

## ПОИСК ГАММА-ВСПЛЕСКОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

В. Б. Петков, В. В. Алексеенко, В. И. Волченко, А. Н. Заиченко,  
С. Н. Карпов, **В. Я. Поддубный**, А. В. Радченков, Д. В. Смирнов,  
Н. С. Хаердинов, А. Б. Черняев, А. Ф. Янин

© 2003

*Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований РАН  
пос. Нейтрино, Эльбрусский район, 361609 Кабардино-Балкарская Республика, Россия  
e-mail: vpetkov@yandex.ru*

---

На установке “Андырчи” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН проведен поиск гамма-всплесков высокой энергии и высокоэнергичного ( $E_\gamma \geq 10$  ГэВ) излучения в корреляции с зарегистрированными при низких энергиях (BATSE,  $E_\gamma = 30\text{--}500$  кэВ) гамма-всплесками. По данным за 1996–2001 гг. получено ограничение на частоту гамма-всплесков с длительностями  $\Delta t = 1\text{--}50$  с и потоками энергии  $W(\Delta t) \geq 5.6 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\Delta t}$  эрг/см<sup>2</sup> в полосе склонений  $10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$ :  $\Omega_{lim} = 2.0 \cdot 10^{-8}$  с<sup>-1</sup> на 90 % доверительном уровне. За период 1996–2000 гг. 147 событий BATSE попали в поле зрения установки “Андырчи” ( $\theta \leq 50^\circ$ ). Диапазон ограничений на поток энергии, уносимый высокоэнергичными гамма-квантами в этих всплесках:  $W_{max} = 6.5 \cdot 10^{-4} - 0.15$  эрг/см<sup>2</sup>.

A SEARCH FOR HIGH-ENERGY GAMMA-RAY BURSTS, by Petkov V. B., Alekseenko V. V., Volchenko V. I., Zaichenko A. N., Karpov S. N., **Poddubny V. Ya.**, Radchenkov A. V., Smirnov D. V., Khaerdinov N. S., Chernyaev A. B., Yanin A. F. – The ground-based extensive air shower array “Andyrchy” of the Baksan Neutrino Observatory was used for the search of high-energy gamma-ray bursts as well as the high-energy radiation ( $E_\gamma \geq 10$  GeV) within the gamma-ray bursts, which have been recorded in the low-energy range ( $E_\gamma \geq 30 - 50$  keV) on the BATSE. The results obtained in 1996–2000 in the sky survey and in coincidence with the BATSE events are presented.

---

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени гамма-излучение высокой энергии (от единиц до тысяч ГэВ) от гамма-всплесков изучено слабо из-за очень малых потоков в этом диапазоне. Гамма-излучение от гамма-всплесков порядка нескольких ГэВ впервые было обнаружено прибором EGRET на борту космического аппарата CGRO [1]. Особенно большой интерес был вызван регистрацией фотона с энергией 18 ГэВ от всплеска GRB 940217 [2].

Гамма-всплески с энергией фотонов больше нескольких ГэВ могут быть зарегистрированы наземными установками большой площади, расположенными на высоте гор и работающими в режиме регистрации одиночной компоненты космических лучей [3–8]. Это означает, что в подобном эксперименте измеряется суммарный темп счета всех детекторов установки. Так как первичный спектр круто падающий, основной вклад в темп счета вносят дошедшие до уровня наблюдения одиночные частицы от малых ливней, рожденных первичными частицами (преимущественно протонами) с энергиями 10–100 ГэВ. Гамма-всплески в такого рода экспериментах могут проявить себя как (кратковременное) увеличение темпа счета.

Следует заметить, что поиск высокоэнергичных гамма-всплесков и поиск высокоэнергичного гамма-излучения в уже зарегистрированных (в диапазоне низких энергий) гамма-всплесках не есть одно и то же. Нельзя исключить, что есть популяция гамма-всплесков с достаточно жестким спектром, которые не могут быть обнаружены приборами на космических аппаратах из-за триггерных условий, но могут быть зарегистрированы наземными установками большой площади. Для поиска высокоэнергичного “хвоста” гамма-излучения анализируется поведение темпа счета во время уже зарегистрированного гамма-всплеска.

