

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАСКАДНЫХ ЛИВНЕЙ В ВОДЕ

В. А. Хомяков *, *А. Г. Богданов*, *В. В. Киндин*,
Р. П. Кокоулин, *А. А. Петрухин*, *С. С. Хохлов*,
В. В. Шутенко, *И. И. Яшин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Черенковский водный детектор (ЧВД) НЕВОД, имеющий в отличие от крупномасштабных ЧВД плотную решетку измерительных модулей, позволяет получить пространственную картину распределения черенковского излучения от каскадных ливней с детализацией до 0,5 м (практически до одной радиационной единицы длины, равной 36 см). Предложена методика исследования черенковского излучения каскадных ливней в воде. Впервые измерена интенсивность излучения в зависимости от глубины развития ливня на разных расстояниях от его оси. Экспериментальные данные сопоставлены с расчетами распределения черенковского излучения для различных моделей рассеяния каскадных частиц.

The Cherenkov water detector (CWD) NEVOD is equipped with, unlike large-scale CWDs, a dense lattice of measuring modules, which allows one to get the spatial picture of the distribution of Cherenkov radiation from cascade showers detailed down to 0.5 m (almost to one radiation length equal to 36 cm). A technique of investigating Cherenkov radiation of cascade showers in water is proposed. For the first time, the dependence of the intensity of radiation on the depth of the shower at different distances from its axis is measured. Experimental results are compared with calculations of distribution of Cherenkov radiation for different models of cascade particle scattering.

PACS: 29.40.Ka

УСТАНОВКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Черенковские водные детекторы (ЧВД) активно используются в исследованиях мюонов и нейтрино сверхвысоких энергий. Поскольку энергетические характеристики этих частиц оцениваются по рождаемым ими в ЧВД каскадным ливням, актуальной задачей является изучение распределения черенковского света от каскадных ливней в воде. Ее решение позволит проверить

*E-mail: VAKhomyakov@mephi.ru

модели развития высокоэнергетических ливней, а также продвинуться в решении задачи распознавания каскадов и восстановления их характеристик. В больших ЧВД, таких как БНТ-200+ [1], ANTARES [2] или IceCube [3], практически невозможно детально рассмотреть ливень в черенковском свете из-за большого шага детектирующей решетки этих установок.

В данной работе эта задача решалась на экспериментальном комплексе НЕВОД [4], имеющем сравнительно небольшой ($9 \times 9 \times 26$ м) ЧВД с плотной измерительной решеткой (рис. 1). В узлах решетки — квазисферические модули (КСМ), регистрирующие черенковское излучение от релятивистских заряженных частиц (всего 91 КСМ). КСМ имеет шесть фотоумножителей ФЭУ-200 с плоским фотокатодом, ориентированных вдоль осей ортогональной системы координат.

Малый шаг детектирующей решетки (2,5 м вдоль детектора, 2 м поперек и 2 м по глубине) и широкий динамический диапазон регистрируемых сигналов ($1-10^5$ фотоэлектронов для каждого ФЭУ [5]) позволяют измерять полную каскадную кривую ливня в отдельном событии и распределение черенковского света от ливня с детализацией до 0,5 м (ограничение связано с размерами оптического модуля).

Для анализа пространственного распределения черенковского света от каскадных ливней отобраны события с ливнями, рожденными в ЧВД окологоризонтальными мюонами, треки которых определялись на основе данных координатно-трекового детектора ДЕКОР [6]. Отбирались события с прохо-

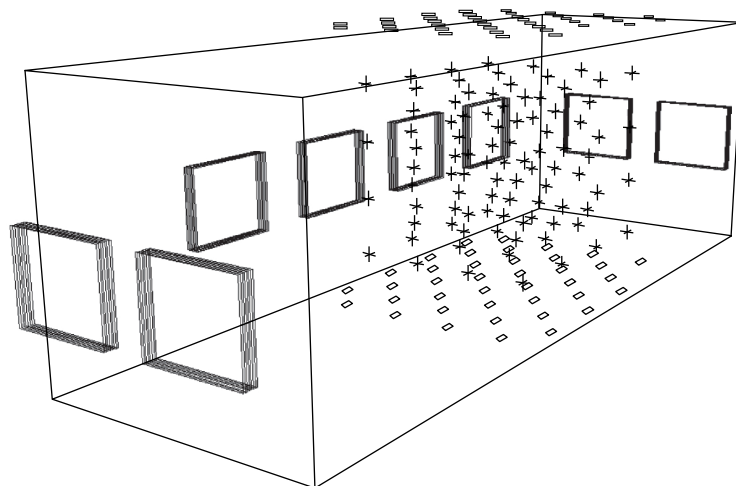


Рис. 1. Схема расположения основных детекторов комплекса НЕВОД: крестики — оптические модули ЧВД; большие прямоугольники (вдоль боковых стен бассейна) — супермодули координатно-трекового детектора ДЕКОР; маленькие прямоугольники (на дне и крышке бассейна) — детекторы системы калибровочных телескопов

