ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

С. Н. Карпов, В. В. Алексеенко, А. Н. Заиченко, З. М. Карпова, В. Б. Петков, $\boxed{\text{В. Я. Поддубный,}}$ Н. С. Хаердинов

© 2003

Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований РАН
пос. Нейтрино, Эльбрусский р-н, 361609 Кабардино-Балкарская Республика, Россия
e-mail: karpov@neutr.novoch.ru

Для изучения солнечных космических лучей (СКЛ) высокой энергии, генерируемых во время мощных солнечных вспышек, предлагается использовать наземные детекторы широких атмосферных ливней (ШАЛ) и подземные мюоные детекторы. Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) в 21-м и 22-м циклах солнечной активности зафиксировал три всплеска интенсивности мюонов, коррелирующие с наземными возрастаниями СКЛ. В текущем 23-м цикле подобных всплесков на БПСТ не обнаружено. Пороговая энергия детекторов ШАЛ значительно выше, чем у нейтронных мониторов. Однако при использовании темпа счета одиночных частиц пороговая энергия определяется геомагнитным обрезанием и сопоставима с порогом регистрации нейтронных мониторов. Полный темп счета двух баксанских детекторов ШАЛ, "Андырчи" и "Ковер", был проанализирован во время наземных возрастаний СКЛ, наблюдавшихся в течение 23-го цикла солнечной активности. Во время шести таких событий из девяти обнаружены значимые превышения темпа счета над фоном галактических космических лучей. Статистическая точность стандартных нейтронных мониторов – около 1–0.5 % по 5-мин данным. Точность "Андырчи" и "Ковра" в этом случае составляет 0.05 % и 0.03 % соответственно, что позволяет фиксировать меньшие возрастания при большей пороговой энергии частиц. Имеются события, когда наземные возрастания СКЛ зарегистрированы только на полярных нейтронных мониторах, имеющих низкий порог регистрации (например Апатиты, E_{tot}= 1.1 ГэВ). В то же время среднеширотные мониторы с более высоким порогом (например Москва, E_{tot}= 2.6 ГэВ) возрастаний не зафиксировали. "Андырчи" и "Ковер" в этих случаях зарегистрировали статистически значимые возрастания (5–8 стандартных отклонений), несмотря на более высокий порог регистрации (E_{tot} = 5.8 ГэВ). Это позволяет продлить спектр СКЛ для данных событий в область более высокой энергии.

INVESTIGATION OF THE SOLAR COSMIC HIGH-ENERGY RAYS, by Karpov S. N., Alekseenko V. V., Zaichenko A. N., Karpova Z. M., Petkov V. B., $\boxed{\text{Poddubny V. Ya.}}$, Khaerdinov N. S. – We propose to use the ground-based extensive air shower (EAS) arrays and underground muon detectors to study the solar cosmic high-energy rays (SCR) generated during powerful solar flares. During both the 21st and the 22nd solar activity cycles the Baksan Underground Scintillation Telescope (BUST) recorded three short-term bursts of muon intensity correlating with the Ground Level Enhancements (GLE) of SCR. No similar muon bursts were found at the BUST in the current 23rd solar cycle. The primary protons causing those muon bursts have energies greater than 500 GeV, 100 times as large as the threshold energy of the neutron monitors which are used for the SCR study on the Earth surface. The threshold energy of EAS arrays is also greater than that of neutron monitors. The total counting rate of two Baksan EAS arrays "Andyrchy" and "Carpet" was examined during the GLE events observed in the 23rd solar activity cycle. Significant excesses above the galactic cosmic ray background were found during several GLE events. The statistical accuracy of neutron monitors by the 5–minute data is about 1 %. This quantity for the "Andyrchy" and "Carpet" is 0.05 % and 0.03 %, respectively. It allows us to fix lesser intensity rises at greater threshold energy of particles. There are GLE events recorded only at the polar neutron monitors (e.g., Apatity), which have low threshold energies (about 1 GeV). The middle-latitude monitors (e.g., Moscow) with a greater threshold didn't show any excess at the same time. In these cases "Andyrchy" and "Carpet" recorded statistically significant rises (5–8 standard deviations) despite their greater threshold energy – 5.8 GeV. These facts allow us to extend the SCR spectrum of those events to a higher energy region.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения солнечных космических лучей (СКЛ) в диапазоне энергий от 1 ГэВ до 15 ГэВ обычно используются нейтронные мониторы. Установки для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) имеют значительно более высокий порог регистрации: от нескольких десятков ТэВ до сотен ТэВ. Однако кроме ливневого компонента они регистрируют и одиночные частицы — мюонный и электромагнитный компоненты. Эта информация обычно используется для мониторинга параметров детекторов. Минимальная энергия регистрации для одиночного компонента определяется геомагнитным порогом обрезания. Диапазон энергии первичных частиц близок к диапазону, перекрываемому нейтронными мониторами. В этом случае главным преимуществом детекторов ШАЛ является значительно больший темп счета. Характерная статистическая точность нейтронных мониторов 1–0.5 % по 5-мин данным. Баксанские ливневые установки "Андырчи" и "Ковер" при тех же условиях имеют точность 0.05 % и 0.03 % соответственно. Это позволяет регистрировать в 10 раз более слабые потоки частиц, чем на нейтронных мониторах.

