

На правах рукописи

Колдобский Сергей Александрович

**СПЕКТРЫ ДЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ЗЕМЛИ**

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Автор



Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор НИЯУ МИФИ
Воронов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: **Свертилов Сергей Игоревич**, доктор физико-математических наук,
профессор, заместитель заведующего кафедрой физики космоса физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Безруков Леонид Борисович, доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией гамма-астрономии и реакторных нейтрино Института ядерных исследований РАН

Ведущая организация: **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

Защита состоится «17» февраля 2016 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 8 (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/dissertations>

Автореферат разослан « » декабря 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор



С. Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа посвящена исследованию спектров дейтронов и отношений их потока к потоку протонов для частиц галактических космических лучей (ГКЛ) и частиц возвратного альбедо на основе анализа данных спутникового эксперимента ПАМЕЛА. Результаты работы важны для уточнения параметров, используемых в моделях распространения ГКЛ, а также для изучения процессов генерации дейтронов альбедного излучения в магнитосфере Земли.

По современным представлениям [1], первичные ГКЛ (в основном, протоны и альфа-частицы) образуются в астрофизических источниках и распространяются в межзвездной среде. При этом химический состав космических лучей (КЛ) отражает состав материи их источников. При распространении протонов и альфа-частиц в результате ядерных реакций с межзвёздным веществом, состоящим, в основном, из атомарного и молекулярного водорода [2], образуются вторичные ГКЛ, в частности, дейтроны и гелий-3, которые практически отсутствуют в спектре источников первичных ГКЛ.

Таким образом, совместное исследование первичной и вторичной компонент ГКЛ, в частности, протонов и дейтронов, позволяет понять особенности распространения КЛ через межзвёздное вещество (в частности, можно определить среднюю толщину вещества, проходимую КЛ до взаимодействия, а также химический состав вещества межзвездной среды).

Дейтроны альбедо рождаются в результате взаимодействия частиц ГКЛ с веществом верхних слоев атмосферы, после чего под влиянием магнитного поля Земли они попадают в различные области ее магнитосферы [3]. Экспериментальные измерения потоков дейтронов альбедо помогают ответить на вопрос, какие процессы приводят к их генерации. Эти измерения нужны также и для корректных расчетов при оценке радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве.

Объем и качество накопленных к началу эксперимента ПАМЕЛА данных по измерению потоков галактических и альбедных дейтронов не позволяли решить поставленные выше задачи с требуемой для этого точностью. Кроме того, результаты были противоречивы – наблюдался значительный разброс между результатами измерений спектров дейтронов, полученных разными научными группами.

Искусственный спутник Земли (ИСЗ) "Ресурс-ДК1", на котором установлена научная аппаратура эксперимента ПАМЕЛА, был выведен на орбиту в июне 2006 года и успешно работает вплоть до настоящего времени. Экспериментальная аппаратура состоит из нескольких детекторных систем, информация с которых позволяет достоверно идентифицировать зарегистрированные частицы. Следует отметить тот факт, что эксперимент ПАМЕЛА проводится за пределами атмосферы, поэтому на результаты измерений не влияет её остаточный слой. Известно, что учет его влияния был достаточно сложной задачей при интерпретации результатов проведенных ранее аэростатных экспериментов, которые составляли большую часть из всех проведенных экспериментов по измерению потоков дейтронов КЛ.

Основными научными целями космического эксперимента ПАМЕЛА являются поиск антиматерии и следов гипотетической темной материи в КЛ, а также измерения потоков протонов, ядер гелия и других частиц в широком интервале энергий [4]. Однако возможности экспериментального комплекса и использование оригинального метода идентификации позволяют также провести анализ изотопного состава легких ядер КЛ.

Исследования характеристик потоков галактических и альбедных дейтронов, выполненные в ходе эксперимента ПАМЕЛА, были проведены в энергетическом диапазоне 70 – 650 МэВ/нуклон (в интервале 70 – 90 МэВ/нуклон полученные результаты являются уникальными), при этом статистическая обеспеченность полученных результатов в 2 – 3 раза выше по сравнению с последними данными других экспериментов. Это делает полученные результаты наиболее точными и

достоверными к настоящему моменту времени и более всего подходящими для совершенствования теоретических аспектов современной астрофизики, что и обуславливает актуальность выбранной тематики диссертационной работы.

Цель работы. Целью работы является разработка метода идентификации дейтронов в условиях интенсивного фона протонов и восстановление с помощью этого метода их спектров и отношений их потоков к потокам протонов в различных геомагнитных областях, соответствующих различной природе регистрируемых частиц, по данным эксперимента ПАМЕЛА.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан новый метод разделения изотопов водорода на интенсивном фоне других частиц, совместно использующий измерения скорости и жесткости частиц, а также измерения их энерговыделения в многослойной детекторной системе. При этом используется корреляционный многопараметрический анализ, позволяющий с высокой надежностью определить состав и энергетический спектр изотопов водорода КЛ;

- впервые в одном эксперименте измерен дифференциальный энергетический спектр дейтронов и отношение потоков дейтронов и протонов в диапазоне кинетических энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон в ГКЛ и в возвратном альбедном излучении. В указанном диапазоне энергий полученные результаты являются наиболее точными на сегодняшний день. Кроме того, результаты проведенных ранее экспериментов были получены лишь в части изученного в настоящей работе диапазона энергий. Полученные результаты по спектрам дейтронов ГКЛ весьма востребованы для уточнения моделей рождения и распространения КЛ. В частности, они позволяют оценить среднюю толщину вещества, проходимую КЛ до взаимодействия [5], а новые результаты по спектру дейтронов возвратного альбедо важны для проверки существующих гипотез формирования потоков дейтронов альбедо [3] и для корректной оценки радиационной обстановки в окрестности Земли.

