

На правах рукописи

Малахов Виталий Валерьевич

**ПОТОКИ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 100 МЭВ ВО
ВНУТРЕННЕМ РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ ЗЕМЛИ**

Специальность 1.3.15. - "Физика атомных ядер и элементарных
частиц, физика высоких энергий"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва - 2023

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

Научный руководитель: Майоров Андрей Георгиевич, кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Оппонент 1: Махмутов Владимир Салимгереевич, доктор физико-математических наук, Физический Институт имени П.Н. Лебедева Российской Академии Наук, заведующий лабораторией

Оппонент 2: Свертилов Сергей Игоревич, доктор физико-математических наук, Московский Государственный Университет им. Ломоносова, физический факультет, заведующий кафедрой физики космоса; Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелицына, Отдел космических наук, Лаборатория космической рентгеновской и гамма-астрономии, ведущий научный сотрудник.

Оппонент 3: Бенгин Виктор Владимирович, кандидат физико-математических наук, Государственный научный центр Российской Федерации - Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Защита состоится «17» Апреля 2024 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета НИЯУ МИФИ.1.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. 8(495) 788-5699

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Автореферат разослан «__» _____2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета НИЯУ МИФИ.1.05 д. ф.-м. н., профессор



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа посвящена измерению анизотропных потоков захваченных и квазизахваченных протонов, а также их временной динамики во внутреннем радиационном поясе Земли.

Магнитное поле Земли на малых расстояниях (до 8-10 радиусов Земли) в первом приближении представляет собой диполь. В таком поле существуют области, в которые напрямую заряженные частицы извне попасть не могут. Однако, если тем или иным образом они проникли туда, то, не имея возможности также напрямую выйти, накапливаются в этих областях. Такой процесс называется захватом, частицы, соответственно, захваченными, а области захвата образуют радиационные пояса.

Существует несколько механизмов захвата, но для протонов с энергией $E > 100 \text{ MeV}$ во внутреннем радиационном поясе основным является CRAND (Cosmic Ray Albedo Neutron Decay). Он заключается в том, что не подверженные влиянию магнитного поля нейтроны альbedo, образованные в результате столкновения высокоэнергетических галактических космических лучей с веществом атмосферы, могут проникать в запрещённые области и распадаться там на электрон, протон и антинейтрино. Часть протонов (а также электронов) могут рождаться с таким вектором импульса, при котором их траектория будет соответствовать захваченной.

Потоки заряженных частиц и, в частности, протонов в этой области отличаются высокой степенью анизотропии и их пространственные и угловые распределения в целом имеют очень сложный характер, завися от целого ряда геомагнитных параметров (например, номера дрейфовой оболочки L или связанного с ней магнитного потока Φ , экваториального питч-угла α_{eq} и связанного с ним K -инварианта и др.) и времени. Потоки на нижней границе внутреннего радиационного пояса при этом подвержены наиболее заметным вариациям, связанным как с вариациями плотности остаточной атмосферы под действием ультрафиолетового излучения, меняющегося с циклом солнечной активности, так и с вековыми изменениями конфигурации магнитного поля Земли.

Экспериментальные измерения в радиационных поясах Земли начали активно проводиться с начала космической эры, и на сегодняшний день их насчитывается более сотни. Подавляющее большинство из них, однако, было проделано при помощи очень простых приборов с плохим угловым и энергетическим разрешением, энергетический диапазон которых, как правило, не превышал 100-150 МэВ. При помощи скрупулёзного анализа проходящих насквозь частиц, для отдельных приборов (SAMPEX [1], Van Allen Probes [2]) верхний предел был повышен до 500-600 МэВ. При этом численные расчёты показывают возможность захвата вплоть до энергий 3-4 ГэВ [3].

Из-за общей сложности картины потоков экспериментальные данные как правило разрабатываются в виде эмпирических моделей, представляющих собой фитирование данных как одного прибора [1,4-6], так и многих [7,8] в пространстве выбранных геомагнитных координат. Для таких моделей сейчас наблюдается острый дефицит измерений на нижней границе внутреннего радиационного пояса, а также в целом при значениях геомагнитных параметров на границах захвата (и в области квазизахвата).

Кроме экспериментальных измерений и эмпирических моделей проводятся также численные расчёты потоков в этих областях [3]. Такие расчёты чрезвычайно сложны и ресурсоёмки и требуют, помимо прочего, калибровки на экспериментальные данные, особенно на пространственных границах областей моделирования.

Спектрометр ПАМЕЛА [9] на спутнике Ресурс-ДК1 проводил прецизионные измерения на низкой околоземной орбите с 2006 по 2016 гг. в широком энергетическом диапазоне (от сотен МэВ до сотен ГэВ) в ближнем околоземном пространстве с угловым разрешением от 0.1° до 2.5° , включая область внутреннего радиационного пояса Земли в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. Таким образом были проведены измерения потоков протонов высоких энергий на внутренней границе внутреннего радиационного пояса на протяжении полного цикла солнечной активности.

Цель работы. Восстановить пространственные, угловые и

энергетические распределения потоков захваченных и квази-захваченных протонов в области внутреннего радиационного пояса Земли по данным эксперимента ПАМЕЛА с 2006 по 2014 гг.

Научная новизна работы.

- Впервые измерены анизотропные потоки захваченных и квазизахваченных протонов в области внутреннего радиационного пояса Земли с энергиями от 600 МэВ до 2.0 ГэВ в период от минимума 23 до максимума 24 цикла солнечной активности.
 - Впервые получены пространственные и угловые распределения потоков захваченных протонов во внутреннем радиационном поясе Земли на высотах 350-600 км при энергиях свыше 600 МэВ.
- #### Результаты, выносимые на защиту.
- Дифференциальные энергетические спектры, питч-угловые и радиальные (в зависимости от параметра L) распределения захваченных и квазизахваченных протонов во внутреннем радиационном поясе Земли.
 - Зависимость потоков захваченных протонов во внутреннем радиационном поясе Земли от фазы 23-24 циклов солнечной активности.

Практическая ценность работы.

Представленные в диссертационной работе результаты измерений потоков захваченных и квазизахваченных протонов на внутренней границе внутреннего радиационного пояса Земли уже используются при разработке моделей генерации вторичной компоненты космических лучей в околоземном пространстве. Кроме того, полученные данные могут быть использованы для составления модели радиационной обстановки, необходимой для планирования космических миссий.

