

УДК 537.591.15

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА СИГНАЛА ОТРАЖЕННОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА СФЕРА-2

© 2019 г. Е. А. Бонвеч^{1, *}, В. И. Галкин², Т. А. Джатдоев¹,
Д. А. Подгрудков², Т. М. Роганова¹, Д. В. Чернов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: chr@sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

СФЕРА-2 — черенковский телескоп, подвешенный под привязным аэростатом и регистрирующий оптическое излучение Вавилова—Черенкова широких атмосферных ливней, отраженное от снежной поверхности оз. Байкал. Проведено детальное моделирование отклика детектора СФЕРА-2 с использованием специально разработанного кода. Полученные модельные события похожи на события от ШАЛ, зарегистрированные в процессе наблюдений на оз. Байкал. Настоящая работа поможет провести изучение состава космических лучей в области энергий 10–100 ПэВ в режиме индивидуальных событий.

DOI: 10.1134/S0367676519080088

ВВЕДЕНИЕ

Проект СФЕРА направлен на изучение первичного космического излучения в диапазоне энергий свыше $3 \cdot 10^{15}$ эВ. Черенковский телескоп СФЕРА-2 регистрирует излучение Вавилова—Черенкова широких атмосферных ливней от космических частиц с энергиями в диапазоне от 10^{16} до 10^{18} эВ, отраженное от заснеженной поверхности земли. Измерения проводились в зимний период 2009–2013 гг. над покрытой снегом ледовой поверхностью озера Байкал. Детектор поднимался на высоту до 900 м над озером. Было зарегистрировано более тысячи событий, классифицированных как события от отраженного черенковского света ШАЛ.

Установка СФЕРА-2 является небольшим оптическим прибором, поднимаемым над поверхностью земли с помощью привязного аэростата. Оптическая система установки состоит из сферического зеркала диаметром 1.5 м и радиусом кривизны 940 мм, мозаики 109 фотоумножителей, расположенной в фокусе зеркала, и ограничивающей диафрагмы Шмидта с диаметром входного отверстия 930 мм [1]. Широкий угол обзора установки в 52 градуса позволяет наблюдать большую поверхность снега с площадью, практически равной квадрату высоты подъема установки. Система сбора данных с 109-ю электронными каналами обеспечивает регистрацию и сохранение данных.

В отличие от наземных черенковских установок, характеристики экспозиции установки СФЕРА-2 зависят от условий проведения измерений, главным из которых является высота H подъема установки над снежной поверхностью, отражающей черенковское излучение ШАЛ. Поэтому параметры экспозиции необходимо рассчитывать отдельно для каждого положения установки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для расчета характеристик установки было проведено полное Монте-Карло моделирование развития широких атмосферных ливней от частиц первичного космического излучения, отражения черенковского света от снега, эффектов, вносимых оптической системой детектора, процессов преобразования фотонов в электрические сигналы в детекторе и работы триггерной системы детектора.

Для проведения расчета пространственно-временной структуры черенковского света ШАЛ на уровне отражающей поверхности использовался специализированный пакет программ CORSIKA 6.500 [2] с моделью высокоэнергетичных адронных взаимодействий QGSJET-I/II [3, 4] и моделью GHEISHA [5] взаимодействий адронов при низких энергиях. Расчет проводился для уровня наблюдения 455 м над уровнем моря, что соответствует высоте поверхности озера Байкал.

На этом этапе для ускорения расчетов учитывается квантовая эффективность используемых в эксперименте фотоумножителей ФЭУ-83-4 и коэффициент отражения от зеркала $K = 0.9$. Поэтому далее все распространение света предполагается не зависящим от частоты и прослеживаются эквивалентные фотоэлектроны от черенковских фотонов ШАЛ с учетом заложенной квантовой эффективности ФЭУ. Моделирование было проведено для четырех типов первичных ядер: протонов, гелия, азота и железа, для трех энергий: 10, 30 и 100 ПэВ и двух диапазонов зенитных углов: до 20 градусов и от 20 до 40 градусов от вертикали; всего рассчитано более полутора тысяч различных каскадов. Результатом первого этапа моделирования для каждого первичного ядра является пространственно-временной трехмерный массив эквивалентных фотоэлектронов на уровне поверхности озера $F(nx, ny, nt) = F[480][480][102]$ с дискретностью 2.5 м по двум координатам и 5 нс по времени.

На следующем этапе моделирования учитываются оптические и геометрические эффекты распространения света от снежной поверхности до детектора: отражение света от снега и модель оптической системы детектора. Каждый фотоумножитель детектора, поднятого на высоту H , обозревает свою часть отражающей поверхности и регистрирует фотоны света, дошедшие от нее. Коэффициент отражения от снега в области чувствительности ФЭУ от 300 до 400 нм практически постоянен [6], что также позволяет работать уже на предыдущем этапе расчета в терминах эффективных фотоэлектронов.