Результаты, выносимые на защиту:

- новый метод идентификации дейтронов на интенсивном фоне других частиц посредством многопараметрического корреляционного анализа данных различных детекторов эксперимента ПАМЕЛА;

- результаты измерений дифференциального энергетического спектра дейтронов и энергетической зависимости отношения потока дейтронов к потоку протонов в диапазоне кинетических энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон в ГКЛ и под внутренним радиационным поясом Земли (частицы возвратного альбеда).

Практическая значимость работы: Разработанный метод идентификации дейтронов может быть использован в других экспериментах, где необходимо эффективное выделение полезных событий при наличии превосходящего на порядки фона других частиц. Результаты измерений энергетического спектра дейтронов могут быть использованы при совершенствовании моделей генерации и распространения КЛ, а также при оценке радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве.

Достоверность полученных результатов измерений обеспечивается результатами моделирования отклика детекторов методом Монте-Карло с использованием программного пакета Geant4, использованием данных тестовых калибровок детекторов научной аппаратуры ПАМЕЛА на ускорителе SPS в ЦЕРН, ежедневными полетными калибровками детекторов, а также подтверждается согласием полученных результатов измерений с предсказаниями ряда теоретических моделей.

Вклад автора. Вынесенные на защиту результаты получены автором лично либо при его определяющем участии.

Апробация работы.

Результаты работы были представлены на 32-й и 33-й Всероссийских конференциях по космическим лучам в 2012 г. (Москва) и в 2014 г. (Дубна), 22-м

и 23-м Европейских симпозиумах по космическим лучам в 2012 г. (Москва) и в 2014 г. (Киль, Германия), 37-й Международной конференции по физике высоких энергий в 2014 г. (Валенсия, Испания), Международных сессиях-конференциях Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук «Физика фундаментальных взаимодействий» в 2013 г. (Протвино) и 2014 г. (Москва), 40-й Научной ассамблее Международного комитета по исследованию космического пространства (COSPAR/КОСПАР) в 2014 г. (Москва), 7-й, 8-й и 10-й Курчатовских молодежных научных школах в 2009, 2010 и 2012 гг. (Москва), Научных сессиях НИЯУ МИФИ в 2010, 2012 – 2015 гг. (Москва), II Международной молодежной научной школе «Современные проблемы физики и технологий» в 2013 г. (Москва).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 7 в журналах из перечня ВАК. 6 публикаций включены в библиографические базы данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 55 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 125 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приводится общая характеристика работы, обосновывается важность и актуальность поставленной задачи.

Глава 1 «Происхождение дейтронов в космических лучах» содержит обзор работ, в которых обсуждаются процессы рождения и распространения дейтронов КЛ в межзвездном пространстве (МП) и гелиосфере, а также в области магнитосферы Земли. Обсуждаются вопросы происхождения дейтронов, регистрируемых в околоземном пространстве.

Дейтроны ГКЛ, регистрируемые в эксперименте ПАМЕЛА в полярных областях, достигают Земли после их рождения и распространения в Галактике. По современным представлениям [1, 2], в отличие от протонов и альфа-частиц, источниками которых являются астрофизические источники (в частности, взрывы сверхновых), дейтроны, наряду с некоторыми другими более тяжелыми ядрами, имеют вторичную природу. Это означает, что они рождаются в результате взаимодействия между первичными ГКЛ (протонами и альфа-частицами) с межзвёздным веществом.

Поэтому измерение дейтронного спектра и его сравнение со спектром протонов и альфа-частиц необходимо для понимания процессов, происходящих при распространении КЛ в МП, а также для оценки некоторых параметров среды распространения – например, длины пробега первичных частиц ГКЛ до взаимодействия с веществом МП.

Дейтроны возвратного альbedo, регистрируемые в эксперименте ПАМЕЛА вне полярных зон, имеют другую природу: они образуются в результате процессов взаимодействия частиц ГКЛ с веществом верхних слоев атмосферы. Формирование их потоков происходит в результате последующего движения в магнитном поле Земли [3]. Полученные в настоящей работе результаты позволяют существенно повысить качество верификации моделей этих процессов.

Глава 2 «Обзор экспериментов по исследованию дейтронов космических лучей» представляет собой анализ современных экспериментальных результатов по измерению потоков дейтронов в КЛ.

