

*На правах рукописи*

**Гришанцева Любовь Александровна**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ  
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ ВТОРИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В  
ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

01.04.16 – Физика ядра и элементарных частиц

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Автор

**Москва, 2010**

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, проф. Гальпер Аркадий Моисеевич

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, проф. Махмутов Владимир Салимгиреевич

Доктор физико-математических наук, проф. Климов Станислав Иванович

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Защита состоится « 11 » марта 2010 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 НИЯУ МИФИ по адресу:

115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. 324-84-98, 323-92-51

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010г.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., проф.



С.Е. Улин

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время увеличилось число запускаемых искусственных спутников Земли, предназначенных как для выполнения научных, так и прикладных задач. В каждом случае, независимо от выполняемой задачи, для разработки режимов работы аппаратуры необходимо знать радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, т.е. потоки заряженных частиц различных энергий в зависимости от широты, долготы и высоты, в том числе потоки электронов и позитронов.

В настоящее время для этой цели обычно используют существующие модели генерации вторичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве. В основе этих моделей лежит один и тот же механизм, основанный на взаимодействии первичных космических лучей с ядрами атомов остаточной атмосферы Земли. В результате рождаются пионы, которые через цепочку процессов распада  $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm}$  и  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  образуют электроны и позитроны высоких энергий. Полученные таким образом вторичные частицы могут быть захвачены геомагнитным полем [1].

Экспериментальные работы, выполненные на космических аппаратах, подтвердили и уточнили основные выводы работы [1] для потоков частиц под радиационным поясом. Анализ результатов, выполненный в работах [2, 3, 5 и ссылки в них], показал, что ядерные взаимодействия первичных космических лучей с остаточной атмосферой являются главным источником электронов и позитронов высоких энергий под радиационным поясом. Было обнаружено более чем двукратное преобладание позитронов над электронами ( $e^+/e^-$  в пределах 1-4), а также изменение отношения  $e^+/e^-$  для разных областей околоземного пространства [2, 3, 4 и ссылки в них]. Данный эффект оказалось возможно объяснить дополнительным учетом изменения энергетического спектра первичных космических лучей (эффект геомагнитного обрезания космических лучей), а также дрейфовыми эффектами в геомагнитном поле для электронов и позитронов, образующихся в атмосфере Земли и выходящих в космическое пространство.

Несмотря на сделанные уточнения, наблюдаются расхождения потоков частиц под радиационным поясом Земли, предсказываемых современными моделями генерации вторичных электронов и позитронов, с экспериментальными данными [5]. К тому же статистика, накопленная в экспериментах к настоящему времени, не позволяет провести детальный анализ пространственных характеристик дифференциальных потоков высокоэнергичных электронов и позитронов. В связи с этим, настоящая диссертационная работа, посвященная изучению потоков высокоэнергичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве, является актуальной благодаря хорошей статистической точности и широкому диапазону энергий экспериментальных данных.

Цель работы. Разработка математической модели спектрометра «АРИНА», определение характеристик спектрометров «АРИНА» и «ПАМЕЛА» при помощи моделирования, а также экспериментальное исследование потоков высокоэнергичных электронов и позитронов вторичного происхождения в околоземном космическом пространстве в период с июля 2006 по декабрь 2008 года.

Научная новизна работы.

- Впервые на одном ИСЗ получены экспериментальные данные по суммарному потоку электронов и позитронов в диапазоне энергий 3 МэВ – 10 ГэВ.
- Впервые получены экспериментальные данные по потокам вторичных позитронов с энергиями до 10 ГэВ.
- Впервые получены детальные пространственные зависимости потоков электронов и позитронов вторичного происхождения в околоземном космическом пространстве.
- Проведен анализ соответствия различных моделей генерации вторичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве

экспериментальным данным, полученным в экспериментах АРИНА и ПАМЕЛА

Результаты, выносимые на защиту.

- Первое измерение суммарного потока электронов и позитронов в диапазоне энергий 3 МэВ – 10 ГэВ.
- Первое измерение потоков вторичных позитронов с энергиями до 10 ГэВ.
- Детальные широтные зависимости потоков электронов и позитронов вторичного происхождения в околоземном космическом пространстве.

Практическая ценность работы. Полученные в экспериментах АРИНА и ПАМЕЛА результаты благодаря хорошей статистической точности могут быть использованы для уточнения модели генерации электронов и позитронов с энергиями от несколько МэВ до 10 ГэВ в околоземном космическом пространстве.

Вклад автора. Изложенные в работе результаты получены автором лично или в соавторстве при его участии.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на:

1. Симпозиуме, посвященном современным научным исследованиям НАТО (NATO Advanced Research Workshop), г. Родос, Греция, 2003.
2. Российской конференции по космическим лучам, Санкт Петербург, 2008.
3. Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS), г. Кошице, Словакия, 2008.
4. 31-ой международной конференции по космическим лучам (31<sup>st</sup> ICRC), г. Лодзь, Польша, 2009.

5. Научной сессии МИФИ, Москва, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 и 2009 г.г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 печатные научные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении приводится общая характеристика диссертационной работы. В Главе 1 дается обзор результатов экспериментального и теоретического изучения потоков вторичных электронов и позитронов с энергиями от нескольких МэВ до нескольких ГэВ в околоземном космическом пространстве. Показывается практическая ценность таких исследований.

В следующих главах описываются:

Глава 2 – Спектрометры АРИНА и ПАМЕЛА, предназначенные для изучения потоков заряженных частиц различного происхождения в околоземном космическом пространстве.

Глава 3 – Методики идентификации частиц, зарегистрированных приборами АРИНА и ПАМЕЛА, и определение физических характеристик спектрометров (светосилы и функции отклика) с учетом разработанных методов идентификации.

