

УДК 523.165

ЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА АТИС-2

© 2007 г. А. Д. Панов¹, Дж. Х. Адамс, мл.², Х. С. Ан³, К. Е. Батьков¹, Г. Л. Башинджагян¹, Дж. В. Ваттс², Дж. П. Вефель⁴, Дж. Ву³, О. Ганел³, Т. Г. Гузик⁴, Р. М. Гунасингха⁵, В. И. Зацепин¹, И. Изберт⁴, К. Ц. Ким³, М. Кристл², Е. Н. Кузнецов¹, М. И. Панасюк¹, Э. С. Сио³, Н. В. Сокольская¹, Дж. Чанг^{6,7}, В. К. Х. Шмидт⁷, А. Р. Фазели⁵

Представлены результаты измерений энергетических спектров протонов, а также ядер He, C, O, Ne, Mg, Si и Fe, некоторых групп ядер и спектра всех частиц в первичных космических лучах в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 200 ТэВ по результатам баллонного эксперимента АТИС-2, 2002–2003 гг. Сделан вывод о существенном различии спектров протонов и ядер гелия (спектр протонов круче) и нестепенном характере спектра протонов и тяжелых ядер.

ВВЕДЕНИЕ

Баллонный эксперимент АТИС (Advanced Thin Ionization Calorimeter) предназначен для измерения энергетических спектров космических лучей с индивидуальным разрешением по заряду от протонов до железа в энергетическом интервале приблизительно от 50 ГэВ до 200 ТэВ. Спектрометр АТИС состоит из кремниевой матрицы, графитовой мишени, сцинтилляционных годоскопов и полностью активного ВГО-калориметра. Детальное описание спектрометра дано в [1], метод определения заряда первичной частицы и достигнутое разрешение детектора заряда описаны в [2]. Впервые в космических лучах высокой энергии для измерения заряда была использована матрица кремниевых детекторов, позволившая решить проблему обратного тока (альбеда) путем высокой сегментации детектора заряда [3]. АТИС совершил два успешных полета в Антарктиде: с 28.12.2000 по 13.01.2001 (тестовый полет АТИС-1) и с 29.12.2002 по 18.01.2003 (научный полет АТИС-2). Предварительные результаты обработки данных полета АТИС-2 опубликованы в [4, 5].

Калориметр спектрометра АТИС является тонким, т.е. с его помощью регистрируется лишь часть энергии первичной космической частицы. В этих условиях возникает задача восстановления спектра первичных частиц из спектра выделенных энергий. Спектр выделенных энергий $f(E_d)$ для ча-

стиц определенного сорта связан с первичным спектром $\Phi(E_0)$ уравнением Фредгольма первого рода

$$f(E_d) = \int A(E_d, E_0)\Phi(E_0)dE_0, \quad (1)$$

где $A(E_d, E_0)$ – аппаратная функция, дающая для каждой первичной энергии E_0 распределение по выделенным в калориметре энергиям E_d . Для получения спектра первичных энергий нужно решить уравнение (1) относительно $\Phi(E_0)$ при известной функции $f(E_d)$. Эта проблема относится к разряду некорректно поставленных обратных задач, для решения которых используются различные приближенные методы. В [4, 5] для перехода от спектров энерговыделений к первичным спектрам применялось скейлинговое приближение, используемое в эмульсионных калориметрах [6]. В этом приближении предполагается, что доля выделенной в калориметре энергии (отношение E_d/E_0) и эффективность регистрации не зависят от первичной энергии E_0 , поэтому первичный спектр может быть получен из спектра энерговыделений просто сдвигом и нормировкой на эффективность регистрации.

Математическое моделирование развития каскадов в спектрометре показало, что скейлинговое приближение плохо описывает работу прибора. Методика, описанная в [4, 5], требует уточнения. В настоящей работе для решения проблемы реконструкции первичных спектров (1) применяются два более точных метода: прямое решение уравнения Фредгольма с использованием тихоновской регуляризации и метод дифференциальных сдвигов, обобщающий известную методику [6]. Кроме того, в настоящей работе использована новая, уточненная калибровка калориметра и улучшенная коррекция температурной чувствительности

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова.

² Центр космических исследований им. Маршалла, США.

³ Университет шт. Мэриленда, США.

⁴ Университет шт. Луизиана, США.

⁵ Южный университет, США.

⁶ Обсерватория Перпл Маунтин Китайской академии наук.

⁷ Институт Макса Планка, Германия.

