

УДК 524.1

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОТОНОВ И ЯДЕР ГЕЛИЯ В СОСТАВЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА “НУКЛОН”

© 2019 г. Э. В. Аткин<sup>1</sup>, В. Л. Булатов<sup>2</sup>, О. А. Васильев<sup>5</sup>, А. Г. Воронин<sup>5</sup>, Н. В. Горбунов<sup>3,4</sup>,  
В. М. Гребенюк<sup>3,4</sup>, В. А. Дорохов<sup>2</sup>, Д. Е. Карманов<sup>5</sup>, И. М. Ковалев<sup>5</sup>, И. А. Кудряшов<sup>5</sup>,  
А. А. Курганов<sup>5</sup>, М. М. Меркин<sup>5</sup>, А. Д. Панов<sup>5</sup>, Д. М. Подорожный<sup>5</sup>, Д. А. Полков<sup>2</sup>,  
С. Ю. Пороховой<sup>3</sup>, Л. Г. Свешникова<sup>5</sup>, Л. Г. Ткачев<sup>4,5</sup>, А. В. Ткаченко<sup>3,6</sup>,  
А. Н. Турундаевский<sup>5,\*</sup>, С. Б. Филиппов<sup>2</sup>, В. В. Шумихин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-производственное предприятие “Общество с ограниченной ответственностью “ГОРИЗОНТ”,  
Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области  
“Университет “Дубна”, Дубна, Россия

<sup>5</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>6</sup>Институт теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова Национальной академии наук Украины, Киев, Украина  
\*E-mail: turun1966@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Главными целями орбитального эксперимента НУКЛОН являются прямые измерения энергетических спектров протонов и ядер космических лучей в диапазоне 2–500 ТэВ. Энергия измеряется двумя различными методами (ионизационный калориметр и новый кинематический метод KLEM, Kinematic Lightweight Energy Meter). Представлены энергетические спектры протонов и ядер гелия. Обнаружены и обсуждаются особенности спектров.

DOI: 10.1134/S0367676519080040

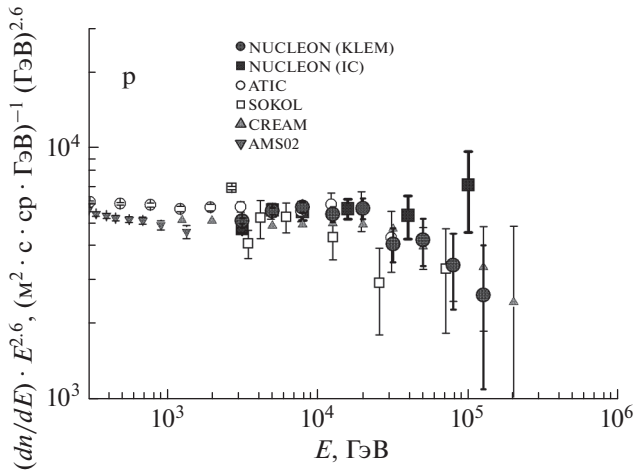
### ВВЕДЕНИЕ

Область “колена” в энергетическом спектре космических лучей ( $10^{14}$ – $10^{16}$  эВ) является критической для изучения процессов ускорения и распространения космических лучей. Основная информация о протонно-ядерной компоненте космических лучей в диапазоне  $10^{12}$ – $10^{14}$  эВ была получена в экспериментах на аэростатах ATIC [1, 2], CREAM [3, 4], TRACER [5] и спутниках AMS02 [6, 7], СОКОЛ [8]. В настоящее время на борту МКС проводится эксперимент CALET [9]. Также осуществляется эксперимент DAMPE [10]. Однако требуются дополнительные прямые измерения спектров различных компонент до энергий  $\sim 1000$  ТэВ. Нами предложен новый метод энергетических измерений KLEM (Kinematic Lightweight Energy Meter) [11]. Этот метод позво-

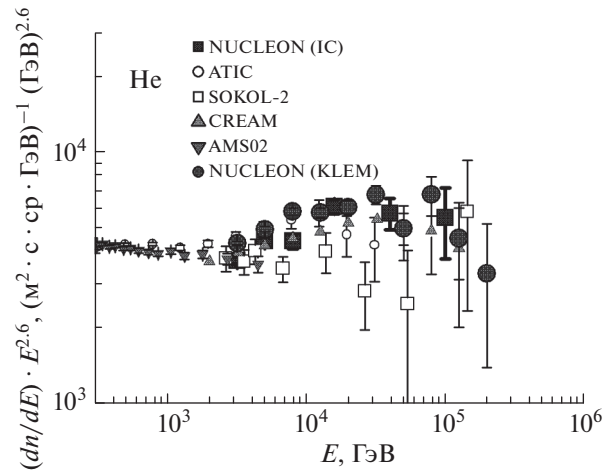
ляет создавать аппаратуру с большим геометрическим фактором при малой массе. Эксперимент НУКЛОН был направлен на проведение прямых измерений энергетических спектров ядер космических лучей и их химического состава в области энергий, предшествующей “колону”, от 2 до более чем 500 ТэВ. Наибольшая измеренная энергия равна 900 ТэВ.

