

На правах рукописи

ПАНОВ Александр Дмитриевич

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЯДЕР ПЕРВИЧНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ ПРОТОНОВ ДО ЖЕЛЕЗА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА АТІС-2

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра и
элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва
2014

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Официальные оппоненты:

Гальпер Аркадий Моисеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский университет «МИФИ», профессор.

Ерлыкин Анатолий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской Академии Наук, главный научный сотрудник.

Зиракашвили Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Институт космофизических исследований и аэронауки имени Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской Академии Наук, Лаборатория теории космической плазмы.

Защита состоится «_____» _____ 2014 г. в _____ часов на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, Ленинские горы, д.1, стр.5 («19-й корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, Ломоносовский проспект, д.27.

Автореферат разослан «_____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук
Д 501.001.77
доктор физико-математических наук,
профессор

С. И. Страхова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Ядерная компонента галактических космических лучей является одной из основных компонент межзвездной среды, изучение которой чрезвычайно важно по множеству причин как теоретического, так и практического характера. В то же время, на конец 1990-х годов, когда планировался и готовился эксперимент АТІС (Advanced Thin Ionization Calorimeter), информация об энергетических спектрах ядер космических лучей была весьма неполна и противоречива.

Для энергетических спектров протонов и гелия имелись измерения нескольких магнитных спектрометров, которые приводили к согласованной картине в области энергий от единиц ГэВ/нукл до не более чем 100–200 ГэВ/нукл. Для энергий выше нескольких ТэВ/нукл для спектров протонов и гелия имелись результаты нескольких эмульсионных и калориметрических экспериментов, но эти данные отличались противоречивостью и низкой статистической обеспеченностью. Для промежутка энергий между 100 ГэВ и примерно 3 ТэВ на нуклон имелись только данные калориметрического эксперимента М.Ж. Руан и др. [1] и результаты для интегральных спектров, полученные на спутниках Протон [2, 3, 4]. Однако, результаты [1] и спутников Протон противоречили друг другу, при этом еще результаты [1] плохо согласовывались с данными магнитных спектрометров для более низких энергий, а в результатах Протонов имелись противоречия внутри самой этой серии экспериментов. Тем самым, промежуток энергий 100 ГэВ–3 ТэВ на нуклон оставался изученным явно недостаточно. При этом результаты эмульсионных экспериментов плохо ложились на продолжение низкоэнергетических данных магнитных спектрометров, поэтому оставалось непонятным, что происходит со спектрами протонов и гелия в диапазоне энергий 100 ГэВ/нукл–3 ТэВ/нукл.

В отношении спектров ядер тяжелее гелия основная проблема состояла в том, что почти полностью отсутствовали статистически обеспеченные данные для энергий выше 200 ГэВ/нукл. Для обильных ядер С, О, Ne, Mg, Si только эксперимент CRN [5] дал по одной экспериментальной точке для каждого из этих ядер при энергии выше 200 ГэВ/нукл; имеющиеся данные некоторых других экспериментов из диапазона энергий 200–1000 ГэВ/нукл были плохо статистически обеспечены. Для железа результаты нескольких экспериментов дали спектральные точки в диапазоне энергий 200–5000 ГэВ/нукл, но все данные имели большие статистические ошибки. Оставалось неясным, имеют ли спектры тяжелых ядер степенной характер при энергиях выше ~ 100 ГэВ/нукл.

Для отношений потоков вторичных ядер к первичным ситуация была еще

более тяжелой. Отношение В/С было статистически и методически надежно измерено в эксперименте НЕАО-3-С2 только до энергии 35 ГэВ/нукл [6], все данные при более высоких энергиях были плохо статистически обеспечены и противоречивы. Отношения потоков некоторых тяжелых ядер $16 \leq Z \leq 24$ к потоку железа были статистически надежно измерены до энергий 200–600 ГэВ в эксперименте НЕАО-3-С3 [7], но содержали странную аномалию в отношениях Ar/Fe и Ca/Fe, которую сами авторы считали возможным признаком методической ошибки.

Таким образом, имелась настоятельная необходимость в прямых измерениях статистически и методически надежных спектров ядер от протонов до железа с индивидуальным разрешением по заряду в диапазоне энергий от нескольких десятков ГэВ/нукл до нескольких десятков ТэВ/нукл, с тем, чтобы 1) с запасом заполнить брешь в данных для спектров протонов и гелия между 200 ГэВ/нукл и несколько ТэВ/нукл; 2) продолжить результаты измерений спектров тяжелых ядер до возможно более высоких энергий и устранить ряд имеющихся неясностей в отношениях потоков тяжелых ядер. Баллонный спектрометр АТІС, разработанный для решения именно этого круга задач, совершил три успешных полета вокруг Южного полюса, и собранные им данные требуют тщательного анализа и осмысления.

Цель работы

Целью исследования является 1) создание набора экспериментальных методик, связанных с обработкой данных баллонного эксперимента АТІС, начиная с чтения, интерпретации и коррекции сырых полетных данных, кончая получением энергетических спектров ядер на границе атмосферы; 2) получение на основе этих методик энергетических спектров основных обильных ядер от протонов до железа и отношений потоков различных ядер, включая отношение потоков ядер, богатых вторичной компонентой, к первичным ядрам, в диапазоне энергий от ~ 50 ГэВ до ~ 100 ТэВ на частицу; 3) анализ полученных результатов на предмет их соответствия наиболее распространенным моделям происхождения и распространения космических лучей.

Новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты

1. Создана система обработки данных эксперимента АТІС, включая: методику амплитудной калибровки всех детекторов и методику реконструкции энерговыведений в детекторах; методику коррекции температурного дрейфа ВГО-калориметра; методику реконструкции событий, включающую определение траектории по данным позиционно-чувствительного калори-

метра и кремниевой матрице, определение заряда по кремниевой матрице и по данным сцинтилляционного годоскопа; методику реконструкции спектров частиц по спектрам энерговыделений тонкого калориметра с использованием дифференциального сдвига и с использованием полного решения некорректно поставленной обратной задачи методом регуляризации Тихонова; методики решения обратной задачи для учета перекрытия линий зарядового распределения и обратной задачи для перехода от спектров на входе в спектрометр к спектрам на границе атмосферы.

2. С использованием разработанных методик получены энергетические спектры ядер, отнесенные к границе атмосферы, и отношения спектров, в том числе: спектры протонов и ядер гелия в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 30 ТэВ на частицу; спектры ядер C, O, Ne, Mg, Si, Fe в диапазоне энергий от 200 ГэВ до 20-30 ТэВ на частицу; спектры нескольких групп ядер (CNO, Ne-S и др.) от энергий 200 ГэВ до энергий более 100 ТэВ на частицу; суммарный спектр всех ядер тяжелее бора в терминах энергии на нуклон от энергии 20 ГэВ/нукл до энергии 5 ТэВ/нуклон; отношения потоков V/C, N/O до энергии 300 ГэВ/нукл и отношение $(16 \leq Z \leq 24)/\text{Fe}$ до энергии 600 ГэВ/нуклон; отношения спектров обильных тяжелых ядер к спектру железа до энергии 600 ГэВ/нукл; спектр всех частиц и энергетическая зависимость среднего логарифма атомного веса в диапазоне энергий от 200 ГэВ до 150 ТэВ на частицу.

3. Проведенный анализ полученных спектров и отношений потоков выявил ряд новых явлений, которые не могут быть поняты в рамках стандартных представлений, основанных на предположении одинаковых степенных спектров магнитной жесткости в источнике для всех ядер и на однородных моделях распространения космических лучей в межзвездной среде:

3.1. Обнаружено различие наклонов спектров протонов и гелия в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 10 ТэВ на частицу, эффективно эквивалентное различию спектральных индексов 0.12 (спектр протонов круче спектра гелия);

3.2. Обнаружен нестепенной характер поведения спектров протонов и гелия в форме эффективного уменьшения модуля спектрального индекса на величину около 0.1 в области энергий между 100 до 400 ГэВ/нуклон;

3.3. Обнаружен нестепенной характер поведения спектров ядер тяжелее гелия в форме уположения этих спектров в области между энергиями 200 и 700 ГэВ/нуклон;

3.4. Обнаружено сложное поведение энергетической зависимости среднего логарифма атомного веса в промежутке между энергиями 200 ГэВ и 30 ТэВ, выражающееся в наличии максимума вблизи энергии 2 ТэВ и (менее достоверно) минимума вблизи энергии 8 ТэВ;

3.5. Обнаружен излом в отношении потоков $(16 \leq Z \leq 24)/\text{Fe}$ вблизи

энергии 50 ГэВ/нукл со сменой падающей зависимости на растущую.

3.6. Обнаружен изгиб в отношении спектров обильных тяжелых ядер к спектру железа вблизи энергии 30 ГэВ/нукл со сменой падающей зависимости на растущую.

Научная новизна

Научная новизна определяется, *во-первых*, тем, что спектрометр АТИС является прибором нового поколения для изучения спектров космических лучей, обладающим принципиально новыми возможностями по сравнению с инструментами предыдущих поколений. В спектрометре АТИС впервые была использована кремниевая матрица высокой сегментированности в сочетании с полностью активным высокосегментированным калориметром, дающим детальную пространственную картину развития ядерно-электромагнитного каскада в приборе. Новая конструкция прибора позволила надежно решить проблему обратных токов и получить качественно более надежные и разнообразные экспериментальные данные, чем это было доступно более старым инструментам. В том числе, научная новизна определяется достигнутой рекордно большой шириной энергетических диапазонов измеренных спектров ядер при их достаточно высокой статистической и методической надежности при измерении одним прибором по единой методике. В частности, полностью перекрыт интервал неопределенности в данных для спектров протонов и гелия от 100 ГэВ до 3 ТэВ, который существовал до эксперимента АТИС. Спектры основных обильных четных ядер космических лучей C, O, Ne, Mg, Si, Fe удалось измерить с достаточной статистической надежностью в широком диапазоне энергий от 200 ГэВ до нескольких десятков ТэВ на частицу, что и позволило выявить нестепенное поведение спектров при высоких энергиях. Спектр всех частиц и энергетическая зависимость среднего логарифма атомного веса были измерены одним прибором в рекордно широком диапазоне энергий: от 200 ГэВ до более чем 100 ТэВ на частицу, что позволило наблюдать сложное поведение энергетической зависимости среднего логарифма атомного веса и показать, что спектр всех частиц гладко выходит на результаты измерений ШАЛ при более высоких энергиях. До рекордно высоких энергий (около 600 ГэВ/нукл) и с достаточной статистической надежностью проведены измерения отношений потоков тяжелых ядер $16 \leq Z \leq 24$ к ядру железа, а также обильных четных ядер к ядру железа, что позволило обнаружить неожиданное сложное поведение этих отношений. *Во-вторых*, научная новизна результатов определяется перечисленными в «Основных результатах диссертации» шестью новыми явлениями, выявленными в анализе полученных экспериментальных спектров ядер космических лучей.

Практическая ценность работы

В настоящее время результаты эксперимента АТЭС очень широко используются для сравнения с теоретическими моделями ускорения и распространения космических лучей и уже послужили основой для ряда новых идей в этой области. Результаты АТЭС применялись также для расчета потоков атмосферных мюонов и нейтрино, и для сравнения с результатами новых экспериментов в области физики космических лучей. Кроме того, разработанные в данном исследовании экспериментальные методики и полученные промежуточные данные разного типа были существенным образом использованы в серии работ по спектрам электронов космических лучей, выполненных со спектрометром АТЭС [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Результаты этих работ широко обсуждаются и цитируются.

Методология и методы исследования

Большая часть разработанных экспериментальных методик с равным успехом может быть использована и, действительно, используется для обработки данных всех трех успешных полетов спектрометра АТЭС: АТЭС-1 (2000-2001), АТЭС-2 (2002-2003) и АТЭС-4 (2007-2008), однако основные результаты диссертации основаны на результатах полета АТЭС-2. Основная причина этого состоит в том, что, как было показано, в полетах АТЭС-1 и АТЭС-4 имели место некоторые аномалии в работе аппаратуры, из-за которых возрасла вероятность пропуска событий для частиц с большими энергиями и зарядами. Однако в полете АТЭС-2 основную часть времени (в общей сложности 11.7 суток) аппаратура работала правильно, и именно данные, собранные за это время, послужили основой настоящей диссертации.

Апробация работы

Результаты отдельных этапов работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях по космическим лучам (ICRC, International Cosmic Ray Conference): 28th (2003, Цукуба, Япония), 29th (2005, Пуна, Индия), 30th (2007, Мерида, Юкатан, Мексика), 32nd (2011, Пекин, Китай), 33rd (Рио де Жанейро, Бразилия); на Генеральных ассамблеях COSPAR: 34-й (2002, Хьюстон, США), 35-й (2004, Париж, Франция), 36-й (2006, Пекин, Китай); на Европейских симпозиумах по космическим лучам: 18-м (2002, Москва), 23-м (2012, Москва, совмещен с 32-й ВККЛ, Москва); на Всероссийских конференциях по космическим лучам (ВККЛ): 27-й (2002, Москва), 28-й (2004, Москва), 29-й (2006, Москва), 30-й (2008, С.-Петербург), на Ломоносовских чтениях в МГУ и на научных семинарах в НИИЯФ МГУ и других

институтах. Все физические результаты, выносимые на защиту, были представлены на конференциях автором лично. Результаты работы отражены в 27 статьях, из которых 18 входят в список ВАК.

Личный вклад автора

Все методики калибровки детекторов и обработки данных, упомянутые в разделе «Новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты», были разработаны и реализованы лично автором. Все экспериментальные результаты, перечисленные там же, были получены лично автором с использованием этих методик. Из трех основных систем компьютерной симуляции прибора АТИС, использованных в работе (на основе систем GEANT3, GEANT4 и FLUKA), автором лично была создана и поддерживалась одна (на основе системы GEANT4). Автор не принимал участие в лабораторных измерениях, имеющих отношение к калибровке нелинейности кремниевых детекторов заряда спектрометра АТИС (но выполнил часть работы, связанную с полетными данными). Симуляция фрагментации ядер в остаточной атмосфере, использованная в настоящей работе, была выполнена в диссертации К.Е. Батькова [14].

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, десяти глав, выводов и двух приложений. Основное содержание диссертации изложено на 329 страницах, приложения занимают 25 страниц. Диссертация содержит 162 рисунка и список литературы из 358 наименований.

Основное содержание работы

Во введении отражена актуальность темы, сформулирована цель работы, обосновано использование данных полета АТИС-2 для ее выполнения, приведены основные результаты диссертации, отражены научная новизна и практическая ценность работы, представлено распределение материала по главам.

