

## КАСКАДНЫЕ ЛИВНИ В ЧЕРЕНКОВСКОМ ВОДНОМ ДЕТЕКТОРЕ НЕВОД

*С. С. Хохлов<sup>1</sup>, Н. С. Барбашина, А. Г. Богданов, А. Н. Дмитриева,  
Л. И. Душкин, Е. А. Задеба, В. В. Киндин, Е. А. Ковыляева, Р. П. Кокоулин,  
К. Г. Компаниец, В. С. Кругликова, А. А. Петрухин, В. А. Хомяков,  
Д. В. Чернов, В. В. Шутенко, И. И. Яшин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Обсуждается методика измерения энергии каскадных ливней в черенковском водном детекторе (ЧВД) НЕВОД с пространственной решеткой квазисферических модулей (КСМ), которая позволяет реконструировать число частиц в каскаде, двигающихся вблизи оси ливня, на основе анализа амплитуд откликов сработавших ФЭУ. Методика восстановления каскадной кривой опробована на каскадных ливнях, генерируемых околоразнонаправленными мюонами высоких энергий, выделенными при помощи размещенного вокруг ЧВД координатно-трекового детектора ДЕКОР. Представлены первые результаты измерения энергетического спектра каскадных ливней в интервале 10–1000 ГэВ.

The technique of cascade shower energy measurements with a Cherenkov water detector (ChWD) NEVOD having a spatial lattice of quasi-spherical modules (QSM) is discussed. This technique allows one to reconstruct the number of cascade particles moving near the shower axis on the basis of analysis of PMT response amplitudes. The technique of cascade curve reconstruction was applied to showers generated by nearly horizontal high-energy muons selected by means of a coordinate tracking detector DECOR deployed around the ChWD. First results of cascade energy spectrum measurements are presented for the interval 10–1000 GeV.

PACS: 29.40.-n; 29.40.Ka

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальный комплекс НЕВОД–ДЕКОР (рис. 1) создавался для регистрации всех основных компонентов космических лучей на поверхности Земли [1, 2]. Комплекс располагается на территории Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» в специальном четырехэтажном здании, оборудованном необходимыми системами, обеспечивающими его работу. Основой комплекса является размещенный внутри здания черенковский водный детектор НЕВОД с размерами водного резервуара  $9 \times 9 \times 26$  м. Детектирующая система представляет собой пространственную решетку

---

<sup>1</sup>E-mail: SSKhokhlov@mephi.ru

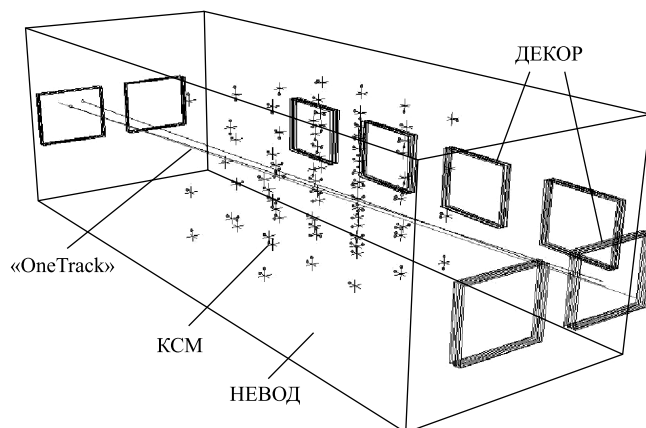


Рис. 1. Экспериментальный комплекс НЕВОД–ДЕКОР

оптических квазисферических модулей (КСМ). Каждый модуль состоит из шести фотоумножителей с плоским фотокатодом, которые ориентированы вдоль осей ортогональной системы координат. Пространственная решетка КСМ позволяет детектировать черенковское излучение с любого направления с одинаковой эффективностью. Для формирования пространственной решетки модули объединены в гирлянды по три или четыре КСМ в каждой с шагом 2,5 м вдоль детектора, 2 м поперек и 2 м по глубине. Всего в состав детектирующей системы входит 91 КСМ (546 ФЭУ).

Для измерения угловых характеристик регистрируемых частиц вокруг черенковского водного калориметра был развернут координатно-трековый детектор ДЕКОР [2, 3], который представляет собой модульную многослойную систему газоразрядных трубок с резистивным покрытием катода. Боковая часть ДЕКОР состоит из восьми вертикальных 8-слойных сборок камер (супермодулей, СМ) общей площадью около 70 м<sup>2</sup>. Плоскости камер оснащены двухкоординатной системой внешних стрипов, которая позволяет определить положение трека заряженной частицы с точностью 1 см по обеим координатам ( $X, Y$ ). Угловая точность реконструкции мюонов, пересекающих СМ, лучше 0,7 и 0,8° для зенитного и азимутального углов соответственно.

