

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 524.1

ЭКСПЕРИМЕНТ НЕВОД-ДЕКОР ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ГРУПП МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2020 г. Е. А. Юрина^a, *, Н. С. Барбашина^a, А. Г. Богданов^a, В. В. Киндин^a,
Р. П. Кокоулин^a, К. Г. Компаниец^a, Дж. Маннокки^b, А. А. Петрухин^a, Дж. Тринкери^b,
С. С. Хохлов^a, В. В. Шутенко^a, И. И. Яшин^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

^bOsservatorio Astrofisico di Torino, Istituto Nazionale di Astrofisica, Via Osservatorio 20, Pino Torinese (To), 10025 Italy

*E-mail: eayurina@mephi.ru

Поступила в редакцию 02.06.2020 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 15.06.2020 г.

Избыток мюонных событий по сравнению с расчетами, обнаруженный во многих экспериментах при сверхвысоких энергиях широких атмосферных ливней (ШАЛ), не удается объяснить с помощью современных моделей адронных взаимодействий. Наличие этого избытка получило название “мюонной загадки”. Одним из путей решения этой проблемы является исследование энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ. С этой целью в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР проводятся измерения энерговыделения групп мюонов космических лучей. Регистрация групп мюонов в широком интервале зенитных углов позволяет исследовать в рамках одного эксперимента широкий диапазон энергий первичных частиц космических лучей (от 10 до 1000 ПэВ). Представлены результаты измерений энерговыделения групп в течение длительного периода наблюдений.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, сверхвысокие энергии, группы мюонов, энерговыделение, черенковский водный калориметр

DOI: 10.1134/S2079562920010170

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в физике космических лучей большой интерес представляет “мюонная загадка” — наблюдаемый во многих экспериментах избыток мюонов по сравнению с расчетами в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) при сверхвысоких энергиях (выше 100 ПэВ). Обобщенные международная рабочая группой результаты исследования “мюонной загадки”, включающие данные экспериментов в космических лучах высоких и ультравысоких энергий AMIGA, IceCube, NEVOD-DECOR, Pierre Auger, SUGAR, Telescope Array, Yakutsk, EAS-MSU, KASCADE-Grande и Hires-MIA приведены в статьях [1, 2]. Результаты анализа этих данных показывают, что при энергиях больше 10^{17} эВ появляется растущий с энергией первичных частиц избыток мюонов по сравнению с ожиданием для современных моделей адронных взаимодействий, в том числе и в предположении предельно тяжелого (ядра железа) массового состава космических лучей. Одной из первых установок, на которой был обнаружен избыток мюонов и установлена его зависимость от энергии первичных частиц, является координатно-трековый детектор ДЕКОР [3–5], позволяю-

щий при относительно небольших размерах регистрировать группы мюонов ШАЛ в широком диапазоне энергий первичных частиц (от 10^{16} до 10^{18} эВ и выше).

Одним из возможных подходов к решению “мюонной загадки” является исследование энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ [6]. С этой целью в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР проводится измерение энерговыделения мюонных групп. Так как средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии, удельное энерговыделение (нормированное на плотность мюонов в группе) дает информацию о средней энергии мюонов. Отклонение экспериментальной зависимости энерговыделения от ожидаемой, рассчитанной в рамках известных моделей адронных взаимодействий, будет свидетельствовать об избытке мюонов сверхвысоких энергий. Единственной установкой, на которой в настоящее время могут быть выполнены такие измерения, является экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР.

ЭКСПЕРИМЕНТ НЕВОД-ДЕКОР

Установка состоит из черенковского водного калориметра (ЧВК) [7, 8] НЕВОД объемом 2000 м³ и координатно-трекового детектора ДЕКОР [9] с площадью около 70 м². Измерительная система ЧВК НЕВОД состоит из квазисферических модулей (КСМ), размещенных в виде решетки, включающей по 7 плоскостей в направлении каждой из координатных осей. Каждый КСМ включает 6 фотоумножителей ФЭУ-200 с плоскими фотокатодами, направленными по осям ортогональной системы координат. Всего в черенковском калориметре находится 91 КСМ (546 ФЭУ). Динамический диапазон регистрирующей электроники составляет от 1 до 10⁵ фотоэлектронов (ф.э.) для каждого ФЭУ благодаря применению двухдиодного съема информации.

