

На правах рукописи

Карелин Александр Владимирович

**Исследование потоков частиц космических лучей
высоких энергий, регистрируемых калориметром**

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Факультет проблем физики и энергетики
Кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии

Официальные оппоненты

Москаленко Игорь Владимирович,
доктор физико-математических наук,
Стенфордский Университет,
Лаборатория экспериментальной физики
им. В.В. Хансена и Институт Кавли для
астрофизики частиц и космологии,
главный научный сотрудник

Дергачев Валентин Андреевич,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН,
главный научный сотрудник

Кузьмичев Леонид Александрович,
доктор физико-математических наук,
МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИЯФ им. Д.В. Скобелевца,
Отдел космических наук, Лаборатория наземной
гамма-астрономии, заведующий лабораторией

Защита диссертации состоится 22 января 2021 года в 15-00 часов на заседании
диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени
М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы 1, строение 5 (19 корпус
НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией, а также со сведениями о регистрации участия в удаленном
интерактивном режиме в защите можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»

<https://istina.msu.ru/dissertations/318275841/>

и в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова
(Ломоносовский просп., д.27).

Автореферат разослан "___" ноября 2020 г.

Телефон совета для справок: +7 916 8717750

Е-mail: galan_lidiya@mail.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

Общая характеристика работы

Актуальность работы и степень ее разработанности. Эффекты, связанные с космическими лучами, наблюдались в течение тысячелетий, задолго до их открытия в 1912 г [1]. Например, полярное сияние - свечение в атмосфере, вызванное космическим излучением. Это явление интерпретировалось в некоторых культурах как битва богов. Даже такое повседневное погодное явление как молния, согласно некоторым теориям, связано с космическими лучами [2].

После открытия космических лучей Виктором Гессом в 1912 году возникло множество новых вопросов касающихся происхождения частиц космического излучения, их распространения в космическом пространстве и механизмов ускорения. Эти и другие вопросы двигали исследователями, приводя их порой к таким фундаментальным открытиям, как открытие Андерсеном позитрона в космических лучах [3].

Сегодня космические лучи - важный раздел астрофизики. Как правило, потоки первичных космических лучей претерпевают существенные изменения благодаря различным процессам, которым они подвергаются на пути к Земле в межзвездном пространстве и гелиосфере. Измерение фундаментальных энергетических и угловых характеристик потоков космических лучей, а также сравнение экспериментальных данных с теоретическими моделями может многое сказать о том, что происходит в Галактике и нашей солнечной системе.

Актуальность темы определяется тем, что однозначного результата по многим вопросам, связанным с фундаментальными характеристиками потоков космических лучей, как энергетическими, так и угловыми, до сих пор не получено.

Протоны и ядра гелия являются наиболее существенной в количественном отношении частью космических лучей, обеспечивая эксперименты большей статистикой по сравнению с другими компонентами. Однако, существовавшие к моменту публикации результатов настоящей диссертации экспериментальные данные по соотношению показателей спектров протонов и ядер гелия космических лучей являлись противоречивыми, особенно в свете опубликованных позднее результатов магнитного спектрометра АМС-02 [4].

Такая же ситуация сложилась и в области измерений энергетического спектра электронов космических лучей при высоких энергиях. В то время как в некоторых экспериментах наблюдалось падение энергетического спектра электронов, начиная с энергий в несколько сотен ГэВ [5, 6], в других экспериментах такое падение не фиксировалось [7, 8].

Измерение угловых характеристик потоков частиц космического излучения позволяет как уточнять и создавать новые модели магнитных полей Солнца и Земли, так и изучать влияние этих полей на галактические космические лучи. Так, существование асимметрии в направлении север-юг в потоках частиц с энергией около 10 ТэВ и выше к моменту написания настоящей работы до конца не было доказано. Однако, крайне важным было не только выявить указанную асимметрию, но одновременно провести измерение ее величины во время переполюсовки магнитного поля Солнца, чтобы доказать возможную связь между асимметрией и солнечным магнитным полем, что и было выполнено в рамках настоящей диссертационной работы.

Данные современных измерений отклонения электронов высоких энергий в магнитном поле Земли в околоземном космическом пространстве не только позволяют уточнять модели магнитного поля Земли, но и могут использоваться при измерении потоков позитронов космических лучей, исследования которых из-за неожиданного роста их отношения к электронам в области высоких энергий крайне актуальны [9].