Первая глава диссертации начинается с обзора диффузионной модели распространения космических лучей в Галактике и ее упрощенной версии, известной как однородная модель или leaky-box приближение. С использованием представлений модели leaky-box разъясняется характер типичных задач, возникающих в физике космических лучей, и показано, что основными экспериментальными данными, которые представляют здесь интерес, являются энергетические спектры космических лучей. После этого в разделе

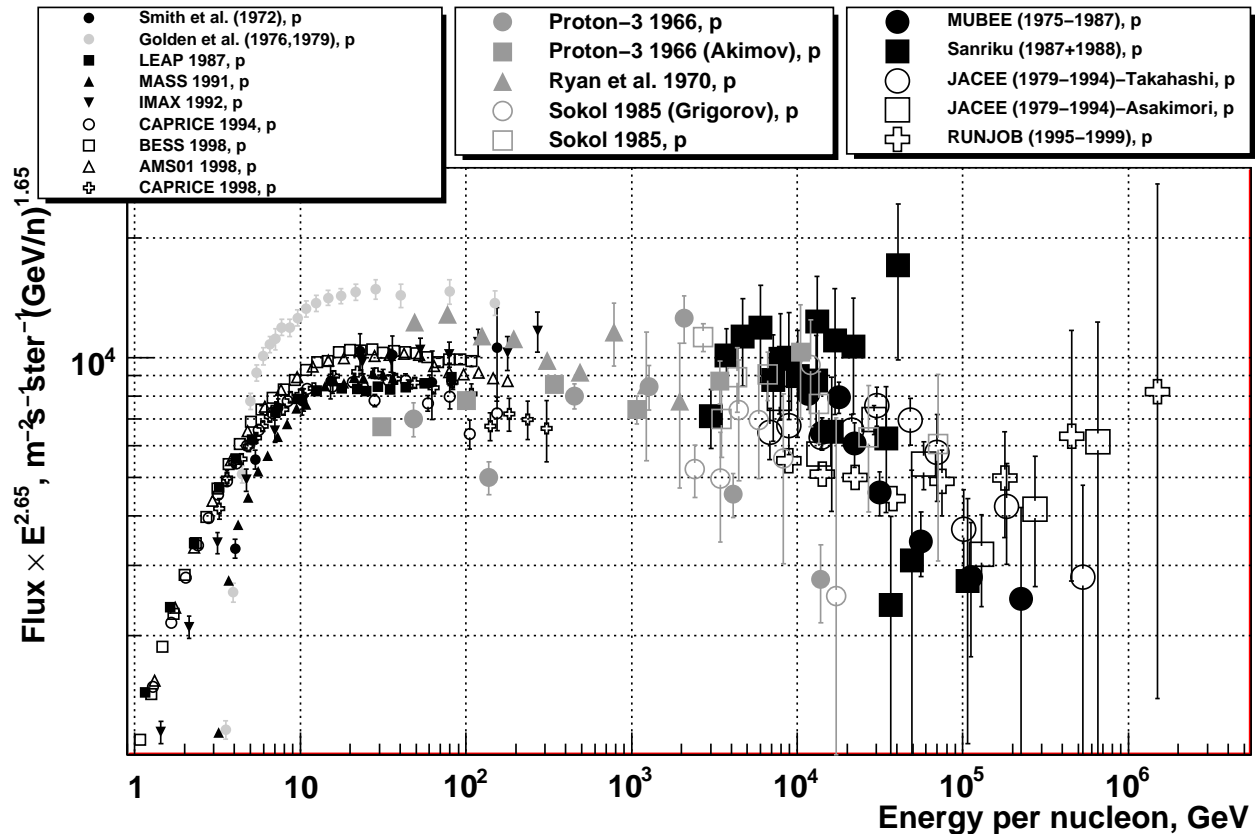


Рис. 1: Спектр протонов (энергия на нуклон) по результатам прямых измерений до эксперимента АТІС. Магнитные спектрометры (мелкие значки): Smith et al. [15], Golden et al. [16], LEAP 1987 [17], MASS 1991 [18], IMAX 1992 [19], CAPRICE 1994 [20], BESS 1998 [21], AMS01 1998 [22]; CAPRICE 1998 [23]. Калориметры (средние светлые значки): Proton-3 1966, [2]; Proton-3 1966 (Akimov) [3]; Ryan et al. 1970 [1]; Sokol (1985) Grigorov [24]; Sokol 1985 [25]. Эмульсионные баллонные эксперименты (Крупные значки): MUBEE (1975-1987) [26], Sanriku (1987+1988) [27, 28], JACEE (1979-1994)-Takahashi [29], JACEE (1979-1994)-Asakimori [30], RUNJOB (1995-1999) [31].

1.2 первой главы вводится понятие «стандартной модели» происхождения космических лучей. Под таковой понимаются представления, согласно которым все первичные ядра космических лучей имеют одинаковые степенные спектры жесткости в источнике в сочетании с однородными моделями распространения космических лучей в Галактике. Подавляющее большинство экспериментальных данных до начала нынешнего века хорошо укладывалось в такие представления.

После введения в проблематику физики космических лучей, в первой главе дается детальный обзор состояния экспериментальных исследований энергетических спектров ядер от протонов до железа, в который включены работы с начала 1960-х годов до конца 1990-х, то есть до первого полета спектрометра АТІС. Как уже отмечалось в разделе «Актуальность темы», информация об энергетических спектрах ядер космических лучей к началу нынешнего века была весьма неполна и противоречива, что и отмечается в выводах из проведенного обзора. Для примера, на рис. 1 приведена компи-

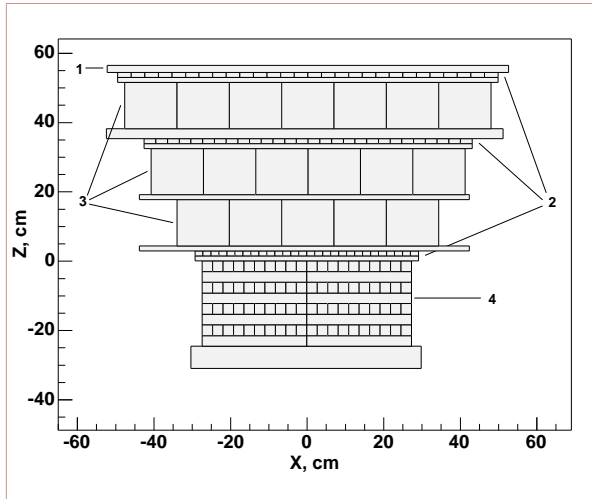


Рис. 2: Схема спектрометра АТІС-2: 1 – кремниевая матрица, 2 – сцинтилляционные годоскопы (сверху вниз: слои S1, S2, S3); 3 – графитовая мишень; 4 – ионизационный ВГО-калориметр.

ления основных результатов прямых измерений для спектра протонов. Видно, что измеренные спектры при энергиях выше нескольких ТэВ находятся в плохом согласии друг с другом, экстраполяция результатов магнитных спектрометров при энергиях до 200 ГэВ плохо выходит на основной массив измерений эмульсионных экспериментов при энергиях выше нескольких ТэВ, при этом в промежутке между энергиями 200 ГэВ и несколько ТэВ имеются данные только двух экспериментов Ryan et al. 1970 [1] и Протон [24, 25], которые находятся в резком противоречии друг с другом. Более того две разные обработки результатов эксперимента Протон, [24] и [25], противоречат друг другу – результаты [24] содержат «колени Григорова» – резкий излом спектра при энергиях масштаба 1 ТэВ, а результаты [25] не содержат такого излома. Поэтому характер сшивки данных магнитных и эмульсионных экспериментов остается непонятным. В завершении первой главы формулируется задача исследования.

Вторая глава посвящена описанию спектрометра АТІС и нескольким тесно связанным с этим вопросам: испытанию спектрометра на пучке в CERN, структуре событий спектрометра и др. Глава начинается с описания эволюции концепции спектрометра на ранних стадиях проекта (1994–1999 гг.), которое дано в разделе 2.1. Собственно конструкция спектрометра описана в разделе 2.2. Спектрометр АТІС (рис. 2) состоит из кремниевой матрицы, построенной из 4480 отдельных кремниевых детекторов-пикселей размером $1.945 \times 1.475 \text{ см}^2$ каждый и предназначенной для определения заряда частиц; мишени, состоящей из трех слоев графита толщиной по 10 см; трех годоскопов, построенных из 202 брусков пластических сцинтилляторов толщиной 1 см и шириной 2 см, расположенных шестью слоями, которые используются для генерации триггеров событий и как дополнительный детектор заряда частиц; полностью активного калориметра, построенного из 320 кристаллов германата висмута ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ – ВГО) размером $25 \times 2.5 \times 2.5 \text{ см}^3$. Кристаллы ВГО в приборе АТІС-2 образуют 8 слоев площадью $50 \times 50 \text{ см}^2$ каждый, причем оси кристаллов в соседних слоях взаимно

перпендикулярны. Глубина калориметра АТІС-2 по вертикали составляет 18 каскадных единиц или 0.9 ядерного пробега протона, толщина мишени вместе со сцинтилляторами годоскопа составляет 1.2 каскадных единицы или 0.75 ядерного пробега протона. 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.

Раздел 2.3 посвящен описанию результатов испытаний спектрометра на пучке в CERN в сентябре 1999 года. В целом, тесты на пучке показали, что компьютерная симуляция прибора с использованием систем GEANT3, GEANT4, FLUKA с достаточно хорошей точностью описывает работу спектрометра при энергиях падающих частиц от 150 ГэВ до 375 ГэВ.

В разделе 2.4 описана структура типичных научных событий в спектрометре АТІС, приводятся «портреты» таких событий для разных ядер и начальных энергий, и описан алгоритм реконструкции траектории частицы. Реконструкция траектории проводится с использованием данных калориметра и кремниевой матрицы и выполняется в три основных шага. На первом шаге траектория восстанавливается только по энерговыделениям в координатно-чувствительном калориметре. Помимо коэффициентов, определяющих проекции траектории на координатные плоскости XZ и YZ , первый шаг алгоритма дает коридоры ошибок, дающие неопределенность положения точки выхода траектории в кремниевой матрице. На втором шаге, с использованием полученных коридоров ошибок, в кремниевой матрице проводится поиск сигнала первичной частицы. В качестве такового выбирается кремниевый пиксел с максимальным сигналом из числа попадающих в коридор ошибок. На третьем шаге проводится уточнение траектории. Процедура выглядит точно так же, как и процедура первого шага, но дополнительно требуется, чтобы траектория прошла через центр пиксела кремниевой матрицы, в котором был найден сигнал первичной частицы.

В разделе 2.5 описаны полеты спектрометра АТІС и объясняется выбор полета АТІС-2 для получения основного массива результатов по спектрам ядер космических лучей. Спектрометр АТІС совершил четыре длительных антарктических полета, стартуя со станции Мак-Мёрдо: АТІС-1 (28.12.2000–13.01.2001), АТІС-2 (29.12.2002–18.01.2003), АТІС-3 (19.12.2005), АТІС-4 (26.12.2007–15.01.2008). Третий полет оказался неудачным из-за повреждения оболочки аэростата, три другие были успешными. Первый полет был тестовым, полеты АТІС-2 и АТІС-4 являются научными. Было показано, что в полетах АТІС-1 и АТІС-4 прибор работал с некоторыми ошибками в формировании претриггера, из-за которых по мере роста энерговыделения в калориметре и заряда частицы возрастала вероятность пропуска событий. Однако в полете АТІС-2 большую часть времени (в общей сложности 11.7 су-

ток) аппаратура работала правильно, и именно данные, собранные за это время, послужили основой настоящей работы. Вопросы, связанные с анализом ошибок претриггера АТЭС в 1-м и 4-м полетах и их коррекцией, более детально рассмотрены в Приложении А. Отмечается, что во всех трех полетах аппаратура работала достаточно корректно в отношении регистрации электронов, которые загружают аппаратуру спектрометра гораздо меньше, чем ядра, поэтому спектры электронов были корректно измерены во всех трех полетах спектрометра АТЭС [8, 9, 10, 11, 12, 13].

В третьей главе диссертации рассматривается круг вопросов, связанных с измерением заряда первичных частиц с использованием кремниевой матрицы: амплитудная калибровка детекторов матрицы и влияние обратных токов (альбедных частиц) на величину определяемого заряда.

Для амплитудной калибровки кремниевой матрицы использовались три разных метода: предполетная калибровка атмосферными мюонами, полетная линейная калибровка по положению пика заряда гелия, и полетно-лабораторная калибровка, использованная для исправления нелинейности счетного тракта, возникающей при больших зарядах первичных ядер. Из этих трех методов первый способ – предполетная мюонная калибровка – имеет низкую точность из-за недостаточной статистики мюонных событий для отдельных кремниевых пикселей, поэтому он использовался только на ранних стадиях проекта при получении самых первых предварительных результатов и в качестве первого приближения для построения гелиевой калибровки, поэтому в диссертации подробно не рассматривается.

В разделе 3.1 описана методика гелиевой калибровки. Идея гелиевой калибровки основана на том, что положение зарядового пика гелия, измеренное каждым отдельным кремниевым пикселем, для всех пикселей должно быть одинаковым. Полетные данные обеспечивают достаточно хорошую статистику сигналов ядра гелия для каждого пикселя, поэтому такая калибровка оказывается статистически достаточно точной.

Гелиевая калибровка предполагает выполнение двух условий: (1) электроника кремниевой матрицы стабильна в течение всего полета и (2) амплитудная характеристика электронных каналов линейна. В разделе 3.2 показано, что электроника обладает требуемой стабильностью, однако предположение (2) оказывается не вполне верным. Счетный тракт кремниевых детекторов начинает проявлять заметную нелинейность в области зарядов больше $15 \div 17e$. В разделе 3.3 описан третий способ калибровки кремниевой матрицы, позволяющий компенсировать эту нелинейность. Этот способ основан на комбинированной полетно-лабораторной калибровке детекторов с использованием полетных генераторов тестовых импульсов.

В разделе 3.4 приводятся основные результаты по зарядовому разрешению, достигнутому с использованием кремниевой матрицы. Результаты,

Таблица 1: Сравнение зарядового разрешения для разных методов калибровки кремниевой матрицы.

Метод	C	O	Ne	Mg	Si	Fe
Гелиевая калибровка	0.32	0.33	0.44	0.41	0.49	—
Нелинейная калибровка	0.32	0.31	0.32	0.36	0.37	0.47

полученные для гелиевой и нелинейной калибровки приведены в табл. 1. Зарядовые спектры, полученные с полной коррекцией нелинейности, показаны на рис. 3 для протонов и гелия и на рис. 4 для различных более тяжелых ядер. Показано, что симуляция хорошо воспроизводит полученное зарядовое разрешение.