ждением мюона через пару супермодулей ДЕКОР, находящихся на противоположных коротких сторонах бассейна ЧВД. Зенитные углы таких мюонов — 85–90°, средняя энергия — около 100 ГэВ.

Параметры каскадных ливней восстанавливались по ранее предложенной методике [7], использующей допущение, что все ливневые частицы движутся вдоль оси ливня и излучают фотоны под одним и тем же углом, а сама ось совпадает с треком мюона-родителя. Каскадная кривая ливня измеряется путем пересчета откликов ФЭУ, регистрирующих излучение от частиц ливня, в число этих частиц. С этой целью участок оси ливня, лежащий в пределах водного резервуара ЧВД, делится на отрезки-бины с длиной в одну радиационную единицу, равную для воды 36,1 г/см². Отклик каждого ФЭУ, который «видит» излучение с заданного бина под черенковским углом ($\sim 42^\circ$), пересчитывается в количество заряженных частиц, приходящихся на соответствующий бин. Если бин «видят» несколько ФЭУ, результаты усредняются с учетом погрешностей. Энергия ливня восстанавливается в результате фитирования экспериментально определенной зависимости числа частиц ливня от глубины его развития аппроксимацией Грейзена [8] в одномерном приближении.

Для изучения пространственного распределения черенковского света отбирались ливни с восстановленной энергией от 100 до 500 ГэВ. Для ливней в этом диапазоне максимальная разница в расстоянии от точки генерации до максимума ливня, характеризующем продольный размер ливня, составляет около 0,5 м. Включение в выборку событий с ливнями больших энергий, имеющих большие продольные размеры, может внести искажения в картину распределения черенковского света. В итоге из данных экспериментальной серии длительностью около 11 900 ч живого времени было отобрано 522 каскада с энергией в указанном диапазоне.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТА ОТ ЛИВНЕЙ

Измерялся отклик квазисферических модулей в зависимости от расстояния до оси и от глубины развития ливня, отсчитываемой вдоль его оси с началом координат в точке максимального развития ливня t_{\max} (что соответствует возрасту ливня $s = 1$). Отклик КСМ рассчитывался как корень из суммы квадратов амплитуд сработавших ФЭУ. Для квазисферического модуля с шестью ФЭУ эта величина слабо зависит от направления прихода света [9]. Отклики нормировались на энергию каскада:

$$B = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \sqrt{\sum A_i^2},$$

где ε_0 — энергия 200 ГэВ (близкая к средней энергии ливней в выборке); ε — восстановленная энергия ливня в событии; A_i — амплитуда сигнала i -го ФЭУ КСМ (в фотоэлектронах).

Величина B в зависимости от глубины и расстояния усреднялась для всех событий выборки. На пространственное распределение интенсивности черенковского излучения от каскада влияют в основном два фактора: ослабление черенковского света в воде (включая цилиндрическое расхождение световых лучей и поглощение света в воде) и отклонение каскадных частиц от направления оси ливня вследствие их многократного рассеяния. Последнее является причиной отклонения излучаемых фотонов от основного черенковского конуса. Влияние энергетического распределения каскадных частиц — фактор гораздо меньшего масштаба, которым здесь можно пренебречь.

В исследовании каскадных ливней большой интерес представляет угловое распределение каскадных частиц. Для его отдельного изучения необходимо исключить влияние ослабления света в распределении величины B . Так как параметры ослабления света в воде одинаковы для каскада и для одиночного мюона, далее рассматривается отношение интенсивности света для каскадов (B) к интенсивности, измеренной для одиночных мюонов (B_μ). Пространственное распределение данной величины приведено на рис. 2.