Одной из самых актуальных тем исследований в современной физике космических лучей является поиск и исследование анизотропии потоков частиц галактического космического излучения, природа которой пока неизвестна. Результаты наземных измерений дипольной или, как ее еще называют, крупномасштабной анизотропии, расходятся по величине амплитуды диполя и по фазе, в частности, в диапазоне энергий от одного ТэВ до порядка двадцати ТэВ [10–13]. В то же время противоречивыми являются данные о самой форме диполя - насколько она является симметричной. В рамках диссертационной работы были впервые проведены спутниковые исследования крупномасштабной анизотропии. Эти исследования открывают новую эру в изучении крупномасштабной анизотропии космических лучей высоких энергий.

На сегодняшний день, проведенные в работе исследования полностью сохраняют свою актуальность. Новые спутниковые эксперименты с калориметром, такие как DAMPE [14] и CALET[15], поставили своей задачей повторить, полученные в эксперименте ПАМЕЛА результаты, связанные с измерением характеристик потоков космических лучей высоких энергий, при возможности на лучшей статистической базе. Анализ и сбор данных в этих экспериментах продолжается, а результаты, полученные в настоящей работе, дают для этих проектов уникальную возможность не только сравнивать свои результаты, но и применять методы, используемые в настоящей работе. Кроме того, материалы настоящей работы при-

минимы и для лучшей постановки самих задач в современных экспериментах.

Цель и задачи исследования состояли в получении фундаментальных энергетических и угловых характеристик потоков частиц первичных космических лучей с энергией от 10 ГэВ и выше с помощью дискретного полупроводникового стрипового калориметра входящего в состав магнитного спектрометра ПАМЕЛА [16] за период времени 2006-2015 гг. В работе решены следующие задачи:

- исследование дифференциальных энергетических суммарных спектров первичных электронов и позитронов космических лучей в диапазоне энергий 300-3000 ГэВ;
- исследование энергетических спектров первичных протонов космических лучей в диапазоне энергий 0.8-9 ТэВ;
- исследование энергетических спектров первичных ядер гелия космических лучей в диапазоне энергий 0.8-9 ТэВ/нуклон;
- исследование отклонений электронов магнитным полем Земли;
- регистрация северо-южной асимметрии в потоках первичных космических лучей при энергии около 10 ГэВ и анализ изменения ее абсолютной величины с ростом энергии;
- регистрация изменения абсолютной величины северо-южной асимметрии в потоках космических лучей с энергией около 10 ГэВ и выше во время переполюсовки магнитного поля Солнца;
- получение характеристик крупномасштабной анизотропии потоков первичных космических лучей в диапазоне энергий 1-20/нуклон ТэВ.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в настоящей работе являлось взаимодействие потоков заряженных частиц космических лучей с энергией выше 10 ГэВ с электромагнитным калориметром и другими детекторными системами спектрометра ПАМЕЛА. Предметом исследования являлись характеристики этих потоков, регистрируемых в околоземном космическом пространстве. Часть потоков имела солнечное происхождение, тогда как другая часть - галактическое.

Методология исследования. Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены с помощью методов математического моделирования и в рамках

экспериментальных исследований на спутнике. При моделировании взаимодействия заряженных частиц с веществом использовался пакет GEANT3, основанный на нем пакет программ GRAMELA, а также GEANT4. Кроме того, были выполнены тестовые измерения для проверки возможности и границ применения математических моделей на ускорителе в ЦЕРН. Основным детектором, используемым в исследовании, был электромагнитный позиционно-чувствительный калориметр, но для оценки систематических погрешностей использовались также данные магнитного спектрометра.

Научная новизна работы состоит в том, что:

-впервые непосредственно в околоземном космическом пространстве был получен суммарный энергетический спектр электронов и позитронов космических лучей в диапазоне энергий 300-3000 ГэВ, в то время как существующие до его публикации результаты от сотен ГэВ и выше для спектра электронов (суммарно со спектром позитронов и отдельно) были скудны, противоречивы и разрознены и тем самым не позволяли сделать вывод о поведении спектра электронов в данном интервале энергий;

-впервые за пределами атмосферы были получены зависимости интенсивностей потоков электронов космических лучей высоких энергий в направлениях Восток-Запад;

-было впервые с высокой достоверностью подтверждено существование северо-южной асимметрии потоков космических лучей около 10 ГэВ и выше и проведено исследование ее зависимости от энергии частиц космического излучения;

- впервые доказано, что изменение северо-южной асимметрии потоков частиц космических лучей происходит при переполюсовке магнитного поля Солнца;

- впервые с высокой степенью статистической достоверности одним прибором за пределами атмосферы были получены результаты по энергетическим характеристикам потоков протонов и ядер гелия космических лучей в диапазоне энергий от 0.8 до 9 ТэВ/нуклон;

- впервые одним прибором за пределами атмосферы одновременно в Северном и Южном полушарии были получены характеристики крупномасштабной (дипольной) анизотропии первичного космического излучения в диапазоне энергий 1-20 ТэВ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Суммарный энергетический спектр первичных электронов и позитронов космических лучей в диапазоне энергий 300-3000 ГэВ претерпевает излом (падение) при энергии около 700 ГэВ.