Глава 4 – Результаты экспериментальных исследований потоков высокоэнергичных электронов и позитронов под радиационным поясом Земли.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Общий объем составляет 125 страниц, включая 53 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 79 наименований.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На сегодняшний день значительный интерес вызывает детальное изучение пространственного поведения потоков высокоэнергичных

заряженных частиц (в частности, электронов и позитронов). Решение данной задачи необходимо для построения точных моделей околоземного космического пространства, имеющих, в том числе, и прикладное значение. Обзор результатов по потокам высокоэнергичных электронов и позитронов, полученных в различных экспериментах до начала работы спектрометров АРИНА и ПАМЕЛА приводится в **Главе 1**. Первые непосредственные измерения потоков электронов высокой энергии в околоземном космическом пространстве были получены при экспозиции небольшой стопки ядерной фотоэмульсии на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) «Восток-5» в 1963 г. [1]. В 80-х годах в экспериментах на спутнике «Интеркосмос-17» и орбитальных станциях «Салют-7» и «Мир» были проведены первые измерения зарядового состава электронной компоненты потоков частиц, как в радиационном поясе Земли, так и под ним. Показано превышение потока позитронов над электронами при энергиях выше 100 МэВ под радиационным поясом Земли, а также совпадение потоков альбеда (питч-угол меньше  $50^\circ$ ) и квазизахваченных (питч-угол больше  $70^\circ$ ) частиц на экваторе (отличие начинается на средних широтах).

Новый шаг в исследовании электронов и позитронов в магнитосфере Земли был сделан в американском эксперименте AMS-1 [5] на борту STS-91. Результаты эксперимента показали более чем четырехкратное превышение потоков квазизахваченных позитронов над электронами в экваториальной области под радиационным поясом Земли при энергиях порядка 500-800 МэВ. При этом область наблюдения была разбита по геомагнитной широте на 6 интервалов, от экватора к средним широтам. Было показано, что потоки квазизахваченных частиц начинают отличаться от альбеда только на средних широтах (порядка  $40^\circ$ ).

Механизм формирования потоков вторичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве, основанный на взаимодействии первичных космических лучей с ядрами атомов остаточной атмосферы Земли, был предложен еще в 60-70 гг. прошлого века. В результате этих взаимодействий рождаются заряженные пионы, которые через цепочку

процессов распада  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \rightarrow e^\pm$  образуют электроны и позитроны высоких энергий, которые могут быть захвачены магнитным полем Земли. Если частицы родились на такой высоте и с такими питч-углами, что многократно отражаются в зеркальных точках, но при долгом дрейфе, из-за асимметрии магнитного поля относительно центра Земли, попадают в плотные слои атмосферы и погибают, то они считаются квазизахваченными. Частицы с малыми питч-углами, зеркальные точки которых находятся на большой глубине в атмосфере, называются электронами (позитронами) альбеда. Согласно этой модели потоки электронов и позитронов практически однородно заполняют окрестности Земли, формируя, так называемый, «ореол». Поскольку сечения образования  $\pi^-$  и  $\pi^+$  практически совпадают, то потоки вторичных электронов и позитронов также практически равны.

В последние годы были проведены различные уточнения и дополнения данной модели генерации. В частности были учтены дополнительные каналы образования вторичных электронов и позитронов (распад нейтральных пионов), анизотропия потока первичных космических лучей в верхней атмосфере из-за Восточно-западной асимметрии геомагнитного обреза. Кроме того, в качестве потока протонов космических лучей были использованы экспериментальные данные спектрометра AMS [5]. Расчеты были выполнены с помощью метода Монте-Карло с учетом реального магнитного поля Земли и различных физических процессов взаимодействия частиц с веществом, таких как тормозное и синхротронное излучения, генерация электрон-позитронных пар гамма-квантами, ионизационные потери энергии, многократное рассеяние. Также учитывались угловые распределения продуктов реакций. Однако в области энергий порядка 100 МэВ, а также на средних широтах рассчитанные по уточненным моделям генерации значения потоков электронов и позитронов лежат систематически ниже экспериментальных.

Поскольку существуют некоторые разногласия результатов расчета с экспериментами, получение новых данных с лучшей статистической достоверностью является актуальной задачей.



В **Главе 2** приведено описание физических схем и принципов работы приборов АРИНА и ПАМЕЛА.

Основная научная задача эксперимента АРИНА – изучение потоков высокоэнергичных заряженных частиц, всплесков и вариаций потоков таких частиц. Спектрометр АРИНА состоит из стопки сцинтилляционных детекторов на основе полистирола и позволяет отдельно измерять потоки высокоэнергичных электронов в диапазоне энергий 3-30 МэВ и протонов в диапазоне энергий 30 – 100 МэВ. Геометрический фактор прибора – 10 см<sup>2</sup>ср.

Основная цель эксперимента ПАМЕЛА – детальные измерения состава и энергетических спектров космических лучей (включая потоки античастиц) в диапазоне энергий 50 МэВ – 300 ГэВ. Спектрометр состоит из времяпролетной системы (ВПС) на основе сцинтилляционных счетчиков, магнитного спектрометра, калориметра, нижнего сцинтилляционного счетчика С4, а также нейтронного детектора. Времяпролетная система состоит из 6 слоев, каждый из которых разделен на полосы, что позволяет восстановить угол влета частицы в прибор. Внеапертурные частицы могут быть отделены по срабатыванию системы антисовпадений. Геометрический фактор прибора ПАМЕЛА равен 21.6 см<sup>2</sup>ср, величина магнитного поля спектрометра – 0.5 Тл, разрешение времяпролетной системы – около 300 пс.

В **Главе 3** детально описаны методики идентификации электронов и позитронов в экспериментах АРИНА и ПАМЕЛА, определены характеристики спектрометров, а также эффективности регистрации частиц с учетом критериев отбора. Проанализирован вклад протонов и пионов в потоки электронов и позитронов, показано, что он зависит от области околоземного пространства.