Отбор событий с группами мюонов осуществляется с помощью координатно-трекового детектора ДЕКОР. Регистрация групп мюонов в широком диапазоне множественности и зенитного угла дает возможность изучения широкого интервала первичных энергий в рамках одного эксперимента [4]. Супермодули (СМ) координатно-трекового детектора ДЕКОР размещены в галереях здания НЕВОД с трех сторон от водного резервуара. Каждый СМ имеет рабочую площадь 8.4 м² и состоит из восьми вертикально подвешенных плоскостей пластиковых стримерных трубок с резистивным покрытием катода и внешним двухкоординатным считыванием. Пространственная и угловая точность реконструкции треков мюонов в СМ лучше 1 см и 1° соответственно.

Идентификация мюонных групп основана на факте, что треки мюонов, рожденных в атмосфере на больших расстояниях от установки, практически параллельны. Отбор событий с группами проводится в несколько этапов. Вначале, на триггерном уровне, отбираются и записываются события со срабатыванием трех любых супермодулей ДЕКОР. Далее проводится мягкий программный отбор событий-кандидатов, содержащих не менее трех квазипараллельных треков, зарегистрированных в трех разных СМ. Дальнейшая процедура отбора групп выполняется операторами с помощью специализированной программы-интерфейса также в два этапа. Сначала отбираются события с множественностью треков не менее заданной, зарегистрированные в выбранных интервалах зенитного и азимутального углов, а затем проводится окончательная классификация событий и подсчет числа мюонных треков. В результате формируются списки, содержащие номера событий, число треков, углы прихода группы.

Локальная плотность мюонов D (м⁻²) в событии оценивается на основе числа зарегистрированных мюонов и эффективной площади шести экранированных водным объемом СМ для измеренного направления прихода группы. В 2019 г.

улучшена методика оценки плотности мюонов в группах по данным ДЕКОР. До этого при оценке плотности мюонов эффективная площадь супермодулей $S_{\text{дет}}$ для данного направления прихода группы вычислялась аналитически, из чисто геометрических соображений (условие пересечения треком по меньшей мере пяти плоскостей в X -проекции). Такое приближение является упрощенным и приводит к некоторому завышению эффективного значения $S_{\text{дет}}$ и, соответственно, к занижению оценки локальной плотности D . Была разработана новая программа и проведено моделирование отклика супермодулей детектора ДЕКОР на прохождение групп мюонов с помощью метода Монте-Карло, в котором учитывались три значимых эффекта: условие триггирования супермодуля (срабатывание по меньшей мере двух четных и двух нечетных плоскостей в Y -проекции), отбор программой реконструкции и операторами мюонных треков по меньшей мере с 5 сработавшими плоскостями в X -проекции, а также неэффективность регистрации, связанная с прохождением треков через зазоры между камерами, их стенки, через камеры, отключенные из-за неисправностей. При обработке экспериментальных данных по группам мюонов вводится поправка, равная отношению локальной плотности, полученной на основе моделирования, к локальной плотности, полученной из результатов аналитического расчета $S_{\text{дет}}$. Также в эту поправку входит эффект маскировки треков (наложение двух и более треков в одной либо в обеих проекциях СМ), который существенен при плотности мюонов более 2 на кв. м.

В качестве меры энерговыделения групп мюонов в черенковском водном калориметре используется суммарный сигнал всех ФЭУ ЧВК НЕВОД (в единицах фотоэлектронов, ф.э.). Поскольку при умеренных зенитных углах ($\theta < 55^\circ$) в отклике калориметра, расположенного на поверхности Земли, наблюдается остаточный вклад электромагнитной и адронной компонент ШАЛ [10], для анализа энерговыделения групп отбирались только события с зенитными углами более 55° , где остаются практически чистые мюоны.

Весной 2013 г. была проведена модернизация системы водоподготовки ЧВК. Преимуществом новой системы водоподготовки стало увеличение длины поглощения черенковского света, которая достигла величины ~ 10 м (больше, чем поперечный размер бассейна ЧВК). В результате этого, число зарегистрированных фотоэлектронов для одиночных мюонов и групп увеличилось более чем вдвое. В то же время, проявились такие эффекты, как вклад света, отраженного от поверхности воды.