2. Показатель дифференциального энергетического спектра первичных протонов кос-

мических лучей в диапазоне энергий 0.8-9 ТэВ составляет величину -2.67 ± 0.02 , а показатель дифференциального энергетического спектра первичных ядер гелия космических лучей в диапазоне энергий 0.8-9 ТэВ/нуклон составляет величину -2.59 ± 0.03 .

3. Спектры первичных протонов и ядер гелия от 100 ГэВ/нуклон до 9 ТэВ/нуклон имеют нестепенной характер, так как претерпевают изменение в данном энергетическом диапазоне, причем спектры первичных протонов и ядер гелия от 100 ГэВ/нуклон до 9 ТэВ/нуклон различаются между собой.

4. Величина асимметрии отклонения электронов магнитным полем Земли, завися от энергии электронов и номера L-оболочки, достигает при 75 ГэВ и L=1-2 величины порядка 0,6, а с ростом L уменьшается более, чем в два раза, причем для энергии выше 250 ГэВ отклонение электронов магнитным полем Земли не наблюдается.

5. Потоки первичных космических лучей при энергии около 10 ГэВ имеют северо-южную асимметрию, абсолютная величина которой уменьшается с ростом энергии, причем существует связь северо-южной асимметрии потоков частиц космических лучей с магнитным полем Солнца. Отношение потоков Север-Юг начинает меняться именно тогда, когда за данный солнечный цикл произошло перенаправление магнитного полюса Солнца.

6. Фаза ϕ и амплитуда A крупномасштабной анизотропии потоков первичных космических лучей в диапазоне энергий 1-20/нуклон ТэВ с учетом фактора $k=2/\pi$ (различие в величинах между амплитудами изначального и полученного диполя) составляют величины:

$$A=0,0013\pm0,0003$$

$$\phi=70^{\circ}\pm10^{\circ}$$

Теоретическая и практическая значимость Разработанные способы определения направлений частиц космического излучения, измерения их энергии и идентификации их типов подходят для использования в других космофизических экспериментах.

Выводы о правильном учете вклада фоновых событий и влиянии этих событий на конечный результат, когда считается что их влиянием можно пренебречь, помогают разобратся в результатах существующих экспериментов и учитываются при проектировании новых.

Результаты данной работы в области измерений энергетических спектров космических лучей используются для уточнения существующих на сегодняшний день теорий и

создания новых моделей, объясняющих происхождение и ускорение частиц космического излучения.

Точное знание энергетических спектров протонов и ядер гелия галактических космических лучей необходимо для исследователей работающих над проблемами, связанными с нейтрино, регистрируемыми на поверхности Земли. Полученные спектры протонов и ядер гелия были нужны, для того чтобы с большей точностью рассчитывать процессы генерации вторичных античастиц - позитронов и антипротонов, что позволяет более надежно оценить фон при поиске экзотических источников античастиц, таких как взаимодействие частиц «темной» материи. Кроме того, знание потоков частиц в околоземном пространстве способствует решению актуальных практических задач защиты космонавтов и космической техники от радиации.

Измеренные спектры протонов, ядер гелия, а также суммарный спектр электронов и позитронов были крайне важны для устранения существовавших на момент их публикации противоречий в результатах наземных и спутниковых измерений.

Исследование величин отклонений электронов в магнитном поле Земли было необходимо для уточнения и создания новых моделей магнитного поля Земли, а также при измерениях потоков позитронов.

Исследования по северо-южной асимметрии потоков галактических космических лучей позволяют понять причину данной асимметрии в потоках и оценить степень влияния солнечного магнитного поля на потоки галактических космических лучей.

Наконец независимое измерение анизотропии космических лучей вне атмосферы помогли утвердить выводы сделанные на основе измерений на наземных установках, а также уточнить параметры дипольной анизотропии и приблизили понимание самой природы анизотропии.

