

УДК 524.1-352

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА НУКЛОН

© 2021 г. А. Н. Турундаевский¹*, О. А. Васильев¹, Д. Е. Карманов¹, И. М. Ковалев¹,
И. А. Кудряшов¹, А. А. Курганов¹, А. Д. Панов¹, Д. М. Подорожный¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: turun1966@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Представлены основные результаты, полученные в космическом эксперименте НУКЛОН. Был измерен состав и спектр космических лучей в области 2–500 ТэВ. Получены спектры отдельных ядер, включая никель и вторичные ядра. Исследована зависимость отношения потоков протонов и ядер гелия от магнитной жесткости. Обнаружено универсальное “колени” в спектрах различных ядер по магнитной жесткости.

DOI: 10.31857/S0367676521040384

ВВЕДЕНИЕ

Аппаратура НУКЛОН [1–4] была разработана в сотрудничестве НИИЯФ МГУ, ОИЯИ (Дубна) и ряда других российских научных и промышленных центров. Прибор был размещен на борту спутника РЕСУРС-П № 2. Орбита космического аппарата является гелиосинхронной, с наклоном 97.276 и средней высотой 475 км. Спутник был запущен 26 декабря 2014 г. и проработал около трех лет. Целью эксперимента является измерение химического состава и энергетических спектров космических лучей в области 2–500 ТэВ. Для измерения энергии одновременно с традиционным ионизационным калориметром использовалась новая методика KLEM (kinematic lightweight energy meter) [1, 5]. Эффективный геометрический фактор составляет более $0.2 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$ для системы KLEM и около $0.06 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$ для калориметра. Система измерения заряда обеспечивает разрешение 0.15–0.20 зарядовой единицы.

СПЕКТРЫ РАЗНЫХ КОМПОНЕНТ И ИХ ОТНОШЕНИЯ

Изучение спектров ядер отдельных компонент является частью исследований области энергий, предшествующей основному “колени” в спектре [2–4]. Получены важные результаты по протонно-ядерной компоненте космических лучей. В ходе обработки данных эксперимента НУКЛОН обнаружено новое универсальное “колени” во всех группах ядер, от протонов до железа [2]. Универсальность означает одно и то же положение колена в шкале магнитной жесткости для всех

групп ядер – в области 10 ТВ. Колени наблюдается с использованием обоих методов измерения энергии частиц, реализованных в обсерватории НУКЛОН – калориметрическим методом и кинематическим методом KLEM (Kinematic Lightweight Energy Meter). Новое “колени” космических лучей, вероятно, связано с пределом ускорения достаточно широко распространенным или ближним источником космических лучей. Спектр протонов с “колени” показан на рис. 1а.

Поскольку процессы ускорения и распространения космических лучей определяются магнитными жесткостями частиц, целесообразно рассматривать и сравнивать измеренные спектры также по жесткости.

Как указывалось выше, все спектры обильных ядер имеют излом по магнитной жесткости в области $\sim 10 \text{ ТВ}$ [2]. При этом есть и заметные различия спектров разных компонент, которые видны при анализе их отношений.

Спектры протонов и ядер гелия сравнивались с данными других экспериментов. В эксперименте AMS02 [6, 7] спектры космических лучей по магнитной жесткости были получены до 1.8 ТВ для протонов и до 3 ТВ для ядер гелия. Параметризация проводилась как для самих спектров, так и для их отношения. Оба спектра становятся более жесткими при магнитных жесткостях выше 200–350 ГВ. При этом наклон зависимости отношения спектров уменьшается с 0.15 при 10 ГВ до 0.077 для области выше 45 ГВ. Данные эксперимента НУКЛОН получены для области магнитных жесткостей выше 2 ТВ, что выходит за верхний предел рабочего диапазона эксперимента AMS02.