Первая достоверная регистрация СКЛ на ливневой установке была выполнена на баксанской установке "Ковер" [2]. Во время мощной вспышки на Солнце 29 сентября 1989 г. "Ковер" зафиксировал огромное возрастание величиной (43.30 ± 0.03) % в темпе счета одиночного компонента. Пороговая энергия определяется геомагнитным порогом обрезания и составляет $\mathrm{E}_k^{th} = 4.8$ ГэВ ($\mathrm{R}_c = 5.7$ ГВ). Кроме этого, "Ковер" зафиксировал возрастание величиной (14.0 ± 0.5) % в темпе счета трехкратного компонента. Главным образом ее составляют локальные ливни малой мощности, которые рождаются вторичными частицами на высоте 1–3 радиационных единиц над установкой. Минимальная энергия E_{min} первичных частиц в этом случае составляет около 10 ГэВ [3].

В текущем 23-м цикле солнечной активности был выполнен анализ данных одновременной регистрации СКЛ от солнечных вспышек на двух баксанских ливневых установках "Андырчи" и "Ковер" и на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ). С 1996 г. по июль 2002 г. мировой сетью нейтронных мониторов зафиксировано девять наземных возрастаний СКЛ от вспышек (так называемые события GLE – Ground Level Enhancement). В шести из них зафиксированы возрастания на "Андырчи" и "Ковре". На БПСТ в текущем цикле не обнаружено всплесков интенсивности мюонов во время событий GLE.

В 23-м цикле для отдельных событий GLE подобная работа была выполнена и на других ливневых установках, таких как MILAGRO, GRAND и L3+C.

ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРОВ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Научный комплекс Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) состоит из целого ряда крупных установок для исследования космических лучей и для низкофоновых экспериментов. Обсерватория расположена на Северном Кавказе в долине реки Баксан в точке с географическими координатами 43.28° с. ш. и 42.69° в. д. Все установки расположены у подножья, на склоне или внутри горы Андырчи на высоте 1700 м над уровнем моря (центр установки "Андырчи" находится на высоте 2050 м). Эффективная жёсткость геомагнитного обрезания R_c^{eff} в месте расположения БНО составляет 5.7 ГВ в магнитоспокойное время и 5.6 ГВ в магнитовозмущённые периоды. Расчет R_c выполнен Б. Б. Гвоздевским (Полярный геофизический институт, г. Апатиты) по модели магнитосферы Цыганенко [4].

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) подробно описан в работе [5]. Эффективная площадь телескопа – 200 м^2, эффективная толщина грунта над БПСТ – 850 м водного эквивалента. Пороговая энергия регистрируемых мюонов – 200 ГэВ. Установка "Ковер" является детектором центральной части ШАЛ и состоит из 400 счетчиков размером $70{\times}70{\times}30$ см^3 на основе жидкого сцинтиллятора. Счетчики одним непрерывным слоем покрывают площадь $14{\times}14$ м^2. Более подробно "Ковер" описан в работе [6]. Установка "Андырчи" [7] для регистрации ШАЛ расположена на склоне одноименной горы над БПСТ. Состоит из 37 детекторов на основе пластического сцинтиллятора площадью $1{\times}1$ м^2 каждый и толщиной 5 см (эффективная площадь для регистрации ШАЛ – $5 \cdot 10^4$ м^2, суммарная площадь сцинтиллятора – 37 м^2). Расстояние между соседними детекторами составляет 40 м.