Степень достоверности результатов Достоверность результатов исследования подтверждается сопоставлением получаемых при моделировании результатов с данными тестовых экспериментов на ускорителе. Используемые в расчетах программные комплексы GEANT апробированы и широко используются при моделировании взаимодействия частиц с веществом. Также использовалась информация с магнитного спектрометра для калибровки калориметрических данных. Полученные в работе данные согласуются с опубликованными расчетными и экспериментальными результатами по тематике диссертации в тех случаях, когда такие данные имеются.

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим при выборе методов расчетов, выполнения моделирования, проверки выбранных методик и получения результатов. Постановка задачи, анализ и интерпретация данных, также выполнены непосредственно автором. Автор принимал участие в постановке и проведении экспериментов для калибровки детекторных систем наземного образца в ЦЕРН. Подготовка публикаций и докладов выполнена лично автором или при его активном участии.

Апробация работы Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

Основные результаты диссертационной работы были представлены на:

1. Российских конференциях по космическим лучам ВККЛ-32 2012 г. (Москва, Россия), ВККЛ-33 2014 г. (Дубна, Россия); ВККЛ-34 2016 г. (Дубна, Россия)
2. Международных конференциях по космическим лучам ICRC-32 2011 г. (Пекин, Китай), ICRC-33 2013 г. (Рио-де-Жанейро, Бразилия); ICRC-34 2015 г. (Гаага, Голландия);
3. Европейских симпозиумах ECRS-23 2012 г. (Москва, Россия), ECRS-24 2014 г. (Киль, Германия), ECRS-25 2016 г. (Турин, Италия);
4. Международной конференции по анизотропии 2015 г. (Бад-Хоннеф, Германия);
5. Международной ассамблеи КОСПАР-40 2014 г. (Москва, Россия);
6. Международной конференции по физике высоких энергий ICHEP-37 2014 г. (Валенсия, Испания);
7. Научных конференциях МФТИ-55 2012 г., МФТИ-56 2013 г., МФТИ-57 2014 г. (Долгопрудный, Россия);
8. Международных конференциях по ядерной физике секции РАН 2012 г. (Москва, Россия), 2013 г. (Протвино, Россия), 2014 г. (Москва, Россия);
9. Международных конференциях International conference on particle physics and astrophysics 2015, 2016 (Москва, Россия).

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 статьях в журналах и в 1 статье в сборнике (14 статей в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, и 4 статьи, индексируемых RSCI и РИНЦ).

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем - 307 страниц, включая 200 рисунков, 7

таблиц и списка литературы из 316 наименований.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе приведен обзор спутниковых и аэростатных экспериментов и применяемых в них калориметрических методов измерений при высоких энергиях за последние 30 лет.

В эксперименте ПРОТОН в 60-ых годах прошлого века был совершен первый опыт поднятия космофизических приборов большого веса, калориметра (больше 10 тонн), на орбиту искусственного спутника - опыт, который не повторен до настоящего времени [17].

С тех пор, практически ни один эксперимент в физике космических лучей по прямым измерениям энергетических спектров на аэростатах и ИСЗ не обходится без такого прибора как калориметр, конечно значительно уступающего по массе калориметру эксперимента ПРОТОН, определяющего выделившуюся энергию при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра.

Калориметр, как правило, входит в состав приборов наряду с другими детекторами (с более прецизионными, но, одновременно, с более дорогостоящими и менее надежными), причем взаимозаменяя и дополняя их некоторые функции (измерение энергии, идентификация частиц, выработка триггерных сигналов, определение направления прилета).

На сегодняшний день калориметр является тем прибором, который при сравнительно небольших размерах и массе, что особенно важно для экспериментов, проводящихся на спутниках и аэростатах, позволяет эффективно отделять протоны и производить прецизионные энергетические измерения, сохраняя работоспособность при длительной эксплуатации.

Далее были рассмотрены различные методы разделения электронной и протонной компонент в космических лучах с помощью калориметра, использующиеся в таких экспериментах как ATIC [18], AMS-02 [19], FGST [7], ПАМЕЛА [20], BETS [21], HEAT [22]. В основе всех методов лежит различие процессов, которые происходят во время развития адронного и электромагнитного ливня в веществе. В описанных методах использовались такие характеристики как: величина обратного тока, величина полного энергосодержания в

калориметре и другие характеристики, связанные с продольным и поперечным развитием ливня.

Также были рассмотрены различные методы определения энергии электронов и протонов, в том числе в экспериментах CREAM [23] и JACEE [24].

