

## ЭКСПЕРИМЕНТ НЕВОД-ДЕКОР ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ГРУПП МЮОНОВ В НАКЛОННЫХ ШАЛ

*Р. П. Кокоулин*<sup>1,\*</sup>, *А. Г. Богданов*<sup>1</sup>, *Н. С. Барбашина*<sup>1</sup>,  
*Л. И. Душкин*<sup>1</sup>, *В. В. Киндин*<sup>1</sup>, *К. Г. Компаниец*<sup>1</sup>,  
*Дж. Маннокки*<sup>2</sup>, *А. А. Петрухин*<sup>1</sup>, *О. Сааведра*<sup>3</sup>, *Дж. Тринкоро*<sup>2</sup>,  
*В. А. Хомяков*<sup>1</sup>, *С. С. Хохлов*<sup>1</sup>, *Д. В. Чернов*<sup>1</sup>, *В. В. Шутенко*<sup>1</sup>,  
*Е. А. Юрина*<sup>1</sup>, *И. И. Яшин*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>2</sup> Институт физики межпланетного пространства, Турин, Италия

<sup>3</sup> Туринский университет, Турин, Италия

Для решения проблемы избытка мюонов в космических лучах при сверхвысоких энергиях необходим анализ энергетических характеристик мюонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). Возможным подходом к таким исследованиям являются измерения энерговыделения групп мюонов в детекторе, которые дают информацию о средней энергии мюонов. В эксперименте, проводимом на комплексе НЕВОД-ДЕКОР, локальная плотность мюонов и направление прихода ливня определяются по данным координатно-трекового детектора, а энерговыделение измеряется с помощью черенковского калориметра. Результаты измерения энерговыделения групп за 17 400 ч наблюдений сопоставлены с расчетами, выполненными с помощью программы CORSIKA.

To solve the problem of the muon excess observed in cosmic rays at ultrahigh energies, the analysis of the energy characteristics of the muon component of extensive air showers (EAS) is necessary. A possible approach to such investigations is the measurement of the energy deposit of muon bundles in the detector, which carries information on the mean muon energy. In the experiment conducted at the NEVOD-DECOR complex, the local muon density and the shower arrival direction are determined according to the data of the coordinate-tracking detector, whereas the energy deposit is measured by means of the Cherenkov calorimeter. Results of the measurements of the energy deposit of the bundles based on the data accumulated during 17 400 h are compared with simulations performed by means of the CORSIKA program.

PACS: 13.85.Tr

---

\*E-mail: rpkokoulin@mephi.ru

## ВВЕДЕНИЕ

В ряде экспериментов, проведенных в космических лучах при ультра-высоких энергиях, был обнаружен избыток многомюонных событий (число мюонов в ШАЛ, интенсивность групп мюонов) по сравнению с результатами расчетов, выполненных на основе широко используемых моделей взаимодействия адронов [1–4]. В принципе, этот избыток может быть вызван как космофизическими (увеличение содержания тяжелых ядер в космическом излучении), так и ядерно-физическими причинами (изменение характеристик взаимодействия первичных протонов и ядер с ядрами атомов атмосферы). Однако при энергиях порядка  $10^{18}$  эВ и выше избыток многомюонных событий не удается объяснить в рамках существующих моделей взаимодействия даже в предположении предельно тяжелого (ядра железа) первичного состава [3–5]. Поэтому естественно предположить, что современные модели развития ядерного каскада в атмосфере требуют пересмотра. Ключом к решению данной проблемы, часто называемой «мюонной загадкой» (muon puzzle), могут стать исследования энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ и их изменений с первичной энергией [6].

Возможным подходом к таким исследованиям является измерение энерговыделения групп мюонов при их прохождении через вещество детектора. Удельные потери энергии мюонов в области значений энергии выше сотен гигаэлектронвольт почти линейно растут с их энергией, и появление избыточного потока высокоэнергичных мюонов должно привести к изменению зависимости среднего энерговыделения от энергии первичной частицы. Эксперимент по исследованию энерговыделения мюонных групп начат на экспериментальном комплексе НЕВОД в 2012 г. Комплекс включает черенковский водный калориметр [7, 8] и координатно-трековый детектор [9], обеспечивающий надежную идентификацию многомюонных событий. Регистрация групп мюонов в широком диапазоне множественности и зенитных углов обеспечивает возможность изучения широкого интервала первичных энергий в рамках одного эксперимента. В статье представлены результаты измерения среднего энерговыделения наклонных групп мюонов, зарегистрированных в двух сериях измерений суммарной продолжительностью более 17 000 ч, и их сравнение с ожидаемыми энергетическими характеристиками, рассчитанными на основе программы CORSIKA [10].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Измерительная система черенковского водного детектора (ЧВД) НЕВОД с внутренним объемом  $9 \times 9 \times 26$  м представляет собой пространственную решетку квазисферических модулей (КСМ) [7]. Каждый КСМ включает шесть