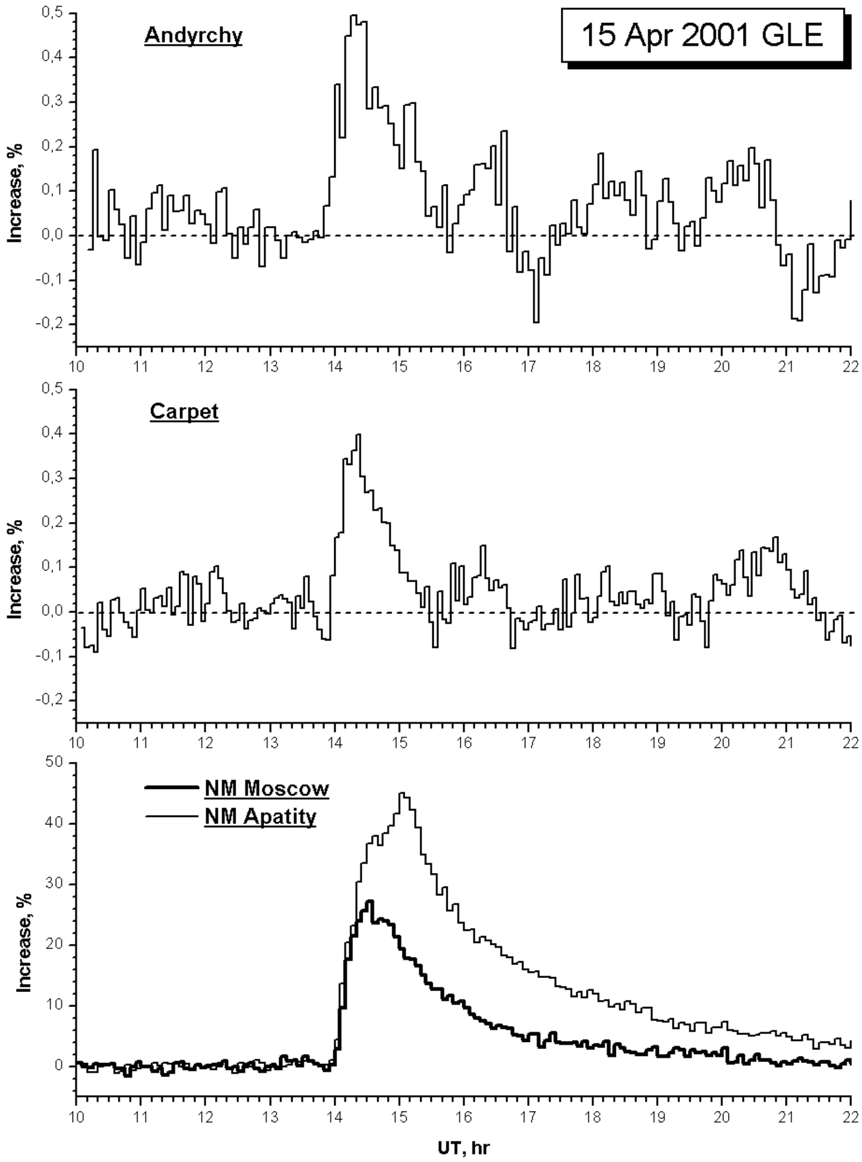
Поиск всплесков интенсивности мюонов на БПСТ во время событий GLE проводился по той же методике, что и в предыдущих 21-м и 22-м циклах солнечной активности. Она достаточно подробно описана в работе [1]. Энергия первичных протонов, вызвавших всплески на БПСТ, превышает 500 ГэВ. Это почти в 100 раз больше энергии регистрации на нейтронных мониторах, обычно использующихся для изучения СКЛ на поверхности земли. В текущем 23-м цикле не обнаружено мюонных всплесков, сравнимых по величине с тремя всплесками, зафиксированными ранее. Возможно, это связано с тем, что 23-й цикл слабее, чем 21-й и 22-й.

Для поиска сигналов во время событий GLE на установках "Андырчи" и "Ковер" использовались данные регистрации одиночных частиц. Темп счета детекторов в этом случае определяется как жестким компонентом (высокоэнергичные мюоны, около 60 % отсчетов), так и мягким компонентом (низкоэнергичные мюоны и электромагнитный компонент, около 40 % отсчетов). Темп счета таких частиц на "Андырчи" составляет 11500 $с^{-1}$, а на "Ковре" – 40000 $с^{-1}$. В анализе использовались 5-мин данные регистрации на "Андырчи" и 4-мин на "Ковре". Статистическая точность составляет в этом случае 0.05 % для "Андырчи" и 0.03 % для "Ковра". При рассмотрении данных ливневых установок важным моментом является исключение вариаций атмосферного происхождения. Величина этих вариаций сравнима или даже больше ожидаемого сигнала от СКЛ на "Андырчи" и "Ковре". В соответствии с теорией метеорологических эффектов [8, 9] для введения поправок необходимо иметь данные измерений атмосферного давления и температурного разреза атмосферы в точке наблюдения. Атмосферное давление непрерывно измеряется на "Андырчи" и "Ковре" с помощью цифровых барографов с точностью не хуже чем 0.1 мбар. Данные аэрологического зондирования температур в атмосфере над пунктом регистрации на Баксане отсутствуют. Осуществляется непрерывное измерение температуры только в приземном слое. В некоторых случаях допускается использование таких данных для введения поправок [8, 9]. Однако следует учитывать, что связь между приземной температурой и вариациями космических лучей является статистической, корреляционной. Поэтому введенные таким способом атмосферные поправки являются довольно грубым приближением. Тем не менее, при усреднении за достаточно длительные интервалы наблюдений такой метод может дать вполне приемлемые результаты. Для коротких интервалов (порядка суток и менее) не гарантируется корректность вводимых поправок. Длительность событий GLE при пороговой жесткости 5.7 ГВ обычно не превышает нескольких часов. Очевидно, что корректное введение атмосферных поправок с использованием только приземной температуры весьма проблематично.