К началу эксперимента ПАМЕЛА уже был накоплен некоторый объем экспериментальных данных по измерению спектра дейтронов ГКЛ [6, 7]. Однако их точность и достоверность представлялась невысокой, при этом наблюдалась взаимная противоречивость значительного числа данных. Кроме того, несколько экспериментов было проведено на аэростатах (в частности, серия экспериментов BESS [7]), когда значительная доля регистрируемых дейтронов рождается при взаимодействии частиц КЛ с веществом атмосферы, что вносит в анализ

достаточно сложную дополнительную задачу по оценке количества вторичных дейтронов.

Что касается дейтронов альбеда, то к началу эксперимента ПАМЕЛА измерение их спектра в области энергий свыше 90 МэВ/нуклон было осуществлено только в эксперименте AMS-01 [6]. Этих результатов было недостаточно для однозначной верификации моделей рождения альбедных дейтронов [3].

Глава 3 «Эксперимент ПАМЕЛА» посвящена подробному описанию научной аппаратуры – устройству и характеристикам детекторных систем, системе приёма информации со спутника и структуре обработки данных.

Схема научной аппаратуры ПАМЕЛА [4] показана на рис. 1. Она включает:

- магнитный спектрометр (МС), состоящий из постоянного магнита и сборки микроstriповых детекторов, помещенных внутри магнитного поля;
- времяпролетную систему (ВПС) на основе сцинтилляционных детекторов С1, С2, С3;
- калориметр;
- сцинтилляционный детектор утечки ливня (С4);
- нейтронный детектор;
- систему детекторов антисовпадений (АС).

Ниже приведено краткое описание МС и ВПС, поскольку при дальнейшем анализе событий в основном использовалась информация этих двух детекторных систем.

Магнит создает внутри рабочей области практически однородное постоянное магнитное поле со средней индукцией 0.43 Тл. Сборка микроstriповых детекторов, называемая трекером [8], состоит из шести слоёв (каждый толщиной 300 мкм) тонких двухсторонних микроstriповых кремниевых детекторов, образующих позиционно-чувствительный датчик, позволяющий восстанавливать траектории пролетающих частиц.

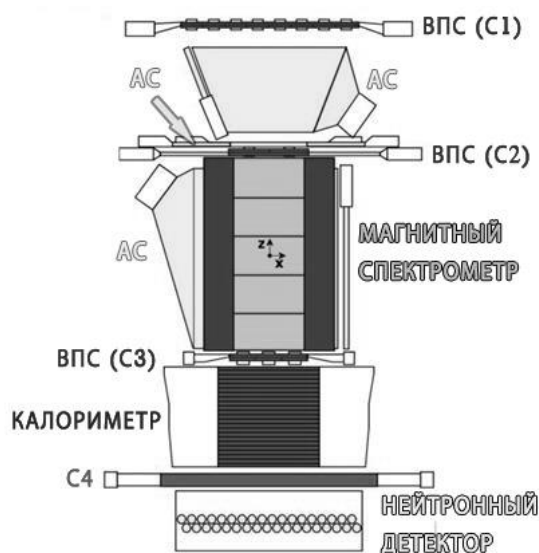


Рисунок 1. Схема прибора ПАМЕЛА.

Времяпролетная система [9], используемая для определения скорости регистрируемых частиц, состоит из трёх сдвоенных детекторов из пластического сцинтиллятора Viscon BC-404 (в верхней части прибора, перед входом в магнитный спектрометр и после него). Для формирования сигнала используются фотоэлектронные умножители Hamamatsu R5900. Временное разрешение времяпролетной системы составляет 250 пс. Детекторы ВПС состоят из полос, что делает их позиционно-чувствительными.

Одновременно детекторы трекера и ВПС способны производить измерения ионизационных потерь заряженных частиц.

Запись событий в память прибора выполняется по триггерному сигналу, вырабатываемому при регистрации частиц детекторами ВПС.

В *Главе 4* «Обработка данных» обсуждаются вопросы отбора событий, подлежащих дальнейшей обработке. Анализируется необходимость «базового» отбора для выделения событий с корректно измеренными характеристиками зарегистрированных частиц, приведены критерии «базового» выделения. Исследуется вопрос стабильности работы экспериментальной аппаратуры.

Рассмотрен также ряд вопросов, связанных с возможным искажением результатов измерений, исследование которых проводилось с использованием моделирования методом Монте-Карло процессов регистрации частиц аппаратурой комплекса ПАМЕЛА, а именно:

- **занижение экспериментально измеренной жесткости.** Суть этого эффекта состоит в отличии реальной жесткости проходящей через детектор частицы от её измеренного в трекаре значения. Происходит это вследствие потерь энергии частицы в детекторах С1 и С2 ВПС и трекара, в результате чего энергия частицы уменьшается, и она сильнее отклоняется магнитным полем. Поэтому измеренный радиус кривизны траектории уменьшается, и измеренная жесткость частицы оказывается меньше истинной. Чем меньше жесткость частицы, тем больше будут потери частиц на ионизацию и сильнее будет указанный эффект.

- **влияние ядерных взаимодействий на прохождение частиц** различной жесткости в трекаре и детекторах времяпролетной системы. В их результате может происходить как увеличение, так и уменьшение количества зарегистрированных дейтронов и протонов различной энергии вследствие ядерных взаимодействий регистрируемых частиц КЛ с веществом прибора. При этом детально учитывалась геометрия и материалы детекторных систем (с учетом, помимо собственно детекторов, также и материалов блоков электроники, конструкционных элементов, защитных кожухов и стенок гермоконтейнера, в котором находится аппаратура эксперимента).