фотоумножителей ФЭУ-200 с плоским фотокатодом диаметром 15 см, направленных по осям ортогональной системы координат. Всего измерительная система содержит 91 КСМ, которые размещены в виде вертикальных гирлянд (по 3 или 4 КСМ в каждой) с расстояниями 2,5 м вдоль водного бассейна и 2 м поперек и по его глубине. После недавней модернизации [8] электронная система детектора позволяет измерять сигналы в широком динамическом диапазоне (от 1 до  $10^5$  фотоэлектронов) для каждого ФЭУ. Координатно-трековый детектор ДЕКОР [9] общей площадью около  $70 \text{ м}^2$  включает 8 супермодулей (СМ), размещенных в галереях здания НЕВОД с трех сторон от водного бассейна. Чувствительная площадь каждого СМ составляет  $8,4 \text{ м}^2$ . Супермодули состоят из 8 вертикальных плоскостей пластиковых стримерных трубок с внешним двухкоординатным считыванием и обеспечивают пространственную и угловую точность локализации мюонных треков лучше, чем 1 см и  $1^\circ$  соответственно. Пример регистрации группы мюонов в установке НЕВОД-ДЕКОР представлен на рис. 1.

В настоящем анализе используются данные двух серий измерений, проведенных с мая 2012 по март 2013 г. и с июля 2013 по апрель 2015 г. Полное живое время наблюдений составило 17 439 ч. Найдено 29 335 событий, содержащих группы мюонов с множественностью  $m \geq 5$  и зенитным углом прихода  $\theta \geq 55^\circ$ . События отбирались в двух секторах азимутального угла, где большинство супермодулей ДЕКОР (шесть из восьми) экранированы водным бассейном, причем для подсчета треков использовались только данные

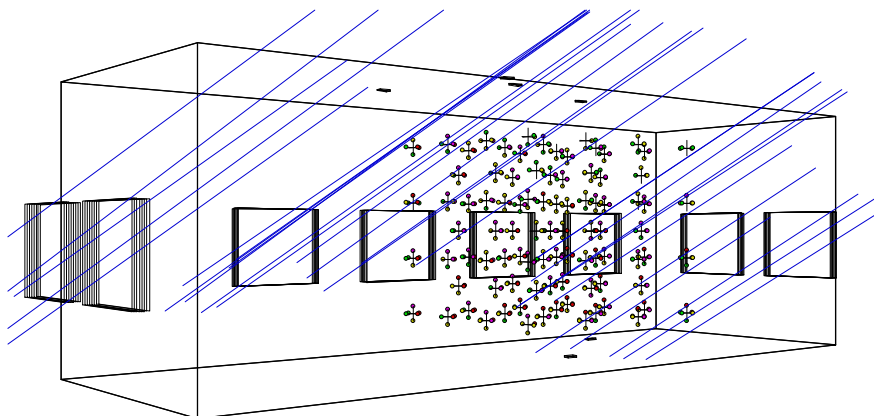


Рис. 1. Пример события с группой мюонов в установке НЕВОД-ДЕКОР. Тонкие линии — восстановленные треки мюонов; маленькие кружки — сработавшие фотоумножители черенковского детектора; большие прямоугольники вокруг водного калориметра — супермодули ДЕКОР; маленькие прямоугольники сверху и внизу — сработавшие сцинтилляционные счетчики системы калибровочных телескопов

этих защищенных СМ; средняя пороговая энергия мюонов в группах для таких условий отбора составляет около 2 ГэВ.

В качестве меры энерговыделения групп мюонов мы используем суммарный сигнал  $\Sigma$  всех сработавших ФЭУ водного калориметра (в единицах фотоэлектронов, ф. э.). При этом предполагается, что полный выход черенковских фотонов пропорционален полным потерям энергии мюонов в веществе детектора (включая образованные мюонами вторичные частицы и каскады от них). Локальная плотность  $D$  ( $\text{м}^{-2}$ ) мюонов в событии оценивается на основе числа зарегистрированных мюонов  $m$  с учетом эффективной площади  $S'_{\text{дет}}$  шести супермодулей ДЕКОР для данного направления прихода группы.