Вклад автора. Изложенные в диссертационной работе результаты получены автором лично либо при его определяющем участии.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1. *Научная сессия МИФИ* (2010, 2013, 2015)

2. *PAMELA software and collaboration meetings* (2011 - 2018)
3. *24th European Cosmic Rays Symposium* (2014, Киль, Германия)
4. *The 34th International Cosmic Ray Conference* (2015, Гаага, Нидерланды)
5. *2nd International Conference on particle physics and astrophysics* (2016, Москва, Россия)
6. *The sixteenth European Space Weather Week* (2019, Льеж, Бельгия)
7. *26 Всероссийская Конференция по Космическим Лучам* (2020, Дубна, Россия)
8. *XXV всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2021»* (2021, Москва, Россия)
9. *27 Всероссийская Конференция по Космическим Лучам* (2022, Москва, Россия)
10. *The 4th International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (ISCRA-2023)* (2023, Москва, Россия)
11. *The 38th International Cosmic Ray Conference* (2023, Нагоя, Япония)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ в рецензируемых изданиях в период с 2015 по 2022 гг., в том числе 6 в журналах, включенных в базы Web of Science и Scopus (из них 3 в журналах первого квантиля Q1), и 1 в сборниках трудов международных конференций.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из аннотации, введения, шести глав, заключения, приложения, списка иллюстраций, списка литературы и приложения.

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

В **главе 1 «Внутренний радиационный пояс Земли»** описаны общие представления о строении магнитного поля Земли, внутреннего радиационного пояса; особенности движения

заряженных частиц в нём; системы геомагнитных координат; характеристики распределений потоков в них.

В *главе 2 «Измерения протонной компоненты в радиационных поясах Земли»* даётся информация о существующих к данному моменту экспериментальных измерениях в области внутреннего радиационного пояса, а также об эмпирических и теоретических моделях, описывающих потоки захваченных протонов.

Глава 3 «Эксперимент ПАМЕЛА» содержит подробное описание магнитного спектрометра «ПАМЕЛА», установленного на борту КА «Ресурс-ДК1», и условий проведения эксперимента.

Глава 4 «Расчёт ориентации КА “Ресурс-ДК1” и НА ПАМЕЛА» включает в себя описание обработки информации об ориентации спектрометра, а также процедуры и метода расчёта угловых характеристик событий, регистрируемых прибором ПАМЕЛА.

Глава 5 «Обработка экспериментальных данных» посвящена разработке метода расчёта анизотропных потоков, а также идентификации захваченных протонов в спектрометре ПАМЕЛА.

В *Главе 6 «Результаты обработки экспериментальных данных»* обсуждаются основные результаты работы, даётся их анализ и сравнение с существующими моделями и экспериментальными данными.

Приложение содержит список систем координат, используемых при расчёте ориентации спутника и направления влёта частиц в прибор, а также методы перехода между ними.

Общий объём работы составляет 203 страницы, включая 63 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 157 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 «Внутренний радиационный пояс Земли» даёт общее представление о строении земной магнитосферы, структуре внутреннего радиационного пояса, механизмах его наполнения заряженными частицами, движении захваченных частиц, характеристиках потоков в этой области и используемых геомагнитных координатах.

Магнитосфера Земли представляет из себя магнитный кокон, обтекаемый потоками плазмы солнечного ветра, сплюснутый на солнечной стороне и вытянутый в протяжённый хвост на ночной. На малых расстояниях (до 6-8 R_Z) магнитное поле Земли почти полностью определяется вращением жидкого ядра планеты, и в первом приближении его можно считать дипольным. Взаимодействие заряженных частиц с полем диполя описывается теорией Штёрмера. Она, в частности, говорит о существовании запрещённых областей, частица извне в которые напрямую попасть не может. Те частицы, которые туда попадают, не могут напрямую выйти и поэтому накапливаются, формируя радиационные пояса (происходит захват заряженных частиц). Внутренний радиационный пояс заполнен в основном протонами с энергиями до нескольких ГэВ и занимает область приблизительно от 1.1 до 2-3 R_Z .

На основе сохраняющихся инвариантов движения частицы определяется трёхмерное пространство геомагнитных координат, в котором обычно и строятся потоки захваченных частиц. Первой координатой обычно является энергия частицы или – в численных расчётах – связанный с ней М-инвариант. Второй – экваториальный питч-угол α_{eq} , связанное с ним отношение магнитного поля в точке отражения к экваториальному B/B_0 , или – в численных расчётах – К-инвариант. Третьей координатой является параметр МакИлвайна L или – в численных расчётах – магнитный поток Φ .

Основным механизмом наполнения радиационных поясов протонами высоких энергий (свыше 100 МэВ) является распад нейтронов альbedo. Согласно так называемому процессу CRAND (Cosmic Ray Albedo Neutron Decay) [10], часть вторичных нейтронов, образованных в результате бомбардировки галактическими космическими лучами вещества атмосферы, покидает её и распадается в магнитосфере Земли на протоны, электроны и нейтрино. Протоны и электроны, попадая в запрещённые зоны, могут захватиться там.

Двигаясь внутри радиационного пояса, заряженные частицы могут взаимодействовать с веществом остаточной атмосферы и плазмасферы, либо рассеиваясь на нём, теряя энергию, либо «погибая» в неупругом взаимодействии, что является основными причинами потерь частиц во внутреннем радиационном поясе. Кроме того, под действием градиента поля частицы испытывают радиальный дрейф. Этот процесс характеризуется коэффициентом

диффузии D_{LL} , зависящим от геомагнитных параметров, прежде всего от L . Наибольшее значение он имеет на верхней границе внутреннего радиационного пояса на расстояниях свыше 1.5 РЗ для частиц, движущихся в экваториальной области, т. е. характеризующихся α_{eq} близким к 90° или K близким к $0 \text{ Гс}^{1/2} \text{ РЗ}$. На нижней границе ($L < 1.20 \text{ РЗ}$) радиальная диффузия играет меньшую роль, однако несмотря на малые значения D_{LL} она тем не менее даёт заметный вклад из-за резкого градиента потоков в этой области.

Захваченные частицы можно условно разделить на стабильно захваченные и квазизахваченные. Первые совершают как минимум несколько оборотов вокруг Земли, вторые – не более одного, кроме того, вторые в отличие от первых образуются напрямую при взаимодействии частиц ГКЛ с атмосферой Земли. Квазизахваченные частицы нижней границы внутреннего радиационного пояса Земли, как правило, гибнут в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии, где дрейфовые оболочки опускаются низко к поверхности Земли.

Внутренний радиационный пояс характеризуется прежде всего большими временами жизни захваченных частиц (время жизни захваченного протона может достигать сотен лет) и стабильностью (известно, что магнитное поле в этой области не подвержено спорадическим вариациям под действием геомагнитных возмущений). Тем не менее, потоки на нижней границе подвержены временным вариациям, связанными с колебаниями плотности остаточной атмосферы под действием ультрафиолетового излучения Солнца, а также с уменьшением дипольного момента Земли, наблюдаемое последние несколько сотен лет. Последнее приводит, во-первых, к движению дрейфовых оболочек, уменьшению средней величины интенсивности магнитного поля на них и, как следствие, приближению зеркальных точек траекторий на одной и той же дрейфовой оболочке ближе к Земле, а во-вторых, к увеличению энергии таких частиц или адиабатическому нагреву. Оба этих эффекта приводят к тому, что дрейфовая оболочка погружается глубже в остаточную атмосферу и потери частиц на ней возрастают, что способствует уменьшению потока.