В разделе 3.5 обсуждается влияние потока альбедных частиц на определяемую величину заряда первичных ядер. Компьютерная симуляция показывает, что для ядер тяжелее бериллия поправки невелики, а для протонов и гелия обратные токи приводят к небольшой недооценке интенсивностей их потоков, как показано в табл. 2. Хотя поправки малы на фоне других систематических неопределенностей, имеющих в эксперименте, они могут быть получены симуляцией и учитывались в измерениях спектров всех ядер кроме железа, для которого этими поправками можно полностью пренебречь.

В четвертой главе рассматриваются вопросы, связанные с определением энерговыделения в ВГО-калориметре. Здесь имеется два комплекса проблем: во-первых, энергетическая калибровка калориметра; во-вторых, вопросы, связанные с коррекцией термочувствительности калориметра. Решение проблемы температурного дрейфа чувствительности калориметра оказалось критически важным для эксперимента АТІС, так как термочувствительность оказалась существенно выше, чем ожидалось, а полетные колебания температуры и, особенно, разница между полетной температурой и температурой калибровки калориметра, были велики.

В разделе 4.1. описана процедура амплитудной калибровки калориметра. Так как система регистрации энерговыделения в калориметре должна обеспечить динамический диапазон порядка 10^6 для каждого кристалла ВГО, то сигнал ФЭУ снимается с трех различных динодов, что обеспечивает три канала съема информации, обладающих различной чувствительностью — каналы R_0 (самый чувствительный), R_1 (средний) и R_2 (самый грубый). Различие в чувствительности соседних каналов (R_0 и R_1 или R_1 и R_2) составляет величину, определяемую фактором порядка 30–50, но зависит от индивидуальных особенностей каждого ФЭУ. Для полной калибровки калориметра проводилась абсолютная калибровка канала R_0 каждого кристалла по атмосферным мюонам в предполетный период, и затем относительная калибровка канала R_1 к каналу R_0 и канала R_2 к каналу R_1 . Знание абсолютной калибровки R_0 позволяет тогда найти абсолютную калибровку

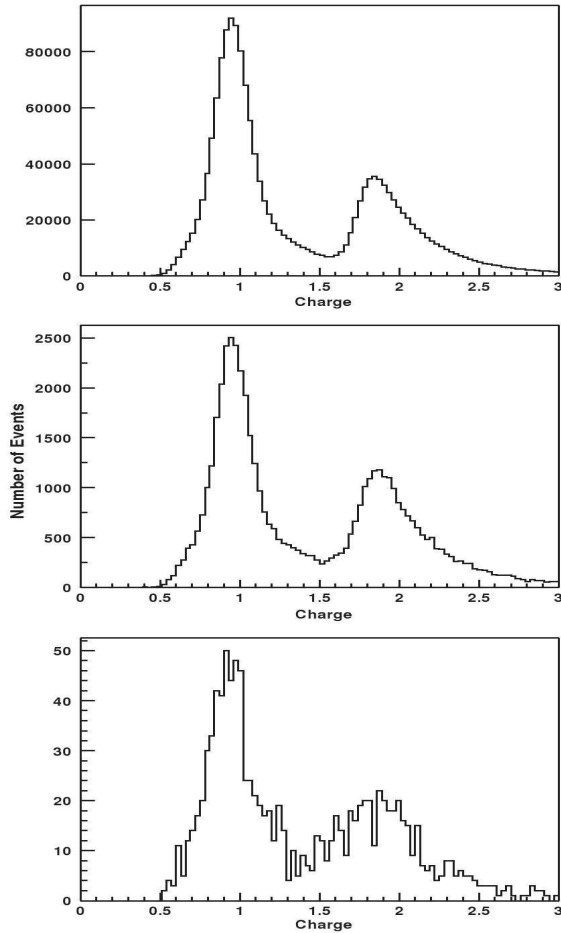


Рис. 3: Зарядовое разрешение для протонов и гелия для трех диапазонов энергий. Верхний график – $E_d > 10$ ГэВ, средний график – $E_d > 100$ ГэВ, нижний график – $E_d > 1000$ ГэВ (энерговыведение E_d для протонов и гелия в среднем составляет $\sim 40\%$ их первичной энергии).

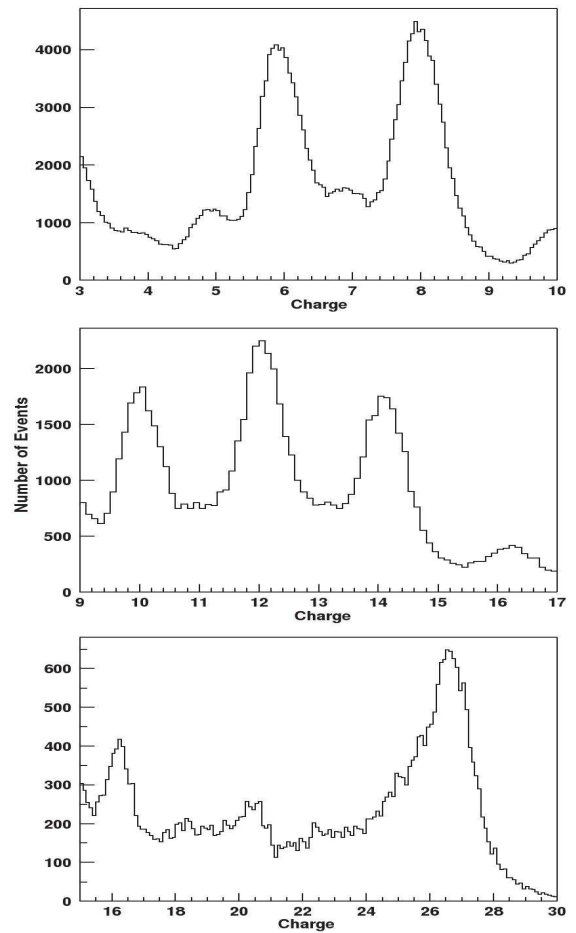


Рис. 4: Зарядовое разрешение для трех различных диапазонов зарядов Z .

также каналов R_1 и R_2 .

В предполетный период прибор находился во включенном состоянии и регистрировал атмосферные мюоны космических лучей. Для каждого кристалла калориметра удалось с достаточно хорошей статистикой измерить характерный пик энерговыведений, связанных с прохождением мюонов. Для каждого кристалла положение мюонного пика (в терминах амплитуды АЦП) было найдено путем аппроксимации его формы методом максимального правдоподобия гауссовой функцией с экспоненциальным фоном и с использованием функции, дающей асимметричное распределение

$$L_{A,B,C}(x) = A \exp[1 - (x - B)/C - \exp(-(x - B)/C)], \quad (1)$$

(Ландау-подобное распределение), также с экспоненциальным фоном. Аппроксимация экспонентой и Ландау-подобным распределением дает отличие в положении пика на уровне 5% от амплитуды. В качестве окончательного значения бралось среднее по обоим методам аппроксимации, что приводит

Таблица 2: Искажение интенсивностей потоков протонов и гелия за счет ошибочной интерпретации сигналов альбедных частиц как сигналов от более тяжелых ядер, в зависимости от энерговыделения в калориметре.

E_d , ГэВ	протоны	гелий
> 10	-1.87%	-0.47%
> 100	-2.29%	-0.60%
> 1000	-2.55%	-0.90%

к оценке систематической ошибки, связанной с методом аппроксимации, в 2.5%.

Для привязки найденных положений мюонных пиков, полученных в терминах амплитуд АЦП, к определенной энергии, с помощью систем GEANT3 [32], GEANT4 [33] и FLUKA [34] был смоделирован однокристалльный пик энерговыделений атмосферных мюонов. Сначала в задаче с простой геометрией было показано, что все системы дают идентичные результаты с точностью 4% по амплитуде пика. Затем с использованием детальной модели прибора АТЭС, построенной с использованием системы GEANT4, пик атмосферных мюонов был промоделирован в реалистичной геометрии. Полученная оценка положения максимума однокристалльного мюонного пика (MIP) дала 23.2 МэВ. Привязка этого значения к найденному максимуму мюонного пика каждого ВГО-кристалла завершает калибровку чувствительных каналов R_0 . Оценка возможной систематической погрешности этой калибровки, и, вместе с тем, точности определения энерговыделения в калориметре, составляет 6%, что и определяет основную систематическую ошибку измерения спектров ядер в эксперименте АТЭС. Такая ошибка в определении энергии эквивалента ошибке в определении интенсивности степенного спектра со спектральным индексом $2.6 \div 2.7$ около 10%.

Междиапазонная калибровка для пар каналов (R_0, R_1) и (R_1, R_2) была проведена с использованием полетных данных, относящихся к записям научных событий, связанных с регистрацией первичных космических частиц. Во многих случаях один и тот же сигнал космической частицы (энерговыделение в кристалле ВГО) удается зарегистрировать сразу в паре каналов — одновременно в R_0 и R_1 или в R_1 и R_2 . Это позволяет сравнить коэффициенты усиления в соответствующих парах.

В разделе 4.2 обсуждаются вопросы, связанные с коррекцией зависимости чувствительности калориметра от температуры. Ввиду критической важности задачи, температурная чувствительность была измерена четырьмя разными способами, которые описаны в подразделах 4.2.1–4.2.4. Все четыре способа основаны на использовании предполетных или полетных данных спектрометра, в них производится калибровка чувствительности калориметра в зависимости от температуры, измеренной бортовыми датчиками, размещенными в различных точках на поверхности калориметра.

Метод 1 основан на наблюдении смещения измеряемого положения пика атмосферных мюонов калориметра в зависимости от температуры, по ре-

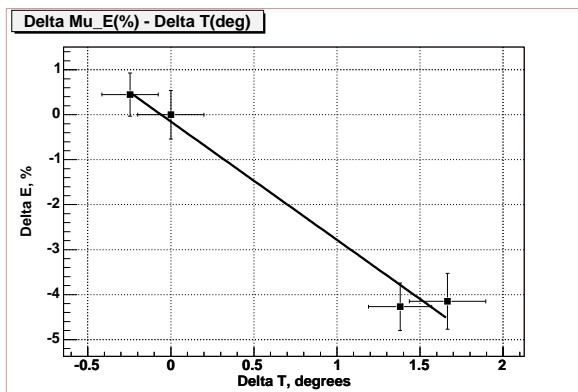


Рис. 5: Метод 1 измерения температурной чувствительности ВГО-калориметра. Зависимость сдвига положения мюонного пика от изменения температуры, измененная по предполетным данным.

результатам предполетных измерений атмосферных мюонов. Были получены 4 точки (рис. 5), по которым и был получен коэффициент температурной чувствительности.

Метод 2 основан на сравнении положения мюонного пика перед стартом и аналогичного однопротонного пика для событий, когда протон проходит весь прибор без ядерного взаимодействия, сразу после набора проектной высоты полета. Этот метод имеет хорошую точность, так как разница температур для измерения мюонного пика и пика протонных событий была велика (10.1C°), но основан на сравнении пиков различной природы.

Метод 3 основан на измерении корреляции суточных колебаний температуры и положения однопротонного и одногелиевого пиков, измеренных по верхнему слою калориметра, для событий с первой точкой ядерного взаимодействия существенно ниже верхнего слоя калориметра.

Метод 4 основан на изучении корреляции суточных колебаний температуры с полной скоростью счета спектрометра выше порога энерговыделения в калориметре 50 ГэВ. Изменение коэффициента усиления калориметра синхронно с температурой приводит к тому, что для разных температур различные части спектра энерговыделений оказываются выше фиксированного порога, что и приводит к изменению полной скорости счета.

Значения температурных коэффициентов, полученные каждым из методов, приведены в табл. 3. Видно, что все результаты согласуются в пределах ошибок, что повышает доверие к полученным значениям. На основании информации от производителей кристаллов ВГО и электроники ожидалось, что термочувствительность счетного тракта калориметра будет примерно втрое ниже измеренных величин. Столь сильное расхождение ожидаемых и полученных величин потребовало измерений с многократно избыточной надежностью, что и было сделано.

Температурные датчики расположены на поверхности калориметра, поэтому показывают температуру именно на его поверхности, но не в объеме. Однако дрейф чувствительности калориметра зависит от некоторой его средней эффективной температуры, а вовсе не от температуры на поверхности. Из-за суточных колебаний температуры, температура в объеме

Таблица 3: Сравнение коэффициентов термочувствительности калориметра, измеренных разными методами.

Метод	Коэффициент термочувствительности, %/градус
Метод 1	-2.63 ± 0.38
Метод 2	-2.62 ± 0.17
Метод 3	-2.33 ± 0.18
Метод 4	-2.66 ± 0.26

калориметра, и, следовательно, его эффективная температура, могут отставать от показаний температурных датчиков. Для правильной коррекции чувствительности калориметра эти отставания должны быть учтены, а для их учета должно быть определено термическое время релаксации калориметра. Эта задача решена в подразделе 4.2.5. Показано, что термическое время релаксации калориметра может быть определено по сдвигу фаз между суточными колебаниями температуры в полете, измеренным по датчикам температуры на поверхности калориметра, и термическим ответом калориметра на эти колебания. По методике, подробно описанной в диссертации, по этому сдвигу фаз термическое время релаксации калориметра было определено как 3.5 ± 0.5 часа, и температурная коррекция данных калориметра проводилась с учетом этого времени релаксации. Температурные коэффициенты чувствительности, измеренные по методам 3 и 4 (см. выше), должны быть рассчитаны с учетом конечного времени температурной релаксации. Эта поправка уже внесена в данные табл. 3.

В пятой главе описана амплитудная калибровка системы сцинтилляционных годоскопов и ее использование в качестве дополнительного детектора заряда и для улучшения зарядового разрешения в области зарядов ядер от Li до Ne. В качестве дополнительного детектора заряда использовался только самый верхний слой сцинтилляторов годоскопа S1 (см. рис. 2). В диссертации детально описана процедура калибровки именно этого слоя сцинтилляторов. Все остальные сцинтилляторы тоже были прокалиброваны, но процедура их калибровки представляет собой упрощенный вариант калибровки верхнего слоя и не требует отдельного описания (включает только пункты 1–3 из приведенного ниже списка).

Процедура калибровки представляет собой многошаговый процесс: 1) калибровка длины затухания света в стрипах; 2) мюонная калибровка; 3) междиапазонная калибровка; 4) коррекция нелинейности; 5) коррекция координатно-зависимой нелинейности. Каждый из шагов описан в отдельном разделе главы 5; в последних двух разделах описан алгоритм улучшения зарядового разрешения с совместным использованием кремниевой матрицы и сцинтилляторов, а также достигнутые результаты.

В разделе 5.1 описана калибровка длины затухания света в стрипах. Для определения законов затухания для каждого стрипа, с использованием предполетных мюонных данных строится зависимость амплитуды мюонно-

го сигнала от продольной (вдоль стрипа) координаты мюона, вызвавшего вспышку. В предположении, что часть фотонов распространяется без поглощения в режиме полного внутреннего отражения от стенок стрипа, а другая часть фотонов приводит к экспоненциально затухающему потоку, экспериментальные кривые аппроксимировались функциями $F + A \exp(-x/\tau)$, где F , A , τ – искомые параметры калибровки затухания (для каждой стороны каждого стрипа отдельно).

