

УДК 524.1

## ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НУКЛОН

© 2019 г. А. Д. Панов<sup>1, \*</sup>, Э. В. Аткин<sup>2</sup>, В. Л. Булатов<sup>3</sup>, О. А. Васильев<sup>1</sup>, А. Г. Воронин<sup>1</sup>, Н. В. Горбунов<sup>4, 5</sup>, В. М. Гребенюк<sup>4, 5</sup>, В. С. Дорохов<sup>3</sup>, Д. Е. Карманов<sup>1</sup>, И. М. Ковалев<sup>1</sup>, И. А. Кудряшов<sup>1</sup>, А. А. Курганов<sup>1</sup>, М. М. Меркин<sup>1</sup>, Д. М. Подорожный<sup>1</sup>, Д. А. Полков<sup>3</sup>, С. Ю. Пороховой<sup>4</sup>, А. В. Ткаченко<sup>4</sup>, Л. Г. Ткачев<sup>4, 5</sup>, А. Н. Турундаевский<sup>1</sup>, С. Б. Филиппов<sup>3</sup>, В. В. Шумихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-производственное предприятие “Общество с ограниченной ответственностью “ГОРИЗОНТ”, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup>Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>5</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области “Университет “Дубна”, Дубна, Россия

\*E-mail: panov@dec1.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Космическая обсерватория НУКЛОН была разработана для измерения спектров ядер космических лучей (КЛ) с индивидуальным разрешением по заряду в энергетическом диапазоне от нескольких ТэВ до 1 ПэВ на частицу. 28 декабря 2014 г. НУКЛОН был выведен на солнечно-синхронную орбиту как дополнительная нагрузка серийного спутника Ресурс-2П и функционирует до настоящего времени (2019). Доклад представляет краткий обзор результатов обсерватории НУКЛОН после трех лет работы на орбите. Представлены спектры основных первичных обильных ядер и вторичных ядер КЛ. Обсуждаются некоторые новые интересные особенности спектров КЛ, обнаруженные в данных НУКЛОНА.

DOI: 10.1134/S0367676519080313

В космическом спектрометре НУКЛОН реализовано два различных метода измерения энергии частиц: первый использует ионизационный калориметр, второй представляет собой кинематический метод KLEM (Kinematic Lightweight Energy Meter) [1, 2], который основан на измерении множественности вторичных частиц после первого ядерного взаимодействия первичной частицы с мишенью в спектрометре. Метод KLEM является принципиально новым, и он был использован в практике физического эксперимента впервые. Основные системы спектрометра представлены четырьмя плоскостями системы измерения заряда, углеродной мишенью, шестью плоскостями системы измерения энергии KLEM (трекер KLEM), тремя двухслойными плоскостями триггерной системы на основе сцинтилляторов, и малоапертурным ионизационным калориметром (25 × 25 см<sup>2</sup>). Спектрометр KLEM в экс-

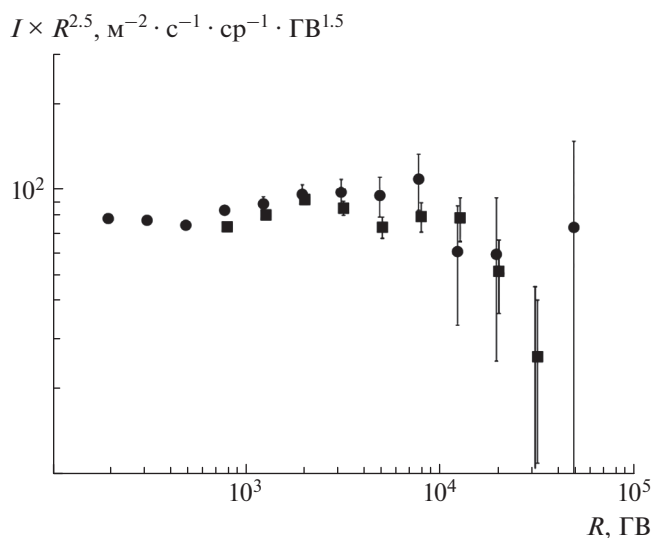
перименте НУКЛОН имеет геометрический фактор, вдвое–вчетверо превосходящий геометрический фактор калориметрической системы (зависит от типа ядра), но энергетическое разрешение KLEM составляет около 60%, а разрешение калориметрической системы составляет 50%–35% (в зависимости от типа ядра). Метод KLEM пока имеет несколько более высокий энергетический порог для тяжелых ядер, чем калориметрический метод. Поэтому оба метода взаимно дополняют друг друга, плюс новый метод KLEM может быть прокалиброван и изучен по хорошо известному калориметрическому методу. Обсуждение деталей конструкции спектрометра и подробностей реализации обеих методик измерения энергии приведены в статьях [3, 4].