Глава 2 «Измерения протонной компоненты во внутреннем радиационном поясе Земли» содержит обзор экспериментов по

регистрации протонов в околоземном пространстве, эмпирических и теоретических моделей.

Радиационные пояса были открыты в середине двадцатого века независимо друг от друга советскими и американскими учеными. В Советском Союзе изучение радиационных поясов проводилось под руководством Вернова С. Н. при помощи сцинтилляционных детекторов, установленных на искусственном спутнике Земли «Спутник 3» и последующих аппаратах этого типа. В США изучением радиационного пояса занимались под руководством Дж. Ван Аллена на приборах, установленных на спутнике «Эксплорер-1».

Большинство измерений, проводившихся до 70-х годов, осуществлялось при помощи простых приборов, представлявших собой отдельные детекторы, сцинтилляционные или полупроводниковые [11,12]. Для регистрации частиц в разных энергетических каналах детекторы собирались в стопку и помещались за коллиматор (или использовались вовсе без него). Вторым типом были обычные счётчики Гейгера, измерявшие все частицы выше определённой пороговой энергии [13,14]. Сами космические аппараты часто не поддерживали ориентацию в пространстве, а учёные могли и вовсе не иметь информации о ней. Более продвинутые приборы, включающие в себя несколько детекторов и позволяющие более точно измерять характеристики частиц и выделять разные их типы, начинают создаваться с 70-х годов; более того, начиная с этого периода многие миссии приобретают мониторинговый характер, проводя непрерывные измерения в течение долгого времени [6,15].

Из-за сложности картины потоков результаты измерений, как правило, оформляют в виде эмпирической модели, которая представляет собой интерполяцию экспериментальных данных в пространстве, построенном на базе различных геомагнитных координат и энергии (например, L ; $V/V_0(V, \alpha_{eq})$; E) и/или как инструмент для расчёта потоков, флюенсов или дозовой нагрузки на произвольно заданной орбите. В таком виде представлены данные экспериментов CRRES [5], SAMPEX [1], NOAA [6] и др. Однако традиционной моделью, описывающей экспериментальные данные большого числа ранних (60-70-х годов) измерений потоков протонов в радиационных поясах Земли, является AP8 [7,8]. Её российским аналогом являются модели Московского Государственного

Университета [16], дополнительно включающие измерения советских экспериментов. Обе модели существуют в двух вариантах, для солнечных минимума и максимума, и в целом, в области внутреннего радиационного пояса хорошо согласуются [17].

Другой подход заключается в численном моделировании процессов, происходящих с заряженными частицами в околоземном пространстве. Самой известной (и практически единственной) подобной моделью на данный момент является модель Селезника [3,18]. В ней решается уравнение переноса, в котором заданы функции источников, описывающих основные механизмы наполнения радиационных поясов, а также основные механизмы потерь. При таком подходе, однако, возникает большое количество неопределённостей в результатах моделирования, связанных как с погрешностями используемых моделей (модели магнитного поля, атмосферы и ионосферы) и начальных данных (спектры ГКЛ, усреднённый спектр солнечных вспышек, спектры и угловые распределения нейтронов альbedo, коэффициенты диффузии и др.), так и с процессами численного моделирования. Поэтому пока в большинстве случаев модель не способна воспроизводить экспериментальные данные, хотя можно сделать определённые выводы о количественных соотношениях тех или иных источников наполнения и потерь, вносящих вклад в наблюдаемые спектры [19].

В *главе 3* «Эксперимент ПАМЕЛА» приводится подробное описание магнитного спектрометра «ПАМЕЛА», установленного на борту КА «Ресурс-ДК1», и условий проведения эксперимента.

Эксперимент «ПАМЕЛА» [9] посвящен исследованию темной материи, барионной асимметрии Вселенной, механизмов генерации космических лучей и процессов их распространения в нашей Галактике и Солнечной системе, а также исследованию эффекта солнечной модуляции и взаимодействия космических лучей с земной магнитосферой. Прибор ПАМЕЛА был запущен на спутнике Ресурс-ДК1 на низкую эллиптическую орбиту с высотами перигея в 350 км и апогея 600 км 16 июня 2006 г. В сентябре 2010 г. орбита была скорректирована до круговой с постоянной высотой 600 км, а в январе 2016 г. спектрометр завершил свою работу. Область внутреннего радиационного пояса пересекалась прибором в районе

Южно-Атлантической магнитной аномалии (ЮАМА) до восьми раз в сутки.

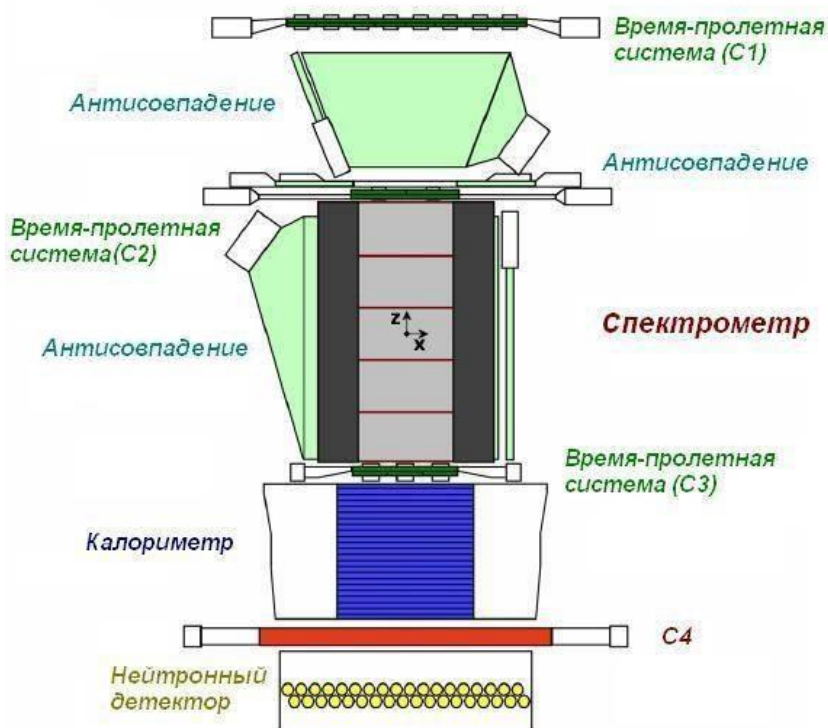


Рис. 1. Устройство магнитного спектрометра ПАМЕЛА

Магнитный спектрометр «ПАМЕЛА» состоит из времяпролетной системы, сцинтилляционных детекторов антисовпадений, трековой системы, электромагнитного калориметра, нейтронного детектора и сцинтилляционного ливневого детектора (рис. 1). Набор детекторных систем спектрометра позволяет измерить время пролета и энергвыделение в различных частях установки и определить жесткость, импульс,

скорость и знак заряда частиц и античастиц, что обеспечивает их регистрацию, надежную идентификацию и взаимную проверку результатов. Энергетическое разрешение спектрометра в диапазоне от 100 МэВ до нескольких ГэВ составляет ~3%, а угловое существенно зависит от энергии и изменяется от 2.5° для 100 МэВ до ~0.1° для 2 ГэВ и выше (см. рис. 2 а).