### АППАРАТУРА НУКЛОН

Прибор НУКЛОН [11–16] был разработан коллаборацией в составе НИИЯФ МГУ (головное предприятие), ОИЯИ (Дубна) и рядом других российских научных и промышленных организаций. Прибор размещен на борту спутника РЕСУРС-П № 2, который был выведен на круговую солнечно-синхронную орбиту с наклонени-



**Рис. 1.** Энергетические спектры протонов. Вместе с данными эксперимента НУКЛОН показаны результаты экспериментов АТИС [1], SOKOL [8], CREAM [3], AMS02 [7].



**Рис. 2.** Энергетические спектры ядер гелия. Вместе с данными эксперимента НУКЛОН показаны результаты экспериментов АТИС [1], SOKOL [8], CREAM [3], AMS02 [6].

ем  $97.276^\circ$  и средней высотой 475 км. Дата запуска 26 декабря 2014 г. В ходе разработки аппаратуры предложен и обоснован новый метод энергетических измерений KLEM [17–21]. Методика может применяться в широком диапазоне энергий ( $10^{11}$ – $10^{16}$  эВ) и обеспечивает энергетическое разрешение не хуже 70% в соответствии с результатами математического моделирования [13, 15, 16, 22]. Метод является развитием известного метода Кастаньоли [23]. Аппаратура НУКЛОН включает различные системы для измерения заряда и энергии, а также выработки триггера на основе кремниевых и сцинтилляционных детекторов [11]. Для измерения энергии применяется как система, использующая методику KLEM, так и традиционный ионизационный калориметр. Общая масса прибора составляет 375 кг. Эффективный геометрический фактор составляет более  $0.2 \text{ м}^2 \text{ ср}$  для системы KLEM и около  $0.06 \text{ м}^2 \text{ ср}$  для ионизационного калориметра. Для получения калибровочных кривых было использовано моделирование Монте-Карло [24, 25].

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Обработка получаемых со спутника данных состоит из нескольких этапов. На первом этапе анализируется траектория частицы. Отбираются пады детектора заряда, через которые прошла частица. Для перехода от зарегистрированных амплитуд сигналов к значениям заряда необходимы калибровки. На начальном этапе использовались результаты наземного эксперимента на ионных пучках (ускоритель SPS). Изменения характеристик каждого измерительного канала во время полета учитывались с помощью полетной калибровки.

После разделения частиц по заряду производится восстановление энергии. Для каждого типа частиц дифференциальный спектр описывается как

$$\frac{dN}{d\ln E} = \frac{1}{\Gamma w W} \frac{\Delta N}{\Delta(\ln E) \Delta T}.$$

Здесь  $\Gamma$  – геометрический фактор установки,  $w$  – доля живого времени,  $W$  – эффективность регистрации,  $\Delta N$  – число зарегистрированных в энергетическом бине ядер,  $\Delta(\ln E)$  – ширина бина в логарифмической шкале,  $\Delta T$  – время экспозиции. Численные значения параметров  $\Gamma$  и  $W$  определяются с помощью математического моделирования. Функция  $E(S)$  нелинейна и для точного восстановления спектра рассчитывалась матрица деконволюции.

В итоге были восстановлены энергетические спектры различных компонент космических лучей. Спектры протонов и ядер гелия представлены на рис. 1, 2. Показаны точки, полученные по методике KLEM и с помощью ионизационного калориметра (IC).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе эксперимента НУКЛОН был протестирован новый метод энергетических измерений. Полученные спектры демонстрируют хорошее согласие между результатами двух разных методик. Спектры протонов и ядер гелия имеют заметный излом при магнитной жесткости  $\sim 10 \text{ ТВ}$ . Это хорошо соотносится с интерпретацией эффекта как нового универсального “колена” в спектре космических лучей [26]. Впервые данные по спектру всех частиц, полученные прямыми методами, перекрываются и сравниваются с данными наземных установок.

