

УДК 524.1

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНЫХ ЛИВНЕЙ, РОЖДЕННЫХ МЮОНАМИ В ЧЕРЕНКОВСКОМ ВОДНОМ ДЕТЕКТОРЕ

© 2019 г. Р. П. Кокоулин¹, *, Н. С. Барбашина¹, А. Г. Богданов¹, В. В. Киндин¹, К. Г. Компаниец¹,
А. А. Петрухин¹, В. А. Хомяков¹, С. С. Хохлов¹, В. В. Шутенко¹, И. И. Яшин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: RPKokoulin@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Приводятся результаты анализа экспериментальных данных по каскадным ливням с энергиями 0.1–10 ТэВ, генерируемым мюонами в черенковском водном детекторе НЕВОД. Обсуждается методика отбора и реконструкции параметров событий с каскадами в объеме детектора. Приводятся результаты измерения распределения зенитных углов каскадов для различных энергий. Измеренные распределения сопоставлены с результатами расчетов.

DOI: 10.1134/S0367676519080234

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 и нейтрино. Особый интерес представляет измерение спектра каскадных ливней в области энергий 100 ГэВ–10 ТэВ, где совместный анализ зенитно-углового распределения и энергетического спектра каскадов может дать информацию об относительном вкладе K - и π -мезонов в генерацию мюонов космических лучей. Однако в крупномасштабных установках из-за большого расстояния между оптическими модулями эффективная регистрация каскадов начинается лишь в области энергий выше десятков ТэВ. Поэтому исследование каскадных ливней в черенковском водном детекторе НЕВОД с плотной пространственной решеткой оптических модулей является важной экспериментальной задачей.

Детектирующая система ЧВД НЕВОД [1] 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 калориметрического режима регистрации съём сигналов прово-

дится с 12-го и 9-го динодов ФЭУ, что обеспечивает динамический диапазон $1-10^5$ фотоэлектронов для каждого фотоумножителя. 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 черенковского водного детектора развернут координатно-трековый детектор ДЕКОР [2], который позволяет для некоторых направлений восстанавливать треки одиночных мюонов.

С помощью детектора ДЕКОР были отобраны треки одиночных околоразрывных мюонов, пришедших в интервале зенитных углов $85^\circ-90^\circ$, и измерен спектр генерируемых ими каскадов [3]. При этом предполагалось, что ось каскада совпадает с треком мюона, и что все ливневые частицы движутся вдоль оси ливня и излучают фотоны под углом 42° . Используя события с известной осью как эталонную выборку, мы разработали методику восстановления параметров каскадов с неизвестной осью на основе суммарных откликов КСМ и измерили спектр каскадов в широкой геометрии в диапазоне зенитных углов $55^\circ-90^\circ$ [4]; однако погрешность восстановления направления оси ливней при этом составляла около 6° .

Каскадные ливни с энергиями 100–500 ГэВ, генерируемые околоразрывными мюонами с известным положением трека, были использованы для измерения пространственного распределения черенковского света от каскада [5]. Результаты измерения хорошо согласуются с распределением черенковского излучения, рассчитанным