В данной статье приведены результаты анализа данных по энерговыделению групп мюонов, зарегистрированных в период с июля 2013 г. по апрель 2019 г. Полное живое время наблюдений

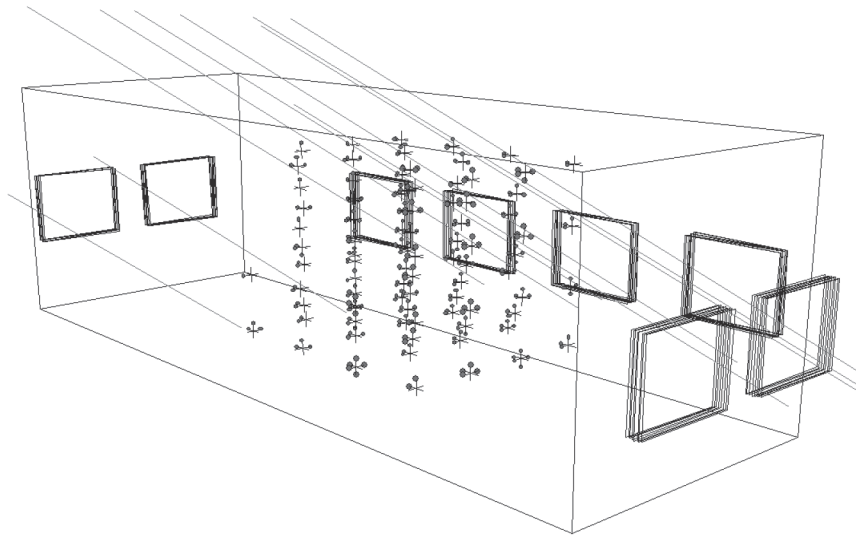


Рис. 1. Пример события с группой мюонов, зарегистрированной координатно-трековым детектором ДЕКОР и черенковским водным калориметром НЕВОД. Тонкие линии — результат реконструкции треков мюонов по данным детектора ДЕКОР; кружки — сработавшие ФЭУ в черенковском водном детекторе НЕВОД, большие прямоугольники — супермодули детектора ДЕКОР.

составило 39131 ч, зарегистрировано 66571 событие с группами мюонов с множественностью не менее 5 и зенитными углами больше 55° .

На рис. 1 представлен пример события с группой мюонов, зарегистрированной координатным детектором ДЕКОР и ЧВК НЕВОД под зенитным углом ~ 57 градусов.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Данные по энерговыделению групп мюонов, получаемые в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР, рассматриваются в виде зависимостей характеристик удельного энерговыделения (суммарное число фотоэлектронов (Σ), деленное на оценку плотности мюонов в событии), поскольку в первом приближении суммарное энерговыделение пропорционально локальной плотности мюонов в событии. На рис. 2 приведены распределения событий по логарифму удельного энерговыделения для трех интервалов зенитного угла ($55^\circ \leq \theta < 65^\circ$, $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$, $\theta \geq 75^\circ$). В первом приближении, эти распределения подобны; их центры смещаются вправо с увеличением зенитного угла. В распределениях видны единичные события с небольшим удельным энерговыделением, а также с экстремально большим энерговыделением, выбивающиеся из распределений.

На рис. 3 приведено распределение событий по удельному энерговыделению, полученное для полной статистики групп мюонов с зенитными углами более 55 градусов и числом треков мюонов в ДЕКОР не менее пяти. Распределение имеет сильно асимметричный характер с протяженной

правой ветвью событий с энерговыделением, в несколько раз превышающим среднее значение. Помимо искомого физического эффекта (появление дополнительного класса событий с “аномально” высокой энергией мюонов), такие события могут быть связаны с относительно редкими случаями регистрации мюонных групп непосредственно вблизи оси ШАЛ или с катастрофическими потерями энергии отдельных частиц в процессах тормозного излучения и неупругого взаимодействия мюонов с ядрами. Вследствие асимметрии распределения и существенного отличия его от нормального, наличие (либо отсутствие) в выборках даже единичных событий с экстремально большим энерговыделением может приводить к существенному завышению (соответственно, занижению) выборочных оценок среднего значения и его погрешности.

Кроме среднего значения, можно рассмотреть возможность использования других характеристик распределения (например, выборочных оценок квантилей), которые отличаются большей устойчивостью. В качестве примера для анализа были использованы выборочные оценки медианы (50% квантиль). В табл. 1 сопоставлены средние и медианные значения удельного энерговыделения групп мюонов для трех интервалов зенитного угла. Как для средних значений, так и для медиан, наблюдается заметный рост удельного энерговыделения с увеличением зенитного угла, что подтверждают приведенные на рис. 2 распределения. Из таблицы видно, что статистические погрешности медианы ощутимо меньше, чем для средних значений.

