

УДК 524.1

## СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА НЕВОД-ДЕКОР ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ГРУПП МЮОНОВ

© 2021 г. Е. А. Юрина<sup>1</sup>\*, Н. С. Барбашина<sup>1</sup>, А. Г. Богданов<sup>1</sup>, В. В. Киндин<sup>1</sup>, Р. П. Кокоулин<sup>1</sup>, К. Г. Компаниец<sup>1</sup>, Дж. Маннокки<sup>2</sup>, А. А. Петрухин<sup>1</sup>, Дж. Тринкоро<sup>2</sup>, С. С. Хохлов<sup>1</sup>, В. В. Шутенко<sup>1</sup>, И. И. Яшин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Астрофизическая обсерватория Турина, Турин, Италия

\*E-mail: eayurina@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Существование избыточного количества мюонных событий по сравнению с расчетами, обнаруженного во многих экспериментах при сверхвысоких энергиях ШАЛ (выше  $10^{17}$  эВ), не удастся объяснить с помощью современных моделей адронных взаимодействий. Одним из путей решения проблемы избытка мюонов является исследование энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ. Представлены результаты измерений энергетических характеристик групп мюонов за 7 лет наблюдений. Экспериментальные зависимости сопоставлены с результатами моделирования, выполненного с помощью программного пакета CORSIKA.

DOI: 10.31857/S0367676521040402

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем в физике космических лучей сверхвысоких энергий является избыток мюонных событий по сравнению с расчетом, получивший название “мюонная загадка”. Избыток мюонов проявляется в области энергий широких атмосферных ливней (ШАЛ) больше  $10^{17}$  эВ. Международная рабочая группа объединила результаты по исследованию избытка мюонов, включающие данные различных экспериментов [1, 2], в том числе эксперимента НЕВОД-ДЕКОР, в котором впервые была измерена зависимость избытка мюонов от энергии первичных частиц (от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  эВ и выше) [3, 4], и показано, что выше  $10^{17}$  эВ избыток мюонов не может быть описан в рамках существующих представлений о ядерных взаимодействиях, даже при предельно тяжелом (ядра железа) составе первичных космических лучей.

Поскольку различные механизмы появления избытка мюонных событий (космофизической либо ядерно-физической природы) должны по-разному сказываться на энергии мюонов, одним из возможных подходов к решению проблемы является исследование энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ [5]. Средние энергетические потери мюонов в веществе практически линейно зависят от энергии мюо-

нов. Если появляется избыток мюонов сверхвысоких энергий, то это должно отразиться в зависимости средней энергии мюонов от энергии первичных частиц. В настоящее время такой эксперимент может быть проведен только на комплексе НЕВОД-ДЕКОР. Этот эксперимент ведется с 2012 г. Предыдущие результаты исследований представлены в статьях [6, 7], в которых были измерены энерговыделения групп мюонов. В зависимости среднего удельного энерговыделения групп от локальной плотности мюонов для фиксированных интервалов зенитных углов было обнаружено увеличение энерговыделения для энергий первичных частиц выше  $10^{17}$  эВ. Цель данной работы — оценить среднюю энергию мюонов в группах и ее изменение с увеличением локальной плотности мюонов и, соответственно, энергии первичных частиц.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДАННЫЕ

Установка включает в себя черенковский водный калориметр (ЧВК) НЕВОД [8, 9] объемом  $2000 \text{ м}^3$  и координатно-трековый детектор ДЕКОР [10] площадью  $70 \text{ м}^2$ . Измерительная система ЧВК НЕВОД представляет собой пространственную решетку из 91 квазисферического

модуля (КСМ), каждый из которых включает 6 фотоумножителей ФЭУ-200 с плоским фотокатодом диаметром 15 см, направленных по осям ортогональной системы координат. Динамический диапазон регистрируемых сигналов составляет от 1 до  $10^5$  фотоэлектронов (ф. э.) для каждого ФЭУ. Координатно-трековый детектор ДЕКОР состоит из 8 супермодулей (СМ), расположенных в галереях здания с трех сторон водного объема детектора НЕВОД. Угловая и пространственная точности реконструкции мюонных треков, пересекающих СМ, лучше 1 градуса и 1 см, соответственно.

Представлены результаты исследований, основанные на данных трех серий измерений, проведенных на комплексе НЕВОД-ДЕКОР в период с июля 2013 по май 2020 г. за 46901 час “живого” времени наблюдений. Отобрано 80078 событий с группами мюонов с множественностью не менее 5 частиц и зенитными углами более 55 градусов. Поскольку при умеренных зенитных углах ( $\theta < 55^\circ$ ) в отклике калориметра, расположенного на поверхности Земли, наблюдается остаточный вклад электромагнитной и адронной компонент ШАЛ [11], для анализа энерговыделения групп отбирались только события с зенитными углами более  $55^\circ$ , где остаются практически чистые мюоны. Координатно-трековый детектор позволяет определить локальную плотность мюонов в группах и направление их прихода, и, соответственно, по этим данным оценить энергии первичных частиц. Энерговыделение групп мюонов восстанавливается по отклику черенковского калориметра НЕВОД (как сумма сигналов всех ФЭУ  $\Sigma$  в единицах ф. э.).