Для расширения возможности измерения энерговыделений мюонов (как одиночных, так и групп) была проведена модернизация измерительной системы ЧВД НЕВОД, в результате которой фотоумножители в КСМ заменены с ФЭУ-49Б на ФЭУ-200, имеющие низкий темп счета темновых шумов и более высокую чувствительность, а также был реализован двухдиодный съём сигналов с ФЭУ, что позволило достичь динамического диапазона от 1 до 10<sup>5</sup> фотоэлектронов [4].

Методика измерений энерговыделений в объеме ЧВД отработывалась на одиночных околоразнональных мюонах. Если сработали два и только два СМ ДЕКОР, расположенные на противоположных коротких сторонах бассейна, и участки трека, реконструированные каждым СМ внутри сборки камер, совпадают в пределах угла меньше 5°, то такое событие называется «OneTrack». В этом случае считается, что треки в отдельных СМ принадлежат одной частице. Линия, соединяющая середины участков треков в пределах каждого СМ, принимается за трек мюона (см. рис. 1). При данной геометрии пороговая энергия регистрации мюонов составляет около 7 ГэВ и более 30 % всех ча-

стиц, пересекающих объем детектора, имеют энергию более 100 ГэВ. Значительная часть мюонов при этом генерирует каскадные ливни в веществе детектора.

### 1. МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАСКАДНОЙ КРИВОЙ

Пространственная решетка КСМ позволяет реконструировать число частиц в каскаде, двигающихся вдоль оси ливня (каскадную кривую), на основе анализа амплитуд откликов сработавших ФЭУ.

Методика восстановления каскадной кривой основана на пересчете отклика каждого ФЭУ, который «видит» «OneTrack», в число излучающих релятивистских частиц (рис. 2). При этом предполагается, что направление движения рожденных в ливне электронов и позитронов совпадает с осью ливня, а сама ось совпадает с треком мюона. Количество заряженных частиц вдоль трека оценивается в отрезках (бинах), на которые предварительно разбит трек. Длина каждого бина — одна радиационная единица. После анализа откликов всех сработавших ФЭУ полученное распределение фитируется приближенным аналитическим выражением для каскадной кривой [5]:

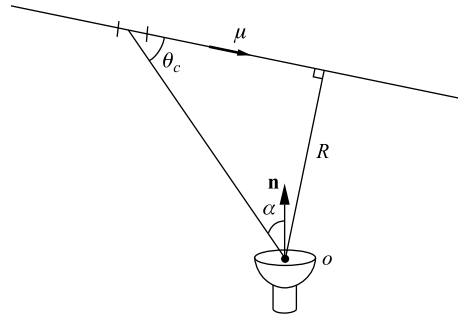


Рис. 2. Геометрия события при пересчете отклика ФЭУ в количество заряженных частиц

$$N^{\text{теор}}(y_0, t_0, t) = \left( \frac{0,32}{\sqrt{y_0}} \right) \exp((t - t_0)(1 - 1,5 \ln s)), \quad (1)$$

где  $y_0 = \ln(E_0/\varepsilon)$ ,  $\varepsilon = 73$  МэВ — критическая энергия электронов в воде;  $S = 3(t - t_0)/(t - t_0 + 2y_0)$  — возраст ливня;  $E_0$  — энергия ливня;  $t_0$  — координата точки генерации ливня.

Фитирование проводится путем минимизации функционала

$$W = \frac{1}{(m - k)} \sum_{i=1}^{i=m} \frac{(N_i^{\text{теор}} - N_i^{\text{эксп}})^2}{N_i^{\text{теор}}}, \quad (2)$$

где  $m$  — число бинов;  $k = 2$  — количество искомых параметров.

Для определения числа излучающих на участке трека частиц  $N_i$  необходимо отклик ФЭУ на данное событие  $A_{\text{ФЭУ}}$  разделить на отклик ФЭУ от одиночной частицы с теми же геометрическими параметрами трека,  $A_{1 \text{ з.ч}}$  (см. рис. 2):

$$N_i^{\text{эксп}} = \frac{A_{\text{ФЭУ}}}{A_{1 \text{ з.ч}}(R, \alpha)}. \quad (3)$$

Число частиц в бине усредняется по всем ФЭУ, которые «видят» трек.

