря высокой чувствительности, исключительно благоприятному месту наблюдений в межпланетном пространстве и оптимальной программе наблюдений, является уникальным источником информации о временных и спектральных характеристиках гамма-всплесков в интервале энергий от 10 кэВ до 10 МэВ. Эти данные, составляющие неотъемлемую часть современных всеволновых исследований источников гамма-всплесков на космических аппаратах и сети наземных оптических и радиотелескопов, широко востребованы. Благодаря высокоточной и оперативной локализации источников гамма-всплесков телескопом BAT/"Swift" исследования на сети наземных телескопов начинаются, буквально, спустя единицы и десятки секунд после начала события. На рисунке 7 показана кривая блеска в гамма-лучах (эксперимент КОНУС–ВИНД) и в видимой области спектра (телескопы TORTORA (CAO РАН) и "Pi of the Sky") для знаменитого всплеска GRB 080319B, яркость которого в диапазоне оптического излучения достигала 5,5 звёздной величины. Всеэволовные исследования показывают, что оптическое излучение и гамма-излучение этого всплеска начинаются в одно и то же время. Это даёт веское свидетельство их происхождения из одной и той же физической области [16].

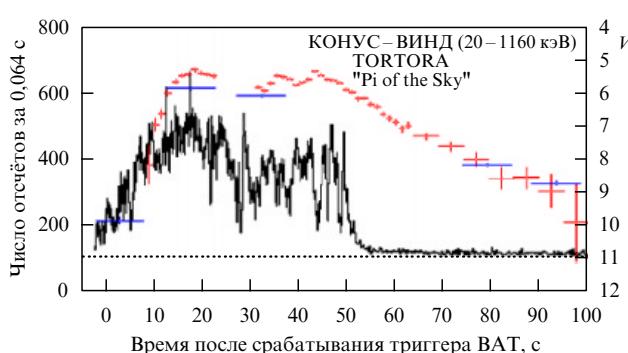


Рис. 7. Оптическое и гамма-излучение события GRB 080319B, по данным КОНУС – ВИНД, TORTORA и "Pi of the Sky" [16]. *V* — характеристика оптической яркости всплеска.

В заключение следует подчеркнуть, что в ФТИ создана надёжная и адекватная задаче исследования космических гамма-всплесков аппаратура КОНУС. Российско-американский эксперимент КОНУС – ВИНД по важности, качеству и полноте получаемой информации выдвинулся на передовые позиции в исследованиях экстремальных взрывных явлений во Вселенной. В ходе 15-летнего непрерывного эксперимента обнаружено и изучено более 3500 космических гамма-всплесков, исследована всплесковая активность всех известных гамма-репитеров. Сводка данных о наблюдениях гамма-репитеров в экспериментах КОНУС содержится в "Konus catalog of SGR activity: 1978 to 2000" [17]. Подготовлены печатная и электронная версии второго каталога данных наблюдений гамма-репитеров в экспериментах КОНУС – ВИНД, КОНУС, ГЕЛИКОН и КОНУС-РФ. Этот каталог охватывает период наблюдений с 1994 г. по 2009 г. и содержит данные о всех известных источниках мягких повторных всплесков и гигантских вспышек от них, полученные с помощью идентичных приборов. Сводка данных о наблюдениях коротких гамма-всплесков за период 1994–2002 г. содержится в электронном каталоге [/www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog/](http://www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog/). Готовится печатная и электронная версии каталога коротких всплесков, охватывающие период 1994–2009 гг.

