

УДК 523.165

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ОБИЛЬНЫХ ЯДЕР ПКЛ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА АТИС-2 – ОКОНЧАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2009 г. А. Д. Панов¹, Дж. Х. Адамс, мл.², Х. С. Ан³, Г.Л. Башинжагян¹, Дж. В. Ваттс², Дж. П. Вефель⁴, Дж. Ву³, О. Ганел³, Т. Г. Гузик⁴, В. И. Зацепин¹, И. Изберт⁴, К. Ц. Ким³, М. Кристл², Е. Н. Кузнецов¹, М. И. Панасюк¹, Э. С. Сно³, Н. В. Сокольская¹, Дж. Чанг^{6, 7}, В. К. Х. Шмидт⁷, А. Р. Фазели⁵

E-mail: panov@declsinp.msu.ru

Представлены окончательные результаты обработки данных баллонного эксперимента АТИС-2 (Антарктида, 2002–2003 гг.), относящиеся к энергетическим спектрам протонов, а также ядер He, C, O, Ne, Mg, Si и Fe, и спектр всех частиц и зависимости логарифма среднего атомного веса ПКЛ от энергии. Окончательные результаты основаны на улучшении использованных ранее методик, в частности на существенном повышении разрешения зарядового спектра. Подтверждены предварительные выводы о существенном различии спектров протонов и ядер гелия (спектр протонов круче), о нестепенном характере спектра протонов и более тяжелых ядер (обнаружено уположение спектра углерода при энергиях выше 10 ТэВ). Обнаружена сложная структура зависимости логарифма среднего атомного номера от энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Баллонный эксперимент АТИС (Advanced Thin Ionization Calorimeter) предназначен для измерения состава и энергетических спектров первичных космических лучей (ПКЛ) в диапазоне энергий приблизительно от 50 ГэВ до 100–200 ТэВ на частицу с поэлементным разрешением по заряду от протонов до железа, а также спектра электронов ПКЛ.

Спектрометр АТИС состоит из кремниевой матрицы для определения заряда первичной частицы, графитовой мишени, сцинтилляционных годоскопов и полностью активного ВГО-калориметра. Детальное описание спектрометра и методов калибровки дано в [1], методика определения заряда первичной частицы, включая детали, связанные с решением проблемы альбедных частиц с помощью высокосегментированной матрицы кремниевых детекторов, описана в [2, 3]. Калориметр прибора является тонким, т.е. регистрирует только часть энергии первичной частицы. Методики реконструкции энергетического спектра первичных частиц из спектра энерговывделений описаны в [4, 5].

Прибор АТИС совершил три стратосферных полета вокруг Южного полюса: АТИС-1 (28.12.2000–13.01.2001), АТИС-2 (29.12.2002–18.01.2003) и АТИС-4 (26.12.2007–15.01.2008). Общая продолжительность полетов составила около 50 суток. Полет АТИС-3 в декабре 2005 г. оказался неудачным из-за повреждения оболочки аэростата на взлете. Полет АТИС-1 был тестовым, обработка данных полета АТИС-4 только началась. Предварительные результаты обработки данных полета АТИС-2, относящиеся к адронной составляющей космических лучей, опубликованы в статьях [5–8]. В настоящем докладе представлены окончательные результаты обработки данных этого эксперимента для энергетических спектров обильных ядер (протоны, ядра He, C, O, Ne, Mg, Si, Fe), для спектра всех частиц и для зависимости среднего логарифма атомного веса ПКЛ от энергии. Для получения этих результатов был использован ряд новых методик. Приводимые результаты мы рассматриваем как окончательные, так как в обработке были учтены все основные известные нам методические эффекты. Дальнейшее усовершенствование методик не может привести к существенному пересмотру результатов.

НОВЫЕ МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры протонов и гелия. В опубликованных ранее работах [5, 6, 8] перекрытие зарядовых линий протонов и ядер гелия учитывалось приблизительно с помощью поправочных коэффициентов. В настоящей работе для первичных протонов и ядер гелия и для различных начальных энергий

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелевича Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

² Центр космических исследований им. Маршалла, США.

³ Университет шт. Мэриленда, США.