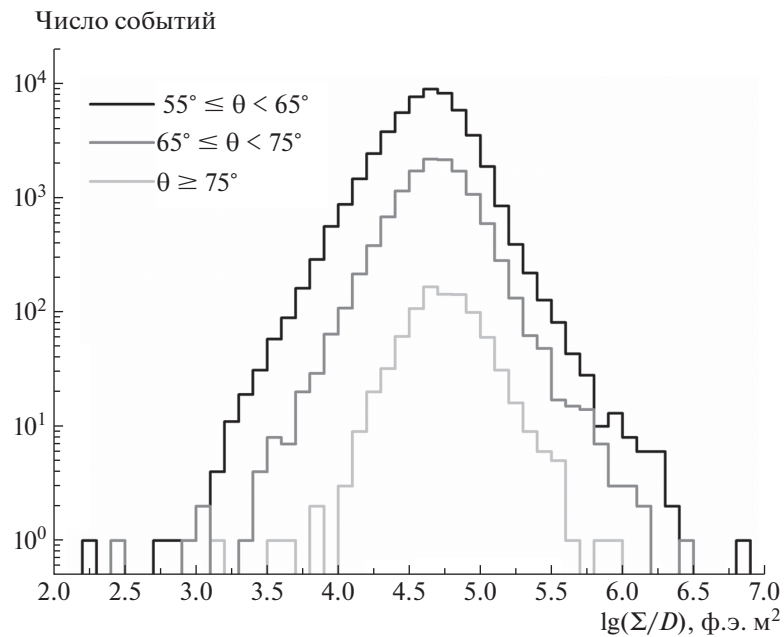


Рис. 2. Распределения событий по логарифму удельного энерговыделения для трех интервалов зенитных углов.

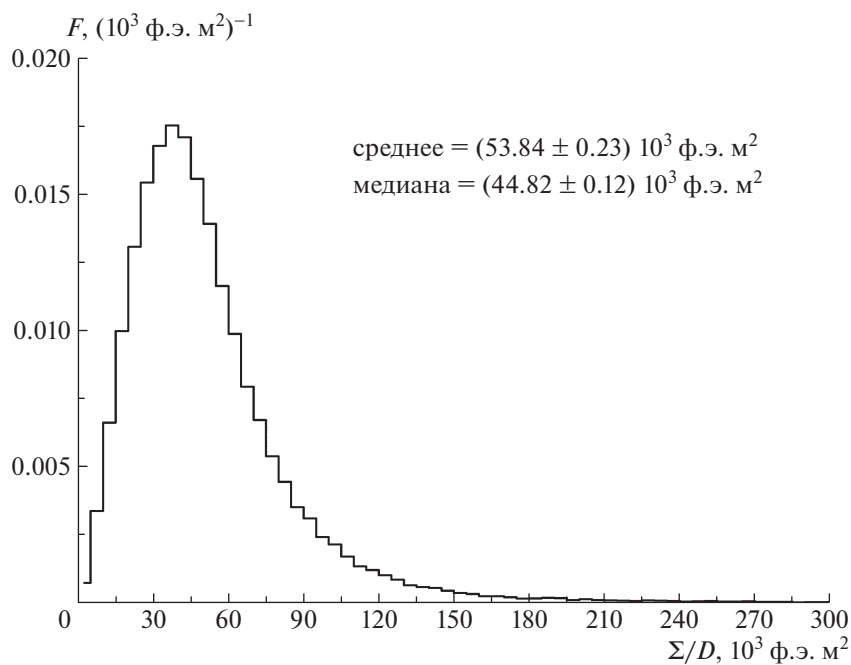


Рис. 3. Распределение событий по удельному энерговыделению групп мюонов.

