

УДК 537.591.15

ЭКСПЕРИМЕНТ СФЕРА: БАЙКАЛ 2010 г.

© 2011 г. Р. А. Антонов¹, С. П. Бешапов², Е. А. Бонвеч¹, В. И. Галкин¹, Т. А. Джатдоев¹,
А. С. Петкун¹, Д. А. Подгрудков¹, Т. М. Роганова¹, Т. И. Сысоева², Мих. Фингер³,
Мир. Фингер³, Д. В. Чернов¹, С. Б. Шаулов²

E-mail: antr@dec1.sinp.msu.ru

В начале 2010 г. проведено несколько подъемов установки СФЕРА-2 с помощью привязного аэростата над заснеженной поверхностью озера Байкал. Были проведены измерения черенковского света широких атмосферных ливней (ШАЛ). Приведены предварительные результаты обработки данных эксперимента СФЕРА-2 на различных высотах наблюдения.

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент СФЕРА является этапом развития новой методики исследования ШАЛ, базирующейся на идеях А.Е. Чудакова [1]. Экспериментальная установка СФЕРА-2 [2–5] представляет собой оптическую систему, состоящую из сферического зеркала диаметром 1.5 м с корректирующей диафрагмой и мозаики из 109 ФЭУ, расположенной в фокальной поверхности зеркала. Установка поднимается в ночной безлунный период над покрытой снегом ледовой поверхностью озера Байкал на высоту до 1 км и регистрирует черенковское излучение ШАЛ, отраженное от снега.

1. КОНТРОЛЬ РАБОТЫ АППАРАТУРЫ

В марте 2010 г. осуществлено семь подъемов установки СФЕРА-2 с помощью привязного аэростата над покрытой снегом и льдом поверхностью озера Байкал. В течение шести подъемов проводились измерения черенковского света ШАЛ.

Во время работы установки проводился контроль параметров работы аппаратуры. В частности, в течение всех полетов постоянно измерялись величины анодных токов ФЭУ $i_{\text{ФЭУ}}$. Этот параметр несет информацию о коэффициентах усиления ФЭУ $k_{\text{ФЭУ}}$, прозрачности атмосферы и отражающей способности снежной поверхности

$$i_{\text{ФЭУ}} = k_{\text{ФЭУ}} I S \Omega \eta K 1.6 \cdot 10^{-19},$$

где $I = 5 \cdot 10^{12}$ фотон $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ – световой фон звездного неба, $S = 0.465^2 \pi - 0.245^2 \pi \approx 0.49 \text{ м}^2$ – рабочая площадь зеркала, $\Omega = 2 \cdot 10^{-3} \text{ ср}$ – телес-

ный угол обзора каждого ФЭУ (полный угол обзора ФЭУ $\varphi = 28 \text{ мм}/525 \text{ мм} = 0.053 \text{ рад} = 3.05 \text{ град}$), $\eta = 0.1$ – квантовая эффективность фотокатода ФЭУ, $K \approx 0.8 \times 0.8$ – коэффициент, учитывающий отражение от снега и от поверхности зеркала.

При величине коэффициента усиления $k_{\text{ФЭУ}} \approx 10^5$ анодный ток ФЭУ $i_{\text{ФЭУ}} \approx 5 \text{ мкА}$.

В эксперименте измерение токов для каждого ФЭУ производится раз в минуту. По результатам прямых измерений ток $i_{\text{ФЭУ}}$ для разных ФЭУ составил 2–4 мкА. В конце каждого сеанса наблюдалось небольшое увеличение тока, что соответствует началу рассвета.

Условие выработки триггерного условия МЗ – превышение амплитудой импульса порогового уровня ($V_{\text{пор}}$) в трех расположенных рядом в мозаике фотоумножителях. Уровень $V_{\text{пор}}$ соответствует 5σ , где σ – величина флуктуаций тока фотокатода ФЭУ во временном интервале 25 нс. Величина флуктуаций тока оценивается, как $\sigma = (IS\Omega\eta K 25 \cdot 10^{-9})^{0.5} \approx 3 \text{ ф.э.}$ Тогда $V_{\text{пор}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$, что соответствует 2.5 единицам кода системы регистрации.

