

УДК 524.1

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ МЮОННЫХ ГРУПП ОТ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МЮОНОВ И ЗЕНИТНОГО УГЛА

© 2019 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>, О. Сааведра<sup>3</sup>, Дж. Тринкоро<sup>2</sup>, В. А. Хомяков<sup>1</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

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

\*E-mail: ea.yurina@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

На экспериментальном комплексе НЕВОД проводится исследование энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ с целью решения проблемы обнаруженного избытка мюонов в ШАЛ при сверхвысоких энергиях по сравнению с результатами моделирования. Получены зависимости энерговыведения групп мюонов от зенитного угла и локальной плотности мюонов для первичных энергий 10–1000 ПэВ. Приводятся результаты сравнения данных с моделированием, выполненным с помощью программы CORSIKA.

DOI: 10.1134/S0367676519080398

### ВВЕДЕНИЕ

На детекторах ALPH [1] и DELPHI [2] ускорителя LEP в CERN обнаружен избыток событий с большой множественностью мюонов по сравнению с моделированием. Анализ данных ДЕКОР [3–5] по группам мюонов с высокой множественностью при больших зенитных углах показал, что измеренная интенсивность событий не может быть объяснена в рамках существующих моделей взаимодействия адронов даже в предположении тяжелого массового состава (ядра железа) при первичных энергиях вблизи  $10^{18}$  эВ. Измерения в обсерватории Пьер Оже [6, 7] также подтвердили избыточное количество мюонов в наклонных широких атмосферных ливнях (ШАЛ) в диапазоне энергий порядка  $10^{19}$  эВ по сравнению с расчетами. Анализ данных установки ШАЛ-МГУ [8] по мюонам с энергиями  $\geq 10$  ГэВ в околоразвертикальных ливнях не выявил избытка наблюдаемых мюонов. Но этот вывод был основан на изучении ШАЛ с энергиями  $> 10^{17}$  эВ. Также избытка мюонов не обнаружили и на детекторе ALICE [9] в CERN, в котором проводился эксперимент по исследованию групп мюонов при энергиях первичных частиц  $> 10^{16}$  эВ. В данных ДЕКОР для энергии  $10^{17}$  эВ избыток также не обнаруживается [4, 5]. Совокупность этих результатов указывает, что избыток мюонов появляется только при ульт-

равысоких энергиях первичных частиц и увеличивается с их энергией.

Для решения проблемы обнаруженного избытка мюонов (так называемой “мюонной загадки”) необходимо исследование энергетических характеристик мюонов в группах [10]. Возможным подходом является измерение энерговыведения групп мюонов в веществе детектора. Средние энергетические потери мюонов практически линейно зависят от их энергии:  $dE_{\mu}/dX \sim a + bE_{\mu}$ , и если появляется избыточный поток высокоэнергичных мюонов, то это должно отразиться в зависимости среднего энерговыведения мюонных групп от энергии первичных частиц.

Исследование энергетических характеристик групп мюонов проводится на экспериментальном комплексе НЕВОД, начиная с 2012 г. Предшествующие результаты исследования энерговыведения групп мюонов представлены в [11]. В настоящей статье представлены результаты, основанные на данных, накопленных за период с июля 2013 по февраль 2018 г.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ДАННЫЕ