Трековая система предназначена для измерения импульса частиц по отклонению их траектории в магнитном поле с напряжённостью 0.43 Тл, создаваемом постоянным магнитом. Для определения отклонения внутри магнита размещен трекер, который состоит из шести плоскостей высокоточных кремниевых микростриповых детекторов, измеряющих координаты прохождения частиц через прибор с пространственным разрешением 3.0 мкм в отклоняющей (X) проекции и 11.5 мкм в другой (Y) проекции. Максимальная регистрируемая жесткость, для которой относительная ошибка измерения составляет 100%, равна ≈1ТВ. Геометрический фактор спектрометра составляет 21.5 см²ср.

Времяпролетная система (ВПС) – система измерения времени пролета частиц (с целью определения их скорости), которая также измеряет энерговыделение частицы при взаимодействии со сцинтилляторами и участвует в выработке триггерного сигнала. Система состоит из шести плоскостей пластических сцинтилляторов, сгруппированных попарно. Каждая из плоскостей разделена на полосы, расположенные ортогонально друг к другу. Сегментация счетчиков позволяет удалять из анализа взаимодействующие в крышке контейнера, каркасе спутника или в самом спектрометре события с множественным рождением.

Электромагнитный калориметр состоит из 44 односторонних кремниевых позиционно чувствительных плоскостей (толщиной 380 мкм), чередующихся с 22 пластинами вольфрамового поглотителя (толщиной 0,26 см). Каждая плоскость содержит 96 стрипов. Стрипы каждой пары плоскостей расположены ортогонально друг другу, что обеспечивает получение двумерной пространственной информации. С помощью калориметра определяется тип частиц (адрон или лептон), измеряется энергия взаимодействующих в нем электронов.

Система антисовпадений служит для определения срабатываний, которые выработаны вторичными частицами, рождёнными в контейнере или механических частях прибора. Научная аппаратура (НА) «ПАМЕЛА» включает две системы

антисовпадений, которые покрывают бока и верх магнита, а также окружают объем между первыми двумя времяпролетными плоскостями.

Нейтронный детектор и детектор утечки ливня S4 используются для улучшения электрон-адронного разделения при высоких энергиях.

В *главе 4* «Расчёт ориентации КА “Ресурс-ДК1” и НА ПАМЕЛА» приводится описание процедуры обработки информации об ориентации КА.

Информация об ориентации космического аппарата (КА) важна для измерений в области радиационных поясов. В то же время, основной задачей КА было дистанционное зондирование Земли, и при съёмке он совершал повороты в пространстве, в частности, по крену до 45° . В случае спектрометра ПАМЕЛА эта информация поступала из нескольких независимых источников: звёздных датчиков КА (точная ориентация, но с пропусками данных), паспортов съёмки (точная ориентация на момент съёмки), таблицы поворотов (профиль угла крена на протяжении всего полёта). Для синхронизации этих данных между собой и с экспериментальными данными спектрометра был разработан специальный алгоритм, учитывающий все особенности данных. Алгоритм позволил рассчитать и привязать к каждому экспериментальному событию ориентацию КА и точность её определения. В большинстве случаев эта точность составляет не более 0.01° .

Глава 5 «Обработка экспериментальных данных» описывает особенности работы спектрометра в радиационном поясе Земли в условиях высоких темпов счёта процедуру идентификации протонов и метод вычисления анизотропных потоков.

Из-за крайне высоких потоков в радиационном поясе Земли для приборов, проводящих измерение в этой области необходимо не переходить в насыщение, чтобы иметь возможность измерять потоки. Для проверки на насыщение было проанализировано живое время прибора при прохождении области ЮАМА. Минимально возможное измеряемое время в эксперименте составляет 0.16 мс. Насыщение в данном случае должно приводить к тому, что для каждого сработавшего триггера на протяжении определённого периода времени живое время минимально или близко к нему. На рисунке 2 отложена зависимость разницы в живом времени между двумя соседними событиями, делённая на минимальное значение

живого времени от времени в мс. Чёрным отложены все события, красным – имеющие минимальное значение живого времени. Область сгущения точек соответствует прохождению области ЮАМА, на врезке она же крупным планом. Из рисунка видно, что красные точки не сгруппированы в одну область и не идут друг за другом, что убедительно показывает отсутствие насыщения.

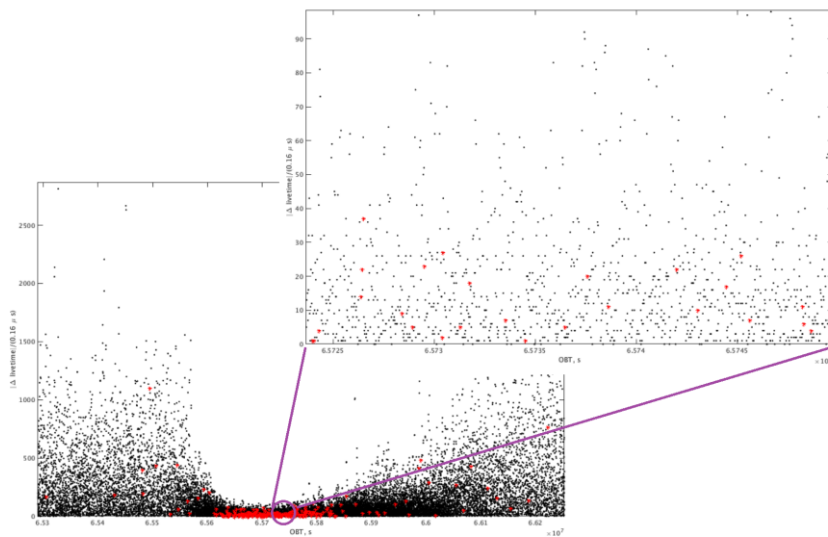


Рис. 2. Зависимость модуля разницы между значениями живого времени для соседних событий, делённый для наглядности на шаг его измерения, от бортового времени при прохождении центра области ЮАМА для всех событий (чёрным) и для событий с минимальным значением живого времени (красным)

Идентификация протонов разделяется на базовый отбор «хороших» событий и отбор собственно протонов среди других частиц. «Хорошими» считаются события, по которым можно с достаточной точностью измерить характеристики частицы, исключить фоновые частицы, рождённые в приборе и заметно изменившие свои характеристики при прохождении прибора. Для базового отбора использовались стандартные критерии, используемые в коллаборации ПАМЕЛА:

- один восстановленный трек в трековой системе;

- трек восстановлен не менее чем по 3 точкам в Y-проекции, и не менее чем по 4 в X-проекции (отклоняющей), находится полностью внутри трековой системы, не пересекая её границ, а также другие технические требования, характеризующие достоверность трека;

- восстановленный в трековой системе трек, продлённый к верхним плоскостям калориметра, совпадает с координатами сработавших стрипов двух его верхних плоскостей;

- отсутствие сигнала в верхних счётчиках антисовпадений;

- не более одного сигнала в каждой из 6 плоскостей ВПС, но не менее 1 в каждом из трёх детекторов ВПС;

- восстановленная скорость частицы больше 0, т.е. исключаются частицы, пришедшие снизу прибора;

Для отбора протонов по величине заряда используется зависимость энерговыделений в детекторах спектрометра от жёсткости. На рис. 3 сверху показано распределение событий по среднему энерговыделению в плоскостях трековой системы спектрометра и магнитной жёсткости (отношение p/z). В нём видны области, соответствующие разным частицам; красными линиями обозначены эмпирические функции для разделения частиц разного заряда между собой. Для радиационного пояса (рис. 3, снизу) и энергий свыше 100 МэВ протоны являются доминирующей компонентой, что снижает относительный фон других частиц.