Так как ионизационные потери нерелятивистских протонов значительно превышают ионизационные потери релятивистских электронов, остановившиеся в веществе прибора АРИНА частицы, идентифицируются по их энерговыделению (амплитуде сигнала с фотоумножителя) в каждом детекторе. Энергия электронов и протонов измеряется по их пробегу в приборе. Частицы обратного направления и частицы, прошедшие через весь прибор, отсекаются детектором С10, включенным в антисовпадение.

Для определения характеристик спектрометра АРИНА была разработана математическая модель прибора с учетом элементов конструкции на основе пакета GEANT3.21. По полученным в результате моделирования данным было определено относительное энергетическое разрешение спектрометра для разных типов частиц и светосила спектрометра (геометрический фактор с учетом эффективностей детекторов и методики идентификации частиц). Наряду с физическими процессами взаимодействия частицы с веществом спектрометра эффективность каждого детектора также определяет его светосилу и функцию отклика и должна быть учтена тщательным образом.

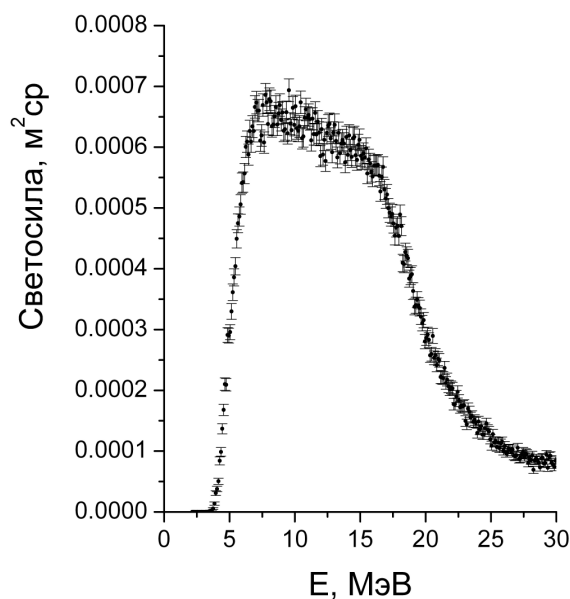


Рисунок 1. Зависимость светосилы спектрометра от начальной энергии электрона с учетом критериев отбора и реальных эффективностей детекторов

В эксперименте АРИНА эффективности детекторов определяются непосредственно после получения каждого файла с научной информацией в процессе экспресс-обработки. Для этого отбираются события, прошедшие через все детекторы спектрометра. Эффективностью исследуемого детектора называется величина  $\eta = \frac{N_r}{N_p}$ , где  $N_r$  – число событий, зарегистрированных данным детектором, а  $N_p$  – прошедших через исследуемый детектор. Таким образом можно определить эффективность каждого детектора спектрометра АРИНА, кроме С9 и С10. Для определения их характеристик регулярно проводятся измерения при отключенном из антисовпадений детекторе С10. Ежедневный мониторинг показал, что эффективности детекторов практически не изменяются со временем и составляют величины от 90 до 99.9%. Детальные расчеты характеристик спектрометра АРИНА с учетом реальных эффективностей детекторов показали, что относительное энергетическое

разрешение составляет величину порядка 10%, а светосила достигает максимального значения  $6.5 \pm 0.5 \text{ см}^2 \text{ ср}$  при энергиях электрона от 7 до 17 МэВ (см. рис. 1). Вероятность имитации электронов протонами и пионами составляет величину порядка 0.1%.

Для идентификации электронов и позитронов в эксперименте ПАМЕЛА использовались времяпролетная система, магнитный спектрометр и электромагнитный калориметр. Магнитный спектрометр позволяет определить знак заряда частицы и ее жесткость по отклонению в магнитном поле. Для отделения частиц, летящих снизу-вверх, применялась времяпролетная система. Протоны и электроны (а также антипротоны и позитроны) разделяются при использовании калориметра (топологических различий электромагнитного и адронного каскадов).

Основные характеристики спектрометра ПАМЕЛА (светосила, энергетическое разрешение) были определены при помощи метода Монте-Карло моделирования прохождения частиц через вещество детекторов прибора. Для этого использовалась математическая модель спектрометра, разработанная коллаборацией ПАМЕЛА на базе пакета GEANT3. Светосила прибора представлена на рис. 2. Видно, что максимальное значение приходится на значения энергии порядка 1 ГэВ, а затем светосила начинает уменьшаться.

Для восстановления и правильной интерпретации дифференциальных спектров частиц был проведен учет эффективностей детекторов в каждый момент времени и вклад фона (протонов и пионов). Эффективности времяпролетной системы, магнитного спектрометра и электромагнитного калориметра были определены по экспериментальным данным для каждого дня

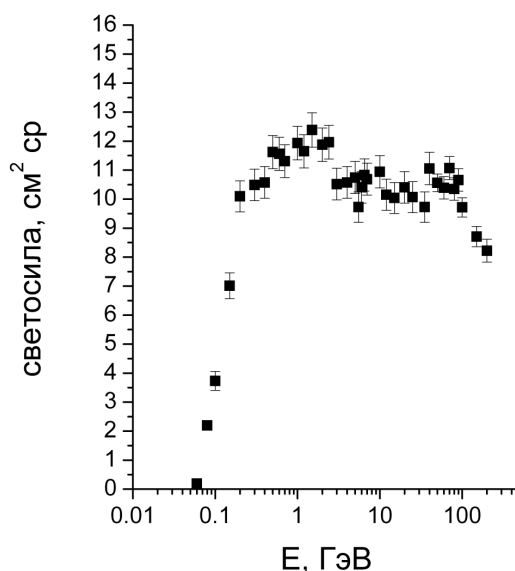


Рисунок 2. Зависимость светосилы спектрометра от начальной энергии электрона с учетом критериев отбора

работы спектрометра ПАМЕЛА. Вклад протонного и пионного фона в поток электронов и позитронов был оценен с использованием, как результатов моделирования, так и непосредственно экспериментальных данных. Показано, что фон зависит от области околоземного пространства (то есть от потока протонов космических лучей) и составляет не более 1% при использовании предложенных критериев отбора.

