

ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ НАКЛОННЫХ ГРУПП МЮОНОВ В ЧЕРЕНКОВСКОМ ВОДНОМ ДЕТЕКТОРЕ НЕВОД

Е. А. Ковыляева, А. Г. Богданов, Л. И. Душкин, Р. П. Кокоулин,
А. А. Петрухин, В. А. Хомяков, С. С. Хохлов, В. В. Шутенко, И. И. Яшин

Приводятся результаты анализа полученных на комплексе установок НЕВОД-ДЕКОР первых экспериментальных данных по энерговывделению наклонных групп мюонов космических лучей в черенковском водном детекторе. Найдено, что среднее удельное энерговывделение в черенковском калориметре (нормированное на плотность мюонов, измеренную по данным координатного детектора) слабо зависит от плотности мюонов; однако наблюдается существенная зенитно-угловая зависимость, что свидетельствует о росте средней энергии мюонов в группах при увеличении зенитного угла.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, группы мюонов, черенковский водный детектор, энерговывделение мюонов.

Введение. В настоящее время космические лучи сверхвысоких энергий ($> 10^{15}$ эВ) исследуются только посредством регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). При больших зенитных углах “выживает” только мюонная компонента ШАЛ, приходящая в детектор в виде групп частиц с квазипараллельными треками (группы мюонов). Основным механизмом генерации мюонных групп являются распады пионов и каонов, рождающихся при развитии ядерно-каскадного процесса в атмосфере. С ростом зенитного угла поперечные размеры ШАЛ на поверхности Земли значительно увеличиваются и достигают десятков кв. км. Поэтому регистрация групп мюонов в широком диапазоне множественности и зенитных углов позволяет получать информацию о характеристиках потока и взаимодействиях первичных частиц в рекордно широком интервале энергий ($10^{15} - 10^{19}$ эВ).

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

В ряде экспериментов в космических лучах ультравысоких энергий (ALEPH [1], DELPHI [2], НЕВОД-ДЕКОР [3], Pierre Auger Observatory [4]) обнаружен избыток мюонных событий по сравнению с результатами моделирования, выполненного в рамках распространенных моделей адронного взаимодействия. Одним из путей выяснения природы этого избытка является исследование энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ, которые в настоящее время недостаточно изучены. Возможный подход к решению этой задачи – измерение энерговыделений групп мюонов в веществе детектора. Идея такого подхода достаточно проста. Средние потери энергии мюонов в веществе хорошо описываются следующим приближенным соотношением:

$$-dE/dx = a + bE, \quad (1)$$

где E – энергия мюона. Потери энергии складываются из ионизационных потерь (первое слагаемое, слабо зависящее от энергии) и т.н. радиационных (второе слагаемое), линейно растущих с энергией мюонов. При высоких энергиях мюонов (для воды при $E > 1$ ТэВ) доминирует второе слагаемое, обусловленное потерями в процессах тормозного излучения, неупругого взаимодействия мюонов с ядрами и прямого образования электрон-позитронных пар мюонами. Отклонение измеренного энерговыделения мюонов от ожидаемой величины, рассчитанной в обычных предположениях о генерации мюонов, будет свидетельствовать об отличии взаимодействия высокоэнергичных адронов с атомами атмосферы от принятой модели (см. например [5]). Одновременное измерение энерговыделений в широком интервале множественности мюонов в группах и зенитных углов позволит выделить область энергий первичных частиц, в которой эти отличия появляются. Совместная работа расположенного на поверхности Земли черенковского водного калориметра НЕВОД [6] и координатно-трекового детектора ДЕКОР [7], специально предназначенного для исследования многочастичных событий при больших зенитных углах, позволяет проводить такие исследования.