⁴ Университет шт. Луизиана, США.

⁵ Южный университет, Батон Руж, США.

⁶ Обсерватория Перпл Маунтин, Китайская академия наук.

⁷ Институт Макса Планка, Германия.

этих частиц с использованием программной системы FLUKA было проведено количественное моделирование аппаратной формы зарядовых линий. С учетом полученных функций была аккуратно решена задача восстановления исходных интенсивностей перекрывающихся линий протонов и гелия. Уточненные результаты обработки приведены на рис. 1. Уточненные результаты мало отличаются от более приблизительных предварительных данных [5, 8]. Результаты подтверждают вывод о различном среднем наклоне спектров протонов и гелия: спектр гелия в среднем более пологий. Вместе с результатами ATIC-2 на рис. 1 показаны данные экспериментов AMS [9, 10], CAPRICE-98 [11], BESS-TeV [12].

Спектры обильных четных ядер от углерода до железа. При получении спектров обильных четных ядер, начиная с углерода, были учтены следующие методические эффекты.

1. Учтены фоны, связанные с высокоэнергетическими хвостами зарядовых распределений для линий протонов и гелия, которые являются либо результатом флуктуаций ионизационных потерь в кремниевых детекторах (хвосты распределения Ландау), либо результатом влияния обратных токов и ядерных взаимодействий частиц в зарядовом блоке прибора. За счет этих высокоэнергетических хвостов первичный протон или ядро гелия может имитировать приход более тяжелого ядра, что может заметно исказить значения потоков ядер тяжелее ядра гелия.

2. С помощью системы FLUKA вычислены аппаратные формы зарядовых линий для каждого интересующего нас ядра и взаимные фоны различных ядер (из-за взаимодействий с элементами конструкции кремниевой матрицы некоторое ядро может регистрироваться как другое ядро, сильно отличающееся от первого по заряду как в большую, так и в меньшую сторону). С использованием этой информации аккуратно решена задача учета перекрытия линий (сводится к решению системы линейных уравнений).

3. Учтен логарифмический рост ионизационной способности частиц (сдвиг зарядовых линий) с ростом энергии частиц. Практически использовалась связь положения зарядовых линий не с исходной энергией частиц, а с энерговыделением в калориметре, и зависимость эта аппроксимировалась линейной функцией логарифма энергии с наклоном $\alpha = 1.2\%$ на декаду энерговыделения. Было показано, что коэффициент α слабо зависит от заряда частицы (как и следовало ожидать).

4. В качестве дополнительного детектора заряда был использован верхний слой сцинтилляционного годоскопа, что позволило ценой некоторого сокращения статистики (на 40%) получить зарядовый спектр со значительно лучшим разрешением (полная ширина линии на половине высоты для ли-

