

УДК 524.1

СРЕДНИЕ ЭНЕРГИИ МЮОНОВ В НАКЛОННЫХ ГРУППАХ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА НЕВОД-ДЕКОР

© 2023 г. Е. А. Юрина¹, *, Н. С. Барбашина¹, А. Г. Богданов¹, В. С. Воробьев¹, В. В. Киндин¹,
Р. П. Кокоулин¹, К. Г. Компаниец¹, А. Ю. Коновалова¹, Дж. Маннокки², А. А. Петрухин¹,
Дж. Тринкоро², С. С. Хохлов¹, В. В. Шутенко¹, И. И. Яшин¹

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

²Астрофизическая обсерватория Турина, Турин, Италия

*E-mail: eayurina@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Представлены результаты измерений энергетических характеристик групп мюонов в наклонных широких атмосферных ливнях в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР. Получены оценки средней энергии мюонов в группах в области энергий первичных частиц от 10 до 1000 ПэВ, которые сопоставлены с расчетами ожидаемых значений для различных предположений о составе космического излучения и моделях адронных взаимодействий. Обнаружено превышение экспериментальных значений средней энергии мюонов по сравнению с расчетами для больших локальных плотностей, соответствующих энергиям первичных частиц выше 100 ПэВ.

DOI: 10.31857/S0367676523701715, EDN: OQLVBC

ВВЕДЕНИЕ

Значимой проблемой в физике космических лучей является “мюонная загадка” — растущий с энергией первичных частиц избыток мюонных событий по сравнению с результатами расчетов в рамках современных моделей адронных взаимодействий. Избыток мюонов обнаружен во многих экспериментах, объединенный результат исследований представлен международной группой WHISP (Working Group on Hadronic Interactions and Shower Physics) [1, 2]. Наблюдаемый избыток может быть обусловлен различными причинами (генерация новых частиц или состояний материи в ядро-ядерных взаимодействиях и др.), которые не учитываются в моделях адронных взаимодействий. Одним из путей решения “мюонной загадки” является исследование энергетических характеристик групп мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) и их изменения с энергией первичных частиц. Возможный подход к исследованию энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ — измерение энерговыделения мюонных групп в веществе детектора. Средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии: $dE/dX = a + bE$. Удельное энерговыделение (нормированное на плотность мюонов) дает информацию о средней энергии мюонов в группах. Появление избытка

мюонов высоких энергий может свидетельствовать о включении новых физических процессов [3]. Некоторые результаты исследований энерговыделений групп мюонов в черенковском водном калориметре НЕВОД представлены в статье [4], а предварительные результаты по средним энергиям мюонов в группах приведены в работах [5, 6]. Целью данной работы является получение экспериментальных оценок средних энергий мюонов в группах в зависимости от зенитного угла и локальной плотности мюонов в широком диапазоне первичных энергий 10–1000 ПэВ на увеличенной экспериментальной статистике с учетом основных систематических эффектов, влияющих на результаты измерений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДАННЫЕ

Установка, на которой регистрируются группы, состоит из черенковского водного калориметра (ЧВК) НЕВОД [7, 8] объемом 2000 м³ и координатно-трекового детектора ДЕКОР [9, 10] площадью 70 м². ЧВК НЕВОД состоит из квазисферических модулей (КСМ), образующих пространственную решетку в водном объеме бассейна. Каждый КСМ включает 6 фотоумножителей ФЭУ-200 с плоским фотокатодом диаметром