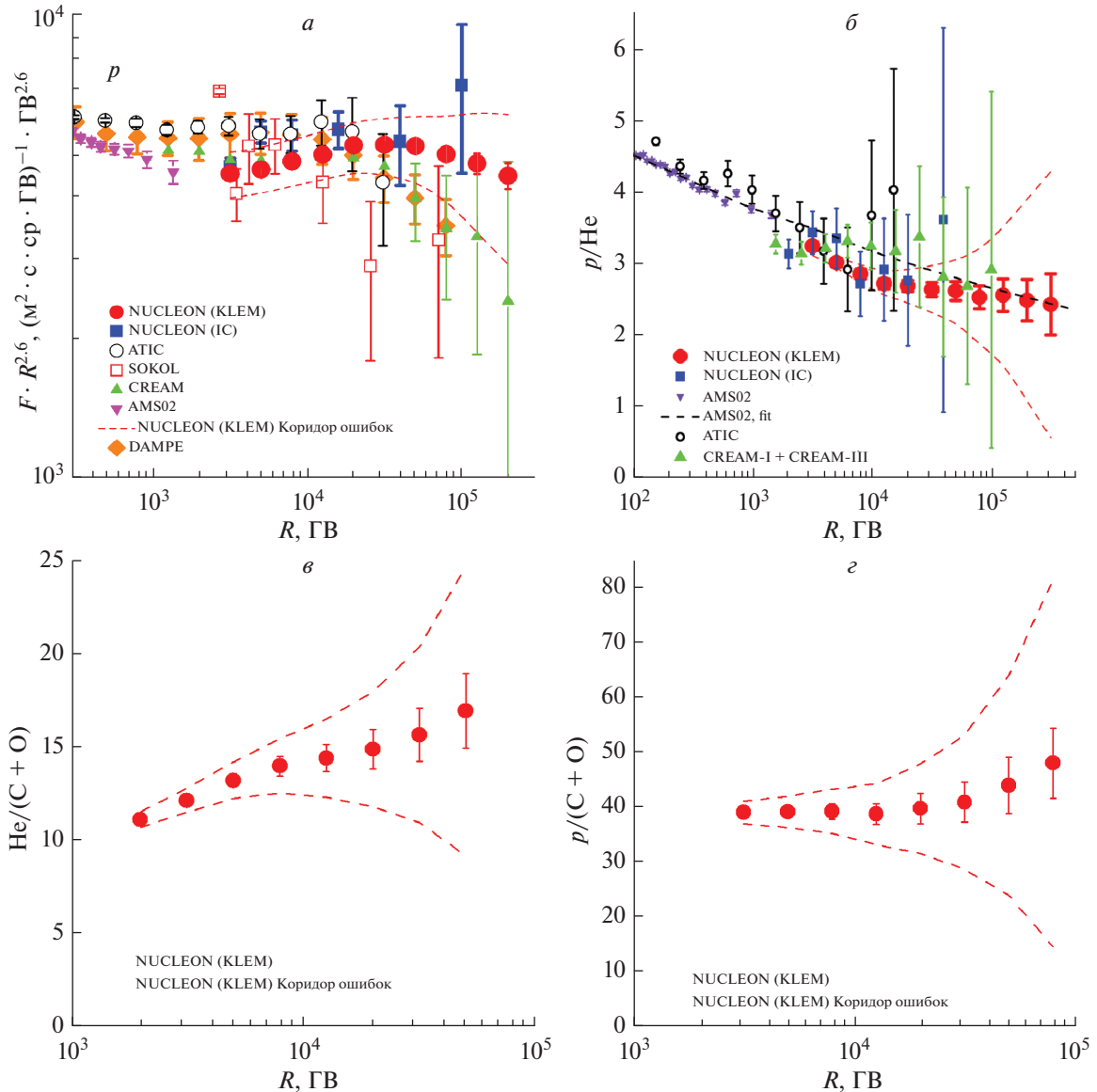


Рис. 1. Спектр протонов (а), отношение спектров p и He (б), отношение спектров He и $C + O$ (в), отношение спектров p и $C + O$ (г).

Одной из основных характеристик химического состава космических лучей, отражающих физические процессы их ускорения и распространения, является отношение потоков протонов и ядер гелия при различных значениях магнитной жесткости. Зависимость этого отношения от магнитной жесткости представлена на рис. 1б. Для жесткостей меньше 2 ТВ показаны точки из данных эксперимента AMS02 [6, 7]. Сопоставление данных различных экспериментов показывает, что доля протонов в диапазоне 0.1–1 ТВ падает с ростом жесткости, но при больших жесткостях (выше нескольких ТВ) выходит на почти постоянный уровень.

Была сделана оценка наклона зависимости отношения потоков протонов и ядер гелия от маг-

нитной жесткости. Показатель наклона оценивается как 0.063 ± 0.010 (стат.) ± 0.031 (сист.) для методики KLEM и 0.095 ± 0.163 для ионизационного калориметра в области выше 4 ТВ.

Зарядовый состав космических лучей в области излома существенно отличается от состава в области магнитных жесткостей ~ 100 ГВ, измеренного в эксперименте AMS02. Отношение потоков протонов и ядер гелия равно 2.98 ± 0.03 (стат.) ± 0.09 (сист.) ($R \sim 5$ ТВ), 2.68 ± 0.07 (стат.) ± 0.20 (сист.) ($R \sim 20$ ТВ), тогда как при ~ 100 ГВ это отношение составляет 4.46 ± 0.20 [8].