Видно изменение относительной интенсивности черенковского света в зависимости от угла с осью ливня. Границы между зонами различной интенсивности, расходящимися веерообразно от начала координат, представляют собой почти прямые линии, как это и ожидалось при исключении влияния ослабления света. Поскольку каскадный ливень в рассматриваемом масштабе не является точечным источником, зона наибольшей интенсивности, располагающаяся вблизи черенковского угла (показан на графике штриховой ли-

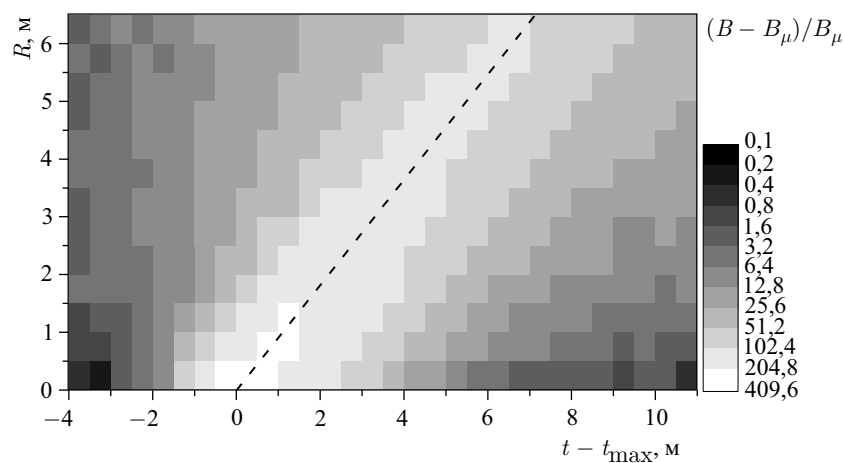


Рис. 2. Зависимость отношения отклика на каскад к отклику на одиночный мюон от глубины развития ливня ($t - t_{\max}$) на разных расстояниях (R) от его оси

нией), представляет собой обратный клин. Основное энерговыделение ливня приходится на участок с продольным размером около 2 м (5–6 радиационных единиц).

СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТАМИ

Проведено сравнение результатов измерений с расчетами распределения черенковского излучения с использованием двух моделей углового распределения ливневых частиц. Одна — расчет среднего углового распределения ливневых частиц на основе каскадных уравнений, выполненный группой И. П. Иваненко [10]. Другая — используемая в коллаборации IceCube [11] аппроксимация результатов моделирования в GEANT 3, выполненный К. Х. Вибушем [12]. Угловые распределения черенковских фотонов для данных моделей были рассчитаны на основе допущения, что от каждого каскадного электрона свет распространяется строго под черенковским углом к его треку.

Также для этих моделей были проведены расчеты пространственного распределения черенковского света от каскадных ливней. В качестве зависимости числа каскадных частиц от глубины развития ливня использовалась аппроксимация Грейзена [8].

Важно отметить, что при распространении черенковского света в детекторе НЕВОД имеет место отражение света от поверхности воды внутри бассейна. Эффект отражения был учтен при моделировании, при этом при-

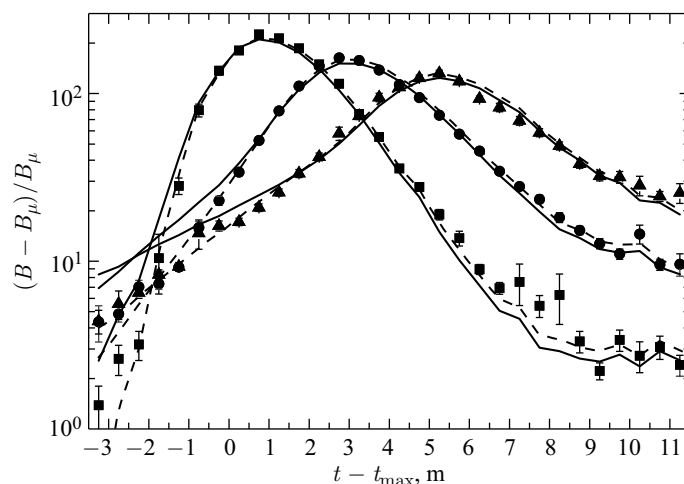


Рис. 3. Значения $(B - B_\mu)/B_\mu$ для трех диапазонов расстояний от оси ливня: квадраты, кружки и треугольники — экспериментальные данные для расстояний 0,5–1,0, 2,5–3,0 и 4,5–5,0 м соответственно; сплошные линии — расчет для модели группы И. П. Иваненко [10]; штриховые — расчет для модели К. Х. Вибуша [12]

нято допущение о полном внутреннем отражении черенковского света, падающего на поверхность воды. Данная поправка наиболее существенна на больших глубинах ($t - t_{\max} > 6$ м), куда в условиях геометрии данного эксперимента попадает отраженный свет от области максимума ливня.