Отклик ФЭУ на одиночную заряженную частицу рассчитывался по формуле

$$A_{1 \text{ з.ч}}(R, \alpha) = \frac{S_{\text{ФЭУ}} \cos \alpha}{2\pi(R + r_{\text{ФЭУ}}) \sin \theta_C} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{dN}{d\lambda} \eta(\lambda) \exp\left(-\frac{R}{L(\lambda) \sin \theta_C}\right) d\lambda, \quad (4)$$

где  $S_{\text{ФЭУ}}$  и  $r_{\text{ФЭУ}}$  — площадь и радиус фотокатода;  $dN/d\lambda$  — распределение черенковских фотонов по длинам волн;  $\alpha$  — угол падения черенковского излучения на фотокатод;  $\theta_C$  — угол излучения черенковского света в воде;  $\eta(\lambda)$  — квантовая эффективность ФЭУ;  $L(\lambda)$  — длина поглощения света в воде;  $\lambda_{\text{min}}$  и  $\lambda_{\text{max}}$  — границы чувствительности ФЭУ.

Результаты расчета  $A_{13,4}$  для  $\alpha = 0^\circ$  представлены на рис. 3 точками. Зависимость фитировалась функцией

$$A_{13,4}(R, \alpha) = \frac{C \cos \alpha}{R + r_{\text{ФЭУ}}} \left( \exp\left(-\frac{R}{L_{\text{short}}}\right) + 0,5 \exp\left(-\frac{R}{L_{\text{long}}}\right) \right) \quad (5)$$

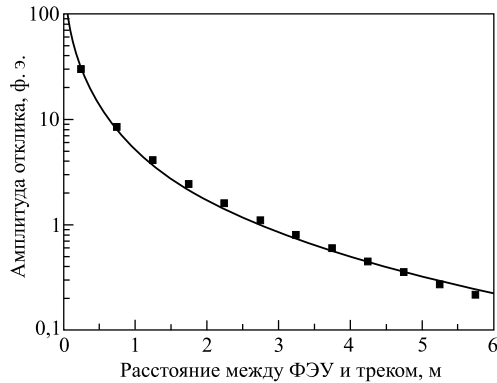


Рис. 3. Зависимость отклика ФЭУ на прохождение одиночной частицы от расстояния до трека

коэффициент наклона равен  $1,02 \pm 0,03$ , что свидетельствует о корректности методики восстановления каскадной кривой.

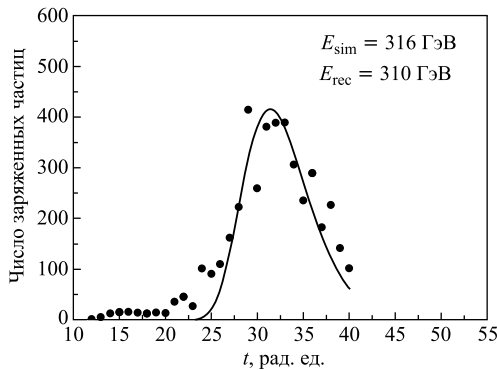


Рис. 4. Пример восстановленной каскадной кривой моделированного ливня

Отклик ЧВД на каскадные ливни с энергией менее 5–7 ГэВ слабо отличим от отклика на одиночный окологоризонтальный мюон, что определяет нижнюю границу диапазона измерений энергетического спектра. Черенковский калориметр позволяет измерять энергии каскадных ливней до 10 ТэВ.

с параметрами  $C = 8,9$  фотоэлектронов · м,  $L_{\text{short}} = 0,7$  м и  $L_{\text{long}} = 3,8$  м.

Методика восстановления каскадной кривой была опробована на событиях, в которых в программном пакете Geant4.9.4 моделировался отклик ЧВД НЕВОД на каскадные ливни с фиксированными энергиями 10, 31,6, 100, 316, 1000 и 3160 ГэВ. Пример восстановленной каскадной кривой моделированного ливня с энергией 316 ГэВ представлен на рис. 4. На рис. 5 представлена зависимость восстановленной энергии каскадного ливня от энергии моделированного ливня. При фитировании зависимости прямой линией коэффициент