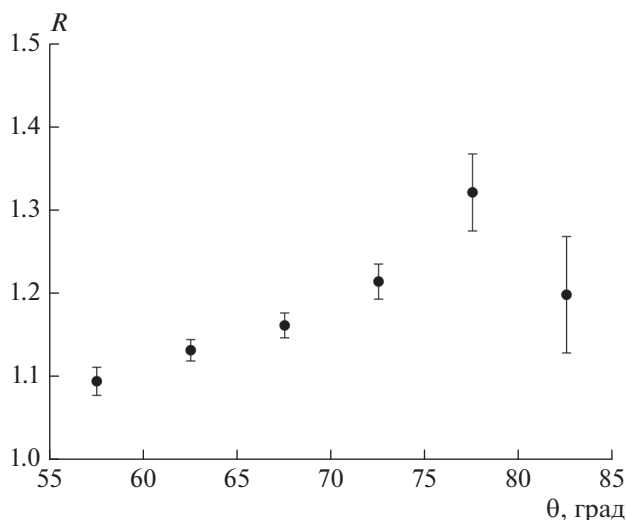


Рис. 1. Зависимость отношения измеренного удельного энерговыделения к моделированному для фиксированной энергии мюонов 100 ГэВ от зенитного угла.

15 см, направленных по осям ортогональной системы координат, и позволяет регистрировать черенковский свет с любого направления. Мерой энерговыделения Σ является сумма сигналов всех сработавших ФЭУ в детекторе в единицах фотоэлектронов (ф.э.).

Координатно-трековый детектор ДЕКОР состоит из 8 супермодулей (СМ), расположенных вокруг черенковского калориметра. Каждый СМ площадью 8.4 м² включает 8 вертикальных плоскостей стримерных трубок. Угловая и пространственная точности реконструкции мюонных треков, пересекающих СМ, лучше 1 градуса и 1 см, соответственно. С помощью детектора ДЕКОР определяется количество мюонов в группе (множественность), а также направление прихода группы.

В индивидуальном событии оценивалась локальная плотность D как отношение множественности m к эффективной площади детектора в данном направлении $S_{\text{дет}}$, с учетом смещения оценки вследствие пуассоновских флуктуаций числа частиц, попавших в детектор, и круто падающего спектра плотности [11]:

$$D = (m - \beta) / S_{\text{дет}}, \quad (1)$$

где $\beta \sim 2.1$ — интегральный показатель наклона спектра локальных плотностей мюонов (СЛПМ) [11].

В первом приближении суммарное энерговыделение пропорционально плотности мюонов D в событии, поэтому рассматривалось удельное энерговыделение Σ/D — число фотоэлектронов, деленное на оценку плотности мюонов в событии.

Для анализа данных использовалось 103 тыс. событий с группами мюонов с множественностью не менее 5 и зенитными углами более 55° за 60.1 тыс. ч “живого” времени (период регистрации с июля 2013 г. по март 2022 г.). При зенитных углах меньше 55°, помимо мюонов, существенен вклад сопровождения от электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ [12, 13] в отклик ЧВК НЕВОД, чем и обусловлен выбор данной границы. События отбирались в двух 60-градусных секторах по азимутальному углу, где большая часть координатного детектора ДЕКОР (шесть из восьми супермодулей) экранирована водным объемом детектора НЕВОД.

СРЕДНИЕ ЭНЕРГИИ МЮОНОВ В ГРУППАХ

Для физического анализа выполнено совместное моделирование отклика детекторов ДЕКОР и ЧВК НЕВОД на прохождение искусственных групп мюонов. События с группами мюонов разыгрывались по спектру локальной плотности мюонов с наклоном и угловым распределением, близким к экспериментальному. В моделировании были учтены как физические особенности детектора ДЕКОР, так и условия отбора событий с группами мюонов. Для отобранных событий проведено моделирование отклика ЧВК НЕВОД на прохождение групп мюонов с фиксированными энергиями мюонов 100 ГэВ с помощью пакета программ Geant4 [14]. Математическая модель ЧВК НЕВОД была проверена и откалибрована по отклику на одиночные околоразнонаправленные мюоны, выделяемые супермодулями ДЕКОР.

Учтены различные систематические эффекты, влияющие на результаты измерений: остаточный вклад в отклик детектора НЕВОД от электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ в интервалах зенитных углов 55°–60° и 60°–65°, который составил 5.1 ± 1.1 и $0.87 \pm 0.30\%$ соответственно, недооценка отклика из-за порога оцифровки, некоторые изменения условий регистрации в различных сериях измерений, эффективность отклика детектора ДЕКОР, маскировка треков и др.