Первые результаты эксперимента НУКЛОН опубликованы в [5] (соответствует первым нескольким месяцам штатного набора статистики,

дан предварительный спектр всех частиц), затем были выпущены два обзора по результатам НУКЛОНа ([4] и [7]), которые соответствовали примерно одному и двум годам набора статистики. В этих обзорах уже были представлены все основные типы данных, которые дает эксперимент НУКЛОН: это поэлементные спектры основных обильных ядер космических лучей и некоторые отношения потоков вторичных ядер к первичным, измеренные в диапазоне энергий от 2–3 ТэВ до нескольких сотен ТэВ на частицу. Настоящий обзор соответствует приблизительно первым трем годам набора статистики. По сравнению с последним обзором [7] интегральная статистика увеличилась, к сожалению, не очень сильно, так как на третьем году функционирования обсерватории очень значительная часть времени была потрачена на решение целевых задач спутника Ресурс-2П, во время решения которых аппаратура НУКЛОН была выключена. Однако на новой статистике был проведен значительно более глубокий анализ данных, что привело к обнаружению новых и очень важных особенностей спектров ядер космических лучей и позволило получить данные нового типа.

В результатах обсерватории НУКЛОН представлены спектры всех основных обильных ядер космических лучей: p, He, C, O, Ne, Mg, Si, Fe. Анализ спектров протонов и гелия посвящена работа [6] (в настоящем выпуске опубликована статья по материалам указанного доклада, где можно найти рисунки со спектрами, см. с. 1078). Результаты вновь подтверждают более пологий спектр гелия при энергиях ниже 10 ТэВ на частицу (результат, впервые надежно установленный в эксперименте АТЭС [8]) и с хорошей статистической значимостью (около 4 стандартных отклонений) подтверждают наличие излома спектра протонов и спектра гелия вблизи магнитной жесткости 10 ТВ. Величина излома для спектрального индекса по масштабу составляет величину 0.5, но пока не может быть определена точно, так как показывает модельную зависимость от вида функции, аппроксимирующей излом (см. детали в [9]).

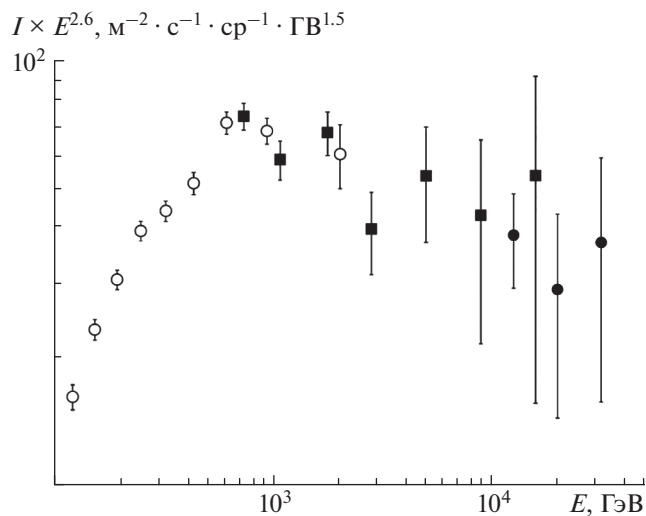
Для ядер C, O, Ne, Mg, Si, Fe получены поэлементные спектры. Имеется указание, что спектр железа круче спектров более легких ядер в области энергий выше нескольких сот ГэВ на нуклон, на что указывает отношение потоков ядер  $Z = 6-14$  к потоку ядра железа, которое показывает рост отношения с ростом энергии. Этот результат согласуется с известным результатом эксперимента АТЭС [11]. Измерены также спектры менее обильных ядер S и Ca, в которых доля первичных ядер ожидается большой, но статистика не позволяет сделать определенных выводов в отношении характера этих спектров.