Как показал предварительный анализ результатов измерений [11], в первом приближении суммарное энерговыделение в ЧВД пропорционально локальной плотности мюонов. Поэтому далее мы рассматриваем удельное энерговыделение  $\Sigma/D$  (т. е. отклик черенковского калориметра, нормированный на оценку локальной плотности мюонов в данном событии).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения зенитно-угловой зависимости среднего удельного энерговыделения мюонных групп, зарегистрированных в интервале зенитных углов  $55 \leq \theta \leq 85^\circ$ , представлены точками на рис. 2. В этом интервале углов регистрируется практически чистая мюонная компонента (и вторичные по отношению к ней частицы) [11]. Стрелки в нижней части рисунка ука-

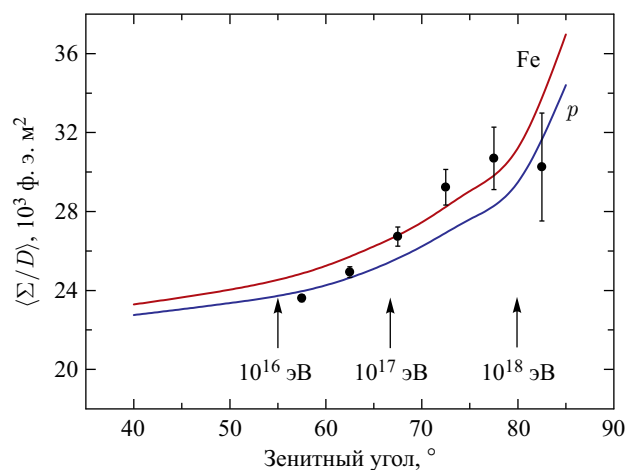


Рис. 2. Зависимость среднего удельного энерговыделения мюонных групп от зенитного угла. Точки — результат измерений; кривые — ожидаемая зависимость, рассчитанная на основе программы CORSIKA для первичных протонов ( $p$ ) и ядер железа (Fe)

зывают характерные энергии первичных частиц (расчетные среднелогарифмические значения [3]), дающих вклад в формирование групп мюонов при разных углах. Как видно из рисунка, данные эксперимента указывают на возрастание удельного энерговыделения с увеличением зенитного угла. Кривые на рис. 2 представляют ожидаемую угловую зависимость энерговыделения, полученную на основе моделирования мюонной компоненты ШАЛ с помощью программы CORSIKA [10] для протонов и ядер железа в качестве первичных частиц. При моделировании мы использовали сочетание моделей взаимодействия адронов SIBYLL2.1 и FLUKA для адронов с энергией выше и ниже 80 ГэВ соответственно. Как показали расчеты, величина средней энергии мюонов, регистрируемых в составе групп, быстро растет с зенитным углом и достигает примерно 500 ГэВ вблизи горизонта. Расчетная зависимость среднего удельного энерговыделения, приведенная на рис. 2, была получена следующим образом. Сначала для каждого зенитного угла рассчитывались средние удельные потери энергии мюонов  $\langle dE/dX \rangle$  с помощью таблиц энергетических потерь [12]. Затем использовалось упомянутое выше предположение, что полный выход черенковского света в калориметре пропорционален потерям энергии мюонов. Наконец, абсолютная калибровка была получена путем нормировки расчетной кривой для первичных протонов к результатам измерений в интервале  $55\text{--}65^\circ$ . В целом измеренная зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла подтверждает возрастание средней энергии мюонов в группах и находится в разумном согласии с ожидаемой, хотя при углах более  $70^\circ$  (первичные энергии порядка  $10^{17}$  эВ) наблюдается указание на превышение по сравнению с расчетом даже для тяжелых ядер.

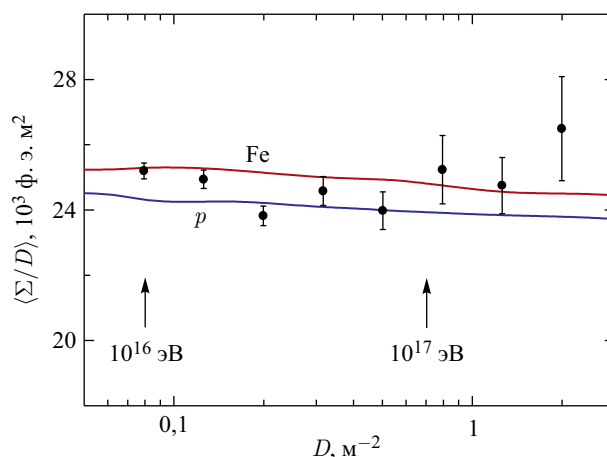


Рис. 3. Зависимость среднего удельного энерговыделения групп мюонов с углами  $\theta \geq 55^\circ$  от локальной плотности мюонов. Обозначения те же, что и на рис. 2