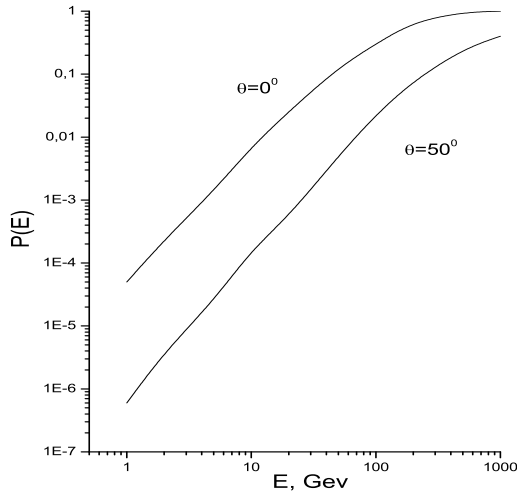


Рис. 1. Вероятность регистрации гамма-квантов детектором бесконечной площади как функция первичной энергии

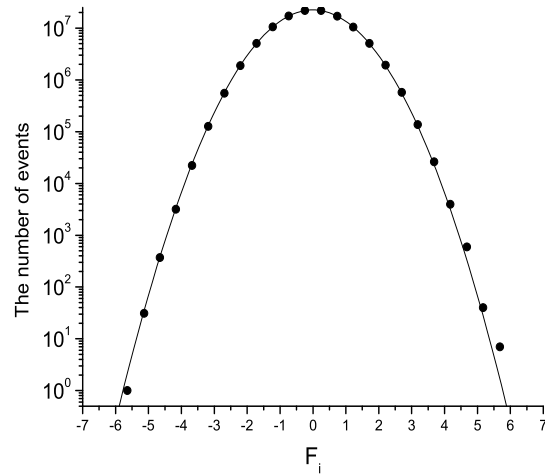


Рис. 2. Экспериментальное распределение количества событий  $N$  по  $F_i$ . Точки – эксперимент, линия – аппроксимация распределением Гаусса

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Ливневая установка “Андырчи” [9, 10] расположена на высоте 2060 м над уровнем моря (глубина в атмосфере 800 г/см<sup>2</sup>) и состоит из 37 детекторов на основе пластмассового сцинтиллятора. Каждый сцинтиллятор имеет площадь 1 м<sup>2</sup>, толщину 5 см и просматривается одним фотоумножителем ФЭУ-49 (диаметр 15 см). Каждый детектор оснащен системой терморегуляции; температура ФЭУ и регистрирующей электроники изменяется не более, чем на 1°С, температура сцинтиллятора – не более, чем на 3°С. Наиболее вероятное энерговыделение в детекторе от одиночных частиц – порядка 10 МэВ, порог срабатывания детектора составляет 5 МэВ (1/2 от наиболее вероятного). Средний темп счета детектора на этом пороге около 310 с<sup>-1</sup>. Поиск гамма-всплесков по изменению суммарного темпа счета установки проводится в условиях большого фона космических лучей, что требует высокой стабильности и надежности работы всей аппаратуры. Суммарный темп счета детекторов установки (37 м<sup>2</sup>) измеряется каждую секунду (~11500/с). Контроль за стабильностью осуществляется посредством одновременных измерений (также каждую секунду) темпов счета четырех частей установки (10, 9, 9 и 9 детекторов). Набор информации по всем решаемым на установке задачам начал в марте 1996 г.

Большинство частиц от ливней, рожденных первичными гамма-квантами с энергией 10–100 ГэВ, поглощаются в атмосфере до того, как достигнут уровня установки. Вероятности  $P(E, \theta)$  зарегистрировать вторичную частицу в гипотетическом детекторе “Андырчи” бесконечной площади от гамма-кванта с первичной энергией  $E$  и зенитным углом  $\theta$  были получены посредством моделирования электромагнитных каскадов в атмосфере и детекторе. На рис. 1 представлена зависимость  $P(E)$  для двух значений зенитного угла. Для определения эффективной энергии первичных гамма-квантов, кроме вероятности регистрации  $P(E, \theta)$ , необходимо задать спектр фотонов во всплеске. Средний дифференциальный спектр можно достаточно хорошо описать степенным законом вида  $I(E) \propto E^{-\gamma}$  с  $\gamma = 2.0$  [1], в этом случае медианная энергия первичных гамма-квантов равна 10 ГэВ.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для предварительного анализа экспериментальных данных мы используем два параметра:  $F_i$  и  $D_i$ . Первый параметр –  $F_i$  – представляет собой отклонение в единицах пуассоновской сигмы темпа счета  $N_i$  за  $i$ -ю секунду 15-минутного интервала от среднего за интервал  $\bar{N}$ :