Дополнительно для отбора и анализа квазизахваченных частиц применяются траекторные расчёты. Для этого численными методами решается уравнение движения частицы в магнитном поле, в данном случае применялся метод Рунге-Кутты 6-го порядка. Трассировка каждой частицы продолжается, пока не выполнится одно из трёх возможных условий остановки: частица достигает расстояния 10 РЗ, частица совершает один оборот вокруг Земли, траектория достигает плотных слоёв атмосферы (40 км). В первых двух случаях событие считается галактическим и стабильно захваченным соответственно. В третьем случае – квазизахваченным или возвратным альбедо. Эти два класса в свою очередь разделяются по количеству зеркальных точек, пройденных частицей. Менее двух соответствуют классу возвратных альбедо.

Суммарное число отобранных вторичных протонов за всё время эксперимента составило $\sim 2 \times 10^7$, из них на область радиационного пояса приходится 1.6×10^7 .

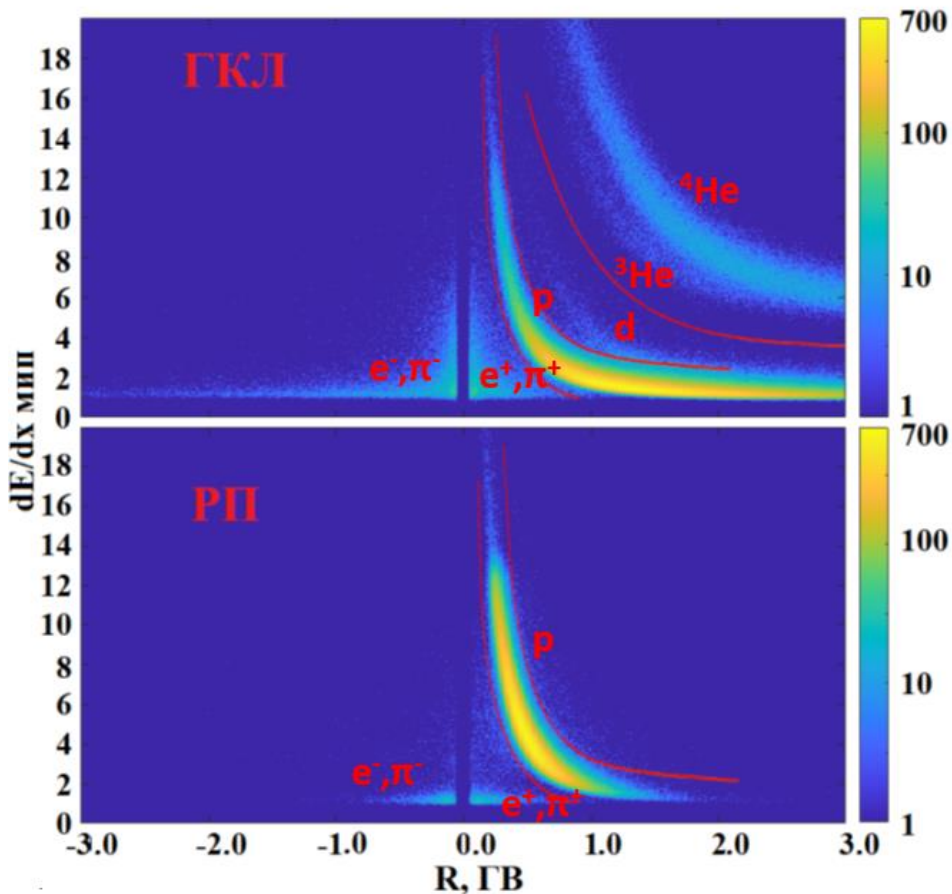


Рис. 3. Распределение $dE/dx(R)$ по числу отобранных протонов (обозначено цветом) в галактических космических лучах (вверху) и в радиационном поясе (внизу).

Задача расчёта интенсивности потока на самом высоком уровне абстракции заключается в переводе темпа счёта отобранных в приборе событий в собственно интенсивность потока. В самом общем случае коэффициентом пропорциональности между этими двумя величинами является светосила прибора Γ . В случае изотропного потока коэффициент пропорциональности зависит

только от геометрии прибора и называется геометрическим фактором G . Если прибор имеет достаточно простую геометрию, то может быть рассчитан аналитически [20]. В случае спектрометра ПАМЕЛА и геометрический фактор, и светосила зависят также от жёсткости частицы, так как их траектории по-разному отклоняются магнитным полем спектрометра, что фактически означает разный угол раствора телескопа в зависимости от жёсткости.

В условиях анизотропии последняя также зависит от ориентации прибора относительно выделенного направления, которым в данном случае является вектор магнитного поля \mathbf{B} в точке измерения. Для её вычисления использовался метод, разработанный для прибора MAST на спутнике SAMPEX [21]. Метод заключается в вычислении так называемой эффективной площади детектора H , связанной с геометрическим фактором следующим выражением:

$$G(E) = 2\pi \int_0^\pi H(E, \alpha) d\alpha$$

где E – энергия частицы, α – её питч-угол. Эффективная площадь H определяется следующим образом:

$$H(E, \alpha, \Psi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A(E, \vartheta, \varphi) \sin \alpha d\alpha d\beta$$

где Ψ – ориентация прибора относительно магнитного поля, A – функция отклика прибора, β – фазовый угол, $\vartheta = f(\alpha, \beta, \Psi)$ и $\varphi(\alpha, \beta, \Psi)$ – зенитный и азимутальный углы соответственно в приборной системе координат.

Эффективная площадь спектрометра ПАМЕЛА была посчитана при помощи моделирования методом Монте-Карло прохождения протонов через прибор при разных ориентациях вектора магнитного поля \mathbf{B} в приборной системе координат с шагом 1° в диапазоне от 0° до 180° и до 360° зенитному и азимутальному углам вектора \mathbf{B} соответственно; разным питч-углами в диапазоне 0° до 180° с шагом 1° ; разным энергиях в диапазоне от 63 МэВ до 5 ГэВ, разбитом на 30 равных логарифмических бинов; разным отрезкам времени, разбитом на интервалы, соответствующие приблизительно одинаковой общей эффективности прибора. Затем эффективные площади были усреднены для каждого бина в пространстве географических широты, долготы и высоты.