В **Главе 4** описаны условия проведения экспериментов АРИНА и ПАМЕЛА на борту ИСЗ «Ресурс-ДК1». Представлены дифференциальные спектры потоков вторичных электронов и позитронов, полученные с помощью этих двух приборов, а также отношение потока позитронов к потоку электронов. Проведено сравнение с предыдущими экспериментами.

Для описания магнитного поля Земли использовались координаты МакИлвайна – величина магнитного поля в точке наблюдения ( $B$ ) и величина  $L$ , характеризующая пространственное расположение силовой магнитной линии. Для дипольного магнитного поля величина  $L$  определяется, как расстояние до данной силовой линии на геомагнитном экваторе, выраженное в радиусах Земли. Геомагнитная широта ( $\theta_m$ ) связана с  $L$ -оболочкой отношением:

$$\frac{1}{L} = \cos^2(\theta_m).$$

Координаты  $L$  и  $B$  вычислялись по модели IGRF'05, описывающей магнитное поле Земли полиномом Лежандра 10-ой степени [6].

Спектрометры АРИНА и ПАМЕЛА были установлены на борту ИСЗ «Ресурс-ДК1» №1, запущенного на эллиптическую орбиту 15 июня 2006 года. Высота орбиты находится в диапазоне 350-600 км, наклонение – около 70°. При подобных характеристиках орбиты спутник значительную часть времени находится вне (ниже) радиационного пояса Земли, что позволяет эффективно регистрировать потоки высокоэнергичных электронов и позитронов вторичного происхождения.

Анализ ориентации ИСЗ «Ресурс-ДК1» показал, что главная ось спектрометра ПАМЕЛА практически все время измерений направлена в зенит. Питч-углы регистрируемых частиц в области геомагнитного экватора близки к 90° и уменьшаются практически до нуля с увеличением геомагнитной широты.

Таким образом, на низких и средних широтах, регистрируются потоки квазизахваченных электронов и позитронов. В нашем анализе область БМА была исключена из рассмотрения, путем выбора  $V > 0.23$  Гс.

На рис. 3 представлено отношение потока позитронов ( $F_e^+$ ) к электронам ( $F_e^-$ ) в диапазоне энергий 0.08 – 10 ГэВ. Видно, что данное отношение изменяется с энергией и достигает значения  $4.5 \pm 0.5$  при 300 – 800 МэВ, что хорошо согласуется с данными экспериментов AMS и МАРИЯ.

При этом статистическая точность результатов, полученных в эксперименте ПАМЕЛА, дает возможность построить более детальную зависимость отношения от энергии.

Большое значение отношения  $F_e^+ / F_e^-$  может быть объяснено наличием Восточно-Западной асимметрии геомагнитного обрезания потока первичных космических лучей. С уменьшением энергии ларморовский радиус частицы уменьшается и данный эффект становится менее значительным, а, поскольку при энергиях менее 100 МэВ возрастает относительная роль процессов тормозного излучения и генерации электрон-позитронных пар гамма-квантами, образованными в результате распада нейтральных пионов, то  $F_e^+ / F_e^-$  - отношение при этих энергиях стремится к единице. Уменьшение отношения  $F_e^+ / F_e^-$  с возрастанием энергии происходит как по причине уменьшения роли восточно-западной асимметрии для высокоэнергичных протонов, ответственных за образование электронов и позитронов с энергиями в несколько ГэВ, так и благодаря увеличению потока электронов за счет частиц космических лучей.

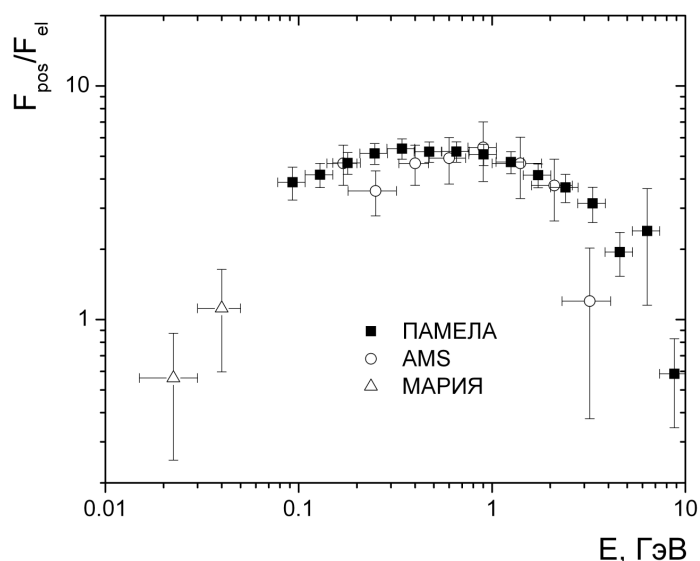


Рисунок 3. Зависимость отношения потока позитронов к потоку электронов от энергии в экваториальной области околоземного космического пространства ( $L < 1.2$ ,  $V > 0.23$ )

Совместное использование данных, полученных в экспериментах АРИНА и ПАМЕЛА, позволило получить суммарный поток в широком диапазоне энергий (от 3 МэВ до 10 ГэВ, рис. 4). На графике также представлены данные спектрометров МАРИЯ и AMS. Видно, что суммарные потоки, полученные в экспериментах, согласуются между собой. Отметим, что впервые на одном ИСЗ получены экспериментальные данные по суммарному потоку электронов и позитронов в столь широком диапазоне энергий.