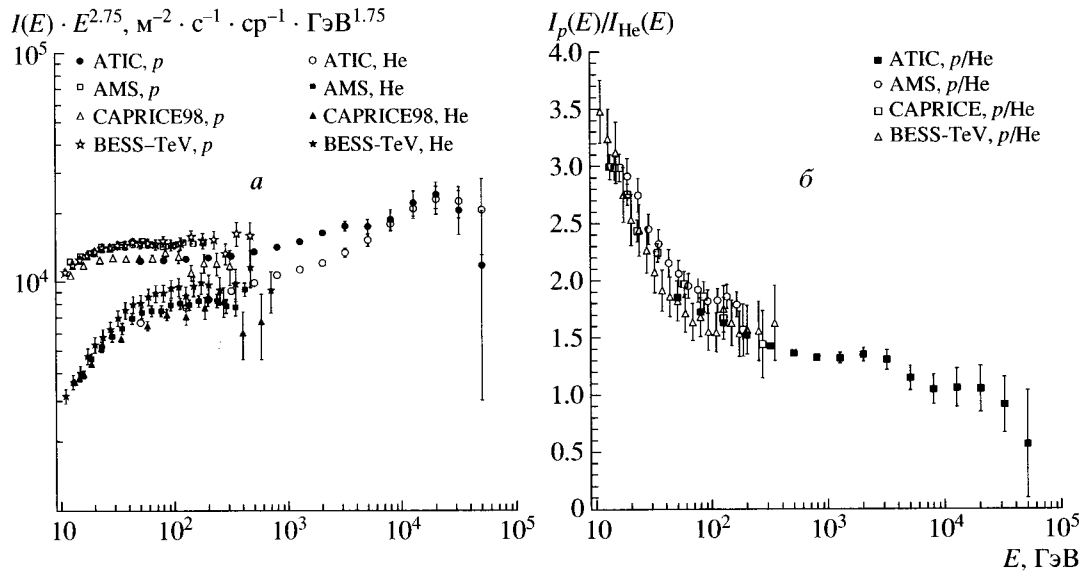


Рис. 1. Спектры протонов и гелия (а) и отношение потока протонов к потоку гелия (б).

калориметрического тракта, где вместо усредненной полетной температуры прибора, как в [4, 5], учитывались и колебания температуры во время полета.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ СПЕКТРОВ

Экспериментальные дифференциальные спектры энерговыделений записываются как число отсчетов в логарифмически-эквидистантных ячейках, делящих весь диапазон исследуемых энергий на n частей. Если первичные спектры искать в таком же виде, то интегральное уравнение (1) в дискретном виде может быть переписано в виде системы уравнений

$$M_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} N_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где обозначения очевидны. Метод поиска первичного спектра $\{N_j, j = 1, \dots, n\}$, основанный на прямом решении дискретизованного уравнения Фредгольма (2) с использованием регуляризации, сводится к минимизации некоторого функционала и применению метода Монте-Карло для вычисления статистических ошибок. Реализация метода для обработки данных эксперимента АТІС детально описана в [7].

Было показано, что для спектров протонов и гелия метод решения обратной задачи с использованием регуляризации для поиска первичного спектра приводит к устойчивому результату. Это означает, что если обрабатывать спектр энерговыделений по частям, то в результате получаются участки первичного спектра, согласующиеся меж-

ду собой. Однако оказалось, что это не так для спектров ядер $Z \geq 6$. Для обработки спектров ядер $Z \geq 6$ был разработан метод дифференциальных сдвигов спектров, который обобщает известную методику [6], основанную на точном скейлинге. В методе дифференциальных сдвигов фактор масштабирования энергии вычисляется для каждого значения E_d отдельно. Для выделенной энергии, точно равной логарифмическому среднему i -той ячейки спектра (E_i), первичная энергия восстанавливается по формуле

$$E_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=i}^n a_{ij} E_j K(E_j)}{\sum_{j=i}^n a_{ij} K(E_j)}, \quad (3)$$

где $K(E_j)$ – начальное приближение для первичного спектра. Для промежуточных значений E_d первичная энергия определяется интерполированием формулы (3). В качестве начального приближения для спектра был использован спектр энергий, соответствующий степенному по импульсу спектру с интегральным показателем $\gamma = 1.6$.