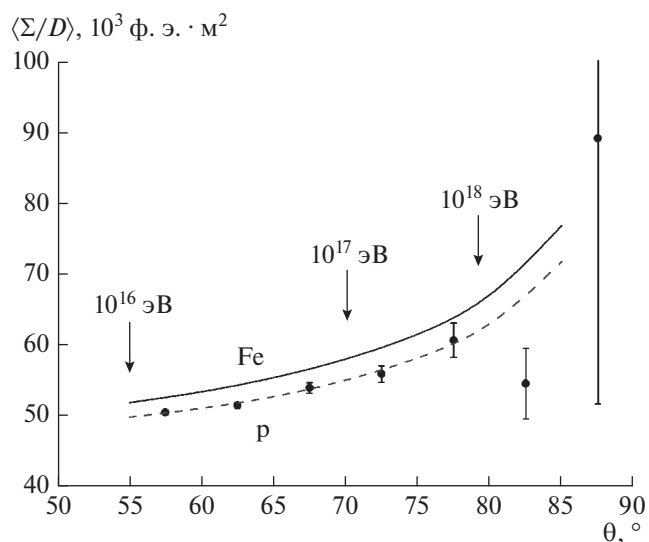
Экспериментальный комплекс включает в себя черенковский водный калориметр (ЧВК) НЕВОД [12, 13] и координатно-трековый детек-

тор ДЕКОР [14]. Регистрация групп мюонов в широком диапазоне множественности и зенитного угла дает возможность изучения широкого интервала первичных энергий в рамках одного эксперимента [4]. ЧВК НЕВОД объемом 2000 м<sup>3</sup> содержит в себе пространственную решетку квазисферических модулей (КСМ). Каждый КСМ включает 6 фотоумножителей ФЭУ-200 с плоским фотокатодом диаметром 15 см, направленных по осям ортогональной системы координат. Всего в черенковском детекторе находится 91 КСМ (546 ФЭУ), размещенных в вертикальных струнах (по 3 или 4 КСМ в каждой) с расстояниями 2.5 м вдоль оси бассейна и 2.0 м поперек него и по глубине. Координатно-трековый детектор ДЕКОР общей площадью около 70 м<sup>2</sup> включает восемь супермодулей (СМ), размещенных в галереях здания НЕВОД с трех сторон от водного резервуара. Чувствительная площадь каждого супермодуля составляет 8.4 м<sup>2</sup>. Супермодули состоят из восьми вертикальных плоскостей пластиковых стримерных трубок с резистивным катодом и внешней двухкоординатной системой считывающих стрипов. Пространственная и угловая точность реконструкции треков мюонов в СМ лучше 1 см и 1° соответственно.

В качестве меры энерговыделения групп мюонов в НЕВОД используется сумма сигналов  $\Sigma$  всех ФЭУ ЧВК (в единицах фотоэлектронов, ФЭ). Локальная плотность мюонов  $D$  (м<sup>-2</sup>) в событии оценивается на основе числа зарегистрированных мюонов и эффективной площади  $S_{det}$  шести экранированных водным объемом СМ для измененного направления прихода группы.

В первой экспериментальной серии отбирались группы с зенитными углами более 40°. При умеренных зенитных углах в отклике незранированного калориметра, расположенного на поверхности Земли, наблюдается остаточный вклад электромагнитной и адронной компонент ШАЛ. Этот вклад экспоненциально убывает с наклонной глубиной атмосферы [15]. При зенитных углах более 55° в событиях с группами остаются практически чистые мюоны. Поэтому в следующих сериях отбирались только события с зенитными углами более 55°. Анализ данных первой серии показал, что полное энерговыделение почти пропорционально локальной плотности мюонов. Поэтому далее мы рассматриваем удельное энерговыделение  $\Sigma/D$ , т.е. отклик черенковского калориметра, нормированный на оценку локальной плотности мюонов в событии.

Весной 2013 г. была проведена модернизация системы водоподготовки ЧВК, и новые данные были набраны в период с июля 2013 по февраль 2018 г. (измерения в настоящее время продолжаются). Полное живое время наблюдений составило 30 688 ч, зарегистрировано 52 141 событие с груп-