Осуществлен переход от непосредственно измеряемых средних удельных энерговыделений к средней энергии мюонов в группах. Для этого было получено отношение R измеренного удельного энерговыделения к моделированному для фиксированных энергий мюонов 100 ГэВ (рис. 1). Используя зависимость средних потерь в воде от энергии мюонов [15], которая практически линейна в области сотен ГэВ, из отношения R были вычислены средние энергии мюонов в черенковском водном калориметре и их погрешности. На рис. 2а приведена полученная зависимость средней энергии мюонов в группах в интервале зенитных углов от 55° до 85°. Стрелками обозначены

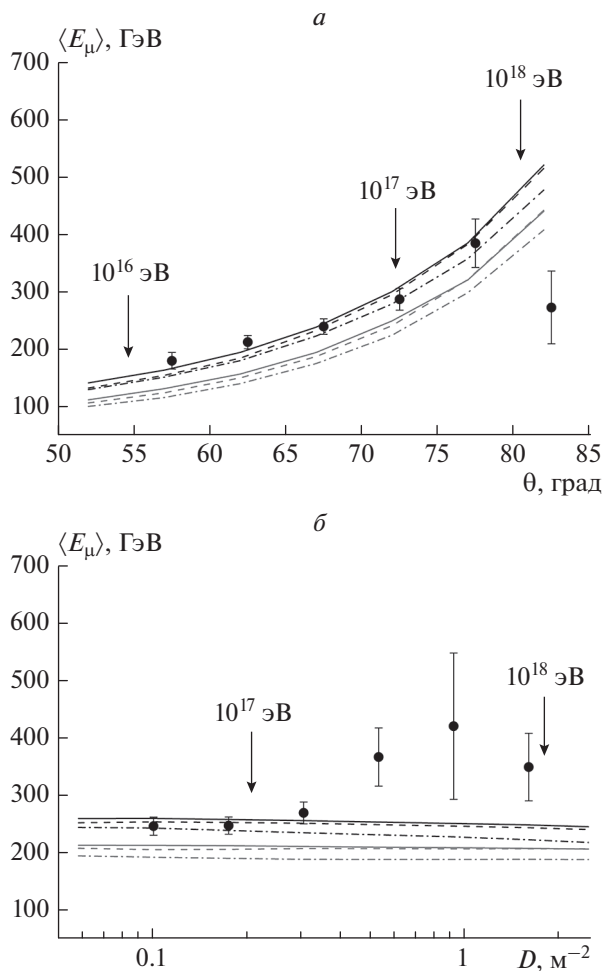


Рис. 2. Зависимости средних значений энергии мюонов в группах мюонов от зенитного угла (а) и мюонной плотности (б) в интервале зенитных углов $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$. Точки — данные, кривые — ожидаемые зависимости, полученные по результатам моделирования ШАЛ в программном пакете CORSIKA (подробное описание в тексте). Стрелками указаны характерные энергии первичных частиц космических лучей.

характерные энергии первичных частиц [11]. Кривые получены в результате моделирования мюонной компоненты ШАЛ, образованных первичными протонами (нижняя группа кривых) и ядрами железа (верхняя группа кривых), в программном пакете CORSIKA [16] для моделей адронных взаимодействий QGSJET-II-04 (сплошные), SIBYLL-2.3с (штриховые) и EPOS-LHC (штрихпунктирные). При расчете ожидаемых зависимостей использовались экспериментальные оценки наклона СЛПМ.

Из рис. 2а наблюдается рост средней энергии мюонов в группах с увеличением зенитного угла, экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с ожидаемыми результатами.

