

УДК 539.1.05

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ СОБЫТИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ ДРЕЙФОВЫМИ КАМЕРАМИ

© 2023 г. В. С. Воробьев¹*, Е. А. Задеба¹, Р. В. Николаенко¹, И. Ю. Трошин¹

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

*E-mail: VSVorobev@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Представлены результаты анализа многочастичных событий в космических лучах на координатно-трековых установках на дрейфовых камерах КТУДК и ПротоТРЕК. Анализ данных ПротоТРЕК показал, что многопроволочные дрейфовые камеры позволяют реконструировать события с плотностью до 15 частиц на квадратный метр. Выполнена оценка энергий первичных космических лучей, ответственных за генерацию групп мюонов, зарегистрированных КТУДК.

DOI: 10.31857/S0367676523701727, EDN: OQZTUS

ВВЕДЕНИЕ

В современной физике высоких и сверхвысоких энергий актуальны проблемы энергетического спектра, химического состава, распространения и происхождения космических лучей. Для решения этих задач создаются новые установки и расширяются уже существующие [1–5].

В ряде экспериментов по исследованию космических лучей сверхвысоких энергий наблюдается избыток количества мюонов по сравнению с расчетами, в которых используются различные модели адронного взаимодействия [6, 7]. Это указывает на некорректность этих моделей при энергии частиц выше 10^{17} эВ, что не позволяет правильно определять химический состав в этой области.

Среди всех экспериментов выделяется экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР [8], который, обладая наименьшей эффективной площадью (около 70 м^2), позволяет исследовать космические лучи в широком диапазоне $3 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{18}$ эВ. Черенковский водный калориметр (ЧВК) НЕВОД позволяет измерять потери энергии мюонов, а координатно-трековый детектор ДЕКОР — определять их локальную плотность и направление прилета. Это единственный в мире комплекс, позволяющий измерять среднюю энергию мюонов широких атмосферных ливней (ШАЛ) — параметр, который способен дать объяснение наблюдаемому избытку [9]. Однако ДЕКОР обладает двумя недостатками: он не полностью перекрывает ЧВК, что не позволяет определить точное

число мюонов, прошедших через калориметр, а двухтрековое разрешение детектора (около 3 см) сильно ограничивает возможность исследования событий с плотностью выше одной частицы/ м^2 , в то время как избыток мюонов наблюдается преимущественно при больших плотностях.

Для решения этой проблемы разрабатывается новый крупномасштабный координатно-трековый детектор ТРЕК [10] на основе многопроволочных дрейфовых камер [11]. Новый детектор будет полностью перекрывать большую сторону калориметра, обладая эффективной площадью 250 м^2 , и иметь разрешение двух треков около трех мм, что на порядок лучше, чем у ДЕКОР. На сегодняшний день созданы два прототипа детектора — координатно-трековая установка на дрейфовых камерах (КТУДК) [12] и ПротоТРЕК [13]. Целью работы является изучения возможности исследования событий с плотностью выше 10 частиц на квадратный метр с помощью многопроволочных дрейфовых камер, а также исследование групп мюонов, зарегистрированных КТУДК.

ПРОТОТИПЫ КООРДИНАТНО-ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА ТРЕК

КТУДК состоит из двух плоскостей по 8 камер в каждой с одинаковой ориентацией в пространстве. Плоскости расположены в коротких галереях с противоположных сторон ЧВК (рис. 1). Такое расположение камер не позволяет реконструировать треки частиц в трехмерном пространстве, однако позволяет выделять группы мюонов среди