Было проверено, что реконструкции первичного спектра методом решения обратной задачи с регуляризацией и методом дифференциальных сдвигов дают одинаковый результат (с точностью до статистических флуктуаций) в общем для обоих методов энергетическом диапазоне первичного спектра. При этом метод дифференциального сдвига для ядер устойчив, хотя нижний порог реконструированных спектров оказывается примерно 200 ГэВ против 50 ГэВ в методе решения обрат-

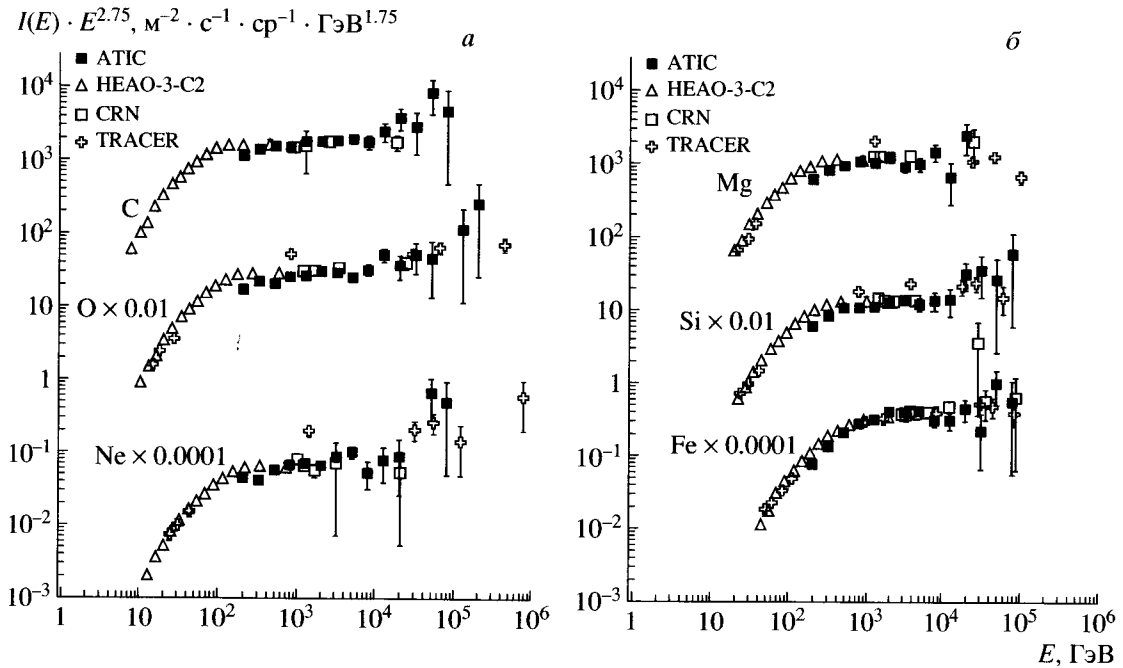


Рис. 2. Спектры четных ядер: C, O, Ne (а) и Mg, Si, Fe (б).