Плотность мюонов в событиях оценивается по числу треков ( $m$ ) в ДЕКОР с учетом эффективной площади супермодулей ( $S_{\text{дет}}$ ) для измеренного направления прихода группы и с учетом наклона спектров локальной плотности мюонов  $\beta \approx 2.1$  [3]:

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

Поскольку в первом приближении суммарное энерговыделение пропорционально плотности мюонов в событии, в дальнейшем анализе используется удельное энерговыделение (суммарное число фотоэлектронов, деленное на оценку плотности мюонов в событии).

Проведено моделирование энерговыделения групп мюонов с фиксированными энергиями мюонов 100 ГэВ на установках НЕВОД-ДЕКОР. События с группами разыгрывались по спектру локальной плотности мюонов с наклоном, близким к экспериментальному. В моделировании учтены физические особенности установки и условия аппаратного, программного и операторского отбора событий с группами мюонов. Для событий, удовлетворяющих условиям отбора, рассчитывался отклик черенковского водного ка-

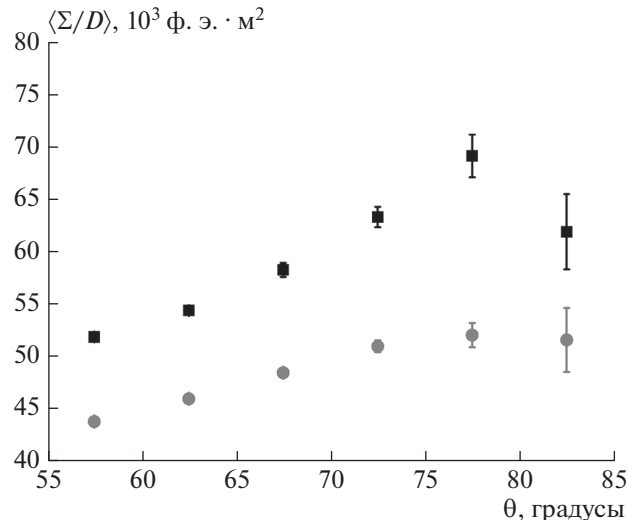


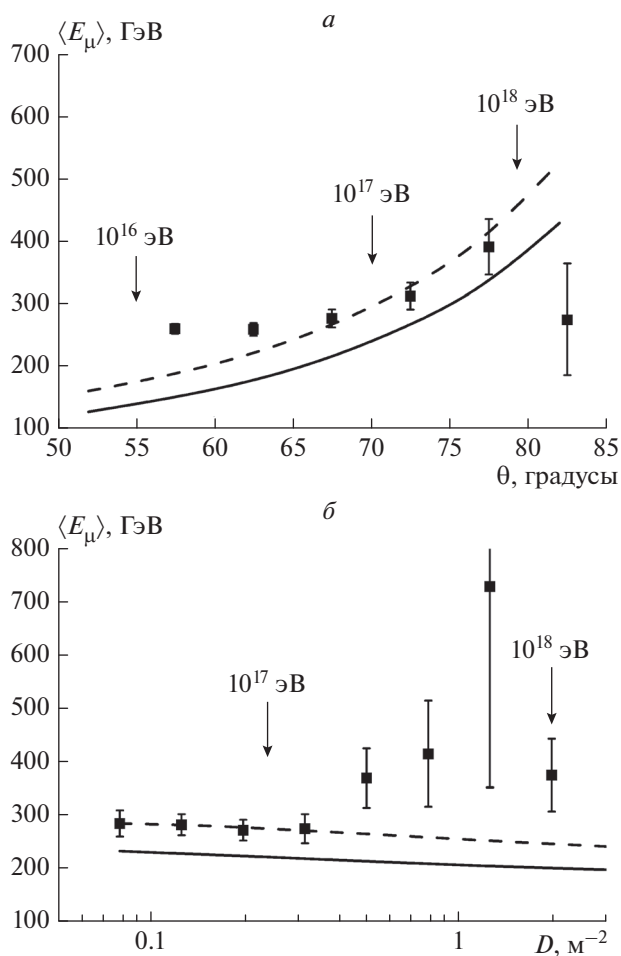
Рис. 1. Зависимость среднего удельного энерговыделения групп мюонов от зенитного угла. Черные квадраты — экспериментальные данные, серые кружки — результаты моделирования для фиксированной энергии мюонов 100 ГэВ.

лориметра НЕВОД с помощью пакета Geant4 [12, 13]. Модель ЧВК НЕВОД была проверена и откалибрована по отклику на одиночные окологоризонтальные мюоны.

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 приведена зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла. Черные квадраты — экспериментальные данные, серые кружки — моделированное удельное энерговыделение групп мюонов с фиксированными энергиями мюонов 100 ГэВ. Как видно из рисунка, наблюдается увеличение среднего удельного энерговыделения с ростом зенитного угла (как для эксперимента, так и для результатов моделирования). Однако экспериментальные точки находятся заметно выше результатов моделирования, что связано с вкладом различных энергий мюонов в группах, причем средняя энергия мюонов в группах выше 100 ГэВ.