Особенность мюонной калибровки сцинтилляторов, описанной в разделе 5.2, состоит в том, что производится калибровка ADC-сигнала каждого ФЭУ, приведенного к центру стрипа с помощью полученной выше калибровки кривой затухания света. В остальном методика калибровки напоминает мюонную калибровку ВГО-кристаллов, но проще ее, так как полученные мюонные пики аппроксимируются только Ландау-подобным распределением (1).

В разделе 5.3 описана междиапазонная калибровка счетных каналов сцинтилляторов. Сигнал ФЭУ снимается с двух различных динодов, что обеспечивает два канала съема информации: R_0 , чувствительный, и R_1 – грубый. Задача междиапазонной калибровки сцинтилляторов напоминает аналогичную задачу для ВГО-кристаллов калориметра, с той разницей, что в первом случае каналов всего два, но связь между ними не линейная, как для разных диапазонов кристаллов ВГО, а квадратичная.

Из-за эффекта насыщения, выход света в сцинтилляторах не связан линейно с величиной dE/dx , поэтому и величина заряда первичной частицы, пропорциональная корню из энергосыделения, без коррекции этой нелинейности будет определена неверно. Процедура коррекции такой нелинейности описана в разделе 5.4. Калибровка нелинейности для каждого ФЭУ (эквивалентно, для каждой стороны сцинтилляционного стрипа) проводится отдельно. Для каждого стрипа отбираются траектории, проходящие через этот стрип, и сравниваются заряды, полученные по кремниевой матрице и по этому стрипу для каждой стороны стрипа отдельно. Для основных обильных ядер тогда получается таблица соответствия истинного заряда (определенного по кремниевой матрице) и заряда, найденного по данному стрипу сцинтиллятора с каждой из его сторон.

После всех проведенных калибровок оказалось, однако, что для ядер с зарядом больше 3 остается еще систематическая зависимость величины определяемого заряда от продольной координаты заряженной частицы в стрипе. Процедура коррекции этой зависимости описана в разделе 5.5.

В разделе 5.6 описан алгоритм определения заряда первичной частицы с использованием одновременно кремниевой матрицы и верхнего слоя сцинтилляторов, и в разделе 5.7 приводятся результаты, достигнутые в отношении зарядового разрешения. Основная решаемая проблема здесь состоит

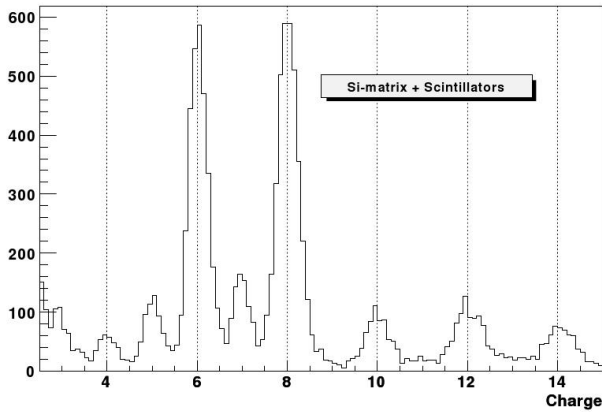


Рис. 6: Зарядовое разрешение для ядер $3 < Z < 15$ для зарядов, найденных по кремниевой матрице вместе с верхним слоем сцинтилляционного годоскопа для условия отбора $|Q_{Si} - Q_{Sci}| < 0.25$. Эффективность отбора 0.25.

в том, что стрипы сцинтилляторов, имея поперечное сечение $2 \times 1 \text{ см}^2$, не являются тонкими, поэтому случаи, когда частица проходит одновременно через два соседних стрипа очень часты. В таких случаях сигнал ионизации для определения заряда должен определяться как сумма сигналов соседних стрипов. Когда заряд по сцинтилляционному годоскопу найден, окончательный результат получается усреднением заряда, найденного по кремниевой матрице и по сцинтилляторам, что улучшает зарядовое разрешение по сравнению с разрешением только кремниевой матрицы. Разрешение можно еще улучшить, если потребовать определенной близости зарядов, определенных по кремниевой матрице и по сцинтилляторам. На рис. 6 показан фрагмент зарядового спектра ядер, полученный с дополнительным условием $|Q_{Si} - Q_{Sci}| < 0.25$. Достигнутое разрешение в области CNO-группы составляет около 0.2 зарядовых единицы, вместо разрешения 0.3 для кремниевой матрицы.

В шестой главе рассматривается задача восстановления спектра энергий частиц по спектру энерговыделений в калориметре (деконволюция). Энергетическое разрешение тонкого калориметра АТЭС составляет величину масштаба 30–40% (зависит от энергии частицы и от типа ядра), поэтому резкие особенности первичных спектров (изломы, бампы) могут быть смазаны в спектре энерговыделений. Для получения исходного спектра энергий с восстановлением его возможных особенностей требуется аккуратное решение обратной задачи. Основным методом решения обратной задачи был метод решения некорректно поставленных задач с использованием регуляризации Тихонова.

Для экспериментальных спектров энерговыделений, записанных в терминах числа событий в логарифмически-эквидистантных энергетических бинах, делящих полный исследуемый диапазон энергий $[E_0, E_{max}]$ на n интервалов, и, спектра первичных энергий, представленного таким же образом, связь между матожиданиями для измеренного спектра M_i и искомого пер-

вичного спектра N_j имеет вид:

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

где i, j – номера энергетических каналов (бинов) спектров, и a_{ij} представляет собой элементы матрицы отклика, которая должна вычисляться путем компьютерной симуляции. Задача поиска величин N_j по измеренным значениям M_i является типичным примером некорректно поставленной обратной задачи.

Осмысленный результат для задачи (2) может быть получен в форме регуляризованного решения, или квазирешения, в терминологии теории некорректно поставленных задач. Показано, что с учетом специфики формы ожидаемого решения (близость к степенной функции с показателем -1.75) метод регуляризации для решения уравнения (2) можно свести к минимизации функционала

$$S(N_1, \dots, N_n) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} N_j - M_i}{\sigma_i} \right)^2 + \tau \cdot \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{\alpha N_{i+1} - 2N_i + \alpha^{-1} N_{i-1}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3)$$

по параметрам N_j . Здесь $\alpha = (E_{i+1}/E_i)^{1.75}$, а E_{i+1} и E_i представляют собой среднегеометрические энергии соответствующих энергетических бинов (α не зависит от i). Величина τ называется параметром регуляризации: чем выше τ , тем сильнее подавляются неустойчивости решения исходной задачи (2), но, в то же время, для слишком больших τ решение будет сильно сглаженным и может потерять важные детали. Показано, что оптимальный параметр регуляризации может быть выбран на основе требования, чтобы величина среднего коэффициента корреляции для точек в соседних каналах реконструируемого спектра равнялась $1/2$.

Метод решения обратной задачи с тихоновской регуляризацией уверенно работает для спектров протонов и ядер гелия, которые хорошо статистически обеспечены. Для спектров ядер тяжелее гелия, для которых статистика во много раз ниже, метод тихоновской регуляризации проявляет признаки неустойчивости, поэтому специально для тяжелых ядер был разработан другой, упрощенный, метод решения задачи деконволюции. Им является метод дифференциальных сдвигов, который уточняет известную методику, основанную на точном скейлинге [35]. В методе дифференциальных сдвигов фактор масштабирования энергии вычисляется для каждой величины энерговыделения E_d отдельно (в отличие от метода точного скейлинга). Для выделенной энергии, равной логарифмическому среднему i -го бина спектра

E_i , первичная энергия восстанавливается по формуле:

$$E_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} E_j K(E_j)}{\sum_{j=1}^n a_{ij} K(E_j)}, \quad (4)$$

где $K(E_j)$ – начальное приближение для первичного спектра. В качестве начального приближения для спектра использовался спектр энергий, соответствующий степенному по импульсу спектру с интегральным показателем $\gamma = 1.6$. Метод дифференциальных сдвигов для тяжелых ядер устойчив, хотя нижний порог реконструированных спектров оказывается 200 ГэВ на частицу против 50 ГэВ в методе решения обратной задачи с регуляризацией.

В седьмой главе описана методика измерения спектров протонов и ядер гелия, приводятся полученные результаты и обсуждение.

Прежде чем процедура деконволюции, описанная в главе 6, сможет быть применена к спектрам энерговыделений протонов и гелия, получаются сами эти спектры энерговыделений. Нетривиальным моментом здесь является правильный учет перекрытия зарядовых линий, который, для протонов и гелия, хоть и не велик, но имеет место, что видно на рис. 3. Учет такого перекрытия является обратной задачей, напоминающей задачу деконволюции, но в данном случае задача имеет устойчивое решение. Для ее решения, с учетом структуры триггера и отбора событий, были симулированы формы зарядовых линий протонов и гелия для нескольких энергий частиц. Существенно, что полученные зарядовые линии учитывают, в том числе, искажение их формы обратными токами и эффективности отбора событий, поэтому реконструкция исходных интенсивностей на их основе адекватно учитывает влияние этих факторов.

Процедура деконволюции (с использованием тихоновской регуляризации) спектра энерговыделений, полученного после описанной выше коррекции, дает первичный спектр на входе в прибор, выраженный в терминах количества отсчетов в логарифмически эквидистантных энергетически бинах. Абсолютный поток для ядер типа j , относящийся к энергетическому бину номер i с границами E_i и E_{i+1} , нормированный на единицу энергии, единичный телесный угол и единицу площади на верхней границе атмосферы, вычисляется по формуле:

$$I_i^{(j)} = \frac{N_i^{(j)}}{\Delta E_i \times S\Omega \times T \times \eta_i^{(j)}} \quad (5)$$

где $\Delta E_i = E_{i+1} - E_i$, $S\Omega$ – геометрический фактор спектрометра, T – живое время экспозиции и $\eta_i^{(j)}$ – фактор коррекции, учитывающий фрагментацию и потерю энергии в остаточной атмосфере для частицы типа j и диапазона энергий от E_i до E_{i+1} . Геометрический фактор был рассчитан методом Монте-Карло как $S\Omega = 0.166 \text{ м}^2 \text{ стер}$, живое время экспозиции составило

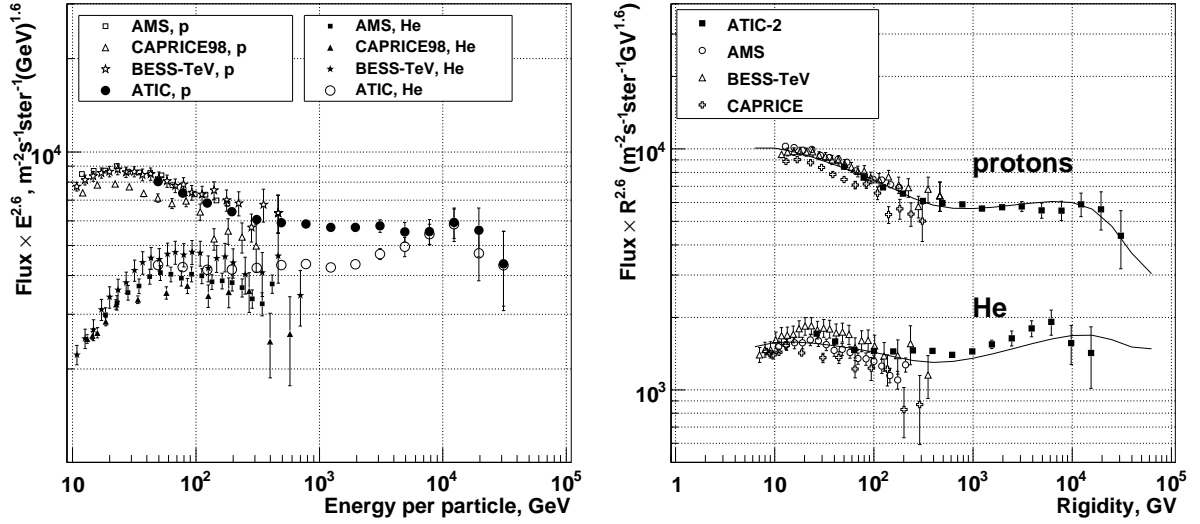


Рис. 7: Спектры первичных протонов и ядер гелия на входе в атмосферу, полученные в эксперименте АТИС-2 и по данным магнитных спектрометров AMS-01 [22, 36], CAPRICE-98 [23] и BESS-TeV [37]. Слева – спектры в терминах энергии на частицу, справа – в терминах магнитной жесткости. Показана также аппроксимация спектров жесткости трехкомпонентной моделью Зацепина-Сокольской [38].

$T = 916020$ сек. Коэффициенты $\eta_i^{(j)}$ вычислены методом Монте-Карло с использованием системы FLUKA на основе симуляции прохождения ядер через атмосферу, выполненной в диссертации К.Е. Батькова [14], для среднеполетной толщины остаточной атмосферы 4.87 г/см^2 . Для протонов и ядер гелия найдены значения $\eta^{(p)} = 0.933$ и $\eta^{(\text{He})} = 0.850$.

Наиболее яркими особенностями полученных результатов (рис. 7) являются различные наклоны спектров протонов и гелия и нестепенной характер спектров. В степенном приближении различие в наклонах спектров протонов и гелия в диапазоне $50 \text{ ГэВ} \leq E \leq 10^4 \text{ ГэВ}$ может быть представлено средним различием в спектральных индексах: $\delta\gamma \approx 0.12$. Можно отметить хорошо заметное нарушение степенного поведения спектра протонов в виде уположения спектра между 200 ГэВ и 300 ГэВ , $\Delta\gamma \approx 0.1$. Спектр гелия также демонстрирует аналогичное уположение, но в данных АТИС оно локализовано несколько хуже, чем в спектре протонов. Последние две высокоэнергетические точки в спектрах как протонов, так и гелия указывают на наличие укрупнения спектров, но этот эффект не является статистически значимым. Результаты АТИС согласуются с данными магнитных спектрометров при низких энергиях и с данными эмульсионных экспериментов при энергиях выше 10 ТэВ и показывают, что данные магнитных спектрометров сшиваются с результатами эмульсионных экспериментов достаточно нетривиальным образом, именно – за счет прогиба спектров протонов и гелия вблизи энергии $200\text{--}300 \text{ ГэВ}$ на нуклон. Указаний на излом спектра протонов вблизи 1 ТэВ (колени Григорова) нет.