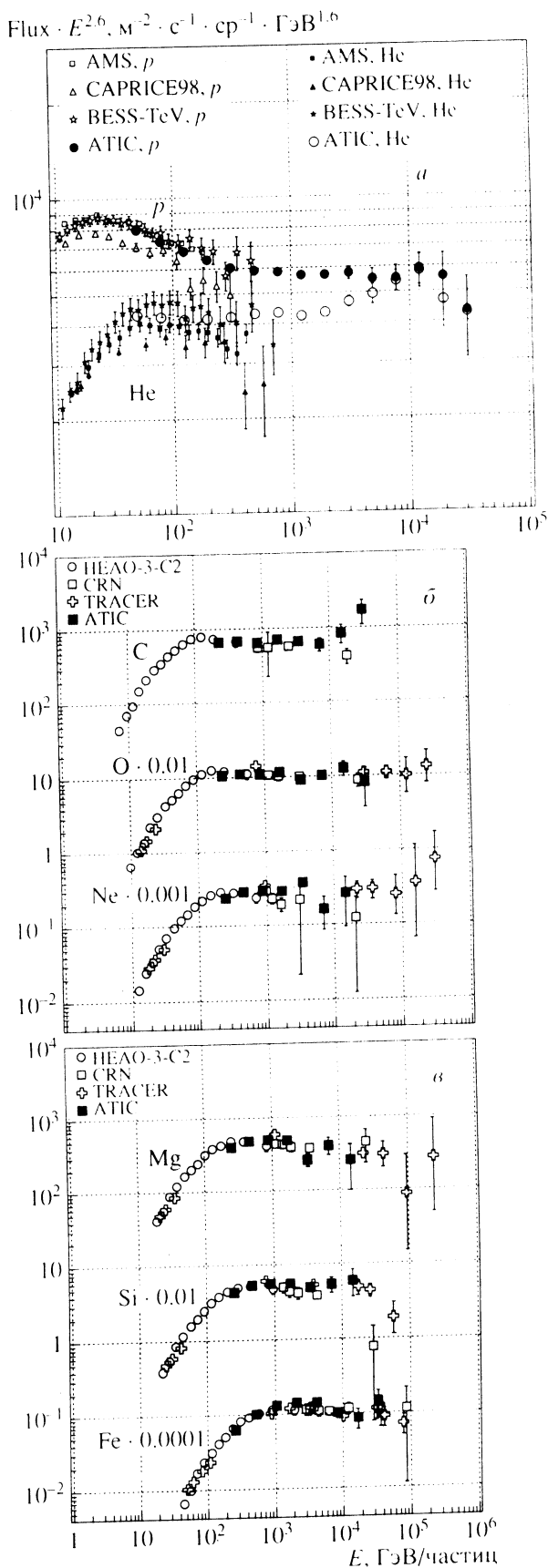


Рис. 1. Спектры протонов, гелия и других обильных ядер.

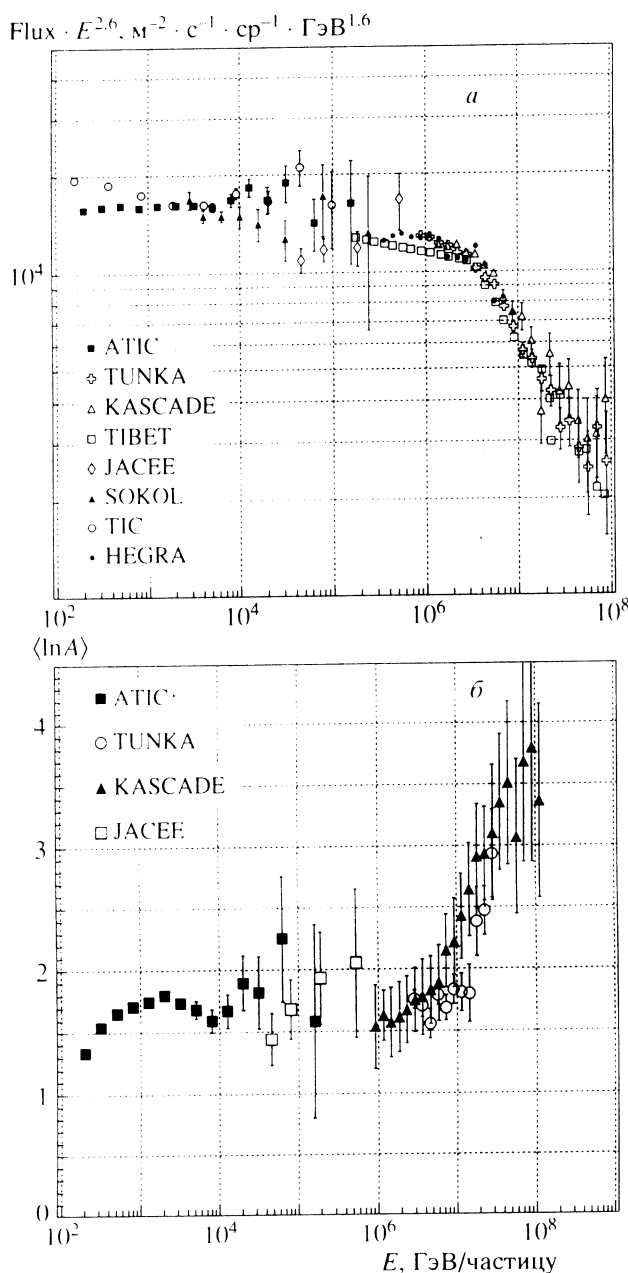


Рис. 2. Спектр всех частиц (а) и зависимость среднего логарифма атомного веса $\langle \ln A \rangle$ от энергии (б).