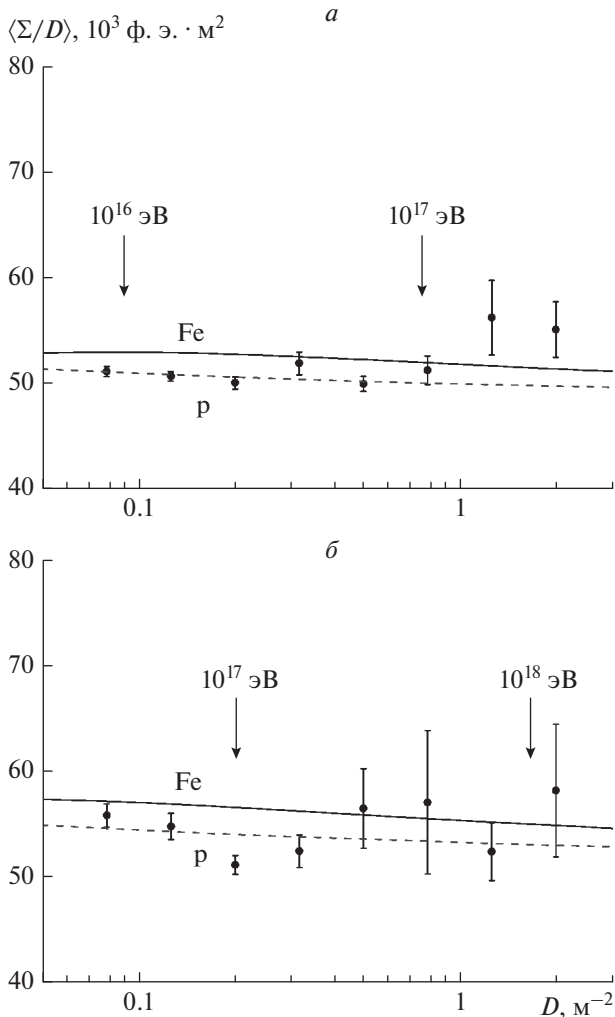
**Рис. 1.** Зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла прихода группы. Точки — экспериментальные данные; кривые — ожидаемые зависимости для групп мюонов ШАЛ, образованных первичными протонами (p) и ядрами железа (Fe). Стрелками указаны характерные энергии первичных частиц космических лучей.

пами мюонов с множественностью не менее 5 и зенитными углами больше 55°.

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.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЕРИЙ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 приведена зависимость удельного энерговыделения групп мюонов от зенитного угла. Экспериментальные точки скорректированы на вклад света, отраженного от поверхности воды (на основе моделирования в программном пакете Geant4 [16, 17]). Стрелки показывают средние логарифмические значения энергий первичных частиц. Увеличение энерговыделения с зенитным углом отражает увеличение средней энергии мюонов в группах. Кривые представляют ожидаемые зависимости среднего удельного энерговыделения мюонов в группах от зенитного угла. Эти кривые получены на основе моделирования ШАЛ с помощью программного пакета CORSIKA [18] для протонов и ядер железа в качестве первичных



**Рис. 2.** Зависимость среднего удельного энерговыделения мюонных групп от локальной плотности мюонов для интервалов зенитных углов  $\theta = 55^\circ\text{--}65^\circ$  (а) и  $\theta = 65^\circ\text{--}75^\circ$  (б). Точки — экспериментальные данные; кривые — ожидаемые зависимости для групп мюонов ШАЛ, образованных первичными протонами (р) и ядрами железа (Fe). Стрелками указаны характерные энергии первичных частиц космических лучей.

частиц. Для моделирования использовалась комбинация моделей взаимодействия SIBYLL-2.3 [19] и FLUKA [20] для адронов с энергией выше и ниже 80 ГэВ соответственно. Расчетная кривая для первичных протонов нормирована по результатам измерений в интервале зенитных углов  $55^\circ\text{--}65^\circ$ . Измеренная зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла подтверждает рост средней энергии мюонов в группах и достаточно хорошо согласуется с ожидаемой.