Экспериментальные данные. Детектирующая система черенковского водного детектора (ЧВД) НЕВОД объемом 2000 м^3 представляет собой пространственную решетку, в узлах которой расположены квазисферические модули (КСМ). Каждый КСМ включает шесть ФЭУ-200 с плоскими фотокатодами диаметром 15 см, ориентированных вдоль осей ортогональной системы координат. Такая система позволяет регистрировать черенковское излучение заряженных частиц, приходящих с любого направления, практически с одинаковой эффективностью. Всего конфигурация измерительной системы в настоящее время включает 91 КСМ (546 ФЭУ). Съем сигналов производится с

12-го и 9-го динодов ФЭУ, что позволяет достичь динамического диапазона $1-10^5$ фотоэлектронов (ф.э.) и реализовать калориметрический режим измерения энерговыделений. Вокруг ЧВД расположен координатно-трековый детектор ДЕКОР, состоящий из 8 супермодулей общей площадью $\sim 70 \text{ м}^2$. 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.

Эксперимент по измерению энерговыделения наклонных групп мюонов на комплексе НЕВОД-ДЕКОР начат в 2012 г. В данных первой серии (май 2012 – март 2013 г., чистое время измерений 5542 часа) найдено 9412 групп с числом зарегистрированных мюонов не менее 5 в интервале зенитных углов от 55° до 85° . Дополнительно, на основе части экспериментальной статистики, были отобраны мюонные группы при умеренных зенитных углах ($\theta = 40^\circ - 55^\circ$, 11055 событий за 3253 часа). Пример зарегистрированного события с группой мюонов приведен на рис. 1.

Результаты анализа данных. В качестве меры энерговыделения групп мюонов использовался суммарный сигнал Σ (выраженный в числе фотоэлектронов) всех ФЭУ детектора НЕВОД. Локальная плотность мюонов в событиях оценивалась по данным детектора ДЕКОР. С учетом смещения оценок из-за падающего спектра плотности частиц и пуассоновских флуктуаций числа мюонов, попавших в установку, для каждого события плотность рассчитывалась по следующей формуле [3]:

$$D = (m - \beta) / S_{\text{det}}, \quad (2)$$

где m – число мюонов, зарегистрированных в координатном детекторе; $\beta \approx 2.1$ – показатель наклона степенного спектра локальной плотности мюонов; S_{det} – суммарная площадь супермодулей ДЕКОР для данного направления прихода группы. В первом приближении, суммарное энерговыделение пропорционально локальной плотности мюонов, поэтому далее мы рассматриваем удельное энерговыделение Σ/D (нормированное на плотность). На рис. 2 (слева) представлена зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла. Точки – экспериментальные данные; стрелки на рисунке соответствуют среднелогарифмическим значениям энергий первичных частиц, ответственных за формирование событий с данной локальной плотностью мюонов и зенитным углом [3]. При малых зенитных углах ($\theta = 40^\circ - 55^\circ$) существенен остаточный вклад электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ. Зенитно-угловая зависимость удельного энерговыделения в данном диапазоне углов хорошо фитуруется экспоненциальной функцией $\exp(X/\Lambda)$ (штриховая кривая на рисунке), где $X = X_0/\sec\theta$ – на-