Осуществлен переход от средних удельных энерговыделений в воде к энергии мюонов в группах. Для этого рассчитано отношение экспериментальных значений средних удельных энерговыделений к моделированным для фиксированных энергий мюонов 100 ГэВ. Затем, используя интерполяцию полученных значений по табличным данным средних удельных потерь мюонов [14], нормированных на потери при энергии 100 ГэВ, вычислялись средние энергии мюонов в калориметре и статистические погрешности. На рис. 2а приведена впервые полученная зависи-



**Рис. 2.** Зависимость средней энергии мюонов в группах мюонов от зенитного угла (а) и локальной плотности мюонов для зенитных углов  $\theta = 65^\circ$ – $75^\circ$  (б). Точки – полученные данные; кривые – ожидаемые зависимости для групп мюонов ШАЛ, образованных первичными протонами (сплошная) и ядрами железа (штриховая). Стрелками указаны характерные энергии первичных частиц космических лучей.

мость средней энергии мюонов в группах от зенитного угла. Стрелками обозначены расчетные среднелогарифмические энергии первичных частиц. Сплошная и штриховая кривые получены в результате моделирования ШАЛ в программе CORSIKA [15] для протонов и ядер железа в качестве первичных частиц. В качестве модели адронных взаимодействий использовалась QGSJET-II-04 [16, 17]. Для зенитных углов  $\theta = 55^\circ$ – $65^\circ$  наблюдается превышение полученных данных над ожиданием, что, возможно, связано с остаточным вкладом сопровождения от электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ. При больших зенитных углах наблюдается хорошее согласие с ожиданием.

На рис. 2б представлена полученная зависимость средней энергии мюонов от локальной

плотности мюонов для интервала зенитных углов  $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$ . Обозначение кривых и стрелок такое же, как на рис. 2а. Кривые на рисунке получены на основе моделирования ШАЛ для первичных протонов и ядер железа для фиксированного зенитного угла  $\theta = 69^\circ$ . Как видно из рисунка, данные указывают на увеличение средней энергии мюонов в группах при больших плотностях мюонов, что соответствует энергиям первичных частиц более  $10^{17}$  эВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте НЕВОД-ДЕКОР впервые получены оценки средней энергии мюонов в группах при разных зенитных углах и локальной плотности, которые соответствуют энергиям первичных частиц  $10^{16}$ – $10^{18}$  эВ. Для первичных энергий более  $10^{17}$  эВ наблюдается рост средней энергии мюонов в группах.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект по теме государственного задания № 0723-2020-0040), а также РФФИ (проект № 18-02-00971-а). 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, and Yakutsk EAS Array Collaborations) // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. Art. No. 02004.
2. Dembinski H.P. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 644.
3. 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.
4. Bogdanov A.G., Kokoulin R.P., Mannocchi G. et al. // Astropart. Phys. 2018. V. 98. P. 13.
5. Petrukhin A.A. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2014. V. 742. P. 228.
6. Kokoulin R.P., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 208. Art. No. 08006.
7. Yurina E.A., Bogdanov A.G., Barbashina N.S. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 620.
8. Петрухин А.А. // УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 521; Petrukhin A.A. // Phys. Usp. 2015. V. 58. P. 486.
9. 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. P. 649.
10. 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. P. 743.

11. *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. P. 484.*
12. *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.*
13. *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.*
14. *Groom D.E., Mokhov N.V., Striganov S.I. // Atom. Data Nucl. Data Tables. 2001. V. 78. P. 183.*
15. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.*
16. *Ostapchenko S. // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. Art. No. 014018.*
17. *Ostapchenko S. // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. Art. No. 074009.*

## Status of the NEVOD-DECOR experiment on the study of muon bundle energy deposit

**E. A. Yurina<sup>a,\*</sup>, N. S. Barbashina<sup>a</sup>, A. G. Bogdanov<sup>a</sup>, V. V. Kindin<sup>a</sup>, R. P. Kokoulin<sup>a</sup>,  
K. G. Kompaniets<sup>a</sup>, G. Mannocchi<sup>b</sup>, A. A. Petrukhin<sup>a</sup>, G. Trincherio<sup>b</sup>,  
S. S. Khokhlov<sup>a</sup>, V. V. Shutenko<sup>a</sup>, I. I. Yashin<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

<sup>b</sup>*Osservatorio Astrofisico di Torino – INAF, Torino, 10025 Italy*

*\*e-mail: eayurina@mephi.ru*

The existence of the excessive number of multi-muon events in comparison with calculations found in many experiments at ultrahigh energies of EAS (above  $10^{17}$  eV) cannot be explained using modern models of hadronic interactions. One of the ways to solve the problem of muon excess is to study the energy characteristics of EAS muon component. The results of the measurements of muon bundle energy characteristics over 7 year observation period are presented. The experimental dependences are compared with the results of simulation carried out using the CORSIKA software package.