

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНЫХ ЛИВНЕЙ,
ГЕНЕРИРУЕМЫХ ОКОЛОГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ
МЮОНАМИ В ЧЕРЕНКОВСКОМ ВОДНОМ ДЕТЕКТОРЕ
С ПЛОТНОЙ РЕШЕТКОЙ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

С. С. Хохлов, М. Б. Амелчаков, Н. С. Барбашина, А. Г. Богданов,
В. Д. Бурцев, А. Н. Дмитриева, Л. И. Душкин, Е. А. Задеба,
В. В. Киндин, Е. А. Ковыляева, Р. П. Кокоулин, К. Г. Компаниец,
В. С. Кругликова, В. В. Овчинников, А. А. Петрухин, В. А. Хомяков,
Д. В. Чернов, И. А. Шульженко, В. В. Шутенко, И. И. Яшин

Обсуждается метод восстановления каскадной кривой по черенковскому излучению в воде детектора НЕВОД с плотной пространственной решеткой оптических модулей. Каскады генерируются окологоризонтальными мюонами, которые выделяются координатным детектором ДЕКОР. Приводятся каскадные кривые и энергетический спектр каскадов, полученный в измерительной серии длительностью около 8000 часов.

Ключевые слова: каскадные ливни, мюоны, черенковский водный детектор, каскадная кривая.

Введение. Современные исследования мюонов и нейтрино в области сверхвысоких энергий проводятся с использованием черенковских водных детекторов (ЧВД), представляющих собой большие водные объемы естественного или искусственного происхождения, в которых размещены оптические датчики в виде регулярной пространственной решетки. Одной из важнейших задач таких детекторов является измерение энергии каскадных ливней, генерируемых мюонами или нейтрино. Однако в крупномасштабных установках, таких как NT-200+, ANTARES или IceCube, из-за больших расстояний между оптическими модулями (десятки метров) энергия каскадных ливней в воде оценивается по черенковскому излучению от каскадов в точечном приближении. При этом

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: SSKhokhlov@mephi.ru

для верификации процедур реконструкции используются модельные эксперименты, что увеличивает систематические неопределенности при восстановлении энергии каскада. Поэтому прямое измерение каскадной кривой в ЧВД с плотной решеткой оптических модулей является актуальной экспериментальной задачей.

Особый интерес представляет измерение спектра каскадных ливней от горизонтального потока космических лучей в ЧВД, расположенном на поверхности Земли, так как при увеличении зенитного угла средняя энергия мюонов быстро растет и достигает величины ~ 100 ГэВ вблизи горизонта, а значительная часть частиц имеют ТэВ-ные энергии. Такие исследования проводятся в настоящее время на экспериментальном комплексе НЕВОД–ДЕКОР.

Экспериментальный комплекс и серия измерений. Экспериментальный комплекс НЕВОД–ДЕКОР создавался для регистрации всех основных компонент космических лучей на поверхности Земли. 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 ЧВД НЕВОД с размерами водного резервуара $9 \times 9 \times 26$ м³ [1]. Детектирующая система представляет собой пространственную решетку оптических квазисферических модулей (КСМ), состоящих из шести фотоумножителей ФЭУ-200 с плоским фотокатодом диаметром 15 см, которые ориентированы вдоль осей ортогональной системы координат. Для обеспечения широкого диапазона калориметрического режима регистрации съем сигналов производится с 12-го и 9-го динодов ФЭУ, что позволяет достичь динамического диапазона $1-10^5$ фотоэлектронов. Пространственная решетка КСМ обеспечивает детектирование черенковского излучения с любого направления практически с одинаковой эффективностью. Модули объединены в гирлянды по 3 или 4 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). Вокруг ЧВД в галереях с внешней стороны расположен координатно-трековый детектор ДЕКОР [2], состоящий из 8 супермодулей (СМ) общей площадью ~ 70 м². Каждый супермодуль состоит из восьми вертикальных плоскостей газоразрядных стримерных трубок. Данные супермодулей позволяют восстанавливать треки заряженных частиц с высокой пространственной (около 1 см) и угловой (лучше 1°) точностью.