Из числа рассмотренных в обзоре методов наиболее простым и эффективным, а, следовательно, и наиболее часто употребляемым в экспериментах, является метод восстановления энергии по измеренной величине полного энергосодержания в калориметре. Этот метод подходит как для протонов, так и для электронов.

Особую группу составляют методы, оценивающие величину энергии частицы по какому-либо параметрам развития ливня в калориметре.

Практическая реализация того или иного метода по измерению первичной энергии в большей степени определяется конструктивными особенностями калориметра, а, следовательно, при дальнейшем развитии технологии создания калориметров, их дизайна и технических характеристик, она будет заметно улучшаться

Во второй главе приведено описание детекторов и систем спектрометра ПАМЕЛА [25].

Прибор включает в свой состав следующий набор детекторов.

- Время-пролетная система (ВПС). Состоит из трех сцинтилляционных детекторов С1, С2, С3. Служит для измерения времени пролёта частиц, энергии, выделенной частицей при взаимодействии с веществом сцинтилляторов, а также в качестве основной триггерной системы спектрометра.

- Нейтронный детектор (НД). Основное назначение – увеличение эффективности разделения электронных и адронных событий, а также измерение фоновых нейтронов и потока солнечных нейтронов.

- Микростриповый кремниевый магнитный спектрометр (трекер). Состоит из шести координатно-чувствительных плоскостей. Служит основным детектором для разделения частиц по знаку заряда и определения их энергии. Шесть плоскостей микростриповых кремниевых детекторов, помещенны в магнитное поле 0.6 Тл.

- Калориметр. Состоит из 44 слоёв кремниевых стриповых детекторов, прослоенных 22-мя пластинами вольфрама. Используется для идентификации типа частицы, позволяет проводить измерения в энергетическом диапазоне недоступном для магнитного спектрометра. Энергосодержание в калориметре измеряется в единицах мип. 1 мип равен энергии,

которая выделяется в одной плоскости калориметра при прохождении одной минимально ионизирующей частицы.

- Сцинтилляционный детектор С4. Служит для регистрации утечки ливня из калориметра и выработки дополнительного триггерного сигнала при регистрации событий высоких энергий.

- Система антисовпадений (АС). АС предназначена для отделения событий, приходящих вне апертюры спектрометра, а также для режекции ложных срабатываний, вызванных частицами обратного тока при ливне в калориметре или в магните трекера.

Запуск КА «Ресурс ДК-1» успешно состоялся 15 июня 2006 года. Тип рабочей орбиты эллиптический с наклоном плоскости орбиты к плоскости экватора 70.4° . Первоначально диапазон высот рабочей орбиты менялся от 350 до 600 км. В сентябре 2010 года произошло изменение орбиты, минимальная и максимальная высота стали близки к друг другу и находятся на уровне 570 км. Эксперимент проводился около 10 лет, пока в начале 2016 года системы спутника не перестали функционировать.

Содержание третьей главы посвящено определению суммарного энергетического спектра позитронов и электронов в диапазоне энергий 300-3000 ГэВ с целью выявления его отклонения от простого степенного закона.

Электроны и позитроны космических лучей высоких энергий ($E > 10$ ГэВ) несут с собой ценную информацию об их природе и взаимодействии с межзвездным веществом и локальными магнитными полями во время распространения. Электроны и позитроны высоких энергий во время распространения в межзвездном пространстве подвержены в основном потерям энергии, связанным с синхротронным излучением в галактических магнитных полях и обратным комптоновским рассеянием на межзвездных фотонах. Величина потерь энергии в единицу времени в этих процессах прямо пропорциональна квадрату энергии электрона. Таким образом, электроны и позитроны не могут распространяться далеко от своих источников.

Наблюдаемый суммарный энергетический спектр электронов и позитронов в околоземном космическом пространстве содержит в себе первичную и вторичную компоненты. Первичный поток электронов формируется благодаря таким астрофизическим объектам, как взрывы сверхновых или пульсары. Вторичные электроны и позитроны в основном рождаются в столкновениях протонов с межзвездным газом (атомарный водород) в процессах образования и распада пионов.

Поэтому знание энергетического спектра электронов и позитронов очень важно для понимания и проверки особенностей всех вышеперечисленных процессов и теоретических построений, а исследование энергетических спектров космических лучей, полученных в прямых измерениях на спутниках, является одной из приоритетных задач в современной астрофизике.