Оценки и расчетные функции пространственного распределения черенковского света (ФПР ЧС) ШАЛ [6] показывают, что при расположении установки СФЕРА-2 на высоте до 1 км над снежной поверхностью и величине порога срабатывания $V_{\text{пор}} > 5 \text{ мВ}$ можно изучать форму ФПР ЧС в ШАЛ с энергией 10 ПэВ в области расстояний от оси ШАЛ вплоть до 200 м.

После подъема установки на заданную высоту в автоматическом режиме проводится установка порогов срабатывания во всех измерительных каналах так, чтобы темп счета событий, обусловленных фоном звездного неба, в каждом из каналов регистрации составлял ориентировочно 10 Гц. В течение полета число срабатываний каждого измерительного канала фиксируется 1 раз в 10 мин.

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелыцина Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

² Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва.

³ Карлов университет, Чехия.

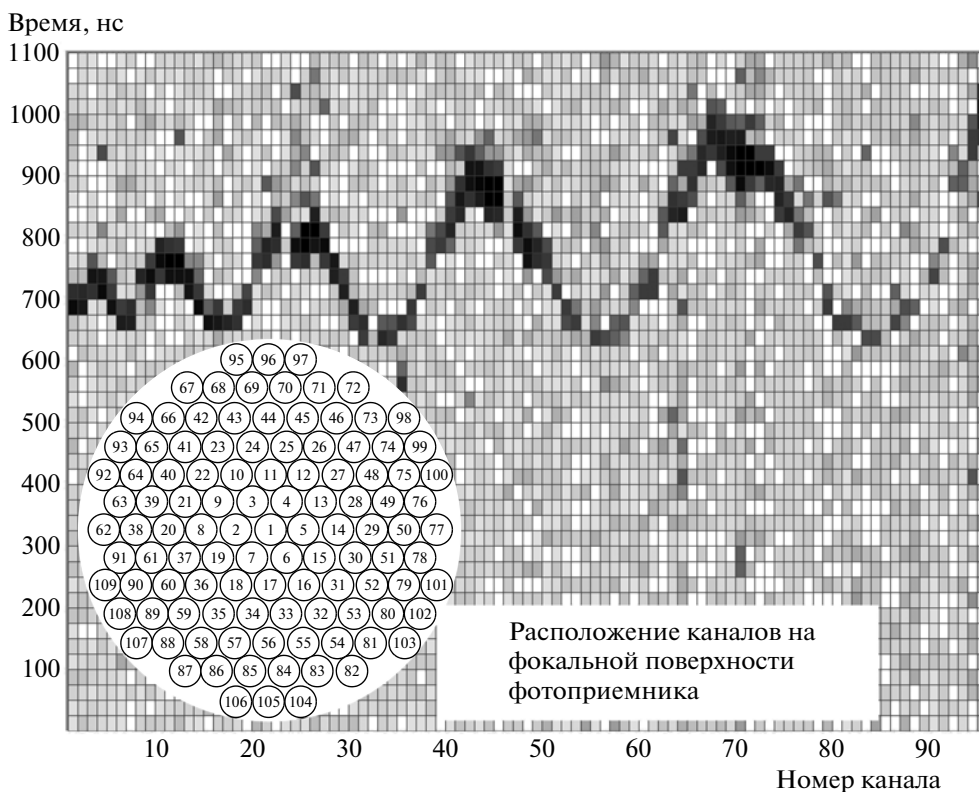


Рис. 1. Пример представления экспериментального события. По горизонтальной оси отложены номера измерительных каналов, по вертикальной — относительное время. Каждый прямоугольник соответствует одному измерению АЦП с шагом 25 нс. Интенсивность закрашивания прямоугольника пропорциональна амплитуде импульса, черный цвет — максимальная амплитуда в событии. Кругжками показано расположение номеров каналов в мозаике ФЭУ.

Разброс этой величины характеризует точность, с которой устанавливается порог срабатывания каналов, регистрирующих импульсы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В таблице приведены данные о времени измерений и высоте подъема установки над поверхностью озера Байкал (455 м над уровнем моря). За 29 ч измерений зарегистрировано 1343 срабатывания триггера.