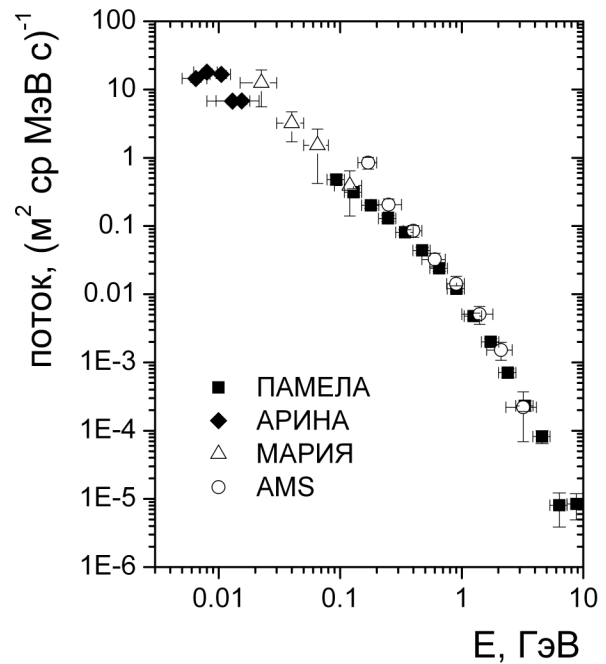


Рисунок 4. Суммарный поток электронов и позитронов в области геомагнитного экватора по данным экспериментов АРИНА и ПАМЕЛА.

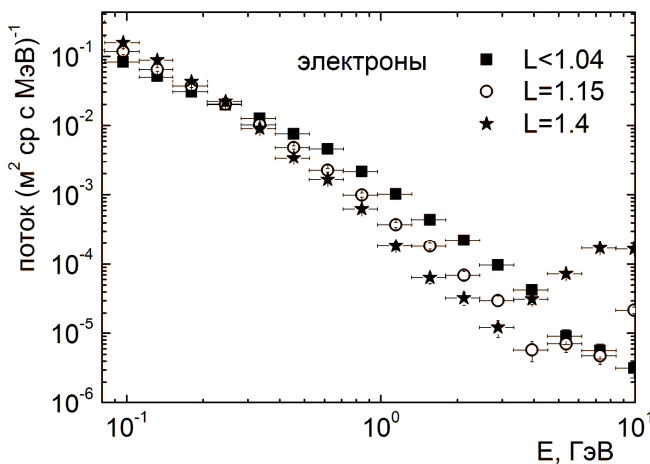


Рисунок 5. Дифференциальный энергетический спектр электронов в зависимости от геомагнитной широты

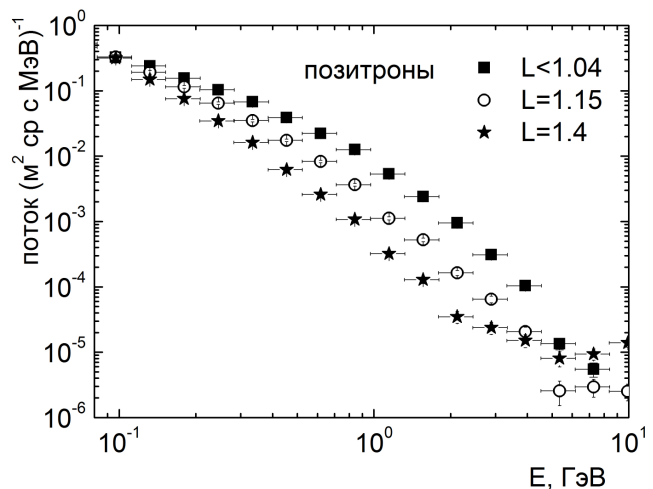


Рисунок 6. Дифференциальный энергетический спектр позитронов в зависимости от геомагнитной широты

Благодаря хорошей статистической точности спектрометр ПАМЕЛА позволяет получить значительно более детальные зависимости потоков электронов и позитронов от широты, чем предыдущие эксперименты. Для примера, на рис. 5 и 6 показана зависимость потоков электронов и позитронов по данным эксперимента ПАМЕЛА для трех геомагнитных широт. Возрастание

потока с энергией, начиная с нескольких ГэВ, связано с появлением вклада первичных космических лучей. Особенно ярко это проявляется для электронов на  $L=1.4$ , где жесткость геомагнитного обрезания равна 7.6 ГэВ. Отметим также, что спектры, как электронов, так и позитронов, с ростом геомагнитной широты становятся более мягкими, благодаря уменьшению границы квазизахвата частиц магнитным полем Земли [1]. Отметим также, что в данной диссертационной работе впервые получены потоки вторичных позитронов с энергиями вплоть до 10 ГэВ.

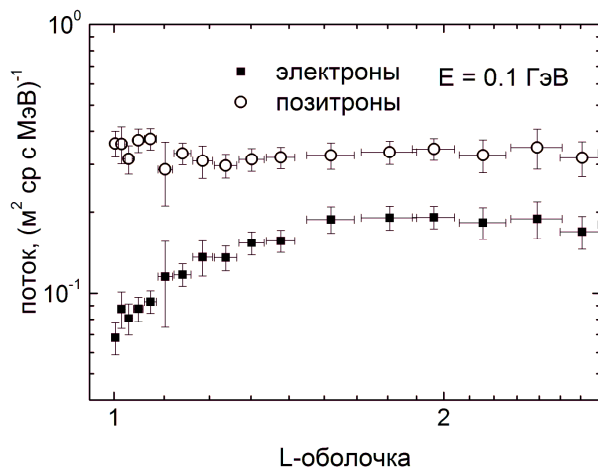


Рисунок 7. Зависимость потоков электронов и позитронов с энергией 0.85 ГэВ от широты