В Главе 5 «Метод идентификации дейтронов» описан предложенный автором способ идентификации дейтронов при их регистрации на фоне интенсивных потоков других частиц, а также определения эффективности отбора и идентификации.

Метод основан на одновременном использовании и анализе следующих независимо измеряемых характеристик частиц:

- жесткости частицы, определенной МС;

- так называемого «усеченного» [А4] среднего энерговыведения в трекаре; усреднение производится по амплитудам в детекторах трекара, а «усечение» исключает при вычислении средней амплитуды сигнала два её максимальных значения;

- энергосвечения в каждом из 6 детекторов ВПС;
- скорости частицы, измеренной ВПС.

На первом этапе анализировалась зависимость «усеченных» средних потерь энергии в трекаре от жесткости частиц для всего набора событий (рис. 2, слева), на которой отчетливо видны перемешивающиеся области локализации различных частиц. Затем были рассмотрены «сечения» этой диаграммы для узких интервалов жесткости. Оказалось, что надежная идентификация дейтронов на них затруднена по причине конечного энергетического и пространственного разрешения детекторов и доминирующего по интенсивности протонного фона (равно как и на подобных распределениях по скорости частиц и энергосвечению в детекторах ВПС). Для подавления этого фона и определения числа зарегистрированных дейтронов применялся разработанный в настоящей диссертации метод. В распределениях по «усеченным» средним энергетическим потерям для узких интервалов жесткости выделялись области локализации дейтронов с использованием двух граничных значений «усеченного» среднего энергосвечения (минимального и максимального), отделяя таким образом протоны слева и изотопы гелия справа. Далее рассматривались распределения по величине обратной скорости частиц ($1/\beta$) для набора событий, имеющих значение «усеченного» среднего энергосвечения между граничными. Поскольку скорость частицы и её потери энергии измеряются независимо, то в новом наборе событий протоны и гелий должны быть подавлены и дейтронный пик в распределениях по величине $1/\beta$ станет более явно различимым. Оптимальные граничные значения энергосвечения устанавливались на базе анализа данных монте-карловского моделирования. Они выбирались таким образом, чтобы потери дейтронов были минимальны при максимальном подавлении фона протонов и более тяжелых ядер (рис. 2, справа). После выбора граничных значений энергосвечений для всего исследуемого диапазона жесткостей 0.5 – 3.0 ГВ их наборы были аппроксимированы гладкими функциями, после чего эти функции были применены к полетному набору данных для отделения дейтронов от других

частиц. Для дальнейшего анализа отбирались события, расположенные между кривыми, описанными рассчитанными функциями.

Для отобранных таким образом событий для узких интервалов жесткости строились распределения по величине $1/\beta$, на которых проводилась окончательная идентификация частиц. Серая гистограмма на рис. 3 является примером такого распределения для интервала жесткостей 1.4 – 1.5 ГВ. Видно, что использование граничных значений для распределения энерговыделения в треке позволило подавить протонный фон на 2 порядка, что значительно улучшило надежность идентификации дейтронов. Для более сильного подавления протонного фона по аналогичной процедуре были использованы распределения по энерговыделениям в детекторах ВПС, что позволило добиться подавления фона протонов еще на порядок (рис. 3, черная гистограмма). Как видно, количество дейтронов практически не изменялось для всего исследуемого интервала жесткостей, что говорит о корректности выбранных значений граничного энерговыделения.