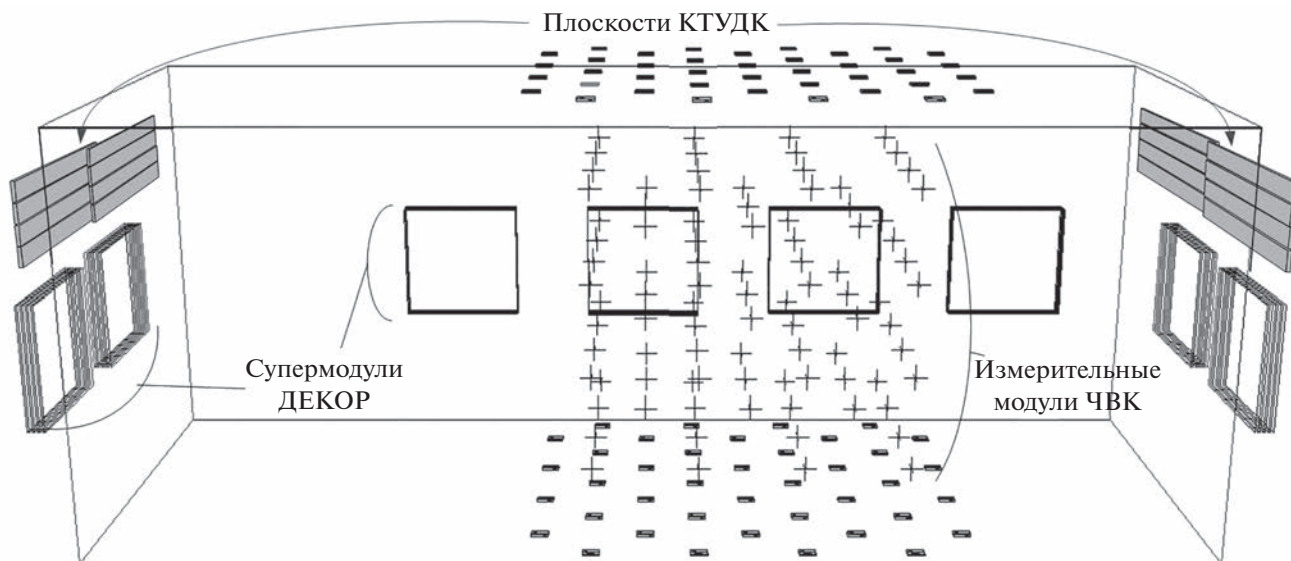


Рис. 1. Расположение дрейфовых камер в установке КТУДК.

многочастичных событий благодаря наличию экранировки в виде калориметра НЕВОД. Эффективная площадь одной плоскости 15 м^2 .

Второй прототип — ПротоТРЕК (рис. 2) — состоит из двух плоскостей по семь камер в каждой с разной (почти перпендикулярной) ориентацией в пространстве. При этом каждая плоскость повернута на 3.5° относительно горизонта, что повторяет взаимное расположение камер в детекторе ТРЕК. Эффективная площадь установки 13 м^2 .

ПротоТРЕК не имеет экранировки, поэтому регистрирует все заряженные частицы ШАЛ, которые долетают до поверхности Земли. Это позволяет изучать возможности дрейфовых камер по

регистрации событий с плотностью более 10 частиц на квадратный метр.

КТУДК позволяет изучать околоразрывные ливни, а ПротоТРЕК — околоразрывные. Регистрирующая система КТУДК записывает события при срабатывании любой установки экспериментального комплекса (ЧВК, ДЕКОР и пр.), а ПротоТРЕК получает триггерный сигнал от двух сцинтилляционных счетчиков, между которыми он расположен.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ДАННЫМ ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР

Реконструкция многочастичных событий по данным дрейфовых камер выполняется в несколько этапов. В первую очередь исключаются из анализа послеимпульсы, наличие которых приводит к ложным реконструкциям. Для этого используется фильтр сигналов на основе сверточных нейронных сетей, которые на моделированных методом Монте-Карло событиях позволили исключить 85% послеимпульсов, сохранив 95% полезных сигналов [14].

На втором этапе выполняется сегментация сигналов по трекам с помощью рекуррентной нейронной сети [14], по результатам ее работы задача сводится к реконструкции одночастичных событий. В случае анализа групп мюонов на КТУДК на последнем этапе выделяется угол, для которого в диапазоне $\pm 5^\circ$ имеется наибольшее число треков. Таким образом, определяется угол квазипараллельных треков мюонов.

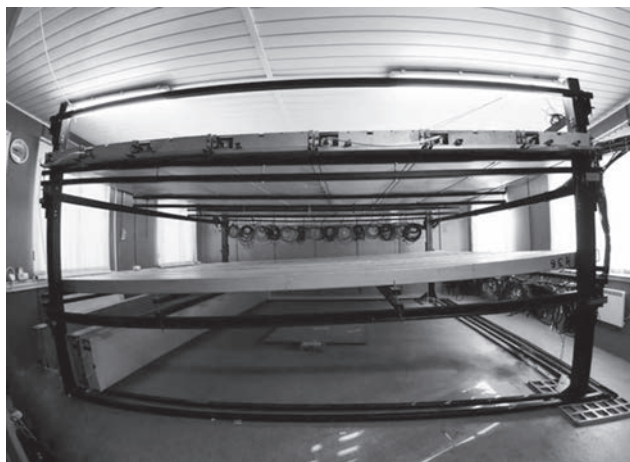


Рис. 2. Фотография установки ПротоТРЕК.