$$F_i = (N_i - \bar{N}) / \sqrt{\bar{N}}. \quad (1)$$

Поскольку вариациями интенсивности космических лучей за 15 мин в первом приближении можно пренебречь, и средний темп счета достаточно велик ( $\bar{N} = 11440$  за 6 лет набора информации), можно ожидать, что параметр  $F_i$  подчиняется распределению Гаусса со средним значением  $V = 0$  и средним квадратичным отклонением  $\sigma = 1.0$ .

Параметр  $D_i$  используется для характеристики отклонений в темпе счета между частями установки:

$$D_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (F_i^j - \bar{F}_i)^2. \quad (2)$$

Здесь  $F_i^j$  – отклонение  $j$ -й части установки,  $\bar{F}_i$  – среднее четырех значений  $F_i^j$  за  $i$ -ю секунду 15-минутного интервала.

В последующей обработке использовались только те секундные точки, для которых выполнялось условие

$$D_i \leq D_{bound}(F_i). \quad (3)$$

Значения  $D_{bound}(F_i)$  были получены методом Монте-Карло в предположении справедливости распределения Пуассона для  $N_i$ . Это условие дает возможность исключить точки с неразумно большими отклонениями в темпе счета между частями установки, т. е. исключить аппаратные погрешности. Полезные события (секундные точки) могут быть отброшены с вероятностью  $2 \cdot 10^{-9}$  для всех событий и с вероятностью  $1.3 \cdot 10^{-3}$  для событий с  $F_i \geq 5$ . Из всего объема экспериментальных данных по условию (3) было отброшено около 0.01 % событий.

## ПОИСК ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

На рис. 2 приведено экспериментальное распределение количества событий по параметру  $F_i$  за шесть лет набора информации (1319.6 сут чистого времени). Данные аппроксимируются распределением Гаусса со средним значением  $V = -(0.00238 \pm 0.00007)$  и средним квадратичным отклонением  $\sigma = 1.0441 \pm 0.0008$ . Отклонение от ожидаемых в первом приближении значений  $V = 0$  и  $\sigma = 1.0$  объясняется пуассоновским поведением темпа счета: моделирование методом Монте-Карло в предположении, что  $N_i$  подчиняются распределению Пуассона, дало значения  $V = -(0.0022 \pm 0.0007)$  и  $\sigma = 1.0414 \pm 0.0008$ .

Отсутствие больших превышений над средним темпом счета в данных может быть интерпретировано как отсутствие “коротких” гамма-всплесков (длительностью  $\Delta t \leq 1$  с) с соответствующим потоком энергии. Предполагая степенной спектр фотонов, поток энергии  $W(F_i)$  для превышения  $F_i$  может быть вычислен как

$$W(F_i) = \frac{N}{S} \int_0^{90} \frac{\sin(\theta) \cdot \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E^{-\gamma+1} dE}{\cos(\theta) \cdot \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E^{-\gamma} \cdot P(E, \theta) dE} d\theta, \quad (4)$$

где  $N = F_i \cdot \sqrt{\bar{N}}$  и  $S = 37 \text{ м}^2$ . Значению  $F_i = 6$  и длительности всплеска 1 с соответствует поток  $W_1 = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ эрг/см}^2$ .