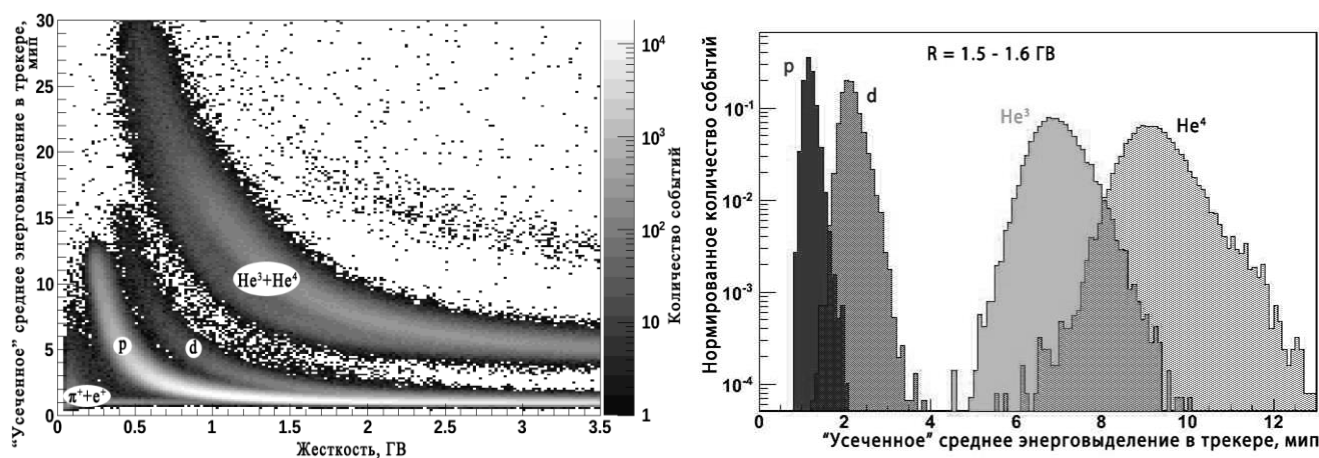


Рисунок 2. Слева: зависимость «усеченных» средних потерь энергии в треке от жесткости частицы для полетных данных. Справа: распределения по «усеченным» средним потерям энергии в треке для изотопов водорода и гелия в интервале жесткостей 1.5 – 1.6 ГВ для данных моделирования, площадь каждого из распределений нормирована на единицу.

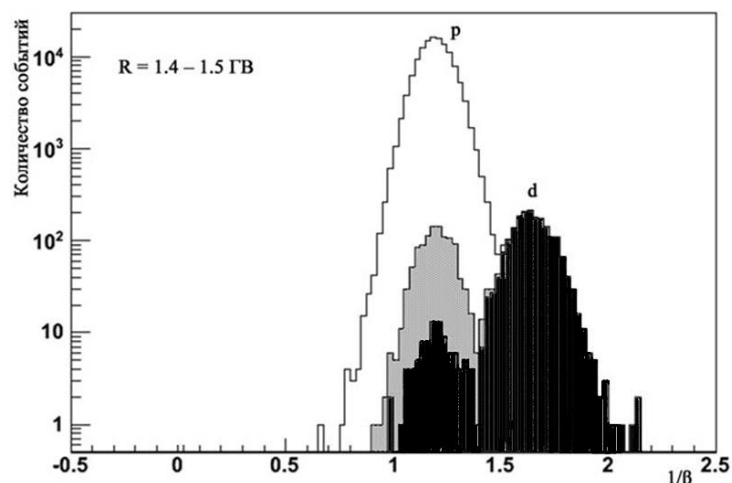


Рисунок 3. «Приборные» распределения изотопов водорода по величине $1/\beta$ для интервала жесткостей 1.4 – 1.5 ГВ для полетных данных. Результаты для исходной смеси протонов и дейтронов (без заливки), а также с применением метода подавления протонов с использованием данных трекера (серый цвет), данных трекера и ВПС (черный цвет).

Эффективность подавления протонов была проверена при помощи моделирования прохождения частиц через прибор методом Монте-Карло и была оценена количественно. В интервале жесткостей с 0.7 до 3.5 ГВ количество ложно исключенных дейтронов не превысило 5 %, в то время как протонный фон подавлялся более чем в 100 раз для жесткостей менее 2.0 ГВ и более чем в 10 раз в интервале жесткостей 2.0 ГВ – 3.0 ГВ. С ростом жесткости частиц эффективность подавления фона протонов падала, вместе с ней падала надежность идентификации дейтронов.

После применения метода подавления протонного фона требовалось определить количество зарегистрированных дейтронов и протонов в исследуемых интервалах жесткости. Для этого использовался один из двух подходов для различных значений жесткости.

В случае, когда подавление фона протонов на распределениях по величине $1/\beta$ было практически полным, то есть пики, соответствующие протонам и дейтронам, полностью разделялись, количество дейтронных событий подсчитывалось непосредственно как количество событий под пиком на гистограмме. В свою очередь количество протонов определялось как разность

между суммарным количеством событий на гистограмме и количеством событий, идентифицированных как дейтроны. Подобный подход применялся для жесткостей ниже 1.4 ГВ.

Для более высоких жесткостей распределения протонов и дейтронов по величине $1/\beta$ перекрывались, при этом «хвост» протонного распределения оказывался в области пика дейтронов. Распределение величины $1/\beta$ близко к нормальному, поэтому для определения количества дейтронов и протонов для жесткостей свыше 1.4 ГВ использовалась аппроксимация экспериментальных распределений суперпозицией двух распределений Гаусса, причем пределы изменения параметров распределений варьировались. Качество аппроксимации проверялось с помощью критерия Пирсона χ^2 . Из параметров распределений были рассчитаны количества зарегистрированных частиц.

В результате были получены «приборные» спектры – количества зарегистрированных протонов и дейтронов для узких интервалов жесткостей шириной 0.1 ГВ в диапазоне 0.5 – 3.0 ГВ без учета эффективности регистрации и отбора событий. На данном этапе работы был осуществлен переход от жесткости к кинетической энергии для удобства сравнения с результатами других экспериментов. В результате были получены «приборные» спектры для протонов и дейтронов с кинетической энергией от 70 до 650 МэВ/нуклон с шагом в 30 МэВ/нуклон.

После определения количества зарегистрированных ядер в зависимости от их жесткости и кинетической энергии было необходимо рассчитать эффективность регистрации и эффективность отбора частиц, учитывающую долю истинных событий, исключенных при «базовом» отборе. Эффективность регистрации частиц прибором составляет величину не менее 99.7% [10].