нии углерода составляла в среднем 0.77e для кремниевой матрицы и 0.59e для комбинации кремниевой матрицы и сцинтилляционного годоскопа). Это позволило всю обработку провести двумя разными путями: для спектров с высокой статистикой и низким разрешением и с более низкой статистикой, но более высоким разрешением – и сравнить результаты. Согласие явилось дополнительным подтверждением правильности обеих методик. На рис. 1 приведены найденные спектры C, O, Ne, Mg, Si и Fe. Результаты АТИС-2 сравниваются с результатами экспериментов HEAO-3-C2 [13], CRN [14],

TRACER [15]. Новые результаты отличаются от предварительных данных [6, 7, 5] более выраженным выполаживанием спектра углерода при энергиях выше 10 ТэВ.

Спектр всех частиц и зависимость среднего логарифма атомного веса от энергии. В предварительной публикации [5] спектр всех частиц получался суммированием спектров отдельных классов ядер, которые восстанавливались из спектра энерговыделений разными способами: спектры протонов и гелия определялись деконволюцией с тихоновской регуляризацией [4], а спектры более тяжелых ядер – методом дифференциального масштабирования (сдвига) [5]. Это приводило к тому, что спектр удавалось получить лишь до энергий около 50 ТэВ. В этой работе все парциальные спектры были получены методом дифференциального сдвига и спектр всех частиц был определен до энергий около 150 ТэВ (см. рис. 2). Была также определена зависимость среднего логарифма атомного веса адронной компоненты космических лучей от энергии для того же диапазона энергий. Спектр всех частиц сравнивается с данными экспериментов Тунка [16], KASCADE [17], TIBET [18], JACEE [19], Сокол [20], ТИС [21], HEGRA [22]. Энергетическая зависимость логарифма атомного веса сравнивается с результатами экспериментов KASCADE [17], JACEE [19] и Тунка (В.В. Просин, частное сообщение, 2008). Данные по $\langle \ln A \rangle$ эксперимента АТИС вместе с данными других экспериментов указывают на существование сложной структуры энергетической зависимости массового состава космических лучей.

Настоящая работа поддержана грантами РФ-ФИ № 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. Batkov K.E. et al. // Proc. 29th ICRC. Pune. 2005. V. 3. P. 353.
5. Панов А.Д. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 4. С. 512.
6. Зацепин В.И. и др. // Изв. РАН. Серия физ. 2004. Т. 68. № 11. С. 1593.
7. Panov A.D. et al. // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1944.
8. Wefel J.P. et al. // Proc. 30th ICRC. Merida. 2007. V. 2. P. 31.
9. Alcaraz J. et al. // Phys. Lett. B. 2000. V. 490. P. 27.
10. Alcaraz J. et al. // Phys. Lett. B. 2000. V. 494. P. 193.

11. *Boezio M. et al.* // *Astropart. Phys.* 2003. V. 19. P. 583.
12. *Haino S. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2004. V. 594. P. 35.
13. *Engelmann J.J. et al.* // *Astron. Astrophys.* 1990. V. 233. P. 96.
14. *Müller D. et al.* // *Astrophys. J.* 1991. V. 374. P. 356.
15. *Ave M. et al.* // 2008. arXiv:0801.0582.
16. *Korosteleva E.E. et al.* // *Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.)*. 2007. V. 165. P. 74.
17. *Roth V., Ulrich H.* // *Proc. 28th ICRC. Tsukuba. 2003.* V. 1. P. 139.
18. *Amenomory M.* // *Proc. 28th ICRC. Tsukuba. 2003.* V. 1. P. 143.
19. *Takahashi Y. (JACEE collaboration)* // *Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.)*. 1998. V. 60. P. 83.
20. *Ivanenko I.P. et al.* // *Proc. 23rd ICRC. Calgary. 1993.* V. 1. P. 17.
21. *Адамс Дж. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1997. Т. 61. № 6. С. 1181.
22. *Arqueros F.* // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 359. P. 682s.