Однако при изучении возрастаний СКЛ используются величина возрастания в процентах относительно фона галактических космических лучей (ГКЛ) до начала возрастания и временной профиль относительной интенсивности. Использование относительной интенсивности существенно упрощает коррекцию метеоэффектов. Достаточно устранить систематический тренд интенсивности, связанный с ходом давления и температуры. Вообще говоря, не требуется коррекции интенсивности по абсолютной величине. Для устранения тренда использовались коэффициенты регрессии, полученные при одновременной корреляции темпа счета установки с давлением и приземной температурой. Мы отдаем себе отчет в том, что приземная температура далеко не всегда отражает изменение температуры в других слоях атмосферы. Такая связь носит статистический, корреляционный характер [8, 9]. Поэтому в случаях, когда коэффициент корреляции оказывался меньше 0.7, температурная коррекция не производилась. Наблюдается значительный разброс значений коэффициентов регрессии для разных периодов наблюдений, что и следовало ожидать исходя из общей теории метеоэффектов [8, 9]. Конечно, примененный метод недостаточно строг, но представляется вполне приемлемым при использовании относительной интенсивности и для коротких интервалов времени (от нескольких часов до суток).

На рисунке представлены данные регистрации СКЛ на различных установках во время вспышки 15 апреля 2001 г. Эта вспышка была одной из самых мощных в текущем цикле и дала наибольшее возрастание на "Андырчи" и "Ковре". На верхней панели рисунка представлены 5-мин данные "Андырчи", на средней – 4-мин данные "Ковра", а на нижней – 5-мин данные нейтронных мониторов Апатиты и Москва. Во всех случаях показано превышение над галактическим фоном в процентах после введения поправок на метеорологические эффекты. В соответствии со стандартной методикой за уровень фона принимался средний темп счета каждой установки в течение часа до начала вспышки. Величина возрастаний на "Андырчи" и "Ковре" оставляет 0.50 % и 0.40 % соответственно. Это примерно в 100 раз меньше, чем возрастание в Апатитах. Такое отличие в первую очередь связано с тем, что спектр СКЛ – падающий, а пороговая жесткость регистрации на Баксане (5.7 ГВ) почти в 9 раз больше, чем в Апатитах (0.65 ГВ). Сигналы величиной 0.5 % не регистрируются на стандартных нейтронных мониторах. Только благодаря высокой статистической точности на "Андырчи" и "Ковре" мы видим достоверный сигнал – 9σ и 13σ в максимуме возрастания.

Таким же методом были проанализированы и другие события GLE. В таблице представлены данные "Андырчи" и "Ковра" во время всех девяти GLE текущего цикла (до июля 2002 г.). Для сравнения приведены также данные нейтронного монитора Апатиты. Во время всех событий име-



Наземное возрастание СКЛ во время солнечной вспышки 15 апреля 2001 г. по данным регистрации на различных установках

ются данные регистрации либо обеих баксанских установок, либо одной из них. В шести событиях из девяти зафиксированы возрастания на баксанских установках, превышающие 3 стандартных отклонения. Все возрастания составляют десятые доли процента. Поэтому не могут быть зафиксированы на нейтронных мониторах с геомагнитным порогом 5–6 ГВ. Таким образом, данные "Андырчи" и "Ковра" позволяют продлить спектр СКЛ в указанных событиях до 5.7 ГВ. Особенно интересны с этой точки зрения GLE 6 мая и 24 августа 1998 г. Даже на высокоширотном НМ Апатиты было зарегистрировано только слабое возрастание величиной около 3 %. На "Андырчи" сигнал составил 0.28 % и 0.31 %, что соответствует 5.0σ и 5.7σ. Это может указывать на наличие жесткого спектра в этих событиях. Кроме того, GLE 24 августа произошло ночью по местному времени, что представляет интерес при изучении анизотропии СКЛ и распространения частиц в магнитосфере Земли и в ММП.