Авторы благодарят за поддержку Российское космическое агентство (Роскосмос), Российскую академию наук, РКЦ “Прогресс”. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова [27].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahn H.S., Seo E.S., Ganel O. et al.* // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1950.
2. *Panov A.D., Adams J.H., Ahn H.S. et al.* // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1944.
3. *Yoon Y.S., Ahn H.S., Allison P.S. et al.* // Astrophys. J. 2011. V. 728. P. 122.
4. *Ahn H.S., Allison P.S., Bagliesi M.G. et al.* // Astrophys. J. 2009. V. 707. P. 593.
5. *Obermeier A., Ave M., Boyle P. et al.* // Astrophys. J. 2011. V. 742. P. 14.
6. *Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. Art. № 211101.
7. *Aguilar M., Aisa D., Alpat B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. Art. № 171103.
8. *Ivanenko I.P., Shestoporov V.Ya., Chikova L.O. et al.* // Proc. 23rd ICRC. (Calgary, 1993). V. 2. P. 17.
9. *Brogi P., Marrocchesi P., Maestro P., Mori N.* // Proc. 34th ICRC. (Hague, 2015). P. 595.
10. *Wu X., Ambrosi G., Asfandiyarov R. et al.* // Proc. 34th ICRC. (Hague, 2015). P. 1192.
11. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Sect. A. 2015. V. 770. P. 189.
12. *Васильев О.А., Карманов Д.Е., Ковалев И.М. и др.* // ЯФ. 2014. Т. 77. С. 621; *Vasiliev O.A., Karmanov D.E., Kovalyov I.M. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2014. V. 77. P. 587.
13. *Булатов В.Л., Власов А.В., Горбунов Н.В. и др.* // ПТЭ. 2010. Т. 53. С. 34; *Bulatov V.L., Vlasov A.V., Gorbunov N.V. et al.* // Instr. Exp. Techn. 2010. V. 53. P. 29.
14. *Воронин А.Г., Гребенюк В.М., Карманов Д.Е. и др.* // ПТЭ. 2007. Т. 50. С. 50; *Voronin A.G., Grebenyuk V.M., Karmanov D.E. et al.* // Instr. Exp. Techn. 2007. V. 50. P. 187.
15. *Воронин А.Г., Гребенюк В.М., Карманов Д.Е. и др.* // ПТЭ. 2007. Т. 50. С. 39; *Voronin A.G., Grebenyuk V.M., Karmanov D.E. et al.* // Instr. Exp. Techn. 2007. V. 50. P. 176.
16. *Подорожний Д.М., Булатов В.Л., Баранова Н.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. С. 518; *Podorozhnyi D.M., Bulatov V.L., Baranova N.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. P. 500.
17. *Башинджагян Г.Л., Воронин А.Г., Голубков С.А. и др.* // ПТЭ. 2005. Т. 48. С. 46; *Bashindzhagyan G.L., Voronin A.G., Golubkov S.A. et al.* // Instr. Exp. Techn. 2005. V. 48. P. 32.
18. *Подорожний Д.М., Постников Е.Б., Свешникова Л.Г., Турундаевский А.Н.* // ЯФ. 2005. Т. 68. С. 51; *Podorozhnyi D.M., Postnikov E.B., Sveshnikova L.G., Turundaevskiy A.N.* // Phys. Atom. Nucl. 2005. V. 68. P. 50.
19. *Короткова Н.А., Подорожний Д.М., Постников Е.Б. и др.* // ЯФ. 2002. Т. 65. С. 884; *Korotkova N.A., Podorozhnyi D.M., Postnikov E.B. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2002. V. 65. P. 852.
20. *Adams J., Bashindzhagyan G., Bashindzhagyan P. et al.* // Adv. Space Res. 2001. V. 27. P. 829.
21. *Adams J., Bashindzhagyan G., Chilingaryan A. et al.* // AIP Conf. Proc. 2000. V. 504. P. 175.
22. *Постников Е.Б., Башинджагян Г.Л., Короткова Н.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. С. 1634; *Postnikov E.B., Bashindzhagyan G.L., Korotkova N.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2002. V. 66. P. 1634.
23. *Castagnoli C., Gortini G., Franzinetti C. et al.* // Nuovo Cim. 1953. V. 10. P. 1539.
24. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // Astropart. Phys. 2017. V. 90. P. 69.
25. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // JCAP. 2017. № 7. P. 20.
26. *Аткин Е., Булатов В., Дорохов В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. С. 5; *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al.* // JETP Lett. 2018. V. 108. P. 5.
27. *Sadovnichy V., Tikhonravov A., Voevodin Vl., Opanasenko V.* “Lomonosov”: Supercomputing at Moscow State University. In Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale (Chapman & Hall/CRC Computational Science). Boca Raton: CRC Press, 2013. P. 283.