Для определения эффективности отбора событий использовались как данные моделирования прохождения протонов и дейтронов через прибор методом Монте-Карло, так и экспериментальные данные. В рамках разработанного метода при

расчете эффективности отбора протонов и дейтронов использовался метод кросс-калибровки, при котором эффективность отбора по данным отдельного детектора определялась с использованием информации других детекторов. При расчете эффективности применялись дополнительные критерии отбора по данным калориметра.

В *Главе 6* «Обсуждение полученных экспериментальных результатов» приводятся полученные результаты по измерению дифференциальных энергетических спектров дейтронов КЛ различной природы. Они сравниваются с результатами других экспериментов и теоретическими расчетами. Анализ производится для данных, полученных в различных геомагнитных областях, где регистрируются частицы различного происхождения. Из-за особенностей движения заряженных частиц в магнитном поле Земли в области регистрации дейтронов ГКЛ примесь дейтронов возвратного альbedo отсутствует. По той же причине в исследуемой области регистрации возвратного альbedo в диапазоне энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон вклад дейтронов ГКЛ в спектр дейтронов альbedo также практически отсутствует, поскольку такие дейтроны имеют жесткость ниже порога геомагнитного обрезания.

На рис. 4, слева приведен спектр дейтронов ГКЛ, измеренный в эксперименте ПАМЕЛА. На этом же рисунке изображены результаты экспериментов BESS93, BESS98 [7] и AMS-01 [6]. На рис. 4, справа приведено отношение потока дейтронов к потоку протонов, измеренное в ГКЛ в эксперименте ПАМЕЛА в сравнении с результатами других экспериментов. Добавлены точки, соответствующие эксперименту BESS97 [7]. Кривые, приведенные на рисунке, являются результатами расчетов спектра дейтронов ГКЛ по различным теоретическим моделям [12, 13].

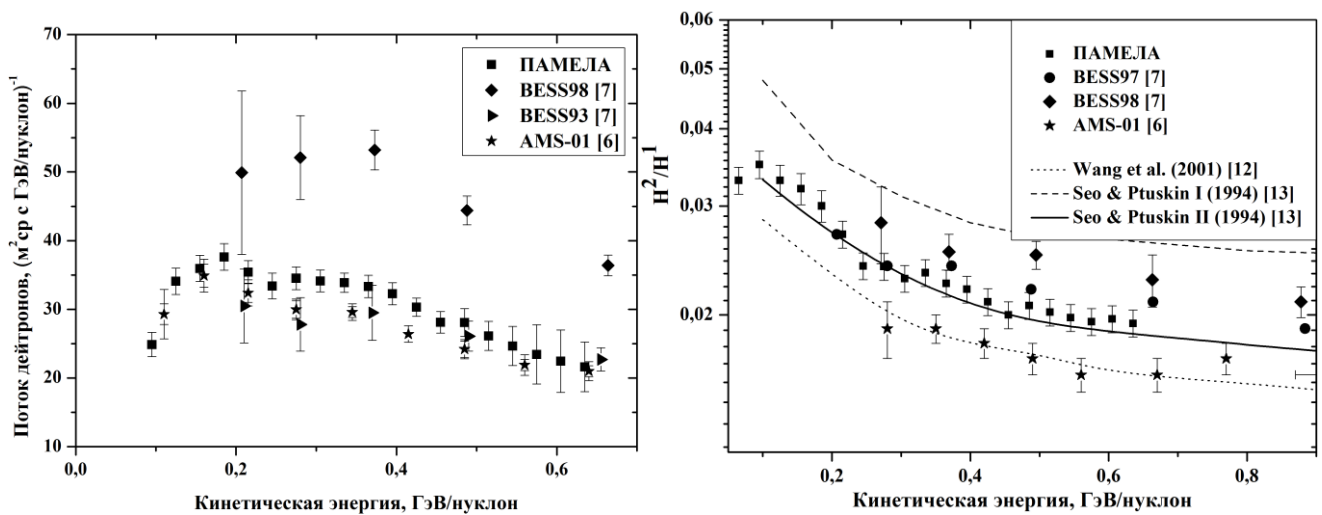


Рисунок 4. Дифференциальный энергетический спектр дейтронов ГКЛ (левый рисунок) и отношение спектра дейтронов к спектру протонов в ГКЛ (правый рисунок). Результаты, полученные в эксперименте ПАМЕЛА, отмечены квадратами.

Из рисунков видно, что результаты эксперимента ПАМЕЛА удовлетворительно согласуются как с рядом расчетов по теоретическим моделям, так и с результатами проведенных ранее экспериментов в совпадающих областях измерений. Наблюдаемые различия в абсолютных значениях спектра связаны с эффектом солнечной модуляции, поскольку результаты измерений в других экспериментах были получены во время других фаз солнечного цикла. Сегодня результаты эксперимента ПАМЕЛА являются наиболее точными измерениями дейтронного спектра ГКЛ и расширяют диапазон измерений в области низких энергий по сравнению с предшествующими экспериментами.