Дифференциальные потоки вычислялись в пятимерном пространстве (Lat, Lon, Alt, E, α) по обычной формуле.

В главе 6 «Результаты обработки экспериментальных данных» приведены полученные основные научные результаты работы.

Результаты проведённых измерений и расчётов анизотропных стабильно- и квазизахваченных потоков получены в виде базы данных, содержащей результаты измерений в нескольких представлениях: матрица $J_{i,j,k,t}^{geomag}$, построенная на базе геомагнитных координат L , α_{eq} и энергии E ; $J_{l,m,k,t}^{inv}$ — на базе инвариантов движения Φ , K и энергии E ; $J_{n,p,q,t}^{geo}$ — на базе географических координат; четвёртое измерение — во всех случаях время. Такие матрицы получены как для отдельно для частиц разного типа захвата, так и для их суммы. Отдельно в базе данных содержатся три соответствующих трёхмерных матрицы, содержащих соответствующие интенсивности потоков рассчитанные за период в районе солнечного минимума (с июля 2006 по октябрь 2010): $J_{i,j,k,smin}^{geomag}$, $J_{l,m,k,smin}^{inv}$, $J_{n,p,q,smin}^{geo}$.

На рис. 4 представлены одномерные распределения интенсивностей потоков захваченных протонов (всех типов), полученных за период август - сентябрь 2006 года. На рисунке а) — радиальные распределения интенсивностей потоков захваченных протонов с энергией 175-230 МэВ для разных значений экваториального питч-угла. Из рисунка видно, во-первых, постепенное увеличение доступных L-оболочек в зависимости от выбранного питч-угла, что связано с орбитой и ориентацией прибора, а, во-вторых, повышение потоков с уменьшением экваториального питч-угла α_{eq} вплоть до значений 30–40°. Такое распределение демонстрирует плавный переход от стабильно-захваченных к квазизахваченным и затем к возвратным альbedo (оранжевые и красные линии, соответствующие $\alpha_{eq} = 10-30^\circ$). Ещё более наглядно, но в зависимости от L этот переход виден на рис. б), где показаны радиальные распределения протонов с $\alpha_{eq} = 75^\circ$ для разных энергетических диапазонов. На рис. с) и d) построены распределения интенсивностей потоков протонов с энергией 80-120 МэВ по экваториальному питч-углу и спектры протонов с $\alpha_{eq} = 75.5^\circ$ соответственно для разных L. Полученные распределения демонстрируют высокую детальность восстановления потоков этих двух компонент вплоть до границы захвата.

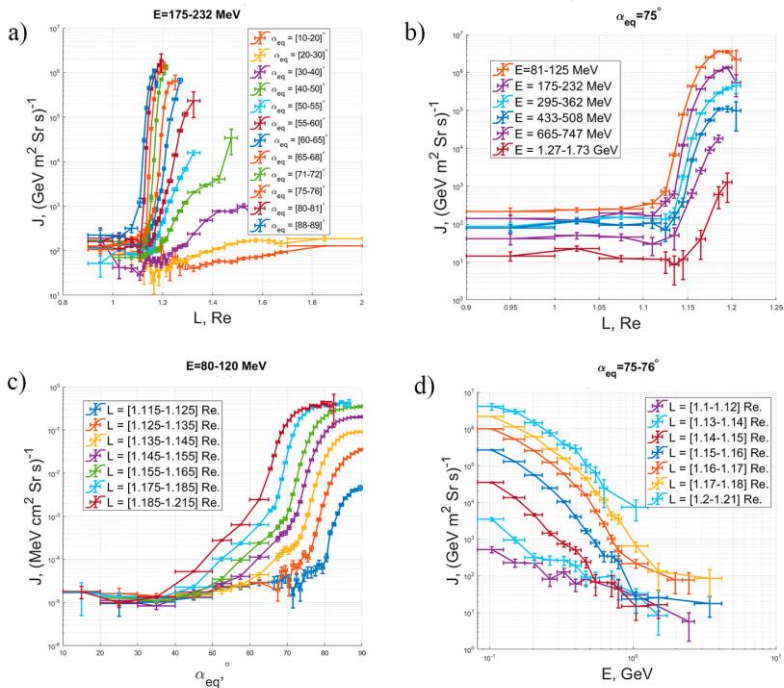


Рис. 4. а) Радиальное распределение интенсивностей потоков протонов с энергией 175-232 МэВ для разных значений экваториального пичч-угла α_{eq} ; б) радиальное распределение интенсивностей потоков протонов с $\alpha_{eq}=75^\circ$ для разных энергетических диапазонов; в) распределение интенсивностей потоков протонов с энергией 80-120 МэВ по экваториальному пичч-углу для разных значений L ; д) дифференциальные энергетические спектры протонов с экваториальным пичч углом $\alpha_{eq}=75.5^\circ$ для разных L .

На рис. 5 представлены энергетические спектры протонов и их распределения по экваториальному пичч-углу на разных L -оболочках, а также профили потоков по L для разных энергий и пичч-

углов, построенные за период солнечного минимума (2006-2010 гг.) в сравнении с моделями AP8-MIN [8], всенаправленные потоки которой пересчитаны в направленные специальной процедурой, и PSB97 [1], построенной на основе измерений SAMPEX/PET также в период солнечного минимума.

Из результатов следует вывод об отличии от измеренных моделью AP8-MIN спектров протонов во всех областях, где она применима. Это, впрочем, только подтверждает многочисленные предыдущие свидетельства того, что модель AP8 завышает потоки высоких энергий и в целом плохо работает на малых L-оболочках. С моделью PSB97 наблюдается довольно хорошее совпадение, учитывая специфику работы в радиационном поясе. Тем не менее, увеличивающуюся разницу при энергиях свыше 100 МэВ можно объяснить тем, что в данной работе расчёты велись в приближении ведущего центра, а энергия 100 МэВ является приблизительной границей, где условия в области нахождения гироцентра начинают существенно различаться от локальных.