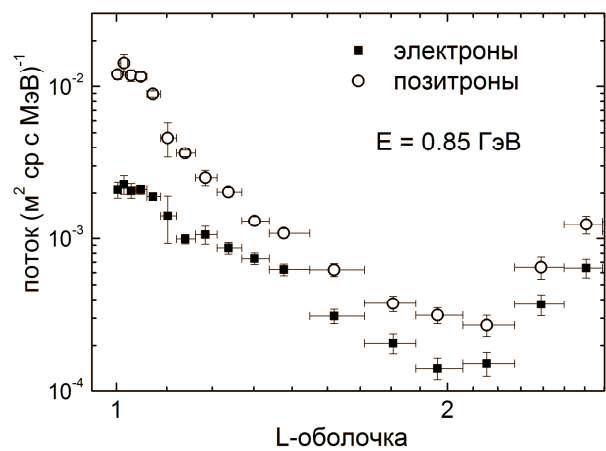


Рисунок 8. Зависимость потоков электронов и позитронов с энергией 0.1 ГэВ от широты

Детальные зависимости потоков электронов и позитронов для двух энергий (100 МэВ и 850 МэВ) показаны на рис. 7 и 8. Отметим различное поведение спектров электронов и позитронов при низких энергиях (порядка 100 МэВ). Поток электронов уменьшается при переходе от средних широт к экватору, в то время как поток позитронов остается практически постоянным. По-видимому, это связано с сочетанием влияния Восточно-Западной асимметрии, сечениями образования электронов и позитронов при взаимодействии протонов космических лучей с атмосферой Земли, а также рассеянием электронов и позитронов в атмосфере.

Несмотря на то, что все эти процессы в настоящее время хорошо известны, спектры, полученные в экспериментах, не всегда полностью воспроизводятся существующими моделями. На рис. 9 и 10 показано сравнение дифференциальных энергетических спектров электронов и позитронов с моделями генерации вторичных электронов и позитронов Михайлова (модель 1 [7]) и Дерома (модель 2 [8]). Можно заметить расхождения полученных в

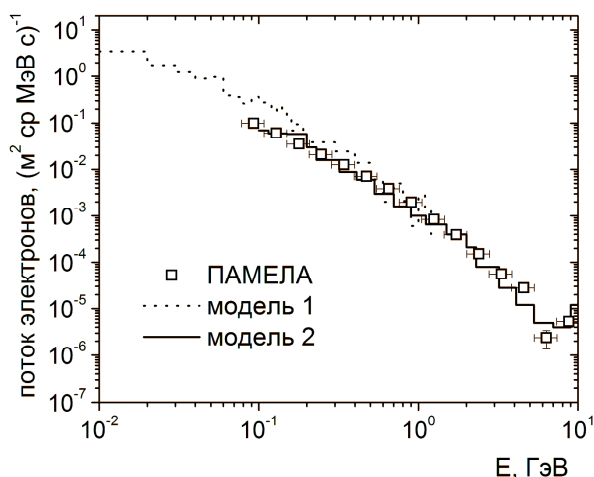


Рисунок 9. Дифференциальный энергетический спектр электронов. Модель 1 – [7]; модель 2 – [8].

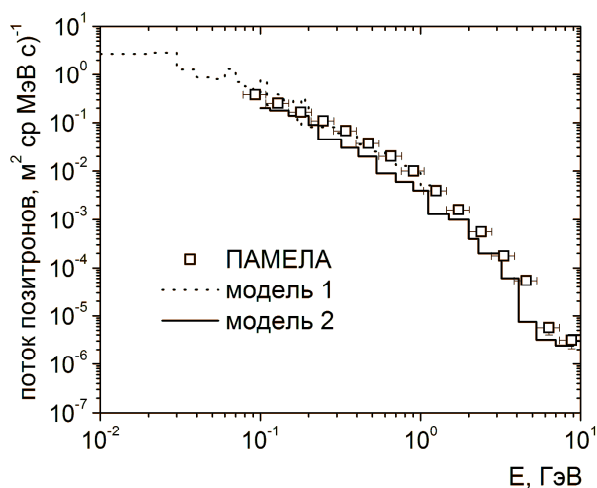


Рисунок 10. Дифференциальный энергетический спектр позитронов. Модель 1 – [7]; модель 2 – [8].

данной работе экспериментальных результатов с моделями. Так поток позитронов неплохо описывается моделью Дерома, в то время, как поток, предсказанный моделью Михайлова немного выше измеренных значений. Поток позитронов, напротив, лучше описывается моделью Михайлова, в то время как результаты, полученные при помощи модели Дерома, находятся систематически ниже экспериментальных данных. Благодаря статистической достоверности и широкому энергетическому диапазону, результаты экспериментов АРИНА и ПАМЕЛА, представленные в данной диссертационной работе, могут быть использованы для уточнения моделей генерации вторичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве.



В ходе работы получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель спектрометра АРИНА с учетом элементов конструкции. Проведен расчет физических характеристик спектрометра с учетом реальных эффективностей детекторов. Показано, что спектрометр имеет относительное энергетическое разрешение порядка 10%, а максимальная светосила –  $6.5 \pm 0.5 \text{ см}^2 \text{ ср}$  при энергиях от 7 до 17 МэВ, что позволяет проводить исследование дифференциальных энергетических спектров электронов.