В эксперименте ПАМЕЛА измерения с помощью магнитной трековой системы выполнены до энергии 625 ГэВ [20], а с помощью калориметра до 800 ГэВ [26]. При этом в последнем случае уже начиная с 400 ГэВ статистики заметно не хватает.

С целью увеличения статистической базы для анализа и энергетического диапазона с использованием новой методики удалось продвинуться в измерениях суммарного энергетического спектра электронов и позитронов с помощью калориметра до энергий порядка 3 ТэВ.

При определении остаточного фона протонов при измерении суммарного спектра электронов и позитронов в диапазоне выше 100 ГэВ необходимо учитывать вклад фоновых протонов до энергий порядка 10 ТэВ. Протоны в энергетическом интервале 1-10 ТэВ вносят существенный вклад в отобранные для построения суммарного спектра электронов и позитронов наборы событий тогда, когда отбор основывается на характеристиках каскада вторичных частиц, вызванного взаимодействовавшей первичной частицей, а не происходит по знаку заряда частицы. Тем не менее, ранее в подобном анализе в эксперименте ПАМЕЛА учитывались только протоны с энергией не более 2 ТэВ.

Для разработки методики с помощью данных, полученных моделированием методом Монте-Карло на основе GEANT3 [27], были получены отклики со всех детекторов прибора ПАМЕЛА при прохождении через прибор протонов и электронов различных энергий (протоны от 100 ГэВ до 10 ТэВ, электроны от 80 ГэВ до 2 ТэВ).

Для первоначального отбора частиц основным критерием являлась пороговая величина полного энергосодержания в калориметре - E_{tot} . Данный критерий позволял выделять частицы высоких энергий (более десятков ГэВ), испытавших взаимодействие в калориметре.

Одним из параметров для отбора электронов, связанных с поперечным развитием ливня, являлся параметр «RMS поперечный» (RMS root mean square deviation). Он является выражением среднеквадратичного отклонения энергосодержаний на некоторых расстояниях от оси ливня от значения энергосодержания на самой оси ливня. Для лучшего

подавления протонов кроме информации о поперечном развитии ливня в калориметре ПАМЕЛА следовало также использовать информацию о его продольном профиле. Дополнительным критерием, позволяющим выделять электронную компоненту, было установление порога на долю энергосодержания в узкой области вдоль ствола ливня.

Отобранные в результате использования приведенных критериев события для измерения энергетического спектра электронов высоких энергий (выше 300 ГэВ), содержали не только электроны и позитроны, но также и значительную долю протонов. Поэтому кроме данных калориметра использовались данные нейтронного детектора.

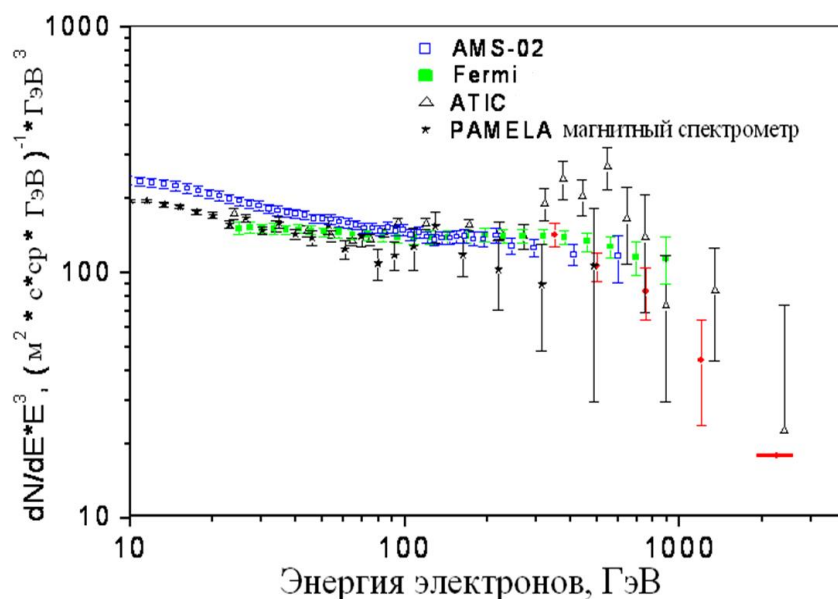


Рис. 1. Сравнение полученного энергетического спектра позитронов и электронов с результатами магнитного спектрометра, а также экспериментов AMS-02, ATIC-02, FGST.

Для получения спектра было рассчитано количество событий в каждом энергетическом интервале за вычетом доли протонов, определенной из дифференциального энергетического спектра протонов, измеренного с помощью калориметра ПАМЕЛА.