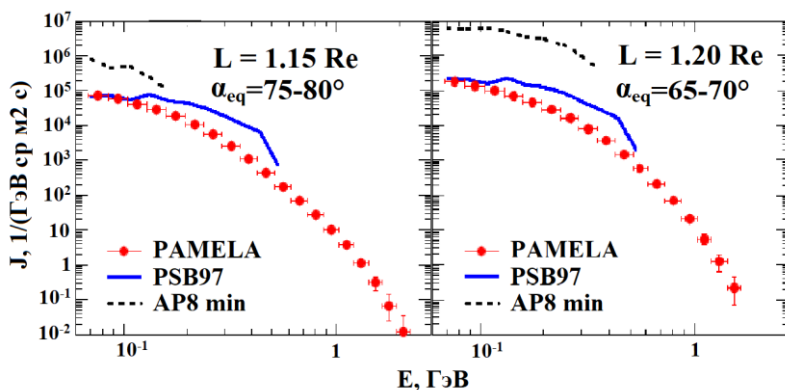


Рис. 5. Энергетические спектры на L-оболочках 1.15 и 1.20 в сравнении с моделями AP8 и PBS97

На рисунке 6 показаны вариации интенсивности потоков протонов с энергиями в интервале $E = 80-136$ МэВ в ВРПЗ в течение почти полного солнечного цикла. В верхнем ряду показаны временные вариации интенсивностей потоков протонов при

движении сначала к минимуму 23/24 цикла солнечной активности, а затем от него к максимуму 24 цикла. Графики построены для разных значений экваториального питч-угла от 66° до 90° и трёх указанных интервалов по L. В среднем ряду показаны распределения интенсивностей потоков захваченных протонов по экваториальному питч-углу α_{eq} за разные периоды времени (обозначены цветом) синяя горизонтальная линия обозначает среднее значение интенсивности потоков квазизахваченных протонов на данной L оболочке, зелёная – протонов возвратного альbedo. В нижнем ряду показаны аналогичные распределения относительных вариаций потоков $\delta J = \frac{J_t - J_{max}}{J_{max}} \times 100\%$ от энергии, где J_{max} — максимальный поток приходящийся на конец 2009 года, т.е. в районе минимума 11-летнего цикла солнечной активности, а J_t — значение потока в каждом из временных интервалов.

Здесь наиболее интересным представляется зависимость вариаций интенсивностей потоков в зависимости от экваториального питч-угла. На каждом из графиков в нижнем ряду можно выделить две области: во-первых, область стабильно захваченных частиц, расположенная правее первого критического значения питч-угла α_{eq}^{c1} ; эта область слабо подвержена вариациям. Далее с уменьшением значения питч-угла траектории частиц всё больше приближаются к атмосфере, что увеличивает величину колебаний интенсивности потоков. Затем величина вариаций начинает уменьшаться, что связано со всё большим увеличением в выборке слабо подверженным вариациям квазизахваченных частиц и достигается второе критическое значение α_{eq}^{c2} . Дальнейшее же увеличение вариаций связано с увеличивающейся долей возвратного альbedo в выборке. Поскольку зеркальные точки в этой области расположены несимметрично относительно геомагнитного экватора и южная точка находится заметно ближе к Земле чем северная, то частицы возвратного альbedo низких энергий, двигаясь вдоль силовой линии по траектории, соответствующей захваченной частице, могут пройти северную зеркальную точку, но затем "погибнуть" в южной. На рис. 7 показаны магнитно-силовые линии на долготе 65° ЗД, соответствующей центру ЮАМА и L-оболочкам от 1.12 до 1.20, и зеркальные точки, соответствующие значениям экваториального питч-угла от 50° до 90° . Из рисунка видна их асимметрия.

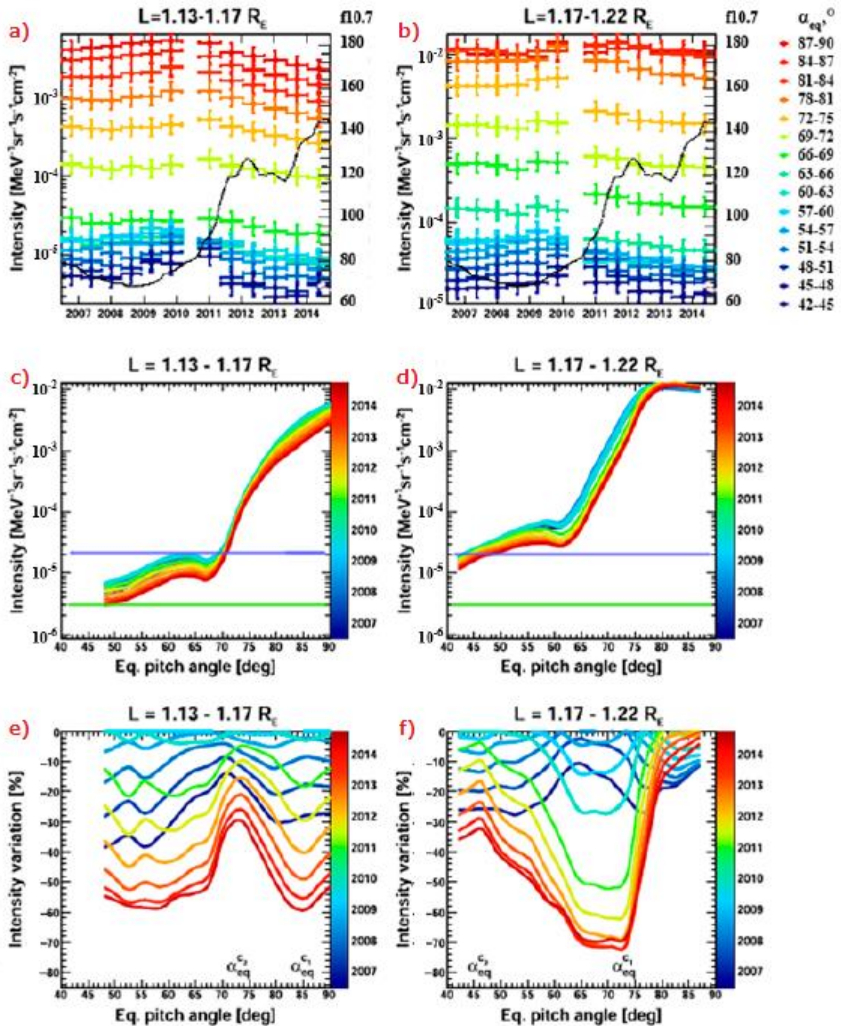


Рис. 6. а), б) – временные вариации интенсивностей потоков захваченных протонов при разных питч-углах, с), d) – распределения интенсивностей потоков протонов по экваториальному питч-углу за разные периоды е), f) – относительные вариации интенсивностей потоков по отношению к значениям в 2009 году в зависимости от питч-угла

Рост вариаций этой компоненты связан с тем, что частицы, которые проходят северную зеркальную точку в периоды солнечного минимума, уже не могут её пройти в условиях солнечного максимума из-за возросшей плотности остаточной атмосферы на её высоте.