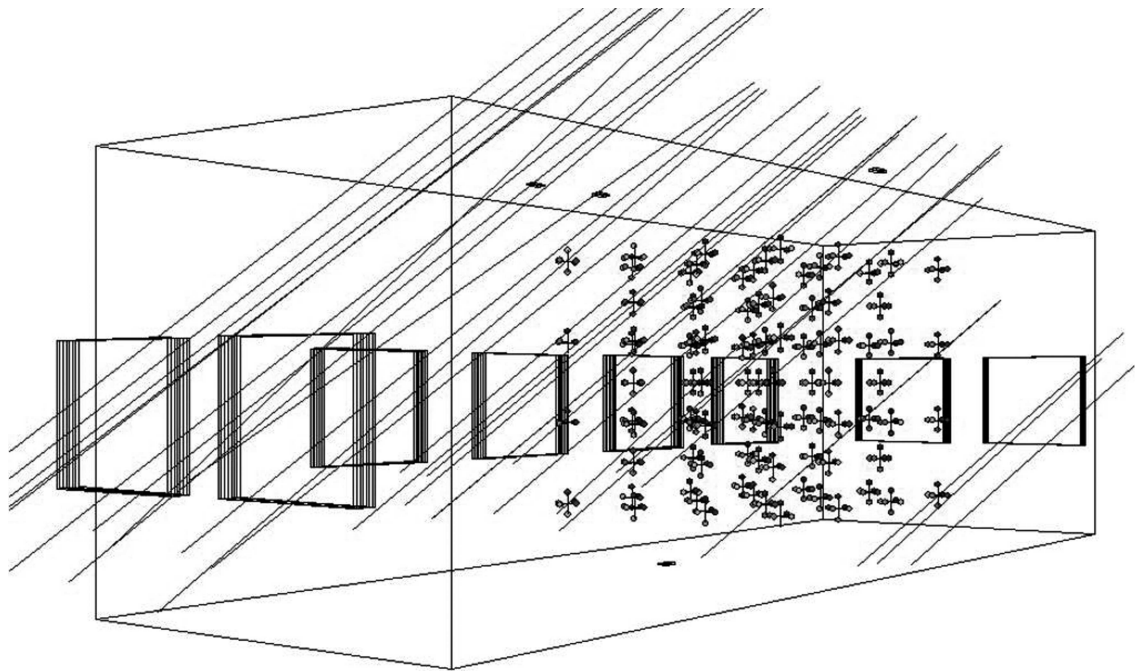


Рис. 1: Пример события с группой мюонов, зарегистрированного в комплексе НЕВОД-ДЕКОР. Тонкие линии – результат реконструкции треков мюонов по данным координатного детектора; кружки – сработавшие ФЭУ в ЧВД НЕВОД. Темные прямоугольники сверху и внизу – сработавшие сцинтилляционные счетчики системы калибровочных телескопов.

клонная глубина в атмосфере, $X_0 = 1014 \text{ г/см}^2$ – вертикальная глубина расположения установки (соответствующая средней величине атмосферного давления за период наблюдений, равной 746 мм рт. ст.), $\Lambda = 134 \pm 15 \text{ г/см}^2$ – длина затухания. Это значение Λ близко к характерной длине поглощения нуклонной компоненты космических лучей в атмосфере. Для углов $\theta > 55^\circ$, где в событиях остаются практически чистые мюоны, наблюдается рост среднего удельного энерговыделения с увеличением зенитного угла, что говорит об увеличении средней энергии мюонов в группах. Сплошная кривая на рис. 2 представляет собой результаты расчетов ожидаемой зависимости удельного энерговыделения для мюонных групп, полученные на основе моделирования мюонной компоненты ШАЛ с помощью программы CORSIKA [8]. В расчетах использовалось сочетание доступных в программе CORSIKA моделей адронных взаимодействий SIBYLL и FLUKA, для высоких ($E_h > 80 \text{ ГэВ}$) и малых энергий адронов соответственно. Как видно из рис. 2, в интервале зенитных углов $\theta = 55^\circ - 85^\circ$ полученная эксперимен-

тальная зависимость удовлетворительно согласуется с ожидаемой. На рис. 2 справа представлена зависимость среднего удельного энерговыделения от локальной плотности мюонов (для зенитных углов $\theta \geq 55^\circ$). Штриховая линия – среднее для данной выборки событий удельное энерговыделение. В пределах имеющихся погрешностей явной зависимости энерговыделения от плотности мюонов пока не просматривается; необходимо повышение статистической точности измерений.