Было проведено сравнение результатов измерений дейтронного спектра и отношения спектра дейтронов к спектру протонов, полученных в эксперименте ПАМЕЛА, со значениями, предсказанными в рамках различных теоретических моделей генерации и распространения ГКЛ. Сравнение проводилось с использованием онлайн-версии программного пакета GALPROP [11]. В результате было обнаружено расхождение между полученными в эксперименте и расчетными значениями спектра дейтронов. Это расхождение обсуждалось в

дискуссии с разработчиками пакета GALPROP, в результате которой были выявлены неточности в используемых ими сечениях рождения дейтронов.

При изучении потоков дейтронов в областях околоземного пространства под радиационным поясом Земли регистрировались частицы возвратного альbedo, которые родились в верхних слоях атмосферы под действием высокоэнергетичных КЛ и, двигаясь под действием магнитного поля Земли, изменили свое первоначальное направление движения и имеют вектор скорости, направленный к Земле. На рис. 5 приведены дифференциальные энергетические спектры дейтронов возвратного альbedo для исследовавшихся четырех интервалов магнитных оболочек Мак-Илвайна.

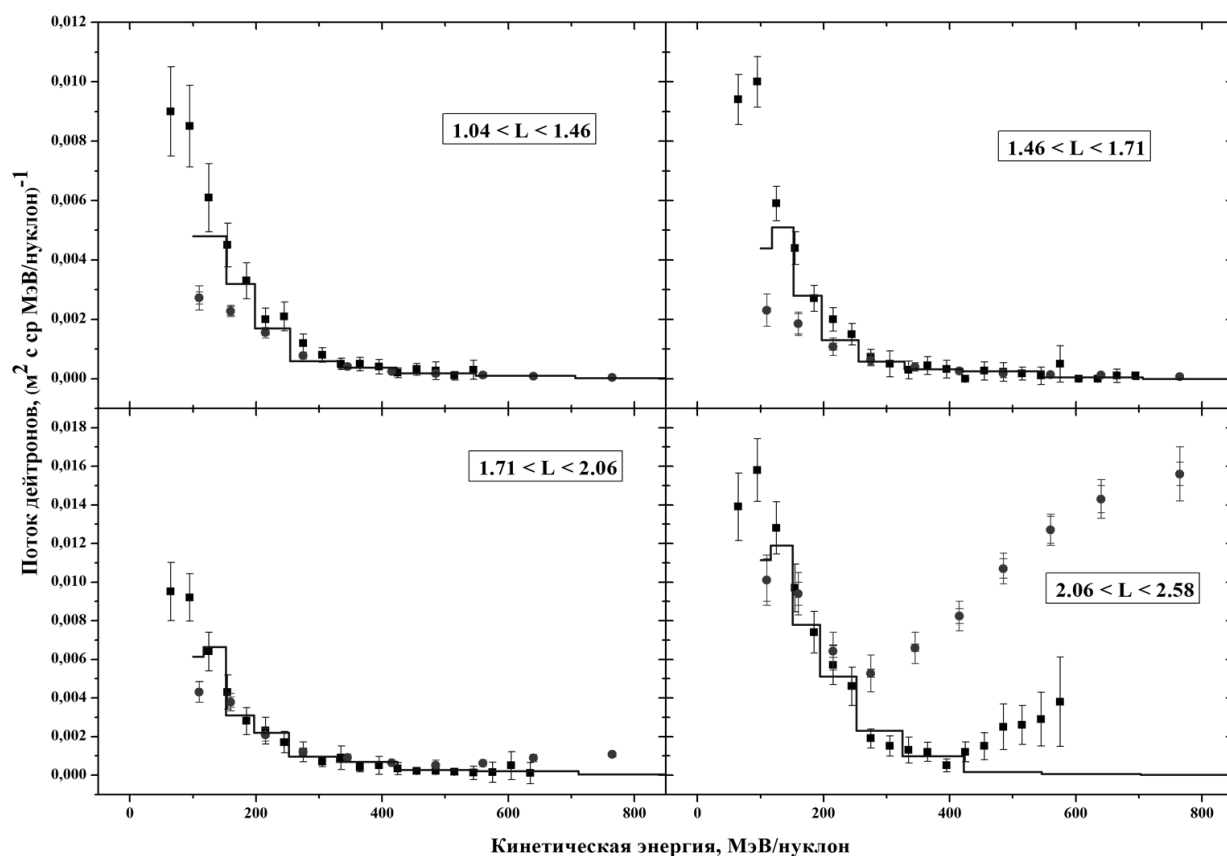


Рисунок 5. Дифференциальный спектр дейтронов возвратного альbedo для различных диапазонов геомагнитных оболочек, измеренный в эксперименте ПАМЕЛА (квадраты), в сравнении с результатами эксперимента AMS-01 [6] (круги) и теоретической моделью [3] (сплошная линия).

Из рисунка видно, что результаты эксперимента ПАМЕЛА находятся в хорошем эсогласии с теоретическими предсказаниями. Кроме того, начиная с

энергии около 200 МэВ/нуклон результаты эксперимента ПАМЕЛА и AMS-01 практически совпадают. Отличия между результатами экспериментов ПАМЕЛА и AMS-01, а также теоретическими расчетами в высокоэнергетичной части спектра при $L > 1.71$ (два нижних графика на рис. 5) связаны с регистрацией в изучаемых геомагнитных областях фоновых частиц ГКЛ, имеющих жесткость выше пороговой жесткости геомагнитного обрезания, и с различиями в орбитах ИСЗ, на которых размещены экспериментальные установки.