Для сопоставления экспериментальных результатов, полученных для разных интервалов зенитного угла, рассматривалось отношение измеренного среднего удельного энерговыделения к ожидаемому для первичных протонов энерговыделению в зависимости от энергии первичных частиц (рис. 4). Данная зависимость получена на

основе представленных в статье [11] зависимостей удельного энерговыделения от локальной плотности мюонов для интервалов зенитных углов $55^\circ \leq \theta < 65^\circ$ и $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$. Интервал $\theta \geq 75^\circ$ не рассматривался из-за небольшой статистики и флуктуаций. Моделирование проводилось в программном пакете CORSIKA [12] для протонов и

ядер железа в качестве первичных частиц с использованием моделей взаимодействия SIBYLL 2.3 [13] и FLUKA [14] для адронов с энергией выше и ниже 80 ГэВ соответственно. Энергии первичных частиц оценивались как среднелогарифмические значения энергий, соответствующие событиям, отобранным в соответствии с плотностью мюонов [4]. Экспериментальные точки скорректированы на вклад света, отраженного от поверхности воды (эта поправка получена на основе моделирования отклика ЧВК на прохождение групп в программном пакете Geant4 [15, 16]). Кривая для протонов нормирована на данные в интервале зенитных углов 55° – 65° . Штриховая и штрихпунктирные кривые представляют собой отношения моделированного удельного энерговыделения для ядер железа к энерговыделению для первичных протонов для зенитных углов $\theta = 59^\circ$ и $\theta = 69^\circ$ соответственно; отличие результатов расчета для разных первичных ядер находится в пределах 5%. Кружки и квадраты представляют отношения измеренного удельного энерговыделения (в интервалах зенитных углов $55^\circ \leq \theta < 65^\circ$ и $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$ соответственно) к моделированному для первичных протонов. Для энергий выше 10^{17} эВ наблюдается тенденция к росту отношения наблюдаемого среднего удельного энерговыделения к ожидаемому, причем величина этого возрастания больше, чем можно было бы ожидать за счет изменения массового состава первичных ча-

Таблица 1. Средние и медианные значения удельного энерговыделения (в единицах 10^3 ф.э. м²) для трех интервалов зенитного угла.

Зенитный угол	Среднее	Медиана
$55^\circ \leq \theta < 65^\circ$	52.35 ± 0.26	43.65 ± 0.13
$65^\circ \leq \theta < 75^\circ$	59.06 ± 0.52	49.03 ± 0.30
$\theta \geq 75^\circ$	68.1 ± 1.9	55.2 ± 1.3

стиц. В правой части рисунка заметна точка с большим значением оценки среднего удельного энерговыделения и погрешности, что связано с наличием в выборке для данного интервала единичного события с экстремально большим энерговыделением (на порядок больше среднего значения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На комплексе НЕВОД-ДЕКОР проводятся измерения энергетических характеристик групп мюонов, генерируемых первичными частицами космических лучей сверхвысоких энергий. Про-

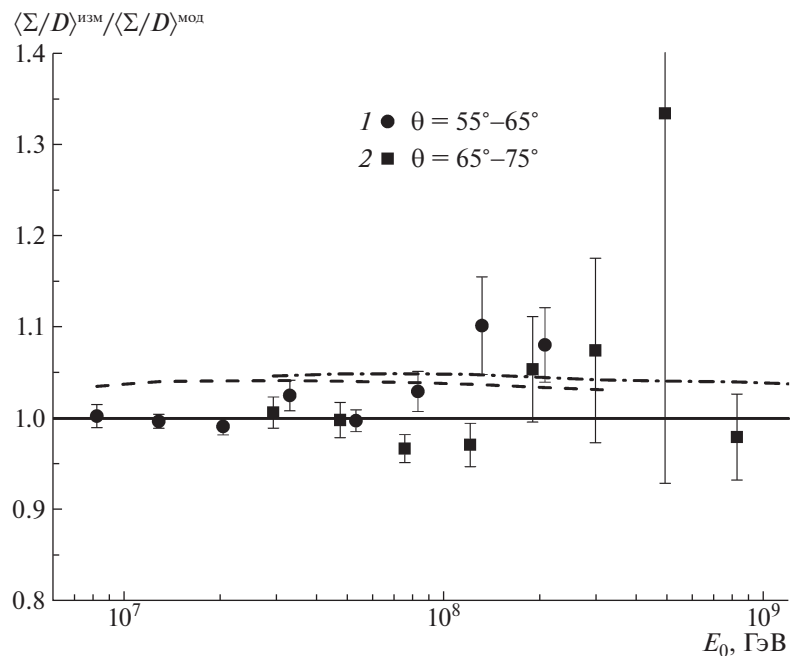


Рис. 4. Зависимость отношения измеренного среднего удельного энерговыделения к моделированному энерговыделению для первичных протонов от энергии первичных частиц. Точки: отношения экспериментального удельного энерговыделения (1, 2 соответствуют интервалам зенитных углов $55^\circ \leq \theta < 65^\circ$ и $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$) к моделированному для первичных протонов. Штриховая и штрихпунктирные кривые — отношения ожидаемого удельного энерговыделения для ядер железа к энерговыделению для первичных протонов для зенитных углов $\theta = 59^\circ$ и $\theta = 69^\circ$ соответственно.