На рис. 2б представлена зависимость средней энергии мюонов от локальной плотности мюонов, полученная для интервала зенитных углов $65^\circ - 75^\circ$. Обозначения кривых и стрелок такие же, как на рис. 2а. Ожидаемые зависимости получены на основе моделирования ливней для первичных протонов и ядер железа для фиксированного зенитного угла $\theta = 69^\circ$. Для больших плотностей, соответствующих первичным энергиям выше 10^{17} эВ, превышение экспериментальных оценок средней энергии мюонов над расчетными для первичных протонов для разных моделей находится в пределах от 4.2σ до 4.8σ , а для первичных ядер железа от 3.1σ до 3.7σ (получено по последним трем точкам зависимости).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При энергиях выше 100 ПэВ результаты эксперимента указывают на превышение средних энергий мюонов в группах по сравнению с ожидаемыми, что может свидетельствовать в пользу включения новых механизмов генерации высокоэнергичных мюонов при сверхвысоких энергиях первичных космических лучей.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проекты № 0723-2020-0040 “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” и № FSWU-2023-0068 “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей”). Моделирование проводилось с использованием ресурсов высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dembinski H.P. et al. (EAS-MSU, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, Pierre Auger, SUGAR, Telescope Array, Yakutsk EAS Array Collaborations) // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. Art. No. 02004.
2. Soldin D. (EAS-MSU, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, Pierre Auger, SUGAR, Telescope Array, Yakutsk EAS Array Collaborations) // Proc. Sci. ICRC2021 (Berlin, 2021). P. 349.
3. Petrukhin A.A. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 2014. V. 742. P. 228.
4. Юрина Е.А., Барбашина Н.С., Богданов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1034; Yurina E.A., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 937.
5. Юрина Е.А., Барбашина Н.С., Богданов А.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 594; Yurina E.A., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 455.
6. Yurina E.A., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Proc. Sci. ICRC2021. (Berlin, 2021). P. 383.

7. Петрухин А.А. // УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 521; *Petrukhin A.A.* // Phys. Usp. 2015. V. 58. No. 5. P. 486.
8. Киндин В.В., Амельчаков М.Б., Барбашина Н.С. и др. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 23; *Kindin V.V., Amelchakov M.B., Barbashina N.S. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. No. 5. P. 649.
9. 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.* // Instrum. Exp. Tech. 2000. V. 43. No. 6. P. 743.
10. Амельчаков М.Б., Барбашина Н.С., Вонсовский Н.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 11. С. 1611.
11. Богданов А.Г., Громушкин Д.М., Кокоулин Р.П. и др. // ЯФ. 2010. Т. 73. № 11. С. 1904; *Bogdanov A.G., Gromushkin D.M., Kokoulin R.P. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2010. V. 73. P. 1852.
12. Кокоулин Р.П., Богданов А.Г., Душкин Л.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 398; *Kokoulin R.P., Bogdanov A.G., Dushkin L.I. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 365.
13. Богданов А.Г., Барбашина Н.С., Душкин Л.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 520; *Bogdanov A.G., Barbashina N.S., Dushkin L.I. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 484.
14. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.
15. Groom D.E., Mokhov N.V., and Striganov S.I. // Atom. Data Nucl. Data Tables. 2001. V. 78. P. 183.
16. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.

Average muon energies in inclined bundles according to NEVOD-DECOR data

E. A. Yurina^{a,*}, N. S. Barbashina^a, A. G. Bogdanov^a, V. S. Vorobev^a, V. V. Kindin^a, R. P. Kokoulin^a, K. G. Kompaniets^a, A. Yu. Konovalova^a, G. Mannocchi^b, A. A. Petrukhin^a, G. Trincheri^b, S. S. Khokhlov^a, V. V. Shutenko^a, I. I. Yashin^a

^aNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

^bOsservatorio Astrofisico di Torino – INAF, Torino, 10025 Italy

*e-mail: eayurina@mephi.ru

Results of measurements of the energy characteristics of muon bundles in inclined extensive air showers in the NEVOD-DECOR experiment are presented. Estimates of the average energy of muons in the bundles in the energy range of primary particles from 10 to 1000 PeV were obtained and compared with the calculated expected values for various assumptions about the composition of cosmic radiation and models of hadronic interactions. An excess of experimental values of the average muon energy in comparison with calculations for high local densities corresponding to energies of primary particles above 100 PeV was found.