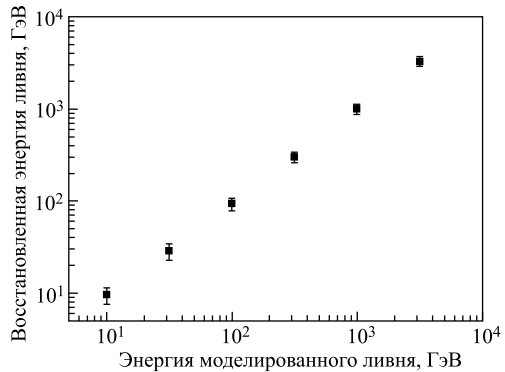


Рис. 5. Зависимость восстановленной энергии каскада от энергии моделированного ливня

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА КАСКАДНЫХ ЛИВНЕЙ

Энергетический спектр каскадных ливней, генерированных окологоризонтальными мюонами космических лучей, измерялся в течение экспериментальной серии с 23 декабря 2011 г. по 22 июня 2012 г. общей длительностью 3000 часов «живого времени». По результатам измерений было отобрано  $7,6 \cdot 10^5$  событий типа «OneTrack», в которых были восстановлены 8947 каскадных ливней с энергиями выше 7 ГэВ.

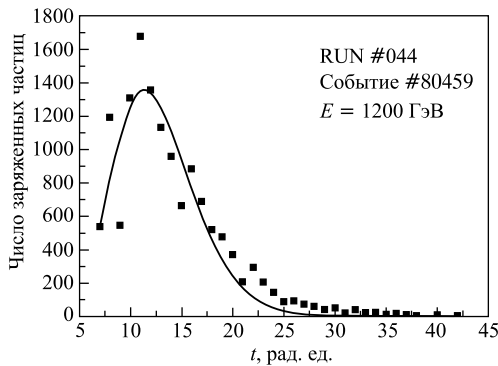


Рис. 6. Пример восстановленной каскадной кривой мощного ливня

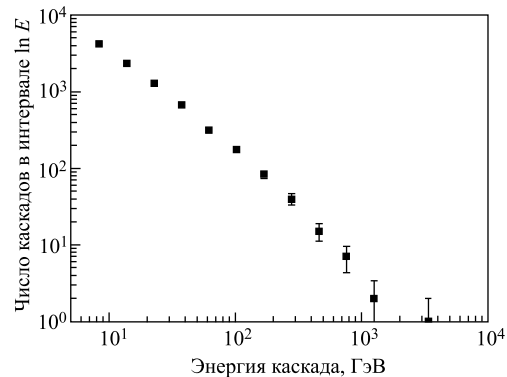


Рис. 7. Измеренный энергетический спектр каскадных ливней

На рис. 6 представлен пример одного из наиболее мощных зарегистрированных каскадов с энергией 1,2 ТэВ. На рис. 7 представлен энергетический спектр каскадных ливней, измеренный в результате эксперимента. Проведенные оценки показывают, что каскадные ливни с энергиями менее 100 ГэВ в основном генерируются  $\delta$ -электронами и спектр в этой области не может быть использован для определения спектра мюонов. Однако область спектра выше 100 ГэВ при увеличении статистики может быть использована для восстановления энергетического спектра мюонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и опробована методика исследования каскадных ливней с энергиями в диапазоне от 7 ГэВ до 10 ТэВ, генерируемых мюонами высоких энергий в черенковском водном детекторе с малым шагом пространственной решетки. Данная методика позволяет измерить энергетические спектры одиночных мюонов и групп мюонов космических лучей в широком диапазоне зенитных углов.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД в рамках ведущей научной школы НШ-6817.2012.2 при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и гранта РФФИ 11-02-12222-офи-м-2011.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aynutdinov V. M. et al.* NEVOD — Neutrino Water Detector on the Earth's Surface // Proc. of 24th Intern. Cosmic Ray Conf., Roma, Aug. 28–Sept. 8, 1995. Roma, 1995. V. 1. P. 1072–1076.

2. *Amelchakov M. B. et al.* High-Resolution Large Area Coordinate Detector for Investigations of High Energy Cosmic Ray Phenomena at the Ground Level // Proc. of 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, Aug. 7–15, 2001. Hamburg, 2001. V. 3. P. 1267–1270.
3. *Барбашина Н. С. и др.* Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей // ПТЭ. 2000. № 6. С. 20–24.
4. *Хохлов С. С. и др.* Современный статус черенковского водного детектора НЕВОД // III Черенковские чтения: Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц. М.: ФИАН, 2010. С. 30–40.
5. *Хаякава С.* Физика космических лучей. Ч. 1. Ядерно-физический аспект. М.: Мир, 1973.