анализированы энерговыделения групп мюонов в черенковском водном калориметре в диапазоне энергий первичных космических лучей 10^{16} – 10^{18} эВ. В результатах измерений имеется указание на возрастание среднего удельного энерговыделения в области энергий первичных частиц выше 10^{17} эВ. Рассмотрена возможность использования устойчивых (квантильных) оценок для анализа распределений событий по удельному энерговыделению.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Программа повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ, проект 02.а03.21.0005), а также РФФИ (грант 18-02-00971-а). Моделирование проводилось с использованием ресурсов высокопроизводительного вычислительного центра МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Dembinski H.P. et al. (EAS-MSU, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, Pierre Auger, SUGAR, Telescope Array, and Yakutsk EAS Array Collabs.) // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. P. 02004.
2. Dembinski H.P. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 644.
3. Kokoulin R.P., Bogdanov A.G., Mannocchi G. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2009. V. 196. P. 106.
4. Bogdanov A.G., Gromushkin D.M., Kokoulin R.P. et al. // Phys. At. Nucl. 2010. V. 73. P. 1852.
5. Bogdanov A.G., Kokoulin R.P., Mannocchi G. et al. // Astropart. Phys. 2018. V. 98. P. 13.
6. Petrukhin A.A. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2014. V. 742. P. 228.
7. Petrukhin A.A. // Phys. Usp. 2015. V. 58. P. 486.
8. Kindin V.V., Amelchakov M.B., Barbashina N.S. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. P. 649.
9. Barbashina N.S., Chernov D.V., Ezubchenko A.A. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2000. V. 43. P. 743.
10. Bogdanov A.G., Barbashina N.S., Dushkin L.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. P. 484.
11. Yurina E.A., Bogdanov A.G., Barbashina N.S. et al. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 620.
12. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. 1998. Forschungszentrum Karlsruhe Report.
13. Riehn F., Engel R., Fedynitch A. et al. // Proceedings of 34th International Cosmic Ray Conference. Hague. 2015. PoS (ICRC2015) 558.
14. Ferrari A., Sala P.R., Fasso A. et al. FLUKA: A Multi-Particle Transport Code (Program Version 2005). 2005. Geneva: CERN.
15. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.
16. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186.

NEVOD-DECOR Experiment on the Measurement of the Energy Deposit of Cosmic Ray Muon Bundles

E. A. Yurina^{1,*}, N. S. Barbashina¹, A. G. Bogdanov¹, V. V. Kindin¹, R. P. Kokoulin¹, K. G. Kompaniets¹, G. Mannocchi², A. A. Petrukhin¹, G. Trinchero², S. S. Khokhlov¹, V. V. Shutenko¹, and I. I. Yashin¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²Osservatorio Astrofisico di Torino, Istituto Nazionale di Astrofisica, Pino Torinese (To), 10025 Italy

*e-mail: eayurina@mephi.ru

Received June 2, 2020; revised June 9, 2020; accepted June 15, 2020

Abstract—The excess of multi-muon events in comparison with calculations which was found in many experiments at ultrahigh energies of extensive air showers (EAS) cannot be explained using contemporary models of hadron interactions. The existence of this excess was called the “muon puzzle”. One of the ways to solve this problem is the study of the energy characteristics of EAS muon component. For this purpose, the energy deposit of cosmic ray muon bundles is measured in the NEVOD-DECOR experiment. The registration of muon bundles in a wide range of zenith angles allows one to explore a wide range of energies of the primary particles of cosmic rays (from 10 to 1000 PeV) in frame of a single experiment. The results of the measurements of the energy deposit of bundles over a long observation period are presented.

Keywords: cosmic rays, extensive air showers, ultrahigh energies, muon bundles, energy deposit, Cherenkov water calorimeter