По данным BATSE [11] гамма-всплески с длительностью до 1 с составляют 20 % от их общего количества, к тому же в распределении гамма-всплесков по длительностям имеются события, длительность которых – сотни секунд. Следует отметить, что поиск всплесков с большой длительностью в наземных экспериментах затруднен из-за наличия короткопериодических вариаций интенсивности космических лучей. В нашем эксперименте был проведен поиск всплесков с длительностями до 50 с (76 % от общего количества), для этого потребовался дополнительный отбор информации. В обработку не вошли события, в которых всплески имитировались сильным изменением темпа счета во время гроз, солнечных вспышек и резких изменений атмосферного давления. Поиск всплесков с длительностями  $\Delta t = 2, 4, 10, 20$  и 50 с был проведен с использованием метода скользящего интервала, величина сдвига равнялась  $\Delta t/2$ . Аналогично (1), отклонение в темпе счета определялось для каждого интервала, фоновый темп счета вычислялся по двум 400-секундным интервалам, до и после скользящего интервала  $\Delta t$ . Распределения по  $F_i$  для больших длительностей аналогичны приведенному на рис. 2, в них также отсутствуют большие

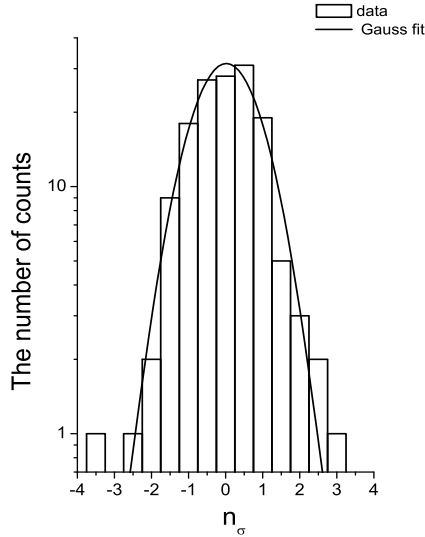


Рис. 3. Экспериментальное распределение количества событий  $N$  по  $n_\sigma$  для интервала  $T_{90}$  и его аппроксимация гауссианой

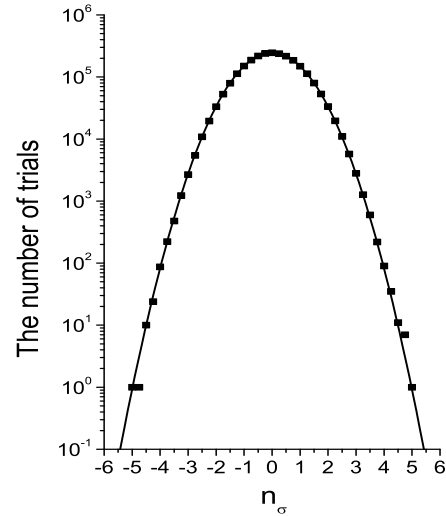


Рис. 4. Суммарное распределение количества событий  $N$  по  $n_\sigma$  для всех интервалов в пределах  $\pm 1.5$  ч вокруг всплеска BATSE

превышения над фоном. Значению  $F_i = 6$  и длительности всплеска  $\Delta t$  соответствует поток энергии  $W_{\Delta t} = W_1 \cdot \sqrt{\Delta t}$ . Таким образом, по данным за 1996–2001 гг. (1319.6 сут чистого времени) получено ограничение на частоту гамма-всплесков с длительностями  $\Delta t = 1 - 50$  с и потоками энергии  $W(\Delta t) \geq 5.6 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\Delta t}$  эрг/см<sup>2</sup> в полосе склонений  $10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$ :  $\Omega_{lim} = 2.0 \cdot 10^{-8}$  с<sup>-1</sup> на 90 %-м доверительном уровне.

## ПОИСК ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРРЕЛЯЦИИ С BATSE

За период 1996–2000 гг. (в мае 2000 г. аппарат CGRO прекратил свою работу) 147 событий BATSE [11] попали в поле зрения установки “Андрычи” ( $\theta \leq 50^\circ$ ). Для каждого из этих событий было вычислено превышение темпа счета  $n_\sigma$  (в стандартных отклонениях) во время всплеска (в течение длительности всплеска  $T_{90}$ ) над фоном. Фоновый темп счета вычислялся по двум 400-секундным интервалам, до и после интервала  $T_{90}$ . На рис. 3 приведены экспериментальное распределение по  $n_\sigma$  и аппроксимация распределением Гаусса (среднее значение  $V = -(0.02 \pm 0.04)$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma = 0.92 \pm 0.08$ ). Таким образом, экспериментальное распределение согласуется с ожидаемым от фона космических лучей. Для каждого из 147 событий было получено ограничение (на уровне трех стандартных отклонений) на поток энергии в высокоэнергичных  $\gamma$ -квантах. Диапазон ограничений составляет  $W_{max} = 6.5 \cdot 10^{-4} - 0.15$  эрг/см<sup>2</sup>, большой разброс значений объясняется различием в зенитных углах и длительностях всплесков.