Для предварительного анализа зарегистрированных событий используется их графическое представление, подобное приведенному на рис. 1. На графике представлены осциллограммы для 95 измерительных каналов. По горизонтальной оси отложены номера каналов, по вертикальной — относительное время. Каждый прямоугольник соответствует одному измерению АЦП с шагом 25 нс. Интенсивность закрашивания прямоугольника

пропорциональна амплитуде импульса, черный цвет — максимальная амплитуда в событии. На рисунке видно, что в таком представлении осциллограмм временные интервалы с максимальными амплитудами импульса образуют кривую сложной синусоподобной формы. Этот эффект возникает за счет взаимного расположения каналов в мозаике фотоприемника, также приведенного на рис. 1. Каждый последующий период упомянутой кривой соответствует измерительным каналам фотоумножителей, расположенных в виде очередного кольца на поверхности фотоприемника. Амплитуда (по оси времени) каждого периода кривой зависит от зенитного угла оси ШАЛ. Сдвиг фазы кривой отражает азимутальный угол оси ШАЛ. Черные прямоугольники показывают область, близкую к оси ШАЛ.

Приведенный метод анализа применяется для предварительной, качественной оценки парамет-

Время экспозиции установки СФЕРА-2 на разных высотах в 2010 г.

Высота подъема установки, м	900	700	500	380
Время экспозиции, мин	940	210	195	405

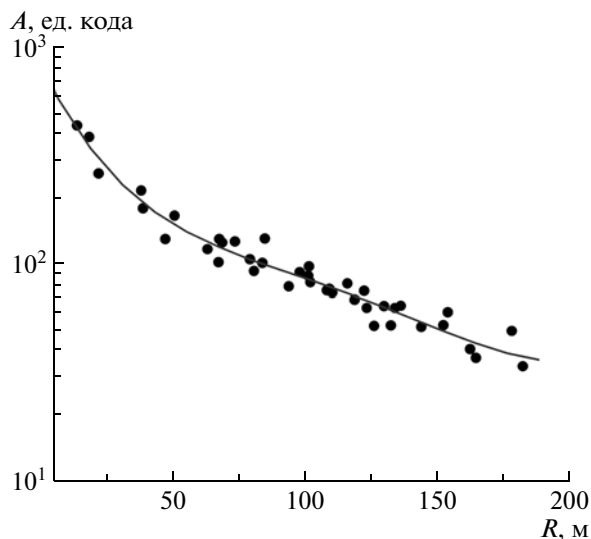


Рис. 2. Пример ФПР ЧС события, зарегистрированного установкой СФЕРА-2. $E_0 \sim 2 \cdot 10^{16}$ эВ, $\sim 19^\circ$, высота аэростата 380 м над поверхностью озера. Сплошная кривая — результат аппроксимации экспериментальных данных.

ров ШАЛ, а также как характеристика эффективности работы измерительной аппаратуры.

Более точное определение параметров ШАЛ достигается с использованием вариативной методики [6]. Направление оси ШАЛ находится в предположении плоского фронта черенковского света ШАЛ. На рис. 2 приведен график функции пространственного распределения ЧС ШАЛ для рассмотренного ранее события. На графике видно, что при подъеме аэростата на небольшую высоту достигается высокое пространственное разрешение. Ближайшая к оси ШАЛ точка лежит на расстоянии всего 15 м. При этом поле зрения

ФЭУ, соответствующего данной точке, перекрывает область пересечения оси ШАЛ с поверхностью озера. Измерение значения интенсивности ЧС вблизи оси ШАЛ недоступно для большинства наземных установок. Однако учет этих значений может помочь в решении задачи определения химического состава первичных космических лучей сверхвысоких энергий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия измерений черенковского излучения ШАЛ с помощью аэростатной установки СФЕРА-2. Проведена реконструкция ФПР ливней, зарегистрированных установкой СФЕРА-2 в марте 2010 г. Обработка экспериментальных данных продолжается.

Работа поддерживается Программой фундаментальных исследований Президиума РАН “Физика нейтрино и нейтринная астрофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чудаков А.Е. // Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий: Матер. Всесоюз. симпоз. Якутск, 1972. С. 769.
2. Антонов Р.А., Петрова Е.А., Федоров А.Н. // Вестн. МГУ, Сер. Физика. Астрономия. 1995. Т. 36. № 4. С. 102.
3. Antonov R.A., Chernov D.V., Korosteleva E.E. et al. // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 1. P. 59.
4. Antonov R.A., Chernov D.V., Korosteleva E.E. et al. // J. Radiat. Phys. Chem. 2006. V. 75. P. 887.
5. Анохина А.М., Антонов Р.А., Бонвеч Е.А. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2009. № 5. С. 32.
6. Anokhina A.M., Antonov R.A., Bonvech E.A. et al. // Proc. 31st ICRC. Lodz. 2009. id-0434.