В [9] были исследованы спектры по магнитной жесткости ядер углерода и кислорода по данным эксперимента НУКЛОН и ряда других экспериментов. Спектры в области жесткостей выше

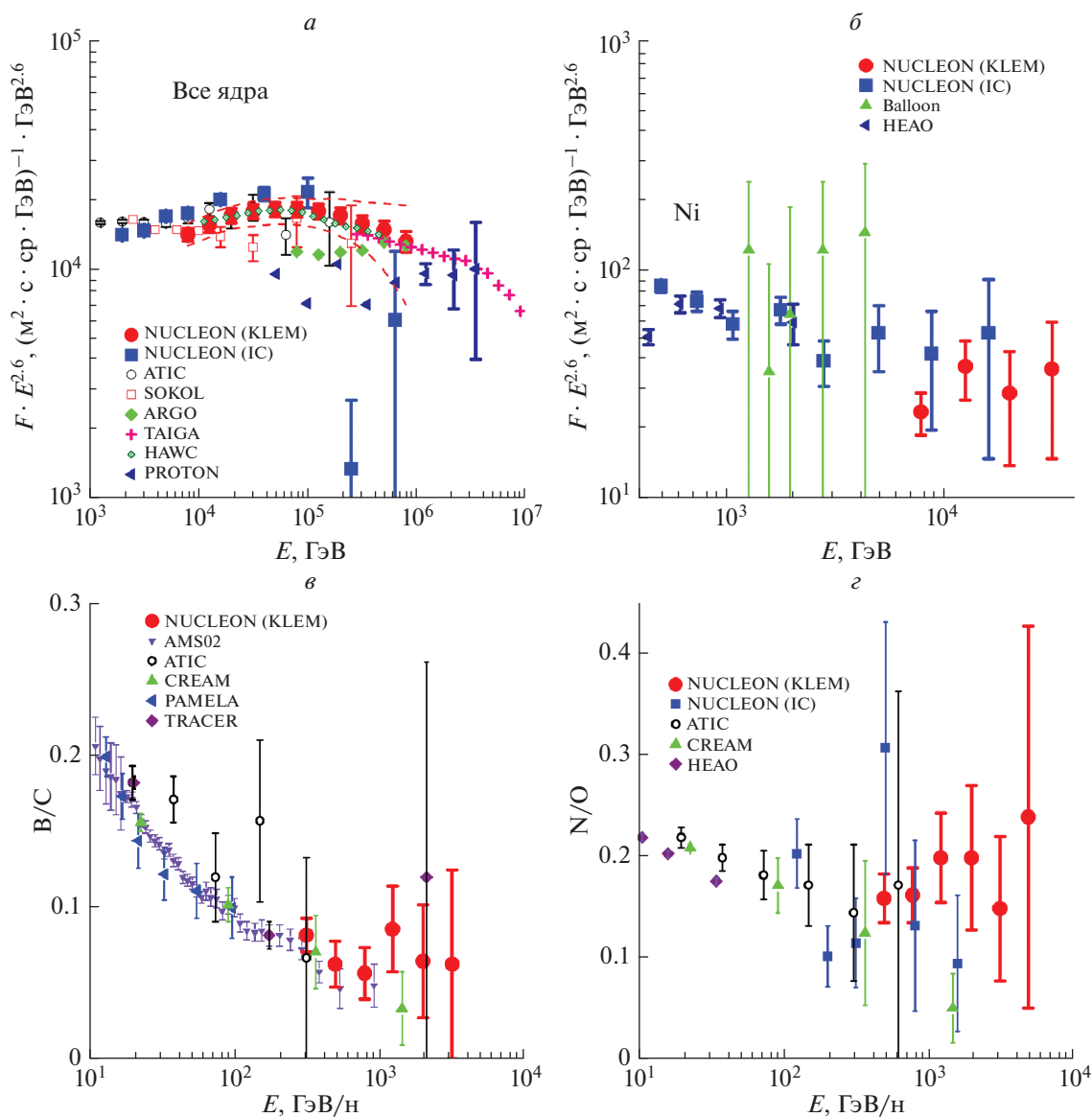


Рис. 2. Энергетический спектр всех частиц (а), спектр Ni (б), отношение спектров B/C (в), отношение спектров N/O (г).

300–500 ГВ более пологие, чем спектры, измеренные в различных экспериментах при меньшей жесткости. В области ~ 10 ТВ наблюдается излом, аналогичный “колену” в спектрах других компонент. На рис. 1в показана зависимость отношения спектра ядер гелия и суммарного спектра ядер углерода и кислорода по магнитной жесткости, а на рис. 1г – аналогичное отношение спектра протонов и того же спектра углерода и кислорода. Видно, что спектр ядер углерода и кислорода более мягкий, чем спектр гелия в области, предшествующей излому, но наклон спектра ядер C, O не отличается от спектра протонов в области, предшествующей “колену”.

Впервые на материале эксперимента НУКЛОН удалось провести сравнение прямых измерений спектра всех частиц с данными ШАЛ. Такие экспе-

рименты, в отличие от прямых измерений, позволяют получить высокую статистику, но при этом их результат существенно зависит от используемых моделей ядерных взаимодействий, а определить тип частицы в индивидуальном случае невозможно. В лучшем случае, определяется средний логарифм массового числа как характеристика потока космических лучей.