На рис. 3 представлены результаты измерений среднего удельного энерговыделения групп мюонов в зависимости от локальной плотности мюонов. Фактически подобный анализ для фиксированного интервала зенитных углов позволяет проследить возможные изменения отклика детектора (и, соответственно, средней энергии мюонов в группах) с первичной энергией. Кривые на рисунке получены на основе моделирования для первичных протонов и ядер железа для зенитного угла  $60^\circ$ ; использован тот же нормировочный коэффициент, что и на рис. 2. Результаты моделирования демонстрируют тенденцию к уменьшению средней энергии мюонов в группах с ростом первичной энергии; данные измерений, напротив, указывают на некоторое возрастание удельного энерговыделения при энергиях выше  $10^{17}$  эВ. Для более определенного вывода о наличии избытка мюонов высоких энергий в группах необходимо дальнейшее увеличение статистики и тщательный анализ возможных систематических искажений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На комплексе НЕВОД-ДЕКОР проводится эксперимент по исследованию энергетических характеристик групп мюонов в наклонных ШАЛ, образованных в результате взаимодействий первичных частиц с энергиями  $10^{16}$ – $10^{18}$  эВ. Целью эксперимента является поиск возможных причин появления избытка многомюонных событий в космических лучах ультравысоких энергий. Полученные результаты измерений среднего удельного энерговыделения групп в зависимости от зенитного угла и локальной плотности мюонов находятся в разумном согласии с результатами моделирования мюонной компоненты с помощью программы CORSIKA, хотя и имеется некоторое указание на превышение измеренного энерговыделения по сравнению с расчетом в области первичных энергий выше  $10^{17}$  эВ. В случае подтверждения при дальнейшем увеличении статистики это отклонение будет свидетельствовать о включении нового механизма образования высокоэнергичных мюонов при сверхвысоких энергиях первичных частиц.

Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» при поддержке Минобрнауки РФ (проект RFMEFI59114X0002, государственное задание и программа поддержки ведущих научных школ РФ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avati V., Dick L., Eggert K., Stroem J., Wachsmuth H., Schmeling S., Ziegler T., Bruehl A., Grupen C. Cosmic Multi-Muon Events Observed in the Underground CERN-LEP Tunnel with the ALEPH Experiment // *Astropart. Phys.* 2003. V.19. P. 513–523.

2. *Abdallah J. et al. (DELPHI Collab.)*. Study of Multi-Muon Bundles in Cosmic Ray Showers Detected with the DELPHI Detector at LEP // *Astropart. Phys.* 2007. V. 28. P. 273–286.
3. *Богданов А. Г., Громушкин Д. М., Кокоулин Р. П., Маннокки Дж., Петрухин А. А., Сааведра О., Тринкери Дж., Чернов Д. В., Шутенко В. В., Яшин И. И.* Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов // *ЯФ*. 2010. Т. 73. С. 1904–1920.
4. *Nellen L. (for Pierre Auger Collab.)*. The Observation of a Muon Deficit in Simulations from Data of the Pierre Auger Observatory // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V. 409. P. 012107.
5. *Saavedra O. et al. (DECOR Collab.)*. NEVOD-DECOR Experiment: Results and Future // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V. 409. P. 012009.
6. *Petrukhin A. A.* Muon Puzzle in Cosmic Ray Experiments and Its Possible Solution // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2014. V. 742. P. 228–231.
7. *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.* 1998. V. 258. P. 105–116.
8. *Khokhlov S. S., Amelchakov M. B., Ashikhmin V. V., Gulyi V. G., Kartsev I. S., Kindin V. V., Kompaniets K. G., Korolev M. A., Petrukhin A. A., Shulzhenko I. A., Shutenko V. V., Vorobiev I. A., Yashin I. I., Zadeba E. A.* New Measuring System of Multipurpose Cherenkov Water Detector NEVOD // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V. 7. P. 271–273.
9. *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. 20–24.
10. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J. N., Schatz G., Thouw T.* CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Forschungszentrum Karlsruhe Report, FZKA 6019. Karlsruhe, 1998. 98 p.
11. *Kokoulin R. P., Bogdanov A. G., Dushkin L. I., Khokhlov S. S., Khomyakov V. A., Kindin V. V., Kovylyayeva E. A., Mannocchi G., Petrukhin A. A., Saavedra O., Shutenko V. V., Trincherо G., Yashin I. I.* Measurements of the Energy Deposit of Inclined Muon Bundles in the CWD NEVOD // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 632. P. 012095.
12. *Groom D. E., Mikhov N. V., Striganov S. I.* Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV–100 TeV // *At. Data Nucl. Data Tables.* 2001. V. 78. P. 183–356.