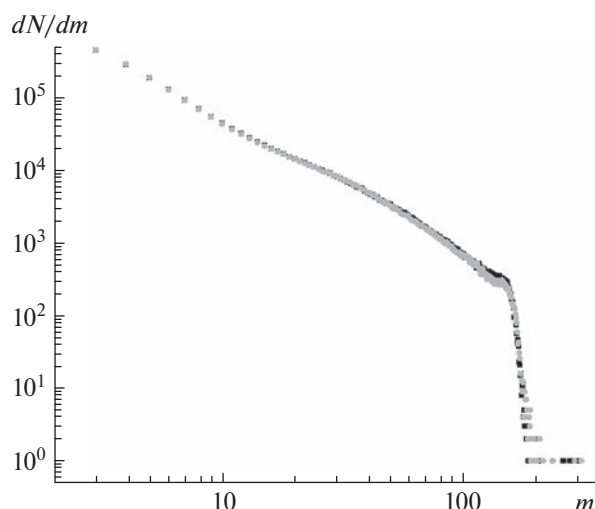


Рис. 3. Распределение событий, зарегистрированных в ПротоТРЕК, по множественности реконструированных треков m . Черные квадратики — верхняя плоскость, серые кружки — нижняя плоскость.

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ СОБЫТИЯ В ПРОТОТРЕК

Для анализа многочастичных событий были отобраны те экспериментальные наборы данных, в которых все 14 дрейфовых камер ПротоТРЕК имели удовлетворительное состояние. Всего за промежуток с 10.06.2021 по 10.02.2022 живое время работы установки составило 1486.2 ч и было реконструировано 1863497 событий с множественностью треков на каждой плоскости не менее трех.

На рис. 3 показано распределение событий по множественности реконструированных треков для каждой плоскости отдельно. Из рисунка видно, что распределение обрывается в районе 170 частиц, что указывает на верхний предел возможности разделения треков по данным дрейфовых камер. С учетом эффективной площади верхний предел плотности составляет примерно 15 частиц на квадратный метр.

ГРУППЫ МЮОНОВ В КТУДК

В КТУДК группы мюонов выделяются в плоскости, которая для данного события (направления прихода группы) является экранированной калориметром НЕВОД. Анализировались события, зарегистрированные в период с 22.03.2017 по 17.04.2019 со следующими условиями: в экранированной плоскости минимум три параллельных трека, а в неэкранированной по меньшей мере — один; доля параллельных треков на экранированной плоскости больше или равна 0.5; азимутальный угол группы лежит в диапазоне $\pm 37.5^\circ$ от нор-

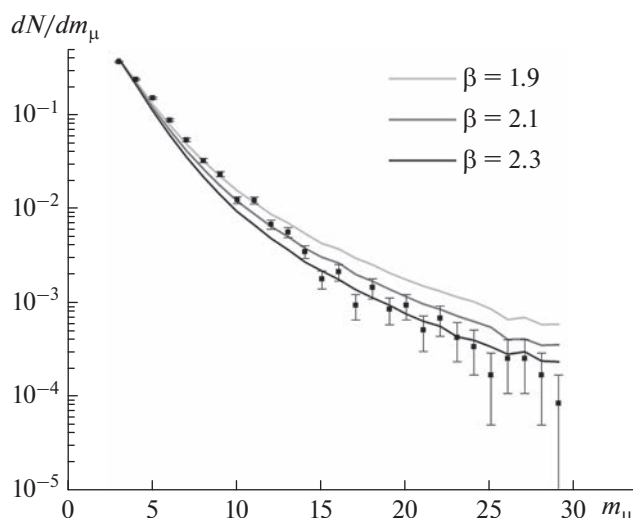


Рис. 4. Распределение событий, зарегистрированных экранированной плоскостью КТУДК, по множественности мюонов m_μ . Кривые — расчет, черные квадратики — экспериментальные данные.

мали к плоскости камеры. С такими условиями были отобраны 16 149 событий.