2. Разработана методика идентификации электронов и позитронов с энергиями от 80 МэВ до нескольких десятков ГэВ по данным спектрометра ПАМЕЛА. Определены физические характеристики прибора с использованием экспериментальных данных и результатов расчетов методом Монте-Карло. Исследована зависимость эффективности регистрации от энергии частиц и времени работы прибора. Максимальная светосила спектрометра примерно равна  $12.0 \pm 0.5 \text{ см}^2 \text{ ср}$  при энергиях от 600 МэВ до нескольких ГэВ. Показано, что протонный и пионный вклад в потоки электронов и позитронов зависит от области околоземного пространства (то есть от потока протонов космических лучей) и составляет не более 1% при использовании предложенных критериев отбора

3. На основании обработки и анализа экспериментальных данных спектрометров АРИНА и ПАМЕЛА получены следующие результаты:

3.1. Построено отношение потоков вторичных позитронов к электронам под радиационным поясом Земли для энергий от 80 МэВ до 10 ГэВ. Показано, что максимальное значение, равное 5 достигается при энергиях 300-800 МэВ. Также показано уменьшение величины отношения потоков позитронов к электронам с ростом широты наблюдения;

3.2. Получены отдельные спектры вторичных электронов и позитронов в экваториальной области под радиационным поясом Земли при энергиях от 100 МэВ до 10 ГэВ. Также получен

суммарный спектр позитронов и электронов в диапазоне энергий от 3 МэВ до 10 ГэВ.

- 3.3. Исследованы зависимости потоков позитронов и электронов от энергии частицы (в диапазоне 80 МэВ – 10 ГэВ) и широты места наблюдения (от 0 до 55°). Показано, что спектры частиц с ростом широты становятся более мягкими.
- 3.4. Проведено сравнение результатов эксперимента ПАМЕЛА с моделями Михайлова и Дерома генерации потоков вторичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве. Показано наличие расхождения экспериментальных данных и потоков, предсказанных данными моделями. Таким образом, экспериментальные результаты, полученные в эксперименте ПАМЕЛА, могут быть использованы для уточнения моделей генерации.

Основное содержание диссертации представлено на 10 конференциях и опубликовано в 24-ех печатных научных работах (в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК). Наиболее полно материалы диссертации представлены в следующих опубликованных трудах научных конференций и ведущих рецензируемых научных журналах:

1. А.Г. Батищев, Л.А. Гришанцева, П.А. Захаров, С.В. Колдашов, П.Ю. Наумов, В.А. Шилов, Система сбора и обработки информации в малогабаритной аппаратуре для регистрации всплесков высокоэнергичных заряженных частиц в магнитосфере Земли / А.Г.Батищев [и др.] // Научная сессия МИФИ 2002 г, Сборник научных трудов. – Т. 7. – С. 47.
2. А.Г. Батищев, С.А. Воронов, А.М. Гальпер, Л.А. Гришанцева, С.В. Колдашов, П.Ю. Наумов, В.Ю. Чесноков, В.А. Шилов, Вопросы планирования и управления в эксперименте «АРИНА» на ИСЗ «Ресурс-ДК1» / А.Г. Батищев [и др.] // Научная сессия МИФИ 2003 г, Сборник научных трудов. – Т. 7. – С. 37.

3. L.A. Grishantseva, ARINA instrument for observation of solar-magnetosphere variations of charged particle fluxes / L.A. Grishantseva // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure (ESPRIT-2003), Proceedings of NATO Advanced Research Workshop. – P. 32.
4. А.Г. Батищев, Л.А. Гришанцева, С.В. Колдашов, П.Ю. Наумов, В.Ю. Чесноков, Интерфейсы взаимодействия систем бортового спектрометра заряженных частиц с системами космических аппаратов / А.Г. Батищев [и др.] // Научная сессия МИФИ 2004 г., Сборник научных трудов. – Т. 7. – С. 79.
5. А.В. Бакалдин, А.Г. Батищев, А.Н. Гирин, Л.А. Гришанцева, С.В. Колдашов, П.Ю. Наумов, Режимы работы аппаратуры и условия накопления информации в эксперименте «АРИНА» на борту «Ресурс-ДК1» / А.В. Бакалдин [и др.] // Научная сессия МИФИ 2004 г., Сборник научных трудов. – Т. 7. – С. 77.
6. Л.А. Гришанцева, С.В. Колдашов, В.В. Михайлов, Методика восстановления энергетических спектров в эксперименте «АРИНА» / Л.А. Гришанцева, С.В. Колдашов, В.В. Михайлов // Научная сессия МИФИ 2005 г., Сборник научных трудов. – Т. 7. – С. 74.
7. Гришанцева Л.А., Колдашов С.В., Михайлов В.В., Safagna F., Di Felice V., Picozza P., Sparvoli R. Расчет эффективности регистрации спектрометром «ПАМЕЛА» потоков электронов с энергией 50-300 МэВ в околоземном космическом пространстве / Л.А. Гришанцева [и др.] // Научная сессия МИФИ 2006 г., Сборник научных трудов. – Т. 7. – С. 59.
8. А.В. Бакалдин, ... Л.А. Гришанцева, ... Эксперимент «АРИНА» по регистрации космических предвестников землетрясений на борту ИСЗ «Ресурс-ДК1» №1 / А.В. Бакалдин [и др.] // Научная сессия МИФИ 2006 г., Сборник научных трудов. – Т. 7. – С. 61.
9. Гальпер А.М., Гришанцева Л.А., Колдашов С.В., Шилов В.А. от имени коллаборации «ПАМЕЛА», Зарядовое соотношение в электрон-позитронных потоках во внутренней зоне радиационного пояса Земли /