**Рис. 1.** Объединенный спектр магнитной жесткости ( $R$ , ГВ) всех ядер с зарядами от 6 (углерод) до 27 (никель). Кружки – данные калориметра, квадратики – данные методики KLEM. Видно, что нижний порог для методики KLEM выше порога калориметрической методики.

Спектры тяжелых ядер, начиная с углерода, дают указания на возможный излом спектров при энергиях масштаба сотни ТэВ на частицу. Интересной гипотезой является предположение, что у всех ядер излом имеет место при одной и той же магнитной жесткости. Для проверки этой гипотезы впервые был измерен объединенный спектр магнитной жесткости для всех тяжелых ядер, начиная с углерода (рис. 1). Данные методики KLEM хорошо согласуются с данными калориметра и в обоих случаях хорошо виден излом спектра вблизи магнитной жесткости 10 ТВ. Статистика данных KLEM выше, и для этого случая статистическая значимость существования излома оценена как не менее 3.9 стандартных отклонений [9]. Это исключительно важный результат. Так как излом наблюдается также и в спектрах протонов и гелия (см. выше), причем при той же магнитной жесткости, то излом имеет универсальный характер по жесткости. Фактически речь идет об открытии нового, низкоэнергетического, колена космических лучей. Именно универсальный характер по жесткости должны иметь особенности спектров, связанные с процессом ускорения частиц, поэтому весьма вероятно, что излом указывает на предел ускорения частиц либо в некотором близком источнике, либо в определенном широко распространенном типе источников космических лучей. Детали анализа нового 10 ТэВ “колена” КЛ даны в [9].

В эксперименте НУКЛОН измерены отношения потоков вторичных ядер к первичным  $V/C$ ,  $N/O$ ,  $Z = 16-24/Fe$  до рекордно высоких энергий. Во всех измеренных отношениях имеется указа-



**Рис. 2.** Спектр никеля (энергия на частицу) поданным экспериментом НУКЛОН (квадратики – данные калориметра, кружки – данные KLEM) и по результатам HEAO-3-C2 [9].

ние на отсутствие ожидаемого падения отношений с ростом энергии при наивысших достигнутых энергиях (подробнее см. [10]).

В данных НУКЛОН впервые представлен спектр никеля, измеренный до энергии около 30 ТэВ на частицу (рис. 2). Это очень важный результат, так как предыдущие результаты были получены в 1990 г. в эксперименте HEAO-3-C3 [12] и были

ограничены сверху более чем на порядок более низкой энергией. Спектр никеля оказался неожиданно крутым: спектральный индекс составляет  $2.83 \pm 0.09$  (заметно круче железа со спектральным индексом около 2.6).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korotkova N.A., Podorozhnyi D.M., Postnikov E.B. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2002. V. 65. P. 582.
2. *Podorozhnyi D.M., Postnikov E.B., Sveshnikova L.G., Turundaevsky A.N.* // Phys. Atom. Nucl. 2005. V. 68. P. 50.
3. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Sec. A. 2015. V. 770. P. 189.
4. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // J. Cosmology Astropart. Phys. 2017. V. 2017. P. 20.
5. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // Astropart. Phys. 2017. V. 90. P. 69.
6. *Turundaevskiy A.* // Proc. 26th E + CRS and 35th RCRC. (Barnaul, 2018). P. 101.
7. *Panov A., Atkin E., Gorbunov N. et al.* // Proc. Sci. 2017. V. ICRC2017. P. 213.
8. *Зацепин В.И., Дж.Х. Адамс-мл, Ан Х.С. и др.* // Изв. РАН. Сер физ. 2004. Т. 68. С. 1593.
9. *Аткин Е., Булатов В., Дорохов В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. С. 5.
10. *Kovalev I.* // Proc. 26th E + CRS and 35th RCRC. (Barnaul, 2018). P. 106.
11. *Panov A.D., Sokolskaya N.V., Zatsepin V.I.* // Nucl. Phys. B. 2014. V. 256–257. P. 233.
12. *Engelmann J.J., Ferrando P., Soutoul A. et al.* // Astron. Astrophys. 1990. V. 233. P. 961.