Из данных за период 2006 - 2013 год были отобраны и проанализированы события, согласно критериям упомянутым выше. Для каждого события рассчитывалась его энергия в соответствии с полным энергосодержанием в калориметре.

На рис. 1 представлены полученные результаты по измерению электрон-позитронного спектра в диапазоне энергий 300-3000 ГэВ в сравнении с результатами магнитного анализа ПАМЕЛА [20] (до 625 ГВ) и других экспериментов, известных к моменту получения результатов данной работы. Демонстрируемые погрешности связаны только со

статистической неопределенностью. Результаты эксперимента ПАМЕЛА демонстрируют очевидный излом спектра по сравнению с результатами двух других спутниковых экспериментов, которые не указывают на существование резкого изменения в спектре при этих энергиях. Кроме того, в полученных результатах нет каких-либо «горбов», которые могли бы появиться при неправильном учете фона протонов.

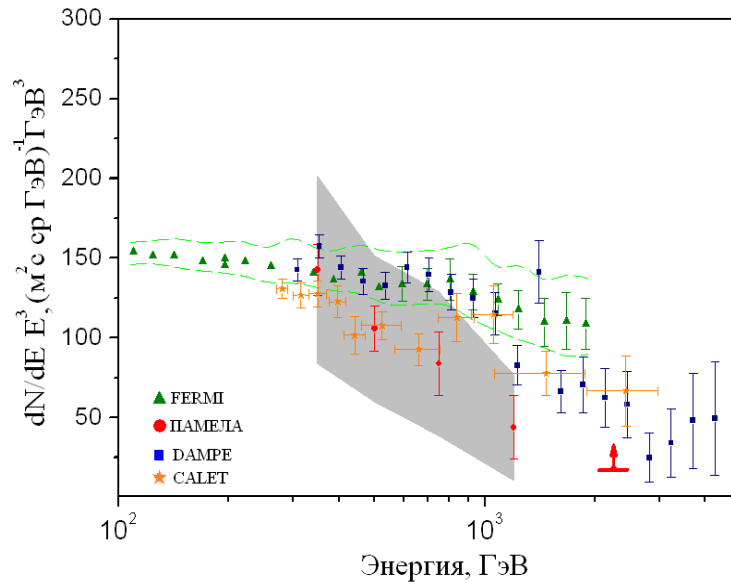


Рис. 2. Сравнение опубликованных недавно результатов FERMI, DAMPE, CALET с результатами калориметра ПАМЕЛА.

Уже после завершения и опубликования результатов данной работы по суммарному спектру электронов и позитронов, были опубликованы данные других спутниковых экспериментов, таких как CALET [28] и DAMPE [29]. Они также использовали калориметр и подтверждают существование излома энергетического спектра электронов в районе 1 ТэВ. Результаты сравнения этих спектров, с данными калориметра прибора ПАМЕЛА и недавними результатами в эксперименте FERMI [30] показаны на рис. 2., где серым цветом отмечена область систематических неточностей. В последней работе по AMS-02 [31] были улучшены алгоритмы отбора частиц и учета фона, в результате чего получилось очень хорошее согласие с данными калориметра ПАМЕЛА (см рис. 3).

Полученное обрезание суммарного спектра электронов и позитронов около энергии 1 ТэВ, вместе с аномальным ростом позитронов в экспериментах ПАМЕЛА [32] и AMS-02 [19], хорошо описывается в модели, где электрон-позитронная плазма в межзвездном пространстве рассматривается по аналогии с фотонным газом космического фонового

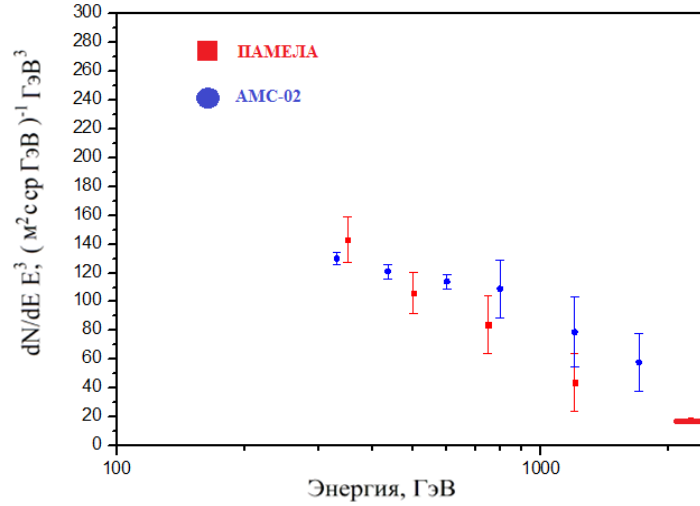


Рис. 3. Сравнение полученного энергетического спектра позитронов и электронов (красные точки) с последними по времени результатами AMS-02