Для моделирования прохождения фотонов через оптическую систему детектора, расположенного на высоте H над уровнем снежной поверхности озера, используется программный код GEANT4 [7]. Расчеты проведены для высот 400, 500, 580, 700 и 900 м, характерных для расположения детектора в эксперименте. Для каждого первичного ядра из первого этапа моделирования рассчитывался массив фотонов, дошедших до фотокатодов ФЭУ детектора при расположении установки на всех пяти указанных высотах для ста различных вариантов расположения оси ливня в поле зрения установки. Таким образом, для каждого индивидуального ливня рассчитывалось пятьсот различных вариантов "точек зрения детектора" на этот ливень, представляющих собой массив эффективных фотоэлектронов, достигших мозаики ФЭУ. Для каждого эффективного фотоэлектрона записываются время прилета, номер ФЭУ ($N_{\text{ФЭУ}}$), расстояние до центра фотокатода и угол падения на него.

На третьем этапе проводится моделирование работы электронной части установки с дискретностью 1 нс. Для нормировки выходного сигнала принимается во внимание коэффициент абсолютной калибровки установки [8]. Учет фоновой засветки и шумов электроники производится пу-

тем добавления к расчетным данным части показальной развертки экспериментальных данных из области, далекой от регистрации черенковского сигнала. Итоговые модельные отклики сохраняются в формате, аналогичном формату экспериментальных данных детектора СФЕРА-2: амплитуды сигналов ста девяти измерительных каналов с дискретностью 12.5 нс общей длительностью 1.2 мкс. Это позволяет обрабатывать модельные и экспериментальные данные одними программами.

На следующем этапе рассчитанные отклики детектора проходят через модель работы триггерной системы установки для каждого экспериментального сеанса измерений. Устанавливаются пороги срабатывания дискриминаторов в измерительных каналах, равные экспериментальным. Таким образом проводится оценка эффективности регистрации установки для каждого сеанса измерений.

Пример рассчитанного отклика детектора СФЕРА-2, находящегося на высоте 580 м над уровнем поверхности снега, на первичное ядро железа с энергией 30 ПэВ и зенитным углом 27.5 градусов приведен на рис. 1а. На рассчитанный сигнал измерительных каналов наложены экспериментальные шумы. Данное событие прошло триггерный отбор в модели триггера. На рисунке по оси абсцисс отложен номер измерительного канала, по оси ординат — номер временного бина (T_{bin}) длиной 12.5 нс. Измерительные каналы пронумерованы согласно их расположению в мозаике ФЭУ по расходящейся спирали, начиная с центрального ФЭУ с номером 1 [1]. Для сравнения на рис. 1б приведено событие 2013-1-11228, зарегистрированное в 2013 г. установкой СФЕРА-2 с высоты 589 м над оз. Байкал. Расстояние от центра поля зрения оптической части установки до оси ливня для обоих событий составляет около 145 м.

Модельные и экспериментальные отклики детектора обрабатываются одними и теми же алгоритмами. В частности, по откликам детектора может быть построена функция пространственного распределения (ФПР) черенковского света ШАЛ. Для набора рассчитанных откликов детектора, расположенного на определенной высоте, от одного первичного ливня $F(nx, ny, nt)$, строится композитная модельная величина — составная функция пространственного распределения черенковского света ШАЛ от этой частицы. Она получается путем усреднения функций пространственного распределения, построенных по прошедшим триггерный отбор откликам детектора, рассчитанным на основании пространственно-временного массива фотоэлектронов $F(nx, ny, nt)$ одной и той же первичной частицы. Таким образом, составная ФПР — это представление детектора, находящегося на некоторой высоте, о ФПР ливня, усредненное по различным расположениям оси ливня в пределах поля зрения детектора. В составной ФПР флуктуации зарегистрированных