Всплеск  $\gamma$ -излучения высокой энергии не обязательно должен совпадать во времени с излучением в низкоэнергетической области: так, во всплеске GRB 940217 фотон с энергией 18 ГэВ пришел с запаздыванием в 1.5 часа [2]. Поэтому поиск всплесков высокоэнергичного  $\gamma$ -излучения различной длительности (1–100 с) в корреляции с событиями BATSE был проведен в пределах  $\pm 1.5$  ч от начала всплеска. Использовался метод скользящего интервала с  $\Delta t = 1, 2, 4, 10, 20, 50$  и 100 с, величина сдвига равнялась  $\Delta t$  для интервала в 1 с и  $\Delta t/2$  для остальных интервалов. Фоновый темп счета вычислялся по двум интервалам 400 с, до и после скользящего интервала  $\Delta t$ . На рис. 4 приведено суммарное распределение по превышению над фоном в единицах стандартного отклонения для всех интервалов вокруг события BATSE. Аппроксимация распределением Гаусса дает среднее значение  $V = -(0.0021 \pm 0.0007)$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma = 1.000 \pm 0.007$ , т. е. в этом случае экспериментальное распределение также согласуется с ожидаемым от фона космических лучей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На установке “Андырчи” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН проведен поиск гамма-всплесков высокой энергии и высокоэнергичного ( $E_\gamma \geq 10$  ГэВ) излучения в корреляции с событиями BATSE.

2. По данным за 1996–2001 гг. (1319.6 сут чистого времени) получено ограничение на частоту гамма-всплесков с длительностями  $\Delta t = 1 - 50$  с и потоками энергии  $W(\Delta t) \geq 5.6 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\Delta t}$  эрг/см<sup>2</sup> в полосе склонений  $10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$ :  $\Omega_{lim} = 2.0 \cdot 10^{-8}$  с<sup>-1</sup> на 90 %-м доверительном уровне.

3. За период 1996–2000 гг. 147 событий BATSE попали в поле зрения установки “Андырчи” ( $\theta \leq 50^\circ$ ). Диапазон ограничений (на уровне трех стандартных отклонений) на поток энергии, уносимый высокоэнергичными гамма-квантами в этих всплесках (в течение длительности всплеска  $T_{90}$ ):  $W_{max} = 6.5 \cdot 10^{-4} - 0.15$  эрг/см<sup>2</sup>. Большой разброс значений объясняется различием в зенитных углах и длительностях всплесков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 00-02-16095) и ФЦП “Интеграция” (проект И0586/920).

- [1] *Dingus B. L. et al.* // Proc. 25th ICRC, Durban.–1997.–**3**.–P. 29.
- [2] *Hurley K. et al.* // Nature.–1994.–**372**.–P. 652.
- [3] *Aglietta M. et al.* // Astrophys. J.–1996.–**469**.–P. 305.
- [4] *Vernetto S.* // Astrop. Phys.–2000.–**13**.–P. 75.
- [5] *Castelina A. et al.* // Proc. 27th ICRC, Hamburg.–2001.–**2735**.
- [6] *Боеводский А. В. и др.* // Изв. АН, Сер. физ.–1999.–**63**, в. 3.–С. 612–614.
- [7] *Alekseenko V. V. et al.* // Proc. 27th ICRC, Hamburg.–2001.–**2764**.
- [8] *Alekseenko V. V. et al.* // Nuclear Phys. B (Proc. Suppl. Ser.).–2002.–**110**.–P. 472.
- [9] *Alexeyev E. N. et al.* // Proc. 23rd ICRC, Calgary.–1993.–**2**.–P. 474.
- [10] *Alexeyev E. N. et al.* Preprint INR 854/94.–Moscow, 1994.
- [11] <http://gammaray.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog>.