С 23.12.2011 г. по 20.03.2013 г. на экспериментальном комплексе проводилась серия измерений, в результате которой за 7945 часов “живого” времени было зарегистрировано

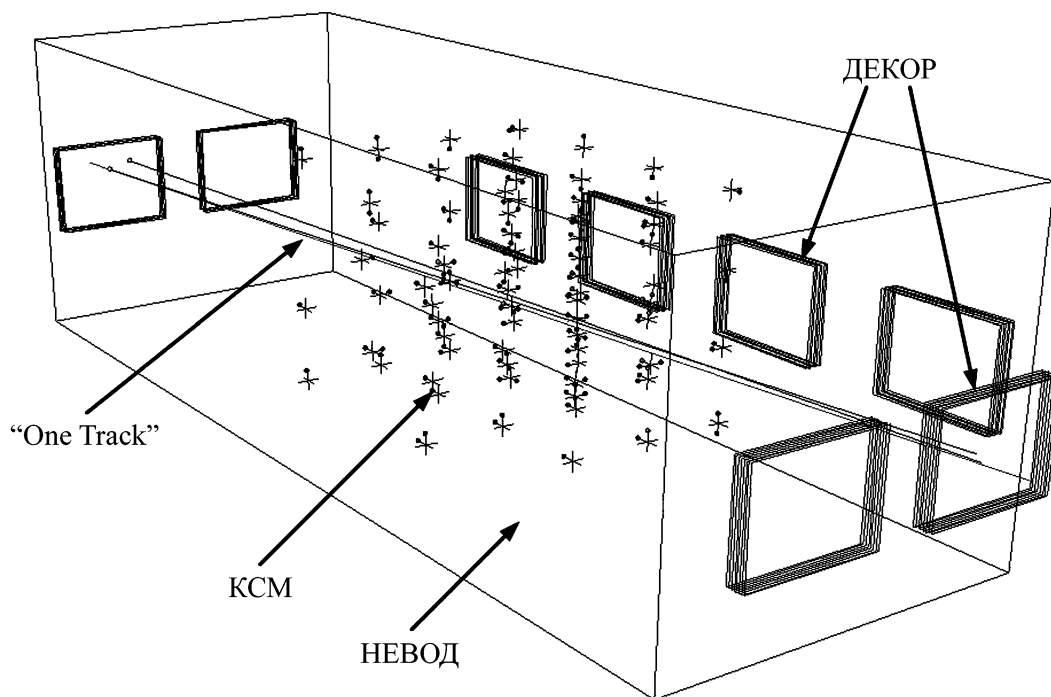


Рис. 1: Пример события “OneTrack”, зарегистрированного экспериментальным комплексом НЕВОД–ДЕКОР. Кружками изображены сработавшие ФЭУ КСМ.

375 млн различных событий. Условием отбора одиночных мюонов являлось срабатывание двух расположенных на противоположных коротких сторонах бассейна супермодулей ДЕКОР. События, в которых направления участков трека, реконструированных в каждом из двух СМ, совпадают в пределах угла меньше 5° , выделяются в отдельную группу “OneTrack”, для которых предполагается, что треки в отдельных СМ принадлежат одной частице. Линия, соединяющая середины участков треков в пределах каждого СМ принимается за трек мюона. При данной геометрии отбираются мюоны с зенитными углами более 85° , пороговая энергия регистрации составляет около 7 ГэВ и более 30% всех частиц, пересекающих объем детектора, имеют энергию более 100 ГэВ. Значительная часть мюонов при этом генерирует каскадные ливни в веществе детектора. Пример зарегистрированного события “OneTrack” приведен на рис. 1.

Метод восстановления каскадной кривой. Пространственная решетка КСМ позволяет реконструировать число каскадных частиц, в зависимости от глубины вещества (каскадную кривую) на основе анализа амплитуд откликов ФЭУ. Метод восстановления каскадных кривых в ЧВД основан на пересчете отклика каждого ФЭУ, который “видит” трек, в число релятивистских частиц, излучающих на треке. При этом пред-

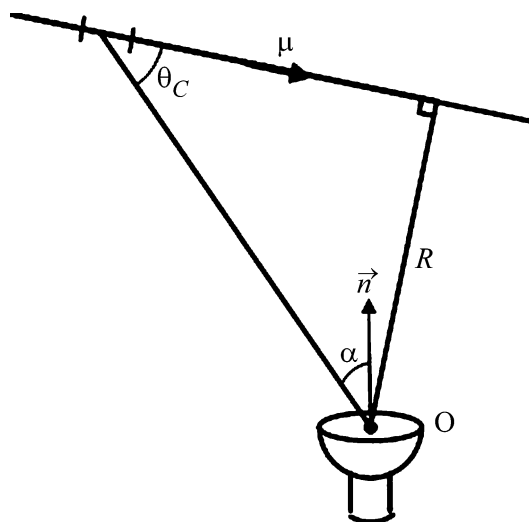


Рис. 2: Геометрия события при пересечении отклика ФЭУ в количестве излучающих частиц на треке.