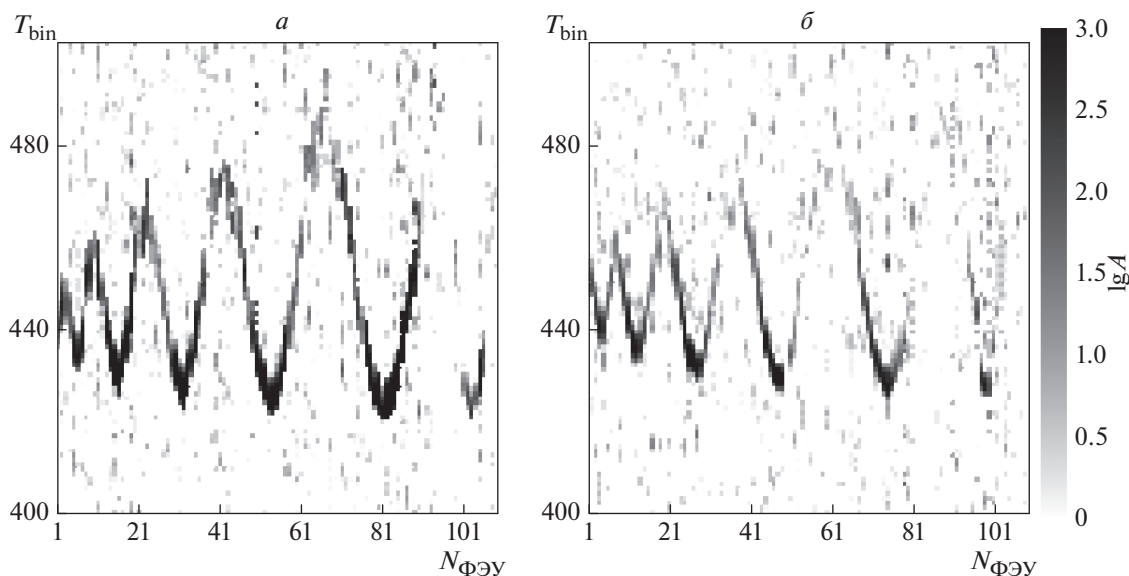


Рис. 1. Примеры отклика детектора СФЕРА-2: *а* — рассчитанный отклик установки, находящейся на высоте 580 м над уровнем наблюдения на черенковский свет от ядра железа с энергией 30 ПэВ; *б* — событие, зарегистрированное установкой в эксперименте 2013 г. с высоты 589 м.

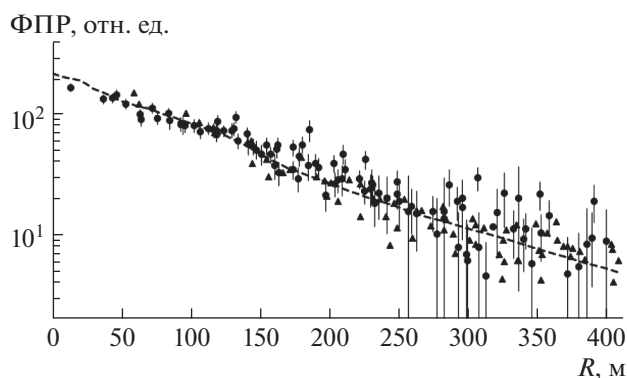


Рис. 2. Функция пространственного распределения черенковского света по данным модельного (треугольники) и экспериментального (кружки) откликов детектора, приведенных на рис. 1. Пунктирной линией нанесена составная ФПР для того же модельного события.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектор СФЕРА-2 является единственным детектором, с помощью которого было зарегистрировано значительное число широких атмосферных ливней методом регистрации отраженного черенковского света, а также построены функции пространственного распределения черенковского света для всех этих событий. Детальное моделирование отклика детектора методом Монте-Карло выполнено с помощью специального высококомпульсного кода. Результаты расчетов практически не зависят от предполагаемой модели оптических свойств снега. В работе возможно проводить исследования массового состава в режиме рассмотрения индивидуальных событий. Проводится работа по дополнительному улучшению процедур моделирования и определения массы частицы первичного космического излучения.

фотоэлектронов усреднены, но сохранена информация о флуктуациях развития исходного ШАЛ.

На рис. 2 треугольниками приведена ФПР для того же модельного отклика детектора, что и на рис. 1*а*. При построении составной ФПР эта модельная ФПР была усреднена вместе с другими ФПР, построенными по откликам детектора СФЕРА-2, находящегося на высоте 580 м над уровнем поверхности снега, на первичное ядро железа с энергией 30 ПэВ и зенитным углом 27.5 градусов. Полученная составная ФПР для этого ливня нанесена на рис. 2 пунктирной линией. Для сравнения, на этот же рисунок точками нанесена ФПР, нормированная на модельную, построенная по тому же экспериментальному отклику детектора, расположенного на высоте 589 м, что приведен на рис. 1*б*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Р.А., Аулова Т.В., Бонвеч Е.А. и др. // ЭЧАЯ. 2015. Т. 46. № 1. С. 115.
2. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // FZKA-6019. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.
3. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B. 1997. V. 52. P. 17.
4. Ostapchenko S.N. // Nucl. Phys. B. 2006. V. 151. P. 143.
5. Fesefeldt H.C. // Techn. Report PITHA 85-02 RWTH. Aachen: RWTH. Aachen, 1985.
6. Dumont M., Brussaoud O., Picard G. et al. // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 2507.
7. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // NIMA. 2003. V. 506. P. 250.
8. Antonov R.A., Bonvach E.A., Chernov D.V. et al. // Astropart. Phys. 2016. V. 77. P. 55.