В порядке обсуждения результатов показано, что найденное различие наклонов наблюдаемых жестких спектров протонов и гелия практически модельно-независимым образом (в смысле независимости от моделей распространения) означает также различие жестких спектров в источниках космических лучей. Это *эффективно* эквивалентно наличию как минимум двух разных типов источников, отвечающих за ускорение преимущественно протонов, либо преимущественно гелия, и характеризующихся различными спектральными индексами жестких спектров. Реально может иметь место как наличие источников разных типов, так и существование гетерогенных источников космических лучей.

Нестепенной характер поведения спектров протонов и гелия так же может быть указанием на существование различных типов источников космических лучей, причем источников, которые различаются не только химическим составом и наклоном спектров, но и предельной энергией ускорения. Показано, что результаты могут быть разумным образом интерпретированы в рамках трехкомпонентной модели Зацепина-Сокольской [38]. Аппроксимация спектров жесткости протонов и гелия, полученная в рамках этой модели, показана на рис. 7 (правая панель).

В восьмой главе обсуждаются основные результаты эксперимента АТIS для спектров обильных четных ядер тяжелее гелия, спектра всех частиц, энергетической зависимости среднего логарифма атомного веса $\langle \ln A \rangle$; здесь же приведены результаты для отношения потоков В/С, N/O.

Исходным материалом для определения энергетических спектров ядер является количество событий, найденное в «зарядовых ящиках», соответствующих каждому ядру, в каждом из используемых энергетических бинов в терминах энерговыделений в калориметре. Строится методика, в которой совместно определяются спектры ядер от лития ($Z = 4$) до кремния ($Z = 14$). Методика состоит из семи отдельных шагов, представленных в разделе 8.1 (подразделы 8.1.1–8.1.7).

Шаг 1 – Генерация зарядовых диапазонов, зависящих от E_d . Положения зарядовых линий, как они определяются детекторами спектрометра, сдвигаются вправо с ростом энергии частиц, что является следствием релятивистского роста ионизационной способности заряженной частицы с ростом энергии. Этот сдвиг должен быть аккуратно учтен при построении «зарядовых ящиков» для каждого ядра, чтобы избежать неконтролируемого смешивания ядер разного типа при определении спектров. Сдвиг зарядовых линий был прокалиброван на основании экспериментальных зарядовых спектров для разных диапазонов энергий. Для всех зарядов релятивистский сдвиг описан феноменологической формулой

$$Q^Z(E_d) = Q_{100}^Z [1 + \alpha \lg(E_d/100 \text{ ГэВ})], \quad (6)$$

где $Q^Z(E_d)$ – среднее измеренное значение заряда для ядра Z для энерговы-

деления E_d , Q_{100}^Z – измеренный заряд для энерговыделения $E_d = 100$ ГэВ, α – константа (одна и та же для всех ядер Z). Фактор α был определен как 1.2% на одну декаду энергии. Для каждой энергии подвижное положение границ зарядовых ящиков, разделяющих ядра, выбирается ровно на полпути между текущими положениями зарядовых пиков. Число событий $I_{s,q}^0$ в каждом зарядовом ящике q (q изменяется от 4 до 14 для ядер от бериллия до кремния), для каждого энергетического бина s – есть исходные данные для определения потоков первичных ядер ($s = 0$ соответствует диапазону энерговыделений E_d 50–100 ГэВ (1.7–2.0 по логарифму) и т.д. с шагом 0.3 по логарифму энергии).

Шаг 2 – Вычитание фона, производимого протонами и гелием. Сигналы в кремниевой матрице от первичных протонов и гелия могут иногда симулировать более тяжелые ядра, главным образом за счет появления альбедных частиц. Эти эффекты включены в форму зарядовых линий протонов и гелия, которая была симулирована системой FLUKA для получения спектров протонов и гелия в главе 7. Так как потоки протонов и гелия велики по сравнению с потоками ядер тяжелее гелия, то эти эффекты могут создать для таких ядер хоть и не очень большие, но заметные фоны. После вычитания этих фонов получают поправленные значения интегралов в энергетических бинах $I_{s,q}^1 = I_{s,q}^0 - B_{s,q}^{p,He}$.

Шаг 3 – Вычитание фона от группы ядер $Z \geq 15$ для ядер $Z = 4 \div 14$. Частицы с зарядами $Z \geq 15$ могут фрагментироваться в веществе над кремниевой матрицей и давать осколки в диапазоне $4 \leq Z \leq 14$. Для вычитания этого фона из зарядовых линий ядер $Z = 4 \div 14$ была использована компьютерная симуляция формы зарядовой линии для ядра железа и предполагалось, что зарядовые линии других ядер $Z \geq 15$ имеют такую же форму.

Шаг 4 – Ширина и форма зарядовых линий. Линии зарядового спектра в области тяжелых ядер перекрываются, поэтому для измерения энергетических спектров тяжелых ядер, как и для ядер протонов и гелия (глава 7), должна быть задача выделения «чистых» интенсивностей линий отдельных ядер. Для этого путем компьютерной симуляции определяется форма зарядовых линий разных ядер при разных энергиях.

Шаг 5 – Проблема взаимных фонов и решение обратной задачи для перекрытия зарядовых линий. Для каждого первичного ядра с зарядом q , зарядовый отклик прибора может быть описан набором коэффициентов $K_4^q, K_5^q, \dots, K_{14}^q$, где K_4^q означает вероятность обнаружить сигнал от q в зарядовом ящике ядра $Z = 4$ и т. д. Эти коэффициенты вычисляются по симулированным формам зарядовых линий (см. Шаг 4). Пусть F_q есть чистая интенсивность зарядовой линии ядра q , т.е. полное число событий этого ядра, приходящееся на некоторый бин энерговыделения. Тогда для каждого E_d -бина экспериментальная интенсивность I_q^1 после вычитания фона прото-

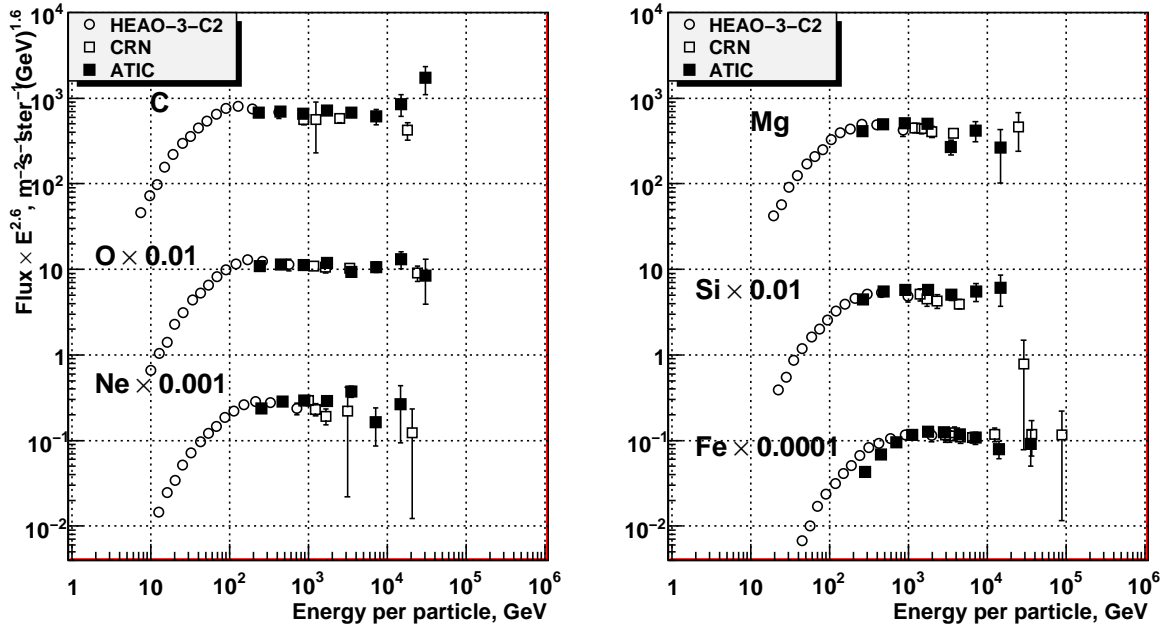


Рис. 8: Спектры тяжелых обильных ядер, полученные при полной статистике с измерением зарядов только кремниевой матрице. Вместе с данными ATIC показаны результаты HEAO-3-C2 [6], CRN [40].

совместном использовании кремниевой матрицы и верхнего слоя сцинтилляторов. Первый метод обеспечивает лучшую статистику, второй работает при лучшем зарядовом разрешении, но из-за дополнительной селекции $Q_{Si} - Q_{Sci} < 0.65$ теряется 40% статистики. Полученные результаты очень близки и служат перекрестной проверкой друг друга. Основным результатом считаются спектры, полученные при бóльшей статистике, с кремниевой матрицей в качестве детектора заряда (рис. 8).

Наиболее интересной и неожиданной особенностью полученных спектров является резкое уположение спектра углерода при энергиях выше 7 ТэВ на частицу (около 600 ГэВ на нуклон). На основании спектра только углерода трудно сказать что-нибудь определенное о существовании реального эффекта. Однако можно измерить спектры групп ядер, что позволит увеличить статистику в спектре. Полученные так спектры групп ядер показаны на рис. 9. Здесь уположение с разной степенью отчетливости видно во всех группах, а в спектре всех ядер $Z \geq 3$ уположение вполне достоверно. Оценка статистической значимости эффекта уположения для спектра ядер в терминах энергии на нуклон дана в главе 9.

В разделе 8.3 та же методика, что была описана для получения спектров отдельных ядер из диапазона $Z = 4 \div 14$, была применена для определения отношения потоков В/С, N/O, С/O. Полученные экспериментальные отношения В/С, N/O эксперимента ATIC, эксперимента HEAO-3-C2 [6] и предсказания двух вариантов модели leaky-box, основанных на раз-

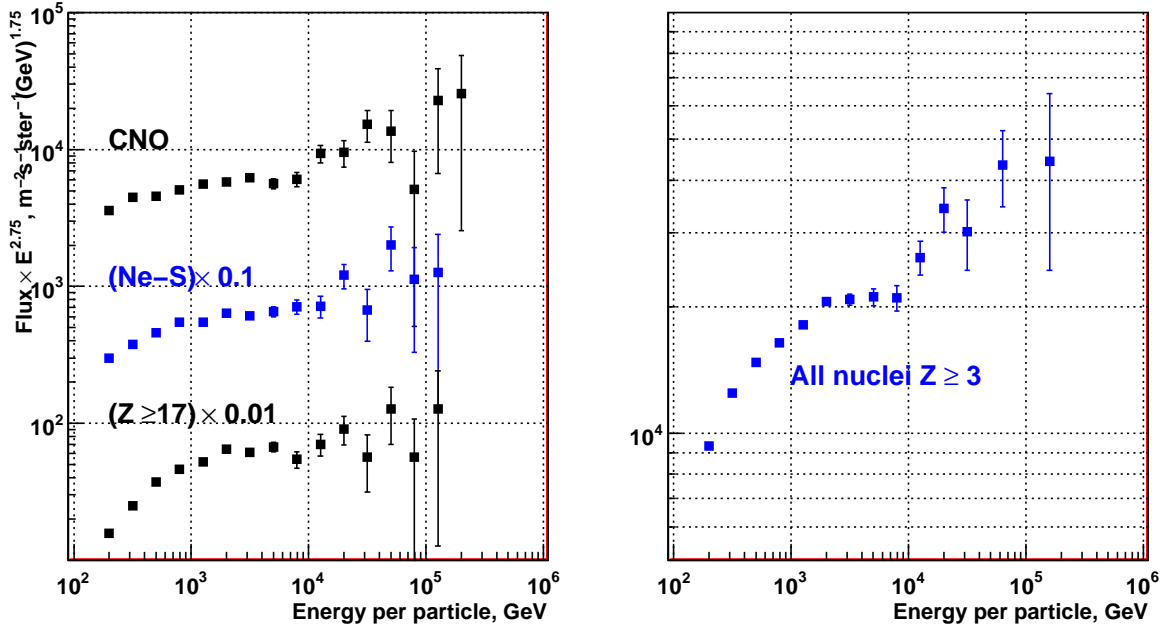


Рис. 9: Спектры групп ядер эксперимента АТИС (энергия на частицу), полученные по упрощенной методике.

ных зависимостях $\lambda_{esc}(R)$, показаны на рис. 10. Пунктирная линия основана на leaky-box модели с длиной утечки, аппроксимирующей данные эксперимента НЕАО-3-С2 [6] $\lambda_{esc} = 34.1\beta R^{-0.60}$ Г см⁻² (R есть магнитная жесткость), а сплошная линия получена для длины утечки, аппроксимирующей данные диффузионного расчета для модели магнитной турбулентности колмогоровского типа и доускорения при распространении [52]: $\lambda_{esc} = 4.2(R/R_0)^{-1/3} [1 + (R/R_0)^{-2/3}]$ Г см⁻², где $R_0 = 5.5$ ГВ. В то время, как экспериментальные данные в основном подтверждают общую тенденцию к уменьшению отношений В/С и N/O с энергией, представленную в обоих моделях, они не позволяют надежно различить две модели из-за недостаточной статистической точности эксперимента (хотя несколько лучше согласуются с моделью с доускорением).

В разделе 8.4 представлены результаты измерений спектра всех частиц и энергетической зависимости среднего логарифма атомного веса (рис. 11). Видно, что спектр всех частиц и спектр среднего логарифма атомного веса, измеренные экспериментом АТИС, непротиворечивым образом переходят в данные экспериментов наземных установок ШАЛ. Зависимость среднего логарифма атомного веса от энергии показывает сложную структуру (достоверный максимум вблизи 2 ТэВ и, возможно, минимум вблизи 8 ТэВ, который определяется со значимостью 1.7 стандартных отклонений). Происхождение этой структуры неизвестно, но можно отметить, что она качественно описывается в трехкомпонентной модели Зацепина и Сокольской [38].

Девятая глава посвящена в основном изучению отношения потоков

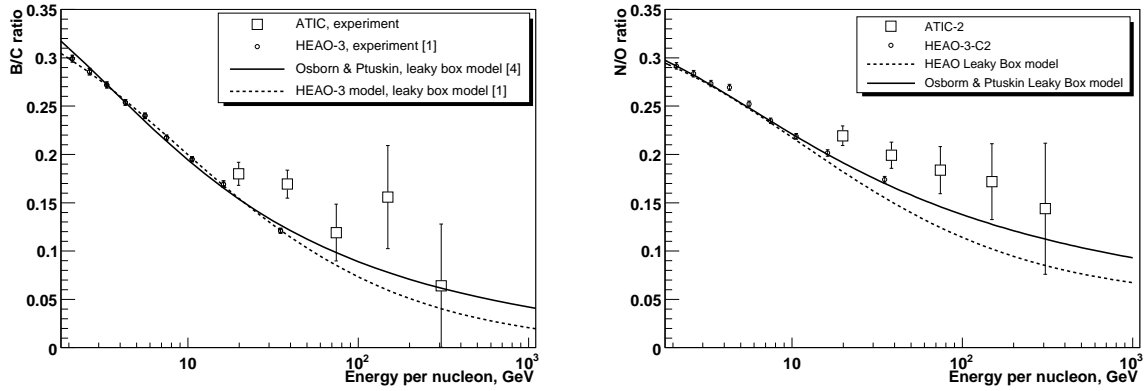


Рис. 10: Отношения В/С, N/O эксперимента АТИС, эксперимента HEAO-3-C2 [6] и двух вариантов leaky-box модели.