На рис. 3 представлены экспериментальные и рассчитанные профили распределения величины $(B - B_{\mu})/B_{\mu}$ для трех интервалов расстояний от оси ливня. Из рис. 3 видно, что обе рассмотренные модели рассеяния каскадных частиц хорошо воспроизводят измеренный продольный профиль каскада. Качественно эксперименту в большей степени соответствует модель Вибуша. Особенно это видно по поведению профилей на восходящем участке, отвечающем за распространение света в обратную полусферу по отношению к направлению развития ливня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ЧВД НЕВОД благодаря наличию плотной решетки оптических модулей и их измерительным характеристикам впервые измерено пространственное распределение черенковского излучения от рожденных мюонами в воде каскадных ливней с энергией в диапазоне 100–500 ГэВ. Из картины распределения видна хорошая направленность черенковского излучения под углом, близким к черенковскому углу в воде. Проведено предварительное сравнение измеренных характеристик рассеяния каскадных частиц с модельными расчетами, показавшее их хорошее согласие.

Авторы выражают благодарность за поддержку Минобрнауки РФ (проект RFMEFI 59114X0002 и госзадание) и РФФИ (грант № 15-02-07763).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Додогацкий Г. В. Байкальский нейтринный эксперимент // УФН. 2011. Т. 181. С. 984.
2. Mangano S. Algorithm for Muon Electromagnetic Shower Reconstruction // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 588. P. 107.
3. Aartsen M. G. et al. (IceCube Collab.). Energy Reconstruction Methods in the IceCube Neutrino Telescope // JINST. 2014. V. 9. P. 03009.
4. Aynutdinov V. M., Kindin V. V., Kompaniets K. G., Petrukhin A. A., Tkachenko P. V., Shutenko V. V., Yashin I. I. Neutrino Water Detector on the Earth's Surface (NEVOD) // Astrophys. Space Sci. 1997. V. 258. P. 105.
5. Хохлов С. С., Воробьев И. А., Гулый В. Г., Карцев И. С., Киндин В. В., Компаниец К. Г., Королев М. А., Петрухин А. А., Шутенко В. В., Яшин И. И. Новая регистрирующая система черенковского водного детектора НЕВОД // Краткие сообщ. физики. 2010. № 4. С. 49.

6. Барбашина Н. С., Езубченко А. А., Кокоулин Р. П., Компаниец К. Г., Коновалов А. А., Петрухин А. А., Чернов Д. В., Шутенко В. В., Янсон Э. Е. Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей // ПТЭ. 2000. № 6. С. 20.
7. Хохлов С. С., Барбашина Н. С., Богданов А. Г., Дмитриева А. Н., Душкин Л. И., Задеба Е. А., Киндин В. В., Ковыляева Е. А., Кокоулин Р. П., Компаниец К. Г., Овчинников В. В., Петрухин А. А., Хомяков В. А., Чернов Д. В., Шутенко В. В., Яшин И. И. Энергетический спектр каскадных ливней, генерируемых в воде окологоризонтальными мюонами // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77, № 5. С. 707.
8. Хаякава С. Физика космических лучей. Ч. 1. М.: Мир, 1973. 701 с.
9. Khomyakov V. A., Kindin V. V., Burtsev V. D., Kokoulin R. P., Kompaniets K. G., Ovchinnikov V. V., Khokhlov S. S., Petrukhin A. A., Shutenko V. V., Yashin I. I., Zadeba E. A. Study of Characteristics of the Quasi-Spherical Measurement Modules of the Cherenkov Water Calorimeter NEVOD // Phys. Proc. 2015. V. 74. P. 442.
10. Belyaev A. A., Ivanenko I. P., Makarov V. V. Cherenkov Radiation of Electron-Photon Showers Developing in Water // Proc. of 1978 DUMAND Summer Workshop, La Yolla, 1978. V. 1. P. 337.
11. Aartsen M. G. et al. (IceCube Collab.). Measurement of South Pole Ice Transparency with the IceCube LED Calibration System // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 711. P. 73.
12. Wiebusch C. H. The Detection of Faint Light in Deep Underwater Neutrino Telescopes. Ph.D. Thesis. Phys. Inst. RWTH. Aachen, 1995. 149 p.