На рис. 4 показано распределение по множественности мюонов в экранированной плоскости. Разными линиями показаны ожидаемые расчетные значения множественности в предположении о степенном спектре локальной плотности мюонов с показателем β . Значению 1.9 соответствуют первичные космические лучи со средней энергией около 3 ПэВ, а 2.3 — со средней энергией выше 100 ПэВ [15]. Видно, что малые множественности лучше всего описываются кривой с $\beta = 1.9$, а самые большие множественности — $\beta = 2.3$.

Согласно методу спектров локальной плотности мюонов [15], энергию первичных ядер можно оценить по формуле

$$\langle E, \text{ГэВ} \rangle \approx 7.03 + 1.07 \lg(D, \text{м}^2) + 3.80 \lg(\sec(\theta)), (1)$$

где θ — зенитный угол, D — средняя плотность мюонов. Для определения плотности использовались углы прихода группы, восстановленные по данным ДЕКОР. Найдено, что за генерацию этих групп мюонов ответственны первичные космические лучи с энергиями $3 \cdot 10^{15} - 10^{18}$ эВ.

Диапазон энергий, доступный для исследования с помощью детектора ТРЕК, будет расширен до $10^{14} - 10^{19}$ эВ как за счет возможности регистрации событий с плотностью на порядок меньшей благодаря большой площади детектора, так и с плотностью на порядок большей за счет новой регистрирующей системы [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многочастичных событий, зарегистрированных с помощью ПротоТРЕК, показал, что многопроволочные дрейфовые камеры позволяют регистрировать и исследовать события с плотностью до 15 частиц на квадратный метр. Исследование групп мюонов космических лучей на установке КТУДК показало, что за их генерацию ответственны первичные космические лучи с энергиями $3 \cdot 10^{15}$ – 10^{18} эВ. Использование новой регистрирующей системы и методов глубокого обучения позволит в эксперименте ТРЕК расширить этот диапазон до рекордных значений 10^{14} – 10^{19} эВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-32-90155) и Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (проект № МК-4137.2021.1.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Просин В.В., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 525; Prosin V.V., Astapov I.I., Bezzyazkov P.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 395.
2. Буднев Н.М., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1049; Budnev N.M., Astapov I.I., Bezzyazkov P.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 951.
3. Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Данженглобу и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 538; Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Danzengluobu et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 405.
4. Alekseev A. K., Atlasov E. A., Bolotnikov N. G. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2021. V. 84. No. 6. P. 893.
5. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // JINST. 2021. V. 16. Art. No. 01026.
6. Dembinski H.P., Arteaga-Velazquez J.C., Cazon L. et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. Art. No. 02004.
7. Soldin D. // Proc. Sci. ICRC 2021. (Berlin 2021). P. 349.
8. Yurina E.A., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. No. 9. P. 1369.
9. Petrukhin A.A. // Phys. Atom. Nucl. 2021. V. 84. No. 1. P. 92.
10. Задеба Е.А., Ампилогов Н.В., Барбашина Н.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 411; Zadeba E.A., Ampilogov N.V., Barbashina N.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 377.
11. Bozhko N.I., Borisov A.A., Bulgakov N.K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1986. V. 243. No. 2–3. P. 388.
12. Задеба Е.А., Ампилогов Н.В., Барбашина Н.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 517; Zadeba E.A., Ampilogov N.V., Barbashina N.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 481.
13. Vorobev V.S., Khomchuk E.P., Nikolaenko R.V. et al. // Proc. Sci. ICRC 2021. (Berlin 2021). P. 401.
14. Vorob'ev V.S., Zadeba E.A., Nikolaenko R.V. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2021. V. 84. No. 9. P. 1567.
15. Богданов А.Г., Громушкин Д.М., Кокчулин 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. No. 11. P. 1852.
16. Vorobev V.S., Borisov A.A., Kozhin A.S. et al. // JINST. 2020. V. 15. Art. No. 08007.

Multiparticle events in cosmic rays registered by means of drift chambers

V. S. Vorobev^{a, *}, E. A. Zadeba^a, R. V. Nikolaenko^a, I. Yu. Troshin^a

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

*e-mail: VSVorobev@mephi.ru

Results of the analysis of multiparticle events in cosmic rays in coordinate-tracking setups on the drift chambers CTUDC and ProtoTREK are presented. The analysis of the ProtoTREK data show that it is possible to reconstruct events with a density of up to 15 particles per square meter. The estimation of the energies of primary cosmic rays responsible for the generation of muon bundles detected in the CTUDC was made.