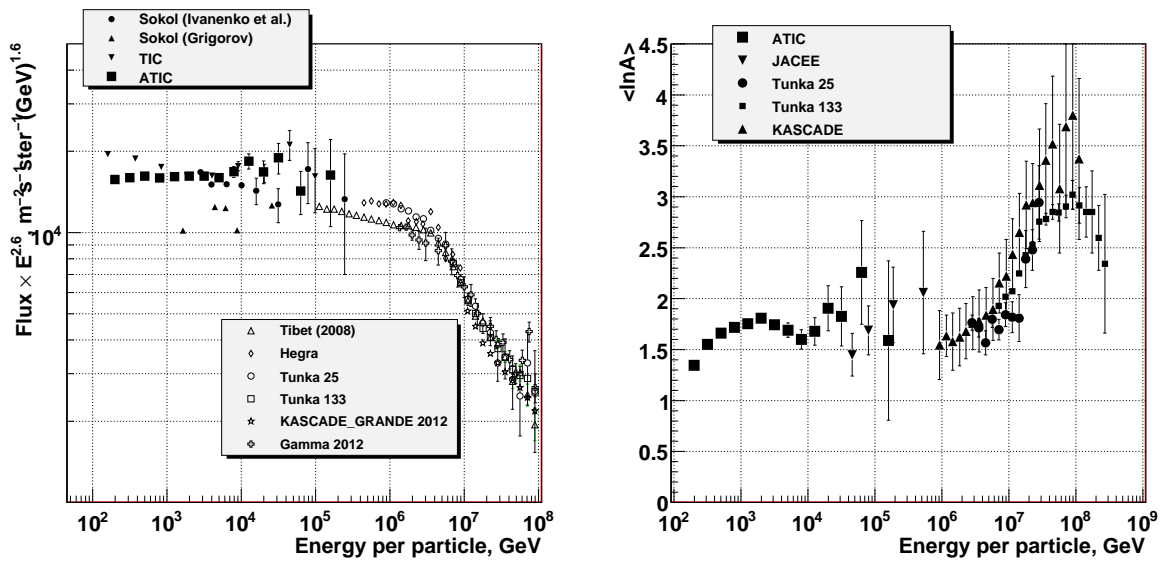


Рис. 11: Слева: спектр всех частиц, измеренный экспериментом АТИС, вместе с результатами некоторых других прямых экспериментов и экспериментов ШАЛ. Прямые эксперименты: Sokol (Ivanenko et al.) [41]; Sokol (Grigorov) [24]; TIC [42]. Эксперименты ШАЛ: Tibet (2008) [43]; Hegra [44]; Tunka 25 [45]; Tunka 133 [46]; KASCADE GRANDE 2012 [47]; Gamma 2012 [48]. Справа: зависимость среднего логарифма атомного веса, измеренная экспериментом АТИС, вместе с результатами некоторых других экспериментов: JACEE [29]; Tunka 25 – [49]; Tunka 133 – [50]; KASCADE [51].

ядер от серы до марганца к потоку железа, но содержит также результаты для отношений потоков обильных тяжелых ядер к потоку железа, поскольку эти две группы вопросов оказались тесно связанными.

Исходной задачей была проверка странных результатов эксперимента HEAO-3-C3 [7] для отношений потоков Ar/Fe и Ca/Fe, где вместо ожидаемого с ростом энергии падения отношений, начиная с энергий больше примерно 100 ГэВ/нукл начинается их резкий рост. При проверке этих результатов эксперимент АТИС встречается с двумя проблемами: во-первых, недостаточное зарядовое разрешение в области зарядов $15 < Z < 26$ затрудняет получение спектров отдельных ядер; во-вторых, для отдельных ядер

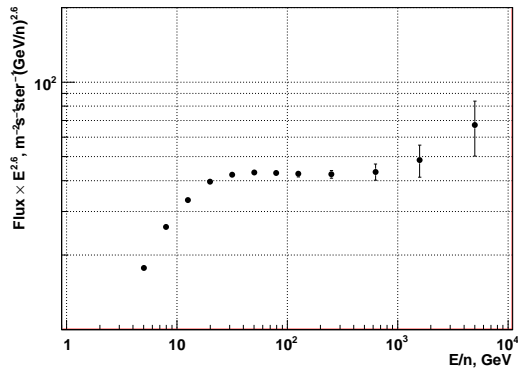


Рис. 12: Спектр в терминах энергии на нуклон для всей области ядер от углерода до железа ($5.5 \leq Z \leq 27$).

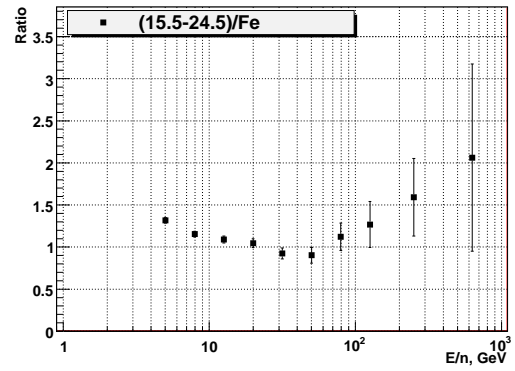


Рис. 13: Отношение спектра $15.5 < Z < 24.5$ к спектру железа, полученное в эксперименте АТЭС-2.

статистика при энергиях больше 100 ГэВ/нукл оказывается недостаточной для получения статистически значимых результатов о поведении отношений потоков этих ядер к потоку железа. Обе проблемы могут быть решены вместе, если вместо спектров отдельных ядер измерить спектры энергии на нуклон сразу для достаточно широких групп ядер, и найти отношение полученных потоков к потоку железа. Соответствующая методика будет тогда проверять, имеет ли место эффект, аналогичный обнаруженному НЕАО-3-СЗ, в спектрах групп ядер.

В разработанной методике измерения спектров энергии на нуклон для групп ядер, измеренный заряд ядра трактуется как непрерывная переменная Z , и на основе интерполяции по средним атомным весам ядер, входящих в группу, атомный вес тоже вводится как непрерывная функция заряда $A(Z)$. Это позволяет любому событию сопоставить энергию на нуклон $\varepsilon = E/A(Z)$ и построить спектр в терминах ε для любого диапазона измеренных зарядов Z .

Для проверки методики этим способом был, прежде всего, получен спектр всех ядер от углерода до железа в терминах энергии на нуклон. Ожидаемой особенностью этого спектра является уположение спектра при энергиях больше приблизительно 500 ГэВ/нукл, и результат вполне подтверждает это ожидание (см. рис. 12). На основе полученного спектра была определена статистическая значимость существования уположения как 97.4%.

На рис. 13 показано полученное по этой же методике отношение потока ядер ($16 \leq Z \leq 24$) к потоку железа. Диапазон ядер ($16 \leq Z \leq 24$) далее будет обозначаться как H^- . Наличие резкого излома отношения H^-/Fe вверх вблизи энергии 50 ГэВ/нукл не вызывает никаких сомнений. Статистическая значимость этого излома оценена как 99.7%. Обнаруженный излом отношения качественно подтверждает результат НЕАО-3-СЗ, но не

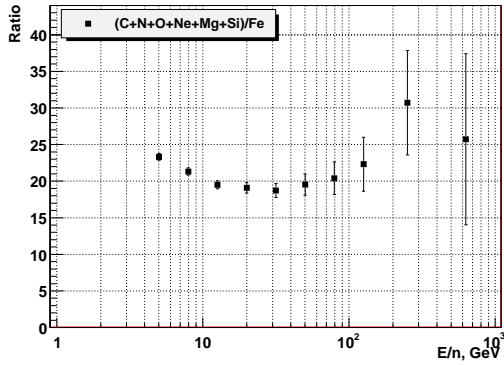


Рис. 14: Отношение потока ядер от углерода до кремния к потоку железа.

для отдельных ядер Ar и Ca, а для группы ядер H^- .

Преждевременно было бы настаивать на связи излома с необычным поведением именно группы H^- . Причина может заключаться также и в укрупнении спектра железа: уменьшение знаменателя может привести к росту всего отношения точно так же, как и рост числителя. Для проверки этой возможности по той же методике были найдены отношения потоков различных групп обильных четных ядер к потоку железа. Действительно, все найденные отношения показывают прогиб с минимумом вблизи 30 ГэВ/нукл (рис. 14), что может указывать на особое поведение спектра железа. Достоверность существования прогиба очень велика.

Вопрос состоит в том, не может ли необычное поведение спектра железа при высоких энергиях, обнаруженное в данных АТЭС, быть аппаратным эффектом? Чтобы исключить эту возможность, проведен ряд специальных тестов, результаты которых практически исключают возможность методической ошибки. Например, найдены отношения спектра группы H^- к спектру железа, измеренному в *других* экспериментах (TRACER и CREAM), причем эти отношения тоже подтверждают существование излома. Эти проверки практически исключают возможность методической ошибки. Таким образом, как излом в отношении H^-/Fe , так и прогиб в отношениях спектров обильных тяжелых ядер в спектре железа, являются не только статистически, но и методически надежно установленными.

В разделе 9.5 показано, что излом в отношении H^-/Fe невозможно понять на основе принятых представлений о распространении космических лучей в однородной Галактике и рассматривается модель, в которой возможность объяснения излома связывается с влиянием неоднородности распределения источников космических лучей и некоторых дополнительных специальных предположений. Эта модель близка модели «замкнутой Галактики» [53], и основные ее предположения состоят в следующем. Предполагается, что подавляющее большинство источников космических лучей сосредоточено в некоторых локальных областях, и Солнце находится внутри одной такой области. На роль таких областей хорошо подходят суперпузы-

ри, образованные взрывами сверхновых в звездных ассоциациях, хотя детальные предположения о природе этих локальных областей не важны для модели. Предполагается, что внутри каждого такого суперпузыря образуется собственный локальный равновесный спектр космических лучей, который описывается моделью leaky-box, примененной к суперпузырю. Далее, предполагается, что вся Галактика в целом является замкнутой относительно диффузионной утечки космических лучей, т. е. длины диффузионной утечки существенно превосходят длины ядерных взаимодействий, при этом источником космических лучей для пространства вне пузырей являются исключительно поверхности пузырей. Тогда наблюдаемые потоки космических лучей будут складываться из двух компонент: локального потока пузыря и части общегалактического потока, проникающего в пузырь. Локальный поток характеризуется падающим отношением спектров вторичных ядер к первичным, а в общегалактическом потоке это отношение сначала растет, а потом выходит на константу (из-за замкнутости Галактики). Результатом может быть отношение, которое сначала падает, потом растет и, наконец, выходит на постоянную величину. Показано, что при выборе подходящего соотношения локального и общегалактического потоков в наблюдаемых спектрах модель с разумной точностью может описать экспериментальные данные.

В десятой главе рассматривается статус результатов АТЭС в свете данных новейших экспериментов. Под новейшими экспериментами понимаются такие прямые эксперименты, которые были проведены, или результаты которых были опубликованы, после завершения эксперимента АТЭС, и результаты которых могут быть сопоставлены с данными АТЭС по спектрам ядер космических лучей. В число таких новейших экспериментов входят CREAM, PAMELA, TRACER, BESS-Polar (I и II) и AMS-02. Основное внимание уделено не просто сравнению спектров, измеренных в разных экспериментах, но статусу новых явлений, обнаруженных в эксперименте АТЭС, в свете данных новейших экспериментов.

В разделе 10.1 приведено краткое описание экспериментов CREAM, PAMELA, TRACER, BESS-Polar и AMS-02.

В разделе 10.2 обсуждается обнаруженное экспериментом АТЭС различие наклонов спектров протонов и гелия. Все без исключения эксперименты: CREAM, PAMELA, TRACER, BESS-Polar и AMS-02 надежно подтверждают этот результат, причем эксперимент PAMELA – двумя различными методами: с использованием магнитного спектрометра и по данным калориметра. В диссертации приводятся рисунки со сравнением спектров и детальные данные по измеренным различиям в спектральных индексах, в том числе – с учетом нестепенного характера спектров протонов и гелия. Различие наклонов спектров протонов и гелия в диапазоне магнитной жесткости

от 30 ГВ до приблизительно 5 ТВ можно считать очень надежно установленным, причем оно имеет место отдельно для различных поддиапазонов этого диапазона; наиболее вероятное различие для среднего спектрального индекса по всему этому диапазону лежит между 0.10 и 0.12.

В разделе 10.3 рассмотрен современный статус нестепенного характера спектров протонов и гелия, открытого в эксперименте АТИС. Нестепенной характер спектров протонов и гелия был прямо подтвержден в эксперименте PAMELA [54], где был обнаружен очень резкий излом спектров вблизи энергии 240 ГэВ/нукл, и косвенно подтвержден экспериментом CREAM [55] по наклону спектров при энергиях выше 1 ТэВ. Однако предварительные результаты эксперимента AMS-02, представленные на 33-й конференции ICRC в 2013 г., находятся в очевидном противоречии с существованием изломов [56]. Ситуация с данными AMS-02 пока не совсем ясна. В частности, можно отметить, что экстраполяция данных AMS-02 в область более высоких энергий не приводит к стыковке с основным массивом результатов при энергиях выше 10 ТэВ.

В разделе 10.4 отмечается, что уположение спектров тяжелых ядер при высоких энергиях подтверждено экспериментом CREAM [55], но результаты TRACER [57, 58] совместимы с чисто степенным поведением спектров при высоких энергиях. Следует отметить, что спектры TRACER содержат очень мало спектральных точек для энергий выше 100 ГэВ (всего по одной точке для спектров С и О в данных [58]) и статистические ошибки таковы, что, фактически, в пределах этих ошибок результаты нельзя говорить о противоречии TRACER результатам АТИС и CREAM.

В разделе 10.5 отношения В/С и N/О эксперимента АТИС сравниваются с результатами CREAM [59], TRACER-LDB2 [58], AMS-02 [60], PAMELA [61]. Статистические ошибки отношения В/С эксперимента АТИС довольно велики, и в пределах этих ошибок результаты АТИС согласуются с результатами всех новейших экспериментов. Для отношения N/О результаты дал только эксперимент CREAM, и результаты АТИС находятся с ним в очень хорошем согласии. В том числе, АТИС дал отношения N/О заметно более высокие, чем эксперимент HEAO-3-C2, и эксперимент CREAM подтвердил эту особенность отношения N/О.

