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

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, $E_\gamma = 30-500$ кэВ) гамма-всплесками. По данным за 1996–2001 гг. 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^2 в полосе склонений $10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$: $\Omega_{lim} = 2.0 \cdot 10^{-8}$ с$^{-1}$ 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^2.

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 работающми 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.

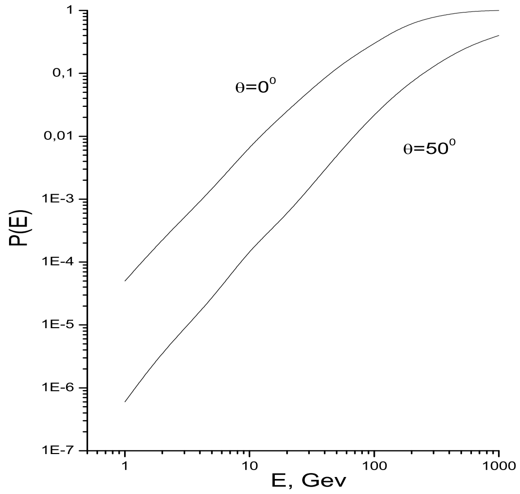

Рис. 1. Вероятность регистрации гамма-квантов детектором бесконечной площади как функция первичной энергии

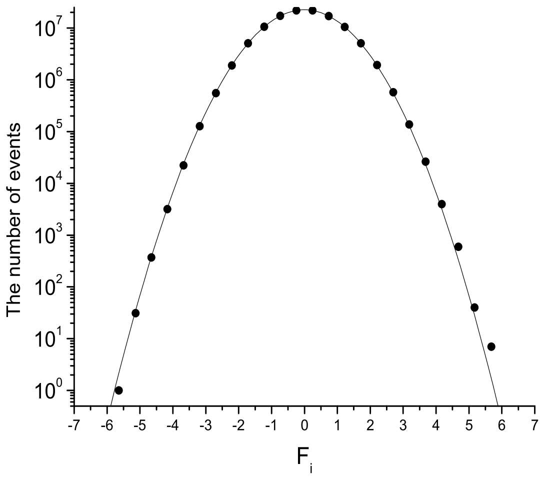

Рис. 2. Экспериментальное распределение количества событий N по F_i. Точки – эксперимент, линия – аппроксимация распределением Гаусса

ЭКСПЕРИМЕНТ

Ливневая установка "Андырчи" [9, 10] расположена на высоте 2060 м над уровнем моря (глубина в атмосфере 800 г/см^2) и состоит из 37 детекторов на основе пластмассового сцинтиллятора. Каждый сцинтиллятор имеет площадь 1 м^2, 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°C, температура сцинтиллятора – не более, чем на 3°C. 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$^{-1}$. 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^2) 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 начат 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 θ 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 $\overline{N}$:

$$F_i = (N_i - \overline{N})/\sqrt{\overline{N}}. \qquad (1)$$

Поскольку вариациями интенсивности космических лучей за 15 мин в первом приближении можно пренебречь, и средний темп счета достаточно велик ($\overline{N} = 11440$ 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:

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

Здесь F_i^j – отклонение j-й части установки, $\overline{F}_i$ – 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

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

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 аппаратурные погрешности. Полезные события (секундные точки) могут быть отброшены с вероятностью $2\cdot10^{-9}$ для всех событий и с вероятностью $1.3\cdot10^{-3}$ 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

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

где $N = F_i\cdot\sqrt{\overline{N}}$ и $S = 37$ м^2. Значению $F_i = 6$ и длительности всплеска 1 с соответствует поток $W_1 = 5.6\cdot10^{-3}$ 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 Δt = 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 Δt. Распределения по F_i для больших длительностей аналогичны приведенному на рис. 2, в них также отсутствуют большие

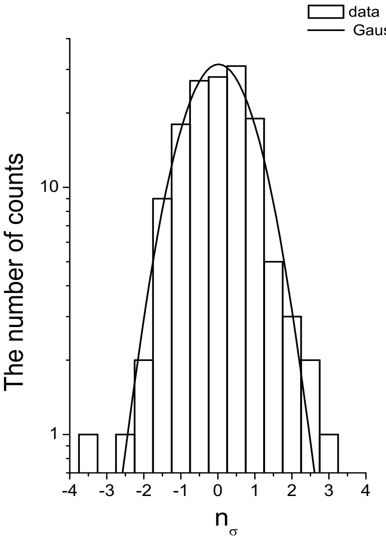

Рис. 3. Экспериментальное распределение количества событий N по n_σ для интервала T_{90} и его аппроксимация гауссианой

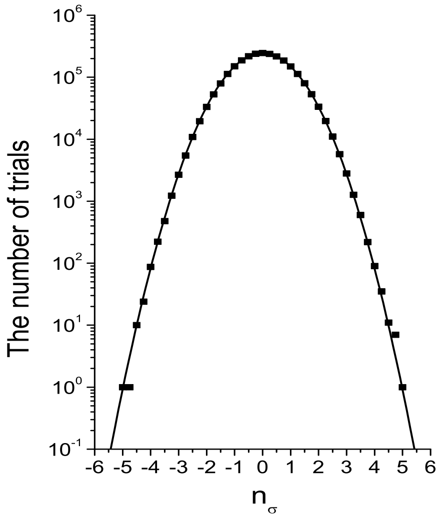

Рис. 4. Суммарное распределение количества событий N по n_σ для всех интервалов в пределах ± 1.5 ч вокруг всплеска BATSE

превышения над фоном. Значению $F_i = 6$ и длительности всплеска Δt 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^2 в полосе склонений $10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$: $\Omega_{lim} = 2.0 \cdot 10^{-8}$ с$^{-1}$ 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 “Андырчи” ($\theta \leq 50^\circ$). Для каждого из этих событий было вычислено превышение темпа счета n_σ (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_σ 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 γ-квантах. Диапазон ограничений составляет $W_{\max} = 6.5 \cdot 10^{-4} - 0.15$ эрг/см^2, большой разброс значений объясняется различием в зенитных углах и длительностях всплесков.

Всплеск γ-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 γ-излучения различной длительности (1–100 с) в корреляции с событиями BATSE был проведен в пределах ± 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 Δt 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 Δt. 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^2 в полосе склонений $10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$: $\Omega_{lim} = 2.0 \cdot 10^{-8}$ с$^{-1}$ 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^2. 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] *Воеводский 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.