В Заключение приводятся результаты работы:

- разработан новый метод выделения дейтронной компоненты КЛ при наличии интенсивного фона других частиц в диапазоне энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон, совместно использующий данные времяпролетной системы, магнитного спектрометра и калориметра прибора ПАМЕЛА; для этого был разработан и применен корреляционный многопараметрический метод анализа, позволяющий с высокой точностью определить изотопный состав и энергетический спектр потоков изотопов водорода КЛ; в результате применения метода выделения дейтронов фон ядер гелия подавляется до 10^{-5} от исходного, фон протонов – до 10^{-4} [А1-А3];

- по данным эксперимента ПАМЕЛА получен дифференциальный энергетический спектр дейтронов и отношение потока дейтронов к потоку протонов в диапазоне кинетических энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон в ГКЛ; в указанном диапазоне энергий полученные результаты являются наиболее точными к настоящему времени [А4-А7];

- измерен дифференциальный энергетический спектр дейтронов возвратного альбедо в области под внутренним радиационным поясом Земли в диапазоне энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон; полученные результаты измерений являются наиболее точными на сегодняшний день и хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями [А8].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

A1. Воронов С. А., Данильченко И. А., Колдобский С. А., Малахов В. В. Методика выделения дейтронов в эксперименте ПАМЕЛА // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. 2010. Т. IV. С. 117-120.

A2. Воронов С.А., Данильченко И.А., Колдобский С.А. Методика идентификации дейтронов в космическом эксперименте ПАМЕЛА // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 8-11.

A3. Воронов С.А., Данильченко И.А., Колдобский С.А. Методика измерения спектра дейтронов в эксперименте ПАМЕЛА // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 4. С. 328-332.

A4. Koldobskiy S. A., Adriani O., Barbarino G. C. et al. Galactic deuteron spectrum measured in PAMELA experiment // Journal of Physics: Conference Series. 2013. V. 409. № 1. p. 012040.

A5. Колдобский С.А., Формато В., Адриани О. и др. Измерение галактического дейтронного спектра в эксперименте ПАМЕЛА // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 5. С. 674-676.

A6. Adriani O., Bongi M., ..., Koldobskiy S. et al. Measurement of the isotopic composition of hydrogen and helium nuclei in cosmic rays with the PAMELA experiment // The Astrophysical Journal. 2013. V. 770. № 1. p. 2.

A7. Adriani O., Bongi M., ..., Koldobskiy S. et al. Measurement of hydrogen and helium isotopes flux in galactic cosmic rays with the PAMELA experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2014. V. 742. p. 273-275.

A8. Колдобский С.А., Адриани О., Базилевская Г.А. и др. Измерения потоков дейтронов альbedo в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 3. С. 327-329.

Список цитируемой литературы:

1. Хаякава С. Физика космических лучей. Москва: Мир, 1973. 704 с.
2. Березинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л., Догель В.А., Птускин В.С. Астрофизика космических лучей, 2-е изд. Москва: Наука, 1990. 528 с.
3. Derome L., Buenerd M. Origin of light nuclei in near earth orbit // *Physics Letters B*, No. B521, 2001. P. 139-145.
4. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. The PAMELA Mission: Heralding a new era in precision cosmic ray physics // *Physics Reports*, Vol. 544, No. 4, 2014. pp. 323-370.
5. Webber W.R. ^3He and ^2H measurements and what they tell us about cosmic ray propagation in the Galaxy // *Advances in Space Research*, Vol. 19, No. 6, 1997. pp. 755-758.
6. Lamanna G. Measurements of cosmic ray protons and deuterons spectra in low earth orbit with the Alpha Magnetic Spectrometer (AMS). University of Perugia, Perugia, Italy, 2000, Ph.D. thesis 2000. 165 pp.
7. Myers Z.D., Seo E.S., Wang J.Z. et al. Cosmic ray ^1H and ^2H spectra from BESS 98 // *Advances in Space Research*, No. 35, 2005. pp. 151-155.
8. Casolino M., Picozza P., Altamura F. et al. Launch of the space experiment PAMELA // *Advances in Space Research*, Vol. 3, No. 42, 2008. pp. 455-466.
9. Campana D. for the PAMELA Collaboration. In-orbit performance of the Time of Flight of the PAMELA experiment // *Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference*. Lodz, Poland. 2009. P. OG.1.5.
10. Bruno A., Cosmic ray antiprotons measured in the PAMELA experiment, University of Bari, Bari, Italy, Ph.D. thesis 2008. 244 pp.
11. GALPROP: WebRun: URL <http://galprop.stanford.edu/webrun.php>
12. Wang J.Z., Seo E.S. et al. Isotopic measurements of cosmic-ray hydrogen and helium during the 1997 solar minimum // *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference*. 2001. pp. 1671-1674.

13. Seo E.S., Ptuskin V.S. Stochastic reacceleration of cosmic rays in the interstellar medium // *The Astrophysical Journal*, Vol. 431, No. 2, 1994. pp. 705-714.