В разделе 10.6 обсуждается излом в отношении спектров тяжелых ядер S-Cr к спектру ядра железа и изгиб в отношении спектров тяжелых обильных ядер к спектру железа, обнаруженные в эксперименте АТИС. Ни один из новейших экспериментов до сих пор не представил прямые данные, которые можно было бы сопоставить с этими результатами АТИС. Однако в результатах эксперимента TRACER [57, 58] имеются спектры S, Ar, Ca, Fe, а также спектры обильных четных ядер. По этим данным могут быть вычислены отношения (S+Ar+Ca)/Fe и O/Fe и т. д., но полученный результат

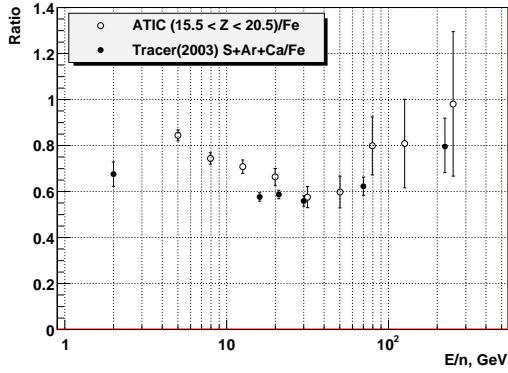


Рис. 15: Отношение $(S+Ar+Ca)/Fe$ эксперимента TRACER-LDB1 [57] и отношение $(15.5 < Z < 20.5)/Fe$ эксперимента ATIC.

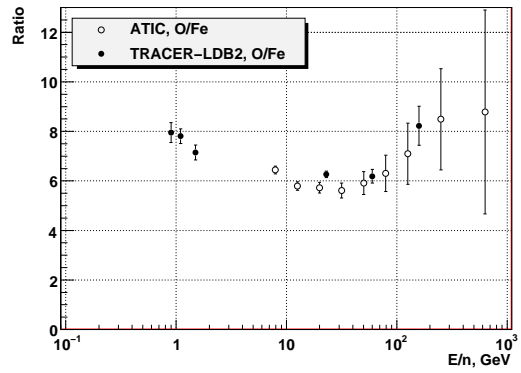


Рис. 16: Отношение спектров кислорода и железа по данным ATIC и по данным TRACER-LDB2 [58].

не будет вполне прямым, так как в таких вычислениях приходится прибегать к интерполяции интенсивности по энергии между опубликованными экспериментальными точками, а такая операция содержит неустраняемую долю произвола. Сравнение полученных таким непрямым способом отношений $(S+Ar+Ca)/Fe$ и O/Fe эксперимента TRACER с отношениями $(16 \leq Z \leq 20)/Fe$ и O/Fe эксперимента ATIC показано на рис. 15 и на рис. 16 соответственно. Видно, что поведение результатов TRACER в обоих случаях очень похоже на поведение результатов ATIC. Таким образом, излом отношения H^-/Fe и изгиб в отношениях обильных ядер к железу подтверждается результатами эксперимента TRACER, но с использованием интерполяции, т. е. не вполне прямым способом.

В разделе 10.7 отмечено, что (пока предварительные) результаты для отношения B/C , полученные в 2013 г. в экспериментах AMS-02 [60] и PAMELA [61], находятся в очень хорошем согласии друг с другом, и при этом не содержат явных особенностей типа излома вблизи энергии 50 ГэВ/нукл. Это очень не похоже на поведение отношения спектров ядер диапазона H^- к спектру железа, наблюдающееся в данных ATIC и, видимо, в данных TRACER и HEAO-3-C3. Причина столь различного поведения отношений B/C и H^-/Fe пока совершенно неясна, и в этих условиях мы считаем, что предложенная попытка понимания излома в отношении H^-/Fe в рамках модели суперпузырей сохраняет значение.

После окончания десятой главы сформулированы **основные результаты диссертации и выводы**. Диссертация также содержит два приложения:

В Приложении А рассмотрены аномалии в работе аппаратуры ATIC в экспериментах ATIC-1, ATIC-4, и на начальном участке полета ATIC-2. Показано, что коррекция данных на основании понимания природы этих аномалий приводит, в главном, к тем же результатам, что и основная часть полетного времени эксперимента ATIC-2. Именно, все эксперименты дают

спектр протонов более крутой, чем спектр гелия, подтверждая один из основных результатов АТИС-2.

В Приложении В обсуждаются четыре теста, предложенных Наумом Леонидовичем Григоровым в «Письме к участникам АТИК-коллаборации» [62]. Тесты должны были, во-первых, независимым от селекции событий методом продемонстрировать наличие излома в спектре протонов вблизи энергии 1 ТэВ, во-вторых проверить алгоритм отбора протонных событий эксперимента АТИС на наличие ошибок. Показано, что тесты первого типа не показывают ожидаемого признака наличия излома, а все факторы, подразумеваемые тестами второго типа, либо учтены при обработке данных АТИС, либо не могут исказить форму определяемого спектра протонов.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. В.И. Зацепин, Дж.Х. Адамс-мл., Х.С. Ан, Дж. Ампе, Г.Л. Башинджагян, Д. Вагнер, Дж.З. Ванг, Дж.П. Вефель, А.Г. Воронин, Дж. Ву, О. Ганел, Р. Гоулд, Д. Гранжер, Р. Гунасингха, Т.Г. Гузик, А. Зигура, Дж. Изберт, Г. Кейс, Т. Кара, Х.Дж. Ким, К.Ц. Ким, С.К. Ким, Е.Н. Кузнецов, И. Квон, Т. Лемчик, М.И. Панасюк, **А.Д. Панов**, Б. Прайс, Г.А. Самсонов, Н.В. Сокольская, М. Сен, Э.С. Сео, Р. Сина, М. Стюарт, А. Топтыгин, С. Убре, А. Фазели, И.Дж. Хан, Дж. Чанг, В.К.Х. Шмидт, С. Эллисон. *Статус эксперимента АТИК*. // Известия Академии Наук; серия физическая, 2001, Т. 65, No. 3, С. 426–429.
2. В.И. Зацепин, Дж.Х. Адамс-мл., Х.С. Ан, Г.Л. Башинджагян, К.Е. Батьков, Дж.З. Ванг, Дж.П. Вефель, А.Г. Воронин, Дж. Ву, О. Ганел, Д. Гранжер, Р. Гунасингха, Т.Г. Гузик, Дж. Изберт, Г. Кейс, Х.Дж. Ким, К.Ц. Ким, С.К. Ким, М. Кристл, Е.Н. Кузнецов, С.А. Накви, М.И. Панасюк, **А.Д. Панов**, Б. Прайс, Г.А. Самсонов, Н.В. Сокольская, Е.С. Сео, Р. Сина, М. Стюарт, А. Фазели, И.Дж. Хан, Дж. Чанг, В.К.Х. Шмидт. *Зарядовое разрешение в эксперименте АТИК*. // Известия Академии Наук; серия физическая, 2002, Т. 66, No. 11, С. 1631–1633.
3. H.S. Ahn, J.H. Adams, G. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, M. Cox, S.B. Ellison, A.R. Fazely, O. Ganel, R. Gould, C.P. Granger, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E. Kouznetsov, A. Malinine, M. Panasyuk, **A. Panov**, B. Price, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, R. Sina, D. Smith, N.V. Sokolskaya, M. Stewart, J.Z. Wang, J. Watts, J.P. Wefel, J. Wu, V. Zatsepin. *ATIC Experiment: Preliminary Results from the Flight in 2002*. 28th International Cosmic Ray Conference. 2003. Tsukuba, Japan. p.1853-1856
4. V.I. Zatsepin, J.H. Adams, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, **A.D. Panov**, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, J.Z. Wang, J.P. Wefel, J. Wu. *Experience of Application of Silicon Matrix as a Charge Detector in the ATIC Experiment*. // 28th International Cosmic Ray Conference. 2003. P. 1857–1860.
5. V.I. Zatsepin, J.H. Adams, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, **A.D. Panov**, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, J.Z. Wang, J.P. Wefel, J. Wu. *Comparison of Measured and Simulated Albedo Signals in the ATIC Experiment*. // 28th International Cosmic Ray Conference. 2003. P. 1861–1864.
6. J.P. Wefel, J.H. Adams, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhangyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, M. Cox, S.B. Ellison, A.R. Fazely, O. Ganel, R. Gould, C.P. Granger, D.

- Granger, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, A. Malinine, M.I. Panasyuk, **A.D. Panov**, B. Price, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, D. Smith, N.V. Sokolskaya, M. Stewart, J.Z. Wang, J. Watts, J. Wu, V.I. Zatsepin. *The ATIC Science Flight in 2002-03: Description and Preliminary Results*. // 28th International Cosmic Ray Conference. 2003. P. 1849–1852.
7. T.G. Guzik, J.H. Adams, H.S. Ahn, G. Bashindzhagyan, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, D. Granger, R.M. Gunasingha, Y.I. Han, J. Isbert, H.J. Kim, K.C. Kim, S.K. Kim, E.N. Kouznetsov, M. Panasyuk, **A. Panov**, B. Price, G. Samsonov, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, R. Sina, N. Sokolskaya, M. Stewart, A. Voronin, J.Z. Wang, J.P. Wefel, J. Wu, V. Zatsepin. *The ATIC long duration balloon project*. // Adv. Sp. Res., 2004, V. 33, P. 1763–1770.
 8. V.I. Zatsepin, J.H. Adams, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, **A.D. Panov**, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, J.Z. Wang, J.P. Wefel, J. Wu. *The silicon matrix as a charge detector in the ATIC experiment*. // Nucl. Instr. Meth. A, 2004, V. 524, P. 195–207.
 9. В.И. Зацепин, Дж.Х. Адамс-мл, Х.С. Ан, К.Е. Батьков, Г.Л. Башинджагян, Дж.З. Ванг, Дж.П. Вефель, Дж. Ву, О. Ганел, Р. Гунасингха, Т.Г. Гузик, Дж. Изберт, К.Ц. Ким, М. Кристл, Е.Н. Кузнецов, М.И. Панасюк, **А.Д. Панов**, Н.В. Сокольская, Э.С. Сио, А. Фазели, Дж. Чанг, В.К.Х. Шмидт. *Энергетические спектры и зарядовый состав галактических космических лучей, измеренные в эксперименте АТИК-2*. // Известия РАН; серия физическая, 2004, Т. 68, No. 11, С. 1593–1595.
 10. К.Е. Batkov, **A.D. Panov**, J.H. Adams, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, J.P. Wefel, J. Wu, V.I. Zatespin. *Deconvolution of energy spectra in the ATIC experiment*. // 29th International Cosmic Ray Conference. 2005, V. 3, P. 353–356.
 11. J.P. Wefel, J.H. Adams, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, **A.D. Panov**, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, J. Wu, V.I. Zatsepin. *Energy Spectra of H and He from the ATIC-2 Experiment*. // 29th International Cosmic Ray Conference. 2005, V. 3, P. 105–108.
 12. Ganel O., H. Adams Jr., H.S. Ahn, J. Ampe, G. Bashindzhagyan G. Case, J. Chang, S. Ellison, A. Fazely, R. Gould, D. Granger, R. Gunasingha, T.G. Guzik, Y.J. Han, J. Isbert, H.J. Kim, K.C. Kim, S. K. Kim, Y. Kwon, M. Panasyuk, **A. Panov**, B. Price, G. Samsonov W.K.H. Schmidt, M. Sen, E.S. Seo, R. Sina, N. Sokolskaya M. Stewart, A. Voronin D. Wagner, J.Z. Wang, J.P. Wefel, J. Wu, V. Zatsepin. *Beam test of the balloon-borne ATIC experiment*. // Nucl. Inst. Meth. A., 2005, V. 552, No. 3, P. 409–419.
 13. Н.В. Сокольская, Дж.Х. Адамс-мл., Х.С. Ан, К.Е. Батьков, Г.Л. Башинджагян, Дж.З. Ванг, Дж.П. Вефель, Дж. Ву, О. Ганел, Р. Гунасингха, Т.Г. Гузик, В.И. Зацепин, Дж. Изберт, К.Ц. Ким, М. Кристл, Е.Н. Кузнецов, М.И. Панасюк, **А.Д. Панов**, Э.С. Сио, А. Фазели, Дж. Чанг, В.К.Х. Шмидт. *Альbedo в эксперименте АТИК: результаты измерений и моделирования*. // ЯФ, 2005, Т. 68, No. 7, С. 1225–1232.
 14. **A.D. Panov**, J.H. Adams Jr., H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, J.P. Wefel, J. Wu, V.I. Zatsepin. *The energy spectra of heavy nuclei measured by the ATIC experiment*. // Adv. Sp. Res., 2006, V. 37, P. 1944–1949.
 15. **А.Д. Панов**, Дж. Х. Адамс, мл., Х.С. Ан, К.Е. Батьков, Г.Л. Башинджагян, Дж. В. Ваттс, Дж. П. Вефель, Дж. Ву, О. Ганел, Т.Г. Гузик, Р.М. Гунасингха, В.И. Зацепин, И. Изберт, К.Ц. Ким, М. Кристл, Е.Н. Кузнецов, М.И. Панасюк, Э.С. Сио,