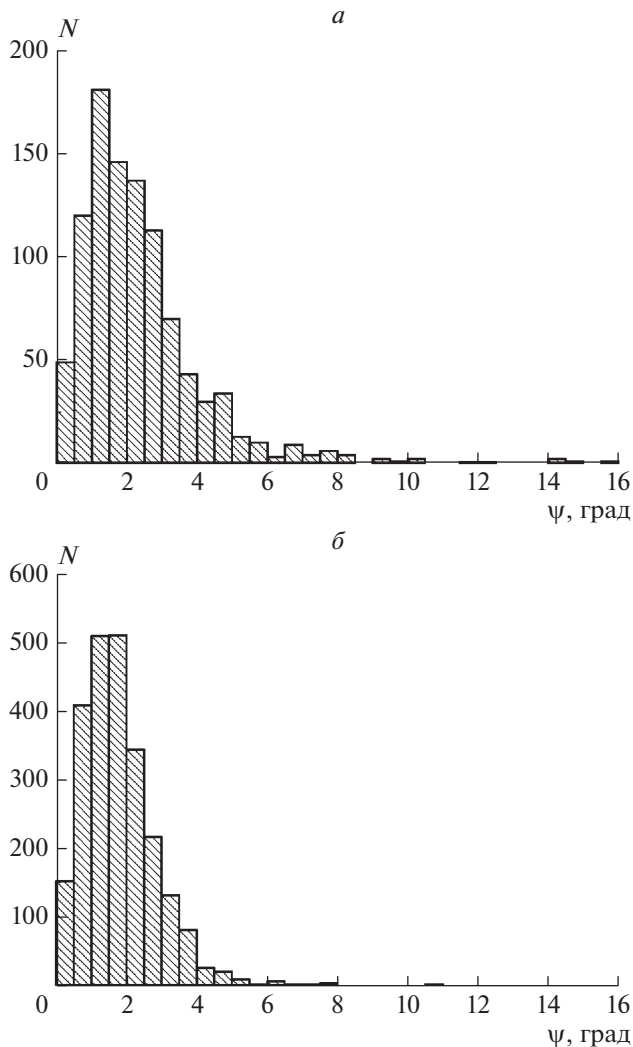


Рис. 1. Распределения каскадных ливней по пространственному углу между истинным и восстановленным направлениями осей каскада: *а* – экспериментальные события с энергиями каскадов $E = 100\text{--}500$ ГэВ, за истинную ось каскада принят трек восстановленного по данным детектора ДЕКОР околоразрешенного мюона; *б* – моделированные в программном пакете Geant4 события с энергиями каскадов $E = 100$ ГэВ.

на основе модели К. Вибуша углового распределения каскадных электронов [6]. Экспериментально измеренное пространственное распределение черенковского света от каскада позволило провести уточнение методики восстановления параметров ливня с неизвестной осью на основе откликов отдельных ФЭУ.

ОТБОР И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАСКАДОВ ПО ДАННЫМ ЧВД

Итерационный алгоритм восстановления параметров ливней основан на методе наименьших

квадратов ожидаемых и измеренных откликов ФЭУ ЧВД. Расчет ожидаемого значения отклика ФЭУ проводится с использованием следующих моделей и допущений. Для определения количества каскадных частиц в зависимости от глубины развития ливня использовалась аппроксимация каскадной кривой К. Грейзена [7]. Угловое распределение черенковского излучения определялось на основе модели К. Вибуша [6]. В качестве отклика на одиночную частицу использовались экспериментальные данные отклика ФЭУ ЧВД НЕВОД в событиях с одиночным мюоном с учетом поправки на отношение средних энергетических потерь для мюона и электрона в воде.

Начальные значения искомым параметров каскада определялись по группе КСМ с наибольшими откликами: энергия каскада пропорциональна их суммарному отклику; точка максимума ливня – центр тяжести этой группы КСМ, оцененный с весами их откликов; направление оси ливня оценивалось по данным откликов ФЭУ с учетом их ориентации в пространстве. События с каскадными ливнями, генерированными мюонами, отличаются от других событий с большим энерговыделением (ШАЛ, группы мюонов и др.) пространственной компактностью кластера модулей с наибольшими амплитудами. Граничное значение среднеквадратичного радиуса кластера выбиралось по данным эталонной выборки; оно составило 2.4 м.

Метод восстановления параметров ливней был апробирован на каскадных ливнях эталонной выборки и на ливнях, моделированных в пакете Geant4. Распределения каскадных ливней по пространственному углу между истинным и восстановленным направлениями оси приведены на рис. 1. Использование при реконструкции данных об откликах отдельных ФЭУ позволило примерно втрое уменьшить погрешность восстановления направления оси ливней: среднее значение пространственного угла составило 2.4° , а его среднеквадратичное отклонение 1.8° . Точность восстановления энергии ливня при этом составила около 8%.