Данные этих экспериментов хорошо согласуются с данными эксперимента НУКЛОН в области их пересечения как по абсолютной интенсивности, так и по форме спектра (см. рис. 2а). Заметно отклонение энергетического спектра от степенного вида, вызванное изломом в спектре по жесткости. Энергетический спектр всех частиц является суперпозицией спектров разных компонент, поэтому его

укручение более плавно, чем в шкале жесткости. Соединение данных по составу космических лучей, полученных из прямого эксперимента НУКЛОН, и результатов детального измерения суммарного энергетического спектра в ШАЛ с высокой статистикой дает возможность получить новую астрофизическую информацию.

В ходе эксперимента НУКЛОН измерен спектр ядер никеля высоких энергий (до ~40 ТэВ, см. рис. 2б), что дает важную информацию о процессах нуклеосинтеза. Спектр никеля имеет наклон 2.83 ± 0.09 [11]. Это значение отличается от наклона спектра железа 2.64 ± 0.02 [11]. Отличие спектров может отражать свойства процессов нуклеосинтеза и ускорения космических лучей.

С хорошей статистикой получены спектры вторичных ядер высоких энергий и их отношения к первичным (В/С, N/O, см. рис. 2в, 2г [12]). В области высоких энергий (>500 ГэВ/нуклон) эти отношения выходят на плато, т.е. спектры вторичных ядер становятся подобными спектру первичных. Возможно, это связано с астрофизическими процессами. При высоких энергиях пробег первичных ядер в межзвездной среде оказывается сравним с пробегом в источниках, и мы наблюдаем спектр вторичных ядер, образовавшихся в источниках и ускорившихся вместе с первичными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено универсальное “колени” в спектре по магнитной жесткости. В области ~10 ТВ спектры становятся более мягкими. Из сравнения спектров ядер С, О с данными AMS-02 в области 200–300 ГВ происходит выполаживание спектров. Отношение спектров протонов и ядер гелия с ростом жесткости падает, но в области “колени” выходит на постоянный уровень. Доля гелия растет на участке, предшествующем “колени”, что может говорить о наличии близкого ис-

точника, обогащенного гелием. Энергетический спектр всех частиц хорошо согласуется с данными наземных экспериментов. Заметны отличия от степенного вида. Измерен спектр ядер никеля высоких энергий (до ~40 ТэВ), что дает важную информацию о процессах нуклеосинтеза. Получены спектры вторичных ядер и их отношения к первичным. В области высоких энергий (>500 ГэВ/нуклон) эти отношения выходят на плато.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2015. V. 770. P. 189.
2. *Аткин Е., Булатов В., Дорохов В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. № 1. С. 5; *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // JETP Lett. 2018. V. 108. No. 1. P. 5.
3. *Аткин Э.В., Булатов В.Л., Васильев О.А. и др.* // Астрон. журн. 2019. Т. 96. № 1. С. 75; *Atkin E.V., Bulatov V.L., Vasiliev O.A. et al.* // Astron. Rep. 2019. V. 63. No. 1. P. 66.
4. *Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I. et al.* // Adv. Space Res. 2019. V. 64. No. 12. P. 2546.
5. *Adams J., Bashindzhagyan G., Bashindzhagyan P. et al.* // Adv. Space Res. 2001. V. 27. No. 4. P. 829.
6. *Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. Art. No. 171103.
7. *Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. Art. No. 251101.
8. *Карманов Д.Е., Ковалев И.М., Кудряшов И.А. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 111. № 7. С. 435; *Karmanov D.E., Kovalev I.M., Kudryashov I.A. et al.* // JETP Lett. 2020. V. 111. No. 7. P. 363.
9. *Panov A., Atkin E., Gorbunov N. et al.* // Proc. 35th ICRC (Busan, 2017). P. 213.
10. *Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I. et al.* // arXiv: 1809.07285. 2018.
11. *Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I. et al.* // Adv. Space Res. 2019. V. 64. No. 12. P. 2559.

Main results of the NUCLEON experiment

**A. N. Turundaevskiy^{a,*}, O. A. Vasiliev^a, D. E. Karmanov^a, I. M. Kovalev^a, I. A. Kudryashov^a,
A. A. Kurganov^a, A. D. Panov^a, D. M. Podorozhny^a**

^a*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: turun1966@yandex.ru*

The main results of the NUCLEON space experiment are presented. The charge composition and energy spectra of cosmic rays were measured in the range 2–500 TeV. Spectra of different nuclei, including nickel and secondary nuclei, were obtained. The dependence of the ratio of proton flux and helium nuclei flux on magnetic rigidity was investigated. An universal “knee” was found in the magnetic rigidity spectra of various nuclei.