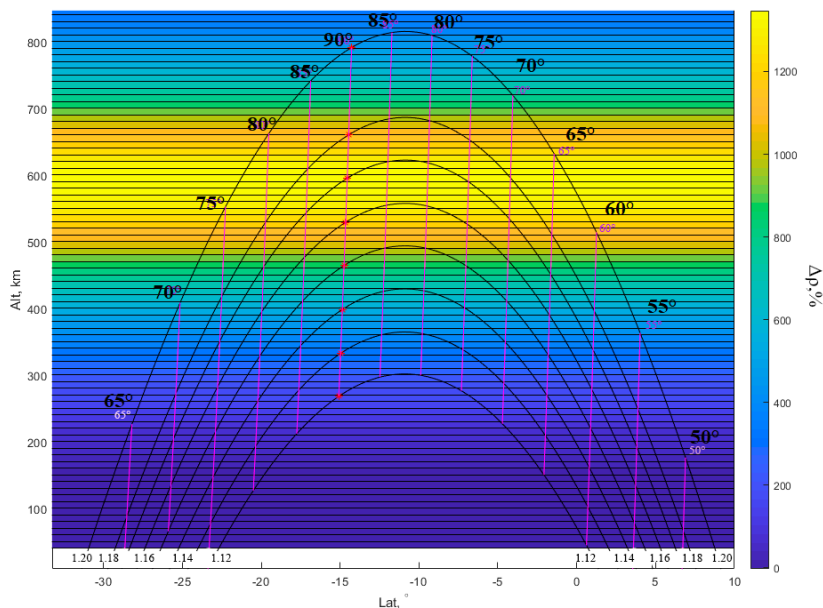


Рис. 7 Расположение магнитно-силовых линий, соответствующих L-оболочкам от 1.12 до 1.20, и зеркальных точек, соответствующих экваториальным углам от 50° до 90° в центре ЮАМА (на долготе 65° ЗД). Цветом отмечено изменение плотности атмосферы в зависимости от высоты.

В ходе работы получены следующие основные результаты:

1. Характеристики интенсивностей потоков захваченных протонов во внутреннем радиационном поясе Земли:
 - а. дифференциальные энергетические спектры стабильно и квази-захваченных протонов в энергетическом диапазоне от 100 МэВ до 2.0 ГэВ (для стабильно-захваченных) и до 4.0 ГэВ (для квази-захваченных) во внутреннем радиационном поясе

Земли для разных значений геомагнитных параметров (параметра Мак-Илвейна L в диапазоне от 1.12 до 1.22, экваториального питч-угла в диапазоне от 40° до 90° , инвариантов K и Φ) и фазы солнечного цикла, соответствующей временному диапазону от июля 2006 до сентября 2009 годов; распределения потоков захваченных протонов по экваториальному углу и параметру Мак-Илвейна L для указанных частиц;

- b. вариации потоков захваченных протонов во внутреннем радиационном поясе Земли в течение цикла солнечной активности в для разных значений параметра Мак-Илвейна L в диапазоне от 1.1 до 1.22, экваториального питч-угла в диапазоне от 40° до 90° и энергии в диапазоне от 100 МэВ до 2.0 ГэВ во временном диапазоне от июля 2006 до сентября 2014 годов.
2. Разработан метод восстановления направления частицы в пространстве с в условиях изменяющейся ориентации прибора, пропусков данных о его ориентации и отклонения частицы в магнитном поле спектрометра.

Основное содержание диссертации было опубликовано в следующих работах:

1. Bruno, A.,..., Malakhov V.V. *et al.* Solar-cycle Variations of South Atlantic Anomaly Proton Intensities Measured with the PAMELA Mission. *Astrophys. J. Lett.* **917**, L21 (2021).
2. Bruno, A.,..., Malakhov V.V. *et al.* Geomagnetically trapped, albedo and solar energetic particles: Trajectory analysis and flux reconstruction with PAMELA. *Adv. Sp. Res.* **60**, 788–795 (2017).
3. Adriani, O.,..., Malakhov V.V. *et al.* Trapped proton fluxes at low Earth orbits measured by the PAMELA experiment. *Astrophys. J.* **799**, (2015).
4. Adriani, O.,..., Malakhov V.V. *et al.* Reentrant albedo proton fluxes measured by the PAMELA experiment. *J. Geophys Res.* **120**, (2015)
5. Malakhov, V. V. *et al.* Time Variations of Proton Flux in Earth Inner Radiation Belt for 2006–2015 Years based on the PAMELA and the ARINA Data. *Phys. Procedia* **74**, 377–381 (2015).

6. Bruno, A.,..., Malakhov V.V. et al. PAMELA's measurements of geomagnetically trapped and albedo protons. in Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2015) 288 (Sissa Medialab, 2016). doi:10.22323/1.236.0288
7. Malakhov, V. V. *et al.* Time variations of proton flux in Earth inner radiation belt during 23/24 solar cycles based on the PAMELA and the ARINA data. *J. Phys. Conf. Ser.* **632**, 012069 (2015).

Список литературы

1. D. Heynderickx *et al.* // IEEE Transactions on Nuclear Science V. 46, № 6, 1999. – P. 1475-1480.
2. R. S. Selesnick *et al.* // Journal of Geophysical Research: Space Physics V. 123, 2018. – P. 685-697.
3. R. S. Selesnick, M. D. Looper и R. A. Mewaldt. // Space Weather V. 5, № 4, 2007. – P. 04003.
4. T. Goka, H. Matsumoto и Sh. Takagi. // Radiation Measurements V. 30, № 5, 1999.-P. 617-624.
5. M. S. Gussenhoven. // CRRESPRO Documentation. Tech. Rep. 1994.
6. S. L. Huston и K. A. Pfitzer. // IEEE Transactions on Nuclear Science V. 45, № 6, 1998. – P. 2972-2978.
7. J. I. Vette. // The NASA/National Space Science Data Center trapped radiation model program (1964-1991), 1991.
8. D. M. Sawyer, J. I. Vette. // Ap-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. 1976.
9. P. Picozza *et al.* // Astroparticle Physics V.27, 2007.- P. 296-315.
10. S. F. Singer // Physical Review Letters V. 1, 1958. – P. 171–173.
11. R.W.Fillius // Journal of Geophysical Research V.71 №1, 1966.- P. 97-123.
12. W.L. Brown *et al.* // Bell system technical journal V.42 №4, 1963.- P. 1505-1559
13. K.L. Ackerson, L.A. Frank // Journal of geophysical research V.72 №3, 1967.- P. 951-957
14. L.A. Frank // Journal of Geophysical Research V.69 №11, 1964.- P. 2171-2191
15. D. Boshier *et al.* // IEEE Transactions on Nuclear Science V.61 №6, 2014.- 3401-3407

16. A. A. Beliaev, J. F. Lemaire. // Evaluation of the INP radiation belts models, TREND, Tecjnicnal Note A. 1994.
17. A. A. Beliaev, J. F. Lemaire. // Radiation Belts: Models and Standards. 2013. – P. 141–145.
18. R. S. Selesnick *et al.* // Journal of Geophysical Research V. 119 № 8, 2014. – P. 6541-6552
19. R. S. Selesnick, J. M. Albert. // Journal of Geophysical Research: Space Physics V. 124, 2019. – P. 5516-5527.
20. J. Sullivan // Nuclear Instruments and Methods V.95 №1, 1971.- P. 5-11
21. R.S. Selesnick *et al.* // Journal of Geophysical Research V.100 №A6, 1995.- P. 9503-9518