В дальнейшем при получении спектров СКЛ необходимо учитывать отличие функций отклика ливневых установок и нейтронных мониторов на одинаковый поток первичных частиц. Пороговая энергия в обоих случаях определяется геомагнитным обрезанием. Медианная энергия ливневых установок довольно сильно зависит от наклона спектра и изменяется от 25 ГэВ

События GLE 23-го цикла солнечной активности

GLE №, дата	НМ Апатиты	"Андырчи", 5-мин		"Ковер", 4-мин	
	Incr., %	Incr., %	St. dev.	Incr., %	St. dev.
55, 1997, Nov. 6	10.5 (5min)	0.19	3.5	Not operated	
56, 1998, May 2	10 (5min) *	0.30	5.5	0.41	13
57, 1998, May 6	3 (5min)	0.28	5.0	Not operated	
58, 1998, Aug. 24	~2.5 (5min)	0.31	5.7	0.23	6.8
59, 2000, July 14	38 (1min)	Not operated		0.09	2.8
60, 2001, Apr. 15	46 (1min)	0.50	8.9	0.40	13
61, 2001, Apr. 18	17 (1min)	0.42	7.3	0.57	18
62, 2001, Nov. 4	3 (5min)	Lack of increase		Lack of increase	
63, 2001, Dec. 26	7.5 (1min)	Lack of increase		Not operated	

* Data of NM Goos Bay

для галактического спектра до 6 ГэВ для спектра с показателем 6. Верхняя граница диапазона чувствительности "Андырчи" $E_{0,95}$ еще сильнее зависит от формы спектра. Для галактического спектра она равна 900 ГэВ. Для спектра с показателем 6 ее величина составляет всего лишь 12 ГэВ.

ВЫВОДЫ

На двух баксанских ливневых установках "Андырчи" и "Ковер" зафиксировано шесть возрастаний СКЛ из девяти GLE, происшедших в 23-м цикле солнечной активности. Величина сигнала во всех случаях составляет десятые доли процента. Такие возрастания не могут быть обнаружены на НМ с таким же геомагнитным порогом. Только высокая статистическая точность "Андырчи" и "Ковра" позволяет регистрировать значимый сигнал. Благодаря этому появляется возможность продлить спектр СКЛ в этих событиях до 5.7 ГВ. При этом необходимо учитывать отличие функций отклика ливневых установок и нейтронных мониторов.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 01-02-16947.

[1] *Karpov S. N., Miroshnichenko L. I., Vashenyuk E. V.* Muon bursts at the Baksan Underground Scintillation Telescope during energetic solar phenomena // IL Nuovo Cimento.–1998.–**21C**, N 5.–P. 551–573.

[2] *Алексеев Е. Н., Алексеенко В. В., Горчаков Е. В. и др.* Предварительный анализ солнечной вспышки 29 сентября 1989 г. по данным установки "Ковер" Баксанской нейтринной обсерватории // Изв. АН СССР. Сер. физ.–1991.–**55**.–С. 1874–1876.

[3] *Alexeenko V. V., Chernyaev A. B., Chudakov A. E., et al.* 29 September 1989 GLE (Ground Level Enhancement) at Baksan Air Shower Array (BASA) // Proc. 23rd Intern. Cosmic Ray Conf., Calgary.–1993.–**3**.–P. 163–166.

[4] *Tsyganenko N. A.* A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet // Planet. and Space Sci.–1989.–**37**, N 1.–P. 5–20.

[5] *Alexeyev E. N., Alexeyenko V. V., Andreyev Yu. M., et al.* Baksan underground scintillation telescope // Proc. 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto.–1979.–**10**.–P. 276–281.

[6] *Alexeenko N. A., Alexeenko V. V., Alexeyev E. N., et al.* Baksan CARPET–2 large area muon detector // Proc. 23rd Intern. Cosmic Ray Conf., Calgary.–1993.–**2**.–P. 477–479.

[7] *Алексеев Е. Н., Алексеенко В. В., Бакатанов В. Н. и др.* Установка "Андырчи" для регистрации ШАЛ над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом // Изв. АН.–1993.–**57**, № 4.–С. 99–102.

[8] *Дорман Л. И.* Вариации космических лучей.–М.: Физматгиз, 1957.

[9] *Дорман Л. И.* Метеорологические эффекты космических лучей.–М.: Наука, 1972.