- Н.В. Сокольская, Дж. Чанг, В.К.Х. Шмидт, А.Р. Фазели. *Элементные энергетические спектры космических лучей по данным эксперимента ATIC-2*. // Известия РАН. Серия Физическая, 2007, Т. 71, No. 4, С. 512–515.
16. **А.Д. Панов**, В.И. Зацепин, Н.В. Сокольская, J.H. Adams, Jr, H.S. Ahn, Г.Л. Башинджагян, J.W. Watts, J.P. Wefel, J. Wu, O. Ganel, T.G. Guzik, R.M. Gunasingha, J. Isbert, K.C. Kim, M. Christl, Е.Н. Кузнецов, М.И. Панасюк, Е.С. Seo, J. Chang, W.K.H. Schmidt, A.R. Fazely. *Измерение энерговыделения сцинтилляционным калориметром в эксперименте ATIC*. // ПТЭ, 2008, No. 4, С. 1–17.
 17. **А.Д. Панов**, N.V. Sokolskaya, J.H. Adams, Jr, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R. M. Gunasingha, T. G.Guzik, J. Isbert, K. C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, J. Watts, J.P. Wefel, J. Wu, V.I. Zatsepin. *Relative abundances of cosmic ray nuclei B-C-N-O in the energy region from 10 GeV/n to 300 GeV/n. Results from ATIC-2 (the science flight of ATIC)*. // 30th International Cosmic Ray Conference, 2008, V. 2, P. 3–6.
 18. J.P. Wefel, J. H. Adams, Jr., H.S. Ahn, G. Bashindzhagyan, J. Chang, M. Christl, A. R. Fazely, O. Ganel, R. M. Gunasingha, T. G. Guzik, J. B. Isbert, K. C. Kim, E. N. Kouznetsov, M. Panasyuk, **A. Panov**, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N. Sokolskaya, J. Watts, J. Wu, V. I. Zatsepin. *Revised Energy Spectra for Primary Elements (H–Si) above 50 GeV from the ATIC-2 Science Flight*. // 30th International Cosmic Ray Conference, 2008, V. 2, P. 31–34.
 19. T.G. Guzik, J.H. Adams, Jr, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, J. Chang, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Isbert, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, M.I. Panasyuk, **A.D. Panov**, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, J. Watts, J.P. Wefel, J. Wu, V.I. Zatsepin. *Enhancing the ATIC charge resolution*. // Adv. Sp. Res., 2008, V. 42, P. 424–430.
 20. J. Isbert, J.H. Adams, H.S. Ahn, G.L. Bashindzhagyan, K.E. Batkov, M. Christl, A.R. Fazely, O. Ganel, R.M. Gunasingha, T.G. Guzik, J. Chang, K.C. Kim, E.N. Kouznetsov, Z.W. Lin, M.I. Panasyuk, **A.D. Panov**, W.K.H. Schmidt, E.S. Seo, N.V. Sokolskaya, JohnW. Watts, J.P. Wefel, J. Wu, V.I. Zatsepin. *Temperature effects in the ATIC BGO calorimeter*. // Adv. Sp. Res., 2008, V. 42, Issue 3, P. 437-441.
 21. **А.Д. Панов**, Дж. Х. Адамс, мл., Х.С. Ан, Г.Л. Башинджагян, Дж. В. Ваттс, Дж. П. Вефель, Дж. Ву, О. Ганел, Т.Г. Гузик, В.И. Зацепин, И. Изберт, К.Ц. Ким, М. Кристл, Е.Н. Кузнецов, М.И. Панасюк, Э.С. Сио, Н.В. Сокольская, Дж. Чанг, В.К.Х. Шмидт, А.Р. Фазели. *Энергетические спектры обильных ядер ПКЛ по данным эксперимента ATIC-2 - окончательные результаты*. // Известия РАН. Серия Физическая, 2009, Т. 73, No. 5, С. 602–605.
 22. В.И. Зацепин, **А.Д. Панов**, Н.В. Сокольская, Дж.Х. Адамс мл., Х.С. Ан, Г.Л. Башинджагян, Дж.В. Ваттс, Дж.П. Вефель, Дж. Ву, Т.Г. Гузик, И. Изберт, К.Ц. Ким, М. Кристл, Е. Н. Кузнецов, М. И. Панасюк, Э. С. Сио, Дж. Чанг, А. Р. Фазели. *Отношение потоков титана и железа в галактических космических лучах по данным эксперимента АТИК-2*. // Письма в Астрономический журнал, Т.35 (2009), No.5, С.377-381
 23. V.I. Zatsepin, **A.D. Panov**, N.V. Sokolskaya. *The experimental constraints on the models of cosmic rays origin inferred from the ATIC data and some other recent experiments*. 32nd International Cosmic Ray Conference, 2011, V. 6, P. 14-17.
 24. В.И. Зацепин, М.И. Панасюк, **А.Д. Панов**, Н.В. Сокольская. *Прямые измерения энергетических спектров и элементного состава галактических космических лучей*. // Вестник Московского университета, Серия 3. Физика и астрономия, 2012, No. 6, С. 25–30.

25. **A D Panov**, N V Sokolskaya, V I Zatsepin, J H Adams, Jr., H S Ahn, G L Bashindzhagyan, J Chang, M Christl, A R Fazely, T G Guzik, J Isbert, K C Kim, E N Kouznetsov, M I Panasyuk, E S Seo, J W Watts, J P Wefel, J Wu. *Upturn observed in heavy nuclei to iron ratios by the ATIC-2 experiment.* // J. Phys.: Conf. Ser., 2013, V. 409, id 012036.
26. **A D Panov**, N V Sokolskaya, and V I Zatsepin. *To the interpretation of the upturn observed by ATIC in heavy nuclei to iron ratios.* // J. Phys.: Conf. Ser., 2013, V. 409, id 012037.
27. **А. Д. Панов**, В. И. Зацепин, Н. В. Сокольская. Рост отношения потоков тяжелых ядер к потоку железа, измеренный в эксперименте АТИС при энергии больше 100 ГэВ на нуклон. Известия РАН. Серия Физическая, 2013, Т. 77, No. 5, С. 681–684.

Список литературы

- [1] M.J. Ryan, J.F. Ormes, V.K. Balasubrahmanyam. // Phys. Rev. Lett. 1972, V. 28, P. 985–988.
- [2] Н.Л. Григоров, В.Е. Нестеров, И.Д. Рапопорт, И.А. Савенко, Г.А. Скуридин. // ЯФ, 1970, Т. 11, С. 1058–1069.
- [3] В.В. Акимов *Изучение энергетического спектра протонов первичных космических лучей на ИСЗ "ПРОТОН-3".* // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 1973.
- [4] Н.Л. Григоров, В.Е. Нестеров, В.Л. Прохин, И.Д. Рапопорт, И.А. Савенко. // Известия АН СССР, сер. физ. 1971, Т.35, No12, С.2443–2445.
- [5] D. Mueller, S.P. Swordy, P. Meyer, J. L'Heureux, J.M. Grunsfeld. // ApJ, 1991, V. 374, P. 356–365.
- [6] J.J. Engelmann, P. Ferrando, A. Soutoul, et al. // Astronomy and Astrophysics, V. 233, 1990, P. 96–111.
- [7] W.R. Binns, T.L. Garrard, M.H. Israel, et al. // ApJ, 1988, V. 324, P. 1106–1117.
- [8] J. Chang, J. H. Adams Jr, H. S. Ahn, et al. // Nature, 2008, V. 456, P. 362–365.
- [9] A.D. Panov, V.I. Zatsepin, N.V. Sokolskaya, et al. // 31th International Cosmic Ray Conference, 2009. URL: <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc0356.pdf>.
- [10] A. D. Panov, V. I. Zatsepin, N. V. Sokolskaya, et al. // In: Proceedings of the Fourteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. Particle Physics at the Year of Astronomy. Ed.: A. I. Studenikin. World Scientific, 2010, P. 256–258.
- [11] А.Д. Панов, Дж.Х. Адамс, мл., Х.С. Ан, и др. // Известия РАН. Сер. Физическая, 2011, Т. 75, No.3, С. 348–351.
- [12] A.D. Panov, V.I. Zatsepin, N.V. Sokolskaya, et al. // Astrophys. Space Sci. Trans., 2011, V. 7, 119-124, 2011.
- [13] A D Panov. // J. of Phys.: Conf. Ser., 2013, V. 409, id 012004.
- [14] К. Е. Батьков. *Энергетические спектры средних и тяжелых ядер по данным стратосферного полёта спектрометра АТИС.* // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2006.
- [15] L.H. Smith, A. Buffington, D.F. Smoot, L.W. Alvarez, M.A. Wahlig. // ApJ, 1973, V. 180, P. 987–1010.

- [16] W.R. Webber, R.L. Golden, S.A. Stephens. // 20th International Cosmic Ray Conference, 1987, V. 1, P. 325–328.
- [17] E.R. Streitmatter, J.S. Stochaj, F.J. Ormes, et al. // 21st International Cosmic Ray Conference. 1990, V. 3, P. 277–280.
- [18] R. Bellotti, F. Cafagna, M. Circella, et al. // Phys. Rev. D, 1999, V. 60, 1999, 052002 (15 pages).
- [19] W. Menn L.M. Barbier, E.R. Christian, et al. // 25th International Cosmic Ray Conference, 1997, V. 3, P. 409–412.
- [20] M. Boezio, P. Carlson, T. Francke, et al. // ApJ, 1999, V. 518, P. 457–472.
- [21] T. Sanuki, M. Motoki, H. Matsumoto, et al. // ApJ. V. 545, 2000, P. 1135–1142.
- [22] J. Alcaraz, B. Alpat, G. Ambrosi, et al. // Phys. Lett. B, V. 490, 2000, P. 27–35.
- [23] M. Boezio, V. Bonvicini, P. Schiavon, et al. // Astropart.Phys. 2003, V. 19, P. 583–604.
- [24] Н.Л. Григоров. // ЯФ, 1990, Т. 51, С. 157–172.
- [25] И.П. Иваненко, В.Я. Шестоперов, Д.М. Подорожный, и др. // Известия Академии Наук, Сер. Физ., 1993, Т.57, №7, С.76–79.
- [26] В.И. Зацепин, Т.В. Лазарева, Г.П. Сажина, Н.В. Сокольская. // ЯФ, 1994, Т. 57, № 4, С. 684–689.
- [27] Y. Kawamura, H. Matsutani, H. Nanjyo, et al. // Phys. Rev. D, 1989, V. 40, P.729–753.
- [28] Y. Kawamura, H. Matsutani, H. Nanjyo, et al. // 21st International Cosmic Ray Conference. 1990, V. 3 (OG Sessions), P. 89–92.
- [29] Y. Takahashi (for the JACEE Collaboration). // Nucl. Phys. B, Proc. Suppl., 1998, V. 60, P. 83–92.
- [30] K. Asakimori, T.H. Burnett, M.L. Cherry, et al. // ApJ, 1998, V. 502, P. 278–283.
- [31] M. Hareyama, V.A. Derbina, V.I. Galkin, et al. // ApJ, 2005, V. 628, P. L41–L44.
- [32] R. Brun, F. Brayant, M. Maire. *GEANT user manual*. // Geneva, CERN, 1984, DD/EE/84-1. (<http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/cernlib>).
- [33] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, V. 53, P. 270–278.
- [34] A. Fassò, A. Ferrari, J. Ranft, P. R. Sala. *FLUKA: a multi-particle transport code*. // In: Computing in High Energy and Nuclear Physics. 2003 Conference (CHEP2003). CERN, INFN, SLAC, 2005. Nos. CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773. (<http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/slac-r-773.html>).
- [35] T.H. Burnett, S. Dake, M. Fuki, et al. // Nuc. Instr. Meth. A, V. 251, Issue 3, P. 583–595.
- [36] J. Alcaraz, D. Alvisi, B. Alpat, et al. // Phys. Lett. B, 2000, V. 494, P. 193–202.
- [37] S. Haino, T. Sanuki, K. Abe, et al. // Phys. Lett. B. 2004, V. 594, P. 35–46 (arXiv:astro-ph/0403704v1).
- [38] V.I. Zatsepin and N.V. Sokolskaya. // A&A, 2006, V. 458, P. 1–5.
- [39] M.M. Shapiro, R. Silberberg, C.H. Tsao. // Space Research XII – Akademic-Verlag, Berlin, 1972. P. 1609–1615.
- [40] S.P. Swordy, J. L’Heureux, P. Meyer, D. Muller. // ApJ, 1993, V. 403, P. 658–662.

- [41] P.I. Ivanenko, D.I. Ya.V. Shestoporov, L.O. Chikova, et al. *Energy Spectra of Cosmic Rays above 2 TeV as Measured by the 'SOKOL' Apparatus*. // 23rd International Cosmic Ray Conference, Vol. 2, 1993, P.17-20.
- [42] Дж. Адамс, Дж. Ли, В.И. Зацепин, М.И. Панасюк, Н.В. Сокольская. // Известия Академии Наук, Сер. Физ., 1997, Т. 61, No.6, С. 1181-1185..
- [43] M. Amenomori, X.J. Bi, D. Chen, et al. // *ApJ*, 2008, V. 678, P. 1165–1179 (arXiv:0801.1803).
- [44] F. Arqueros, J.A. Barrio, K. Bernlöhr, et al. // *A&A*, 2000, V. 359, P.682–694
- [45] E.E. Korosteleva, V.V. Prosin, L.A. Kuzmichev, G. Navarra. // *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 2007, V. 165, P. 74–80.
- [46] S.F. Berezhnev, D. Besson, N.M. Budnev, et al. // 32nd International Cosmic Ray Conference, 2011, V. 1, P. 219–222.
- [47] W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velazquez, K. Bekk, et al. // *Astropart. Phys.* 2012, V. 36, P. 183–194.
- [48] R. Martirosov, A. Garyaka, S. Ter-Antonyan, et al. // 2010, arXiv:1010.6260 [astro-ph.HE].
- [49] N. M. Budnev, O. A. Chvalaiev, O. A. Gress, et al. //2009, *Nucl.Phys.Proc.Suppl.* 2009, V. 190, P. 247–252.
- [50] S.F. Berezhnev, D. Besson, N.M. Budnev, et al. // 32nd International Cosmic Ray Conference, 2011, V. 1, P. 207–210.
- [51] M. Roth, H. Ulrich, T. Antoni, et al. // 28th International Cosmic Ray Conference. 2003. Tsukuba. V. 1, P. 139–142.
- [52] J. L. Osborne, V. S. Ptuskin. // *Sov. Astron. Lett.* 1988, V. 14(2), P. 132–134.
- [53] B. Peters, N.J. Westergaard. // *Astrophysics and Space Science*, V. 48, P. 21–46.
- [54] O. Adriani, G.C. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, et. al. // *Science*, 2011, V. 332, Issue 6025, P. 69-72.
- [55] H.S. Ahn, P. Allison, M.G. Bagliesi, et al. // *ApJ Lett.* 2010, V. 714 P. L89–L93.
- [56] S. Haino, on behalf of the AMS Collaboration. // 33th ICRC, 2013, Rio-de-Janeiro, ID-1265, URL:
<https://143.107.180.38/indico/contributionDisplay.py?contribId=1265&sessionId=3&confId=0>.
- [57] M. Ave, P.J. Boyle, F. Gahbauer, et al. // *ApJ*, 2008, V. 678, P. 262–273.
- [58] A. Obermeier, M. Ave, P. Boyle, et al. // *ApJ*, 2011, V. 742, id 14, 11pp. (arXiv:1108.4838).
- [59] H.S. Ahn, P.S. Allison, M.G. Bagliesi, et al. // *Astropart. Phys.* 2008, V. 30, P. 133–141.
- [60] A. Oliva, on behalf of the AMS Collaboration. // 33th ICRC, 2013, Rio-de-Janeiro, ID-1266, URL:
<https://143.107.180.38/indico/contributionDisplay.py?contribId=1266&sessionId=3&confId=0>.
- [61] V. Formato, N. Mori, R. Carbone, et al. (PAMELA collaboration). // 33th International Cosmic Rays Conference, 2013, ID0538 (to be pulished).
<https://143.107.180.38/indico/contributionDisplay.py?contribId=538&sessionId=3&confId=0>.
- [62] Н.Л. Григоров. // В кн.: Н.Л. Григоров. Избранные труды по физике космических лучей. Сборник статей. С. 121–124.