полагается, что направление движения рожденных в ливне электронов и позитронов близко к оси ливня, а сама ось совпадает с треком мюона. Оценивается количество заряженных частиц в каждом отрезке-бине вдоль трека, на которые разбивается трек. Длина каждого бина – одна радиационная единица (для воды – 36.1 г/см^2).

Для определения числа излучающих на участке трека частиц N_i необходимо величину отклика ФЭУ на данное событие A_{PM} разделить на величину отклика ФЭУ от одиночной частицы с теми же геометрическими параметрами трека A_1 :

$$N_i = \frac{A_{PM}}{A_1(R, \alpha)}, \quad (1)$$

где R – расстояние от трека до центра фотокатода, α – угол падения черенковского излучения на фотокатод. Число частиц в бине усредняется по всем ФЭУ, которые “видят” данный бин (рис. 2).

Величина отклика ФЭУ, выраженная в фотоэлектронах, на одиночную заряженную частицу рассчитывалась по формуле:

$$A_1(R, \alpha) = \frac{S_{PM} \cdot \cos \alpha}{2\pi(R + r_{PM}) \cdot \sin \theta_C} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{dN}{d\lambda} \eta(\lambda) \cdot \exp\left(-\frac{R}{L(\lambda) \cdot \sin \theta_C}\right) d\lambda, \quad (2)$$

где S_{PM} и r_{PM} – площадь и радиус фотокатода; $dN/d\lambda$ – распределение черенковских фотонов по длинам волн; θ_C – угол излучения черенковского света в воде; $\eta(\lambda)$ – кванто-

вая эффективность ФЭУ, $L(\lambda)$ – длина поглощения света в воде, λ_{\min} и λ_{\max} – границы чувствительности ФЭУ.

После анализа откликов ФЭУ полученный профиль фитируется приближенным аналитическим выражением для каскадной кривой [3]:

$$N^{\text{appr}}(y_0, t_0, t) = \begin{cases} 1.35, & \text{если } t \leq t_0 \\ \left(\frac{0.32}{\sqrt{y_0}}\right) \cdot \exp((t - t_0) \cdot (1 - 1.5 \ln s)) + 1.35, & \text{если } t > t_0, \end{cases} \quad (3)$$

где $y_0 = \ln(\epsilon_0/\beta)$, $\beta = 78.3$ МэВ – критическая энергия электронов в воде: $s = 3 \cdot (t - t_0)/(t - t_0 + 2 \cdot y_0)$ – возраст ливня; ϵ_0 – его энергия, t_0 – координата точки генерации ливня.

Корректность методики восстановления каскадной кривой была проверена на событиях, которые моделировались в программном пакете Geant4.9.4. В результате моделирования было выяснено, что вероятность обнаружения каскадов с энергиями 1 ГэВ составляет $\sim 60\%$, и эта вероятность растет с увеличением энергии каскада и приближается к 100% при энергиях выше 10 ГэВ.

Результаты исследований. В результате анализа данных экспериментальной серии было отобрано 1.7 млн событий “OneTrack”, в которых было восстановлено 123364 события с каскадами с энергиями 1–3000 ГэВ. События с каскадами были разбиты на группы по десятичному логарифму энергии, внутри которых проведено усреднение каскадных кривых. Результаты представлены на рис. 3.

Экспериментальный дифференциальный энергетический спектр каскадов приведен на рис. 4 квадратами, причем для области энергий меньше 10 ГэВ значения приведены с учетом поправок, полученных при моделировании; при более высоких энергиях величина поправок пренебрежимо мала. Также на рис. 4 приведены ожидаемые спектры каскадов для некоторых значений показателя интегрального спектра генерации пионов и каонов, рассчитанных с использованием формул Л. В. Волковой [4]. Методом максимального правдоподобия было найдено, что 95% доверительный интервал показателя спектра генерации находится в пределах $\gamma = 1.51$ – 1.67 .