Разработанный метод отбора и восстановления параметров каскадов с неизвестной осью был применен к данным экспериментальных серий 2013–2017 гг. суммарной продолжительностью около 30 тысяч часов “живого” времени. На рис. 2 представлены зенитно-угловые распределения событий с ливнями для разных энергетических диапазонов. При малых зенитных углах ($\cos\theta > 0.6$) доминируют каскады, рожденные в ЧВД адронной компонентой космических лучей. Для зенитных углов более 55° ($\cos\theta < 0.6$) экспериментальные данные были аппроксимированы расчетными кривыми зенитно-угловых распределений ливней, рожденных исключительно мюонами. Получен-

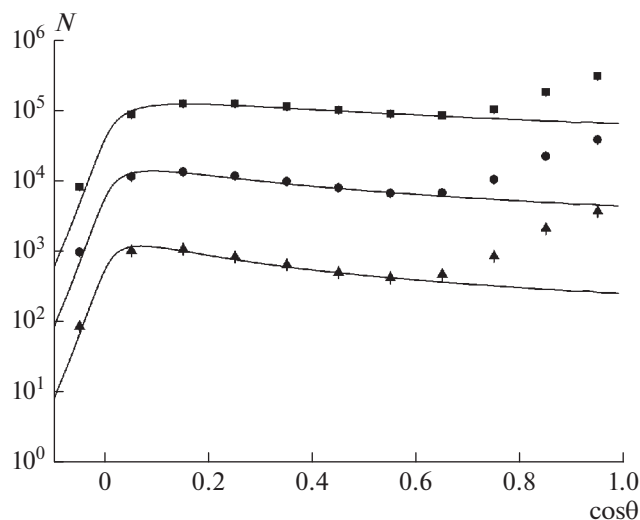


Рис. 2. Распределение каскадных ливней по косинусу зенитного угла: точки — эксперимент (квадраты, кружки и треугольники соответствуют каскадам с энергиями $E > 100$ ГэВ, $E > 316$ ГэВ и $E > 1$ ТэВ); кривые — расчет для соответствующих энергий (при $\gamma = 1.65$ и K/π -отношении, равном 0.15) с учетом погрешностей реконструкции направления.

ный в результате аппроксимации показатель интегрального спектра генерации родительских пионов и каонов равен $\gamma = 1.65$. Фитирование проводилось при фиксированном отношении $K/\pi = 0.15$. Дальнейшее увеличение статистики позволит в будущем “отпустить” этот параметр при фитировании и получить экспериментальную оценку относительного вклада разных родительских мезонов в генерацию мюонов высоких энергий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе измеренного ранее на ЧВД НЕВОД пространственного распределения черенковского света в воде разработан метод отбора и восстановления параметров каскадных ливней с неиз-

вестной осью. Использование при реконструкции откликов отдельных ФЭУ позволило достичь достаточно высокой угловой точности восстановления оси ($\sim 2.4^\circ$) при энергетическом разрешении лучше 8%. Для каскадов с энергиями в диапазоне 0.1–10 ТэВ измерено зенитно-угловое распределение, которое может быть использовано в дальнейшем для оценки K/π -отношения при генерации атмосферных мюонов.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Программа повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ, проект 02.a03.21.0005, и государственное задание), а также гранта РФФИ № 15-02-07763.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киндин В.В., Амелчаков М.Б., Барбашина Н.С. и др.* // ПТЭ. 2018. № 5. С. 23; *Kindin V.V., Amelchakov M.B., Barbashina N.S. et al.* // Instr. Exp. Tech. 2018. V. 61. № 5. P. 649.
2. *Барбашина Н.С., Езубченко А.А., Кокоулин Р.П. и др.* // ПТЭ. 2000. № 6. С. 20; *Barbashina N.S., Ezubchenko A.A., Kokoulin R.P. et al.* // Instr. Exp. Tech. 2000. V. 43. № 6. P. 743.
3. *Хохлов С.С., Барбашина Н.С., Богданов А.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 707; *Khokhlov S.S., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. № 5. P. 638.
4. *Хомяков В.А., Богданов А.Г., Киндин В.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 405; *Khomyakov V.A., Bogdanov A.G., Kindin V.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 3. P. 371.
5. *Хомяков В.А., Богданов А.Г., Киндин В.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 528; *Khomyakov V.A., Bogdanov A.G., Kindin V.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 4. P. 490.
6. *Wiebusch C.H.* // The detection of faint light in deep underwater neutrino telescopes. Ph.D. Thesis. Aachen: Physik. Inst. RWTH. 1995. P. 85.
7. *Nayakawa S.* // Cosmic ray physics. N.Y.: Wiley Interscience, 1969.