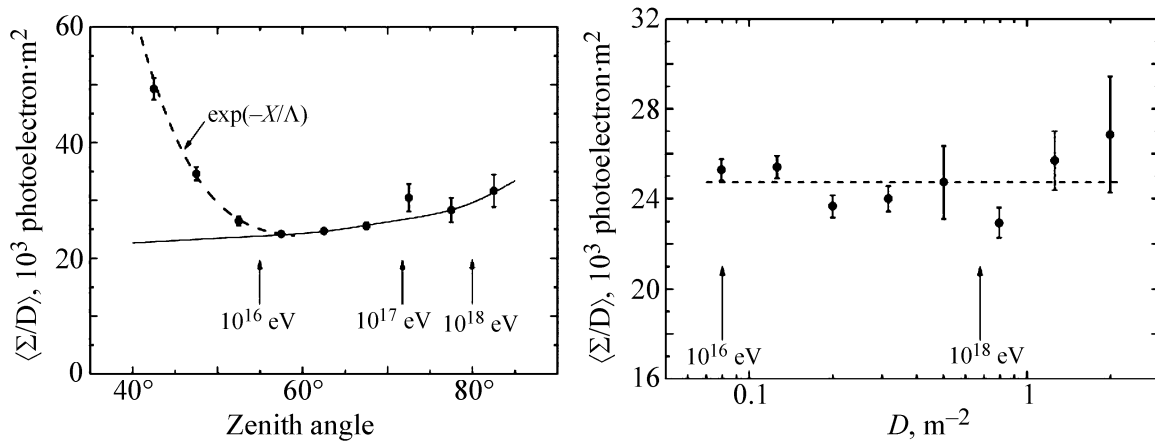


Рис. 2: Зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла (слева) и плотности мюонов (справа). Точки – экспериментальные данные; стрелки показывают среднелогарифмические энергии первичных частиц, дающих вклад в события с данной локальной плотностью мюонов и зенитным углом. Слева: штриховая кривая – результат фитирования экспоненциальной функции с длиной ослабления $\Lambda = 134 \pm 15 \text{ г/см}^2$ для интервала зенитных углов $40^\circ - 55^\circ$; сплошная кривая – ожидаемая зависимость для групп мюонов, рассчитанная с помощью программы CORSIKA. Справа: штриховая линия – среднее удельное энерговыделение для данной выборки событий.

Заключение. На комплексе НЕВОД-ДЕКОР начат эксперимент по исследованию энерговыделения наклонных групп мюонов космических лучей в черенковском водном детекторе. Проведен предварительный анализ данных по группам мюонов, полученных в первой серии измерений (5542 ч наблюдений). Найдено, что среднее удельное энерговыделение в черенковском водном калориметре (нормированное на локальную плотность мюонов) для зенитных углов прихода групп $\theta > 55^\circ$ слабо зависит от плотности мюонов; однако наблюдается существенная зависимость энерговыделения от зенитного угла, которая удовлетворительно согласуется с ожидаемой, полученной с помощью

программы CORSIKA. Набор экспериментальных данных и их анализ продолжают.

Работа выполнена на уникальной установке Экспериментальный комплекс НЕВОД при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания, Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ, а также гранта ведущей научной школы НШ-4930.2014.2.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. Avati, L. Dick, K. Eggert, et al., *Astroparticle Physics* **19**, 513 (2003).
- [2] J. Abdallah, P. Abreu, W. Adam, et al., *Astroparticle Physics* **28**, 273 (2007).
- [3] А. Г. Богданов, Д. М. Громушкин, Р. П. Кокоулин и др., *ЯФ* **73**(11), 1904 (2010).
- [4] G. Rodriguez, in: *Proceedings of 32nd International Cosmic Ray Conference* (Beijing, China, 2011), vol. 2, p. 95.
- [5] А. А. Petrukhin, *ЯФ* **66**(3), 544 (2003).
- [6] V. M. Aynutdinov, V. V. Kindin, K. G. Kompaniets et al., *Astrophysics and Space Science* **258**, 105 (1998).
- [7] Н. С. Барбашина, А. А. Езубченко, Р. П. Кокоулин и др., *ПТЭ*, № 6, 20 (2000).
- [8] D. Heck et al., *Forschungszentrum Karlsruhe Report*, FZKA 6019 (1998).

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

Поступила в редакцию 20 мая 2014 г.