На рис. 2а и 2б приведены зависимости среднего удельного энерговыделения от локальной плотности мюонов для групп в интервалах зенитных углов  $55^\circ \leq \theta < 65^\circ$  и  $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$ . Фактически подобное рассмотрение для фиксированного зе-

нитно-углового интервала позволяет проследить возможные изменения отклика детектора (и, соответственно, средней энергии мюонов в группах) с возрастанием первичной энергии. Кривые на рисунках получены на основе моделирования для первичных протонов и ядер железа для фиксированных зенитных углов  $\theta = 59^\circ$  и  $\theta = 69^\circ$  соответственно; применен тот же коэффициент нормировки, что и на рис. 1. Как видно из рисунков, результаты моделирования показывают тенденцию к медленному снижению энергии мюонов в группах с увеличением первичной энергии. В то же время данные указывают на некоторое увеличение среднего удельного энерговыделения при больших плотностях мюонов, соответствующих эффективным энергиям первичных частиц более  $10^{17}$  эВ. Важно отметить, при переходе к большим зенитным углам одинаковым плотностям мюонов будут соответствовать события с большей энергией первичных частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На комплексе НЕВОД-ДЕКОР проводятся измерения энергетических характеристик групп мюонов, генерируемых первичными частицами космических лучей в области энергий  $10^{16}\text{--}10^{18}$  эВ. Выявлена заметная зависимость среднего удельного энергетического энерговыделения (нормированного на плотность мюонов) от зенитного угла. Эта зависимость находится в хорошем согласии с результатами моделирования, выполненного на основе программы CORSIKA. Обнаружено указание на увеличение средней энергии мюонов в группах по сравнению с ожиданием при первичных энергиях между  $10^{17}$  и  $10^{18}$  эВ. Это отклонение может свидетельствовать о включении нового механизма генерации высокоэнергичных мюонов при ультравысоких энергиях первичных частиц.

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, и государственное задание), а также РФФИ (грант № 18-02-00971-а). Моделирование проводилось с использованием ресурсов высокопроизводительного вычислительного центра МИФИ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avati V., Dick L., Eggert K. et al. // *Astropart. Phys.* 2003. V. 19. P. 513.
2. Abdallah J. et al. (LEP — DELPHI Collaboration) // *Astropart. Phys.* 2007. V. 28. P. 273.
3. Kokoulin R.P., Bogdanov A.G., Mannoichi G. et al. // *Nucl. Phys. B.* 2009. V. 196. P. 106.

4. *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. Nuclei. 2010. V. 73. P. 1852.*
5. *Bogdanov A.G., Kokoulin R.P., Mannocchi G. et al. // Astropart. Phys. 2018. V. 98. P. 13.*
6. *Nellen L. (for Pierre Auger Collaboration) // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. Art. № 012107.*
7. *Aab A. (Pierre Auger Collaboration) et al. // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. Art. № 032003.*
8. *Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Karpikov I.S. et al. // Astropart. Phys. 2017. V. 92. P. 1.*
9. *The ALICE Collaboration // JCAP. 2016. P. 032.*
10. *Petrukhin A.A. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2014. V. 742. P. 228.*
11. *Kokoulin R.P., Bogdanov A.G., Barbashina N.S. et al. // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. № 1. P. 101.*
12. *Петрухин А.А. // УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 521; Petrukhin A.A. // Phys. Usp. 2015. V. 58. P. 486.*
13. *Khokhlov S.S., Amelchakov M.B., Ashikhmin V.V. et al. // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. P. 271.*
14. *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. // Instr. Exp. Tech. 2000. V. 43. №. 6. P. 743.*
15. *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. № 4. P. 484.*
16. *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 506. P. 250.*
17. *Allison J. et al. (Geant4 Collaboration) // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 1.*
18. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.*
19. *Riehn F., Engel R., Fedynitch A. et al. // Proc. 34th ICRC. (Hague, 2015). Art. № 558.*
20. *Ferrari A., Sala P.R., Fassò A., Ranft J. // FLUKA: A multi-particle transport code (program version 2005). Geneva: CERN, 2005. 405 p.*