Список литературы

1. Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A *Astrophys. J. Lett.* **182** L85 (1973)
2. Мазец Е П, Голенецкий С В, Ильинский В Н *Письма в ЖЭТФ* **19** 126 (1973) [Mazets E P, Golenetskii S V, Il'inskii V N *JETP Lett.* **19** 77 (1973)]
3. Мазец Е П, Голенецкий С В, в сб. *Астрофизика и космическая физика* (Под ред. Р А Сюняева) (М.: Физматлит, 1982) с. 216 [Mazets E P, Golenetskii S V, in *Soviet Scientific Reviews, Sec. E, Astrophysics and Space Physics Reviews* Vol. 1 (Ed. R A Syunyaev) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1981) p. 205]
4. Мазец Е П, Голенецкий С В, в сб. *Астрофизика и космическая физика* (Итоги науки и техники. Сер. Астрономия, Вып. 32, Под ред. Р А Сюняева) (М.: ВИНИТИ, 1987) с. 16 [Mazets E P, Golenetskii S V, in *Soviet Scientific Reviews, Sec. E, Astrophysics and Space Physics Reviews* Vol. 6 (Ed. R A Syunyaev) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1988) Pt. 3, p. 283]
5. Paciesas W S et al. *Astrophys. J. Suppl.* **122** 465 (1999)
6. Мазец Е П и др. *Письма в Астрон. журн.* **5** 307 (1979) [Mazets E P et al. *Astron. Lett.* **5** 163 (1979)]
7. Mazets E P et al. *Nature* **282** 587 (1979)
8. Golenetskii S V, Ilyinskii V N, Mazets E P *Nature* **307** 41 (1984)
9. Mazets E P et al. *Astrophys. J. Lett.* **519** L151 (1999)
10. Hurley K et al. *Nature* **397** 41 (1999)
11. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 3 (2007) [Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 1 (2007)]
12. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 22 (2007) [Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 19 (2007)]
13. Mazets E P et al. *Astrophys. J.* **680** 545 (2008)
14. Aptekar R L et al. *Astrophys. J. Lett.* **698** L82 (2009)
15. Van der Horst A J et al. *Astrophys. J. Lett.* **711** L1 (2010)
16. Racusin J L et al. *Nature* **455** 183 (2008)
17. Aptekar R L et al. *Astrophys. J. Suppl.* **137** 227 (2001)

PACS numbers: 95.55.Ka, 95.85.Pw, 98.70.Rz
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004h.0424

Открытие быстрой оптической переменности гамма-всплеска GRB 080319B и перспективы широкоугольного оптического мониторинга высокого временного разрешения

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, С.Ф. Бондарь, В.Л. Плохотниченко, А. Гуарниери, К. Бартолини, Д. Греко, А. Пиччиони

1. Введение

Систематическое изучение переменности ночного неба на субсекундной временной шкале является важной, но по сей день практически нерешённой задачей. Необходимость такого рода наблюдений для поиска и изучения нестационарных объектов с неизвестной заранее локализацией отмечалась ещё Бонди [1]. Исследования в этой области проводились и ранее [2, 3], но из-за технических сложностей в них либо достигалось высокое временное разрешение на уровне нескольких десятков микросекунд при мониторинге малых, размером 5'–10', полей, либо использовалось временное разрешение 5–10 с при широких (20°–30°) полях. Функционирующие в настоящее время широкопольные мониторинговые системы, такие как WIDGET [4], RAPTOR [5], BOOTES [6] и "Pi of the Sky" [7], имеют большие поля зрения при достаточно хорошем пределе обнаружения, но низкое временное разрешение, что затрудняет их использование для регистрации быстрых транзитов.

Приведём несколько примеров таких: вспышки звёзд типа UV Cet, передние фронты которых могут длиться 0,2–0,5 с [8], 30 % гамма-всплесков, продолжающихся менее 2 с, тогда как отдельные детали их кривых блеска делятся вплоть до 1 мс [9]. Представляют также значительный интерес очень быстрые метеоры, возможно, рождающиеся за пределами Солнечной системы [10].

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, В.Л. Плохотниченко.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Нижний Архыз, Карабаево-Черкесия, РФ. E-mail: beskin@sao.ru

С.Ф. Бондарь. Научно-исследовательский институт прецизионного

приборостроения, Москва, РФ

А. Гуарниери, К. Бартолини, Д. Греко, А. Пиччиони

(A. Guarneri, C. Bartolini, G. Greco, A. Piccioni).

Astronomy Department, Bologna University, Bologna, Italy