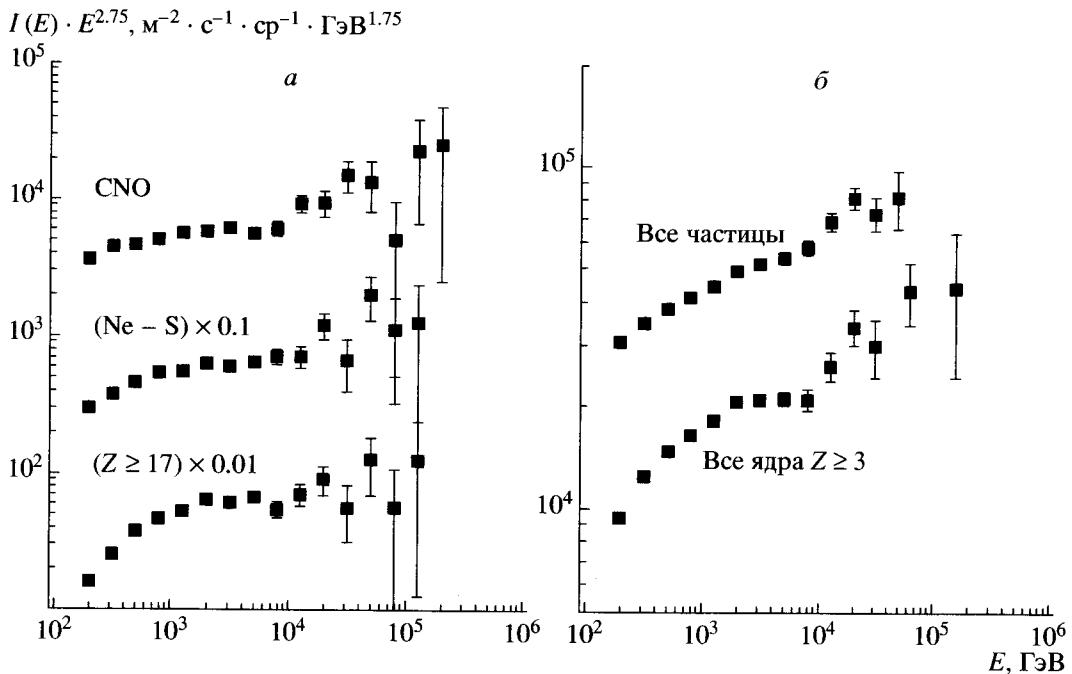


Рис. 3. Спектры различных групп ядер (а) и спектр всех частиц (б). Верхняя граница энергий в спектре всех ядер $Z \geq 3$ выше, чем в спектре всех частиц, так как спектры протонов и гелия (см. рис. 1) методом решения обратной задачи с регуляризацией могут быть определены только до 80 ТэВ.

ной задачи с регуляризацией. Другим преимуществом метода дифференциальных сдвигов перед прямым методом решения обратной задачи с регуляризацией является то, что он работает в области данных с низкой статистикой, где прямой метод уже неприменим. Однако для использования мето-

да дифференциальных сдвигов нужно, чтобы спектр не слишком сильно отличался от степенного. Это имеет место для ядер $Z \geq 6$.

Абсолютные потоки первичных частиц определяются путем нормировки реконструированных первичных спектров на геометрический фактор

прибора, живое время экспозиции, поправку на поглощение в остаточной атмосфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показаны полученные первичные спектры протонов и ядер гелия (здесь и всюду в этой статье в терминах энергия на частицу) и отношение потоков протонов и гелия в зависимости от энергии. Результаты АТЭС-2 сравниваются с результатами экспериментов AMS [8, 9], CAPRICE-98 [10], BESS-TeV [11]. Спектры протонов и ядер гелия имеют достоверно различные наклоны и согласуются с данными магнитных спектрометров [8–11] в области более низких энергий.

На рис. 2 показаны полученные первичные спектры некоторых четных ядер $Z \geq 6$. Данные АТЭС-2 сравниваются с результатами экспериментов HEAO-3-C2 [12], CRN [13], TRACER (предварительные результаты) [14]. Можно отметить хорошее согласие, за исключением небольшого систематического превышения данных HEAO над результатами АТЭС-2 в области энергий 200–700 ГэВ.

На рис. 3 приведены спектры различных ядерных групп и спектр всех частиц по данным АТЭС-2. Можно отметить достоверное выполаживание спектров ядер тяжелее гелия в области первичных энергий $E_0 > 10$ ТэВ, что особенно хорошо видно на суммарном спектре ядер $Z \geq 3$ (рис. 3). Форма спектра всех частиц близка к степенной, что в свете результатов эксперимента АТЭС-2 выглядит как случайное обстоятельство, так как спектры отдельных ядерных групп, в число которых надо

включить также спектры протонов и ядер гелия (рис. 1), довольно далеки от степенной формы. Обработка данных эксперимента АТЭС-2 продолжается.

Настоящая работа поддержана грантами РФФИ 02-02-16545, 05-02-16222; в США грантами НАСА NNG04WC12G, NNG04WC10G, NNG04WC06G; Д. Чанг благодарит Министерство науки и технологии Китая за поддержку грантом 2002CB713905.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guzik T.G. et al.* // Adv. Space Res. 2004. V. 33. P. 1763.
2. *Zatsepin V.I. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2004. V. 524. P. 195.
3. *Сокольская Н.В. и др.* // ЯФ. 2005. Т. 68. С. 1225.
4. *Зацепин В.И. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68. С. 1593.
5. *Panov A.D. et al.* // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1944.
6. *Burnett T.H. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 1986. V. 251. P. 583.
7. *Batkov K. E. et al.* // Proc. 29th ICRC. Pune. 2005. V. 3. P. 353.
8. *Alcaraz J. et al.* // Phys. Lett. B. 2000. V. 490. P. 27.
9. *Alcaraz J. et al.* // Phys. Lett. B. 2000. V. 494. P. 193.
10. *Boezio M. et al.* // Astropart. Phys. 2003. V. 19. P. 583.
11. *Haino S. et al.* // Phys. Lett. B. 2004. V. 594. P. 35.
12. *Engelmann J.J. et al.* // Astron. Astrophys. 1990. V. 233. P. 96.
13. *Müller D. et al.* // Astrophys. J. 1991. V. 374. P. 356.
14. *Müller D. et al.* // Proc. 29th ICRC. Pune. 2005. V. 3. P. 89.