- А.М. Гальпер [и др.] // Научная сессия МИФИ 2008 г., Сборник научных трудов. – Т. 9. – С. 143
10. O. Adriani, ..., L. Grishantseva, ... Secondary electron and positron fluxes in the Earth magnetosphere near the geomagnetic equator / O. Adriani [et al.] // Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Cosmic Ray Symposium, Kosice, Slovakia, edited by P. Kiraly, K. Kudela, M. Stehlik, A.W. Wolfendale. – P. 180. – ISBN 978-80-968060-5-8
11. А.М. Гальпер, ... Л.А. Гришанцева Аномальный эффект эксперимента «ПАМЕЛА» – важный шаг к пониманию природы темной материи / А.М. Гальпер [и др.] // Научная сессия МИФИ 2009, Сборник научных трудов. – Т.1. – С. 94. – ISBN 978-5-7262-1179-4
12. В.В. Михайлов, ... Л.А. Гришанцева ... Измерения потоков протонов и ядер гелия первичных космических лучей от 100 МэВ до 100 ГэВ в эксперименте ПАМЕЛА / В.В. Михайлов [и др.] // Научная сессия МИФИ 2009, Сборник научных трудов. – Т.4. – С. 61. – ISBN 978-5-7262-1179-4
13. Л.А. Гришанцева ... Высокоэнергичные электроны и позитроны в околоземном космическом пространстве / Л.А. Гришанцева [и др.] // Научная сессия МИФИ 2009, Сборник научных трудов. – Т.4. – С. 65. – ISBN 978-5-7262-1179-4
14. С.В. Борисов, ... Л.А. Гришанцева, ... Методика измерения электрон-позитронного спектра с использованием калориметра спектрометра ПАМЕЛА / С.В. Борисов [и др.] // Научная сессия МИФИ 2009, Сборник научных трудов. – Т.4. – С. 69. – ISBN 978-5-7262-1179-4
15. Liubov A. Grishantseva, M.A. Vzheumikhova, A.M. Galper and S.V. Koldashov, Electron and proton fluxes measured by the ARINA spectrometer in the Earth magnetosphere during December 2006 solar events / L.A. Grishantseva [et al.] // Proceedings of ICRC2009, Lodz, Poland, [электронный ресурс]. -1 электр. опт. диск (CD-ROM). Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – ISBN 978-83-929057-0-7.
16. Liubov Grishantseva on behalf of the PAMELA collaboration, Sub-cutoff electrons and positrons in the near Earth space / L.A. Grishantseva //

- Proceedings of ICRC2009, Lodz, Poland, [электронный ресурс]. -1 электр. опт. диск (CD-ROM). Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – ISBN 978-83-929057-0-7.
17. А.В. Бакалдин, ... Л.А. Гришанцева, ... Экспериментальная аппаратура для регистрации всплесков высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве / А.В.Бакалдин [и др.] // Изв. РАН. Серия физическая. – 2005. – Т. 69. – № 6 – С. 918.
18. А.В. Бакалдин, ... Л.А. Гришанцева, ... Спутниковый эксперимент «АРИНА» по изучению сейсмических эффектов в потоках высокоэнергичных частиц в магнитосфере земли/ А.В.Бакалдин [и др.] // Космические исследования. – 2007. – Т. 45. – № 5. – С. 471.
19. O. Adriani, ..., L. Grishantseva, ... An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV / O. Adriani [et al.] // Nature. – 2009. – №458. – P. 607.
20. O. Adriani, ..., L. Grishantseva, ... New Measurement of the Antiproton-to-Proton Flux Ratio up to 100 GeV in the Cosmic Radiation / O. Adriani [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2009. – №102. – P. 051101.
21. О. Адриани, ..., Л.А. Гришанцева, ... Потоки вторичных электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве по данным спектрометров АРИНА и ПАМЕЛА. / О. Адриани [и др.] // Изв. РАН Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – № 3 – С. 382.
22. О. Адриани, ..., Л.А. Гришанцева, ... Позитроны и электроны в первичных космических лучах по данным эксперимента ПАМЕЛА/ О. Адриани [и др.] // Изв. РАН Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – № 5 – С. 606.
23. С.В. Борисов, ... Л.А. Гришанцева ... Измерение спектра электронов и позитронов высоких энергий с использованием калориметра спектрометра ПАМЕЛА / С.В. Борисов [и др.] // Инженерная физика – 2009. – №7.

24. O. Adriani, ..., L. Grishantseva, ... Measurements of quasi-trapped electron and positron fluxes with PAMELA / O. Adriani [et al.] // *Journal of Geophysical Research*, 114, A12218, doi:10.1029/2009JA014660

#### Список цитируемой литературы

1. Григоров Н.Л., Электроны высокой энергии в окрестностях Земли. – М. Наука, 1985: Сер. Физ., 1982, т. 46, стр. 1675.
2. S.A. Voronov, A.M. Galper, S.V. Koldashov et al. // *Space Researches*, vol. 33, Nr. 5, p. 567, 1991.
3. Воронов С.А., Колдашов С.В., Михайлов В.В., Спектры электронов и позитронов альbedo с энергией более 20 МэВ *Космические исследования*, т. 33, №. 3, стр. 329, 1995.
4. Воронов С.А., Гальпер А.М., Колдашов С.В., Масленников Л.В., Михайлов В.В., Попов А.В., «Пространственные распределения электронов и позитронов высоких энергий под радиационным поясом Земли», *Космические исследования*, стр. 140, 1992.
5. E. Fiandrini, G. Esposito, B. Bertucci, et al. // *JGR*, vol. 107, Nr. A6, p. 1067, 2002.
6. <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/geomagnetic/igrf>.
7. Koldashov, S. V., V. V. Mikhailov, and S. A. Voronov (1995), Electron and positron albedo spectra with energy more than 10 MeV, *ICRC 24th, Rome, 4*, p. 993.
8. Derome, L., M. Buenerd, and Y. Liu (2001), Secondary electrons and positrons in near Earth orbit, *Physics Letters B*, 515, 1.

Гришанцева Любовь Александровна

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ  
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ ВТОРИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ  
В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

01.04.16 – Физика ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Усл.п.л. – 1.5

Заказ №01159

Тираж: 90экз.

Копицентр «ЧЕРТЕЖ.ру»

ИНН 7701723201

107023, Москва, ул.Б.Семеновская 11, стр.12

(495) 542-7389

[www.chertez.ru](http://www.chertez.ru)