Заключение. Плотная пространственная решетка оптических модулей экспериментального комплекса НЕВОД–ДЕКОР позволила впервые измерить каскадную кривую по черенковскому излучению в воде. В результате получены экспериментальные каскадные кривые ливней с энергиями 3–1000 ГэВ, которые могут быть использованы для верификации методов восстановления энергии каскадов в функционирующих и создаваемых крупномасштабных черенковских детекторах. Измерен дифференциальный

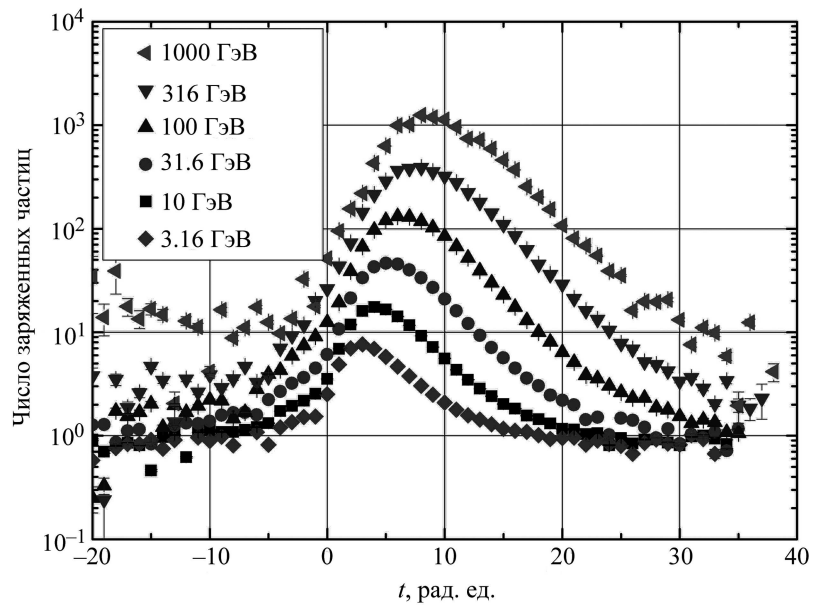


Рис. 3: Средние по группам экспериментальные каскадные кривые ливней с энергиями 3.2–1000 ГэВ.

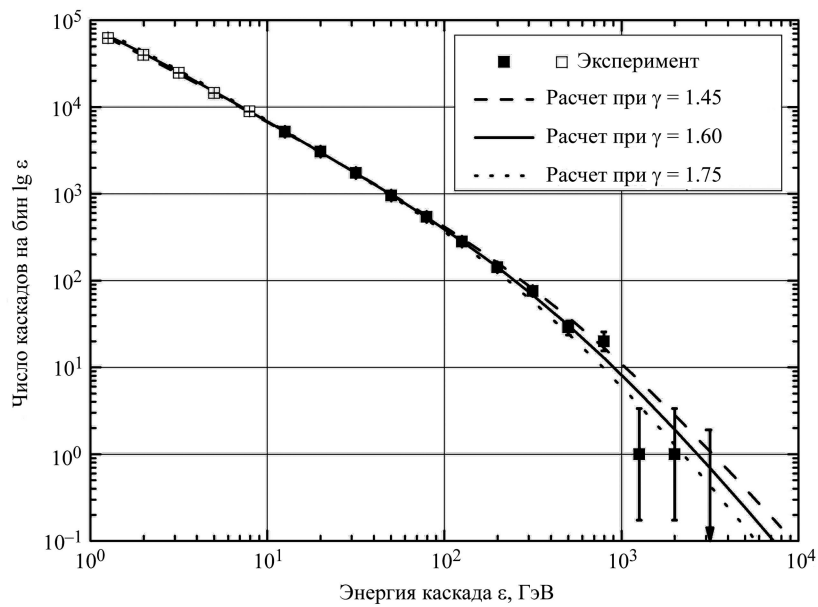


Рис. 4: Экспериментальный и ожидаемые спектры каскадов.

спектр каскадных ливней в диапазоне энергий 1–3000 ГэВ, по которому оценен показатель интегрального спектра генерации пионов и каонов.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕБОД при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России проект RFMEFI59114X0002 и гранта Ведущей научной школы НШ–4930.2014.2.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. M. Aynutdinov, V. V. Kindin, K. G. Kompaniets, et al., *Astrophysics and Space Science* **258**, 105 (1998).
- [2] Н. С. Барбашина, А. А. Езубченко, Р. П. Кокоулин и др., *ПТЭ*, № 6, 20 (2000).
- [3] С. Хаякава, *Физика космических лучей*, Ч. 1 (М., Мир, 1973).
- [4] Т. П. Аминева, В. А. Астафьев, А. Я. Варковицкая и др., *Исследование мюонов высоких энергий. Метод рентгеноэмульсионных камер* (М., Наука, 1975).

Печатается по материалам III Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”, Москва, МИФИ, апрель 2014 г.

Поступила в редакцию 21 июля 2014 г.