излучения как первичный электронный газ в стационарном неравновесном состоянии [33]. Согласно модели, представленной в работе [34], электроны и позитроны космических лучей во время распространения от источника в магнитных полях межзвездной среды не являются распределенными изотропно (как в модели изотропной диффузии [35]), а захватываются волокнистыми структурами, называемыми авторами струями. Это ведет к ограничению наблюдаемой энергии в районе 1 ТэВ, так как электроны с более высокой энергией все время жизни могут провести, будучи захваченными этими струями. В рамках этой модели все особенности в энергетическом спектре электронов от отдельных источников сглаживаются, что также соответствует полученным результатам. В целом величина энергии обрезания в самих источниках точно неизвестна, известно только то, что она лежит в ТэВ-ой области [36]. Тем не менее, вместе с временем жизни источника, она входит в разряд инжекционных параметров, определяющих место обрезания в энергетическом спектре электронов.

В работе [37] с помощью приближения, в котором все источники, ответственные за формирования спектра электронов при высоких энергиях, должны иметь более или менее одинаковые инжекционные параметры, дается оценка энергии, при которой происходит обрезание спектра электронов, в зависимости от типа источника. Так спектр испускания такого относительно молодого объекта как пульсар Vela [38] не может привести к обрезанию спектра электронов в окрестности Земли в районе 1 ТэВ, в то время как за это могут

быть ответственными источниками со средней продолжительностью жизни класса сверхновой Monogem [39].

Обрезание суммарного спектра электронов и позитронов в районе 1 ТэВ может быть рассмотрено в рамках еще одной модели [40]. В ее основе этой модели лежит предположение, что космические лучи, после ускорения на ударных волнах, развившихся в остатках сверхновой, остаются захваченными внутри этих остатков некоторое время, пока не высыплются в межзвездное пространство. В течении этого времени электроны подвержены потерям на излучение, в то время как адронная компонента претерпевает ядерное взаимодействие с веществом. Согласно этой модели время захвата определяет место обрезания в энергетическом спектре электронов. Так $2 \cdot 10^5$ лет проведенных электронами внутри остатков сверхновой в захваченном состоянии достаточно, чтобы создать обрезание энергетического спектра именно в районе 1 ТэВ. Укрупнение спектра и показатель энергетического спектра электронов в области выше этого укрупнения может быть объяснен ускорением на ударных волнах в полярных шапках сверхновых звезд типа Вольфа Райе и красных супергигантов. Однако, в рамках этой же модели, может существовать избыток электронов и при более низких энергиях, который не наблюдается [41]. Так как существование обрезания энергетического спектра электронов около 0.9 ТэВ теперь может считаться доказанным, то оно будет использоваться при калибровке энергетической шкалы черенковских детекторов нового поколения на уровне 3% для часовой шкалы времени [42].

Таким образом, с помощью калориметра ПАМЕЛА путем включения в анализ данных, полученных в 2009-2013 гг., а также путем более тщательного расчета примеси протонов при энергиях выше 400 ГэВ удалось увеличить статистику, повысить надежность результатов и продвинуться в измерении суммарного спектра галактических электронов и позитронов в область более высоких энергий. Представленный результат крайне важен для понимания процессов происхождения и распространения космических лучей, а также в практической области калибровки наземных детекторов.

Четвертая глава посвящена измерению энергетических спектров протонов и ядер гелия в диапазоне энергий 0.8-9 ТэВ/нуклон для сравнения их спектральных показателей между собой и выявления особенностей энергетических спектров. С тех пор, как впервые непосредственно в околоземном космическом пространстве были получены спектры протонов и ядер гелия в эксперименте ПРОТОН [17], лишь несколько баллонных экспериментов в своих измерениях затрагивали энергетический диапазон 1-10 ТэВ и только в

одном спутниковом – СОКОЛ [43]. Диапазон 1-10 ТэВ является своего рода окном, где до недавнего времени существовало крайне мало измерений. В то время, как при энергии менее 1 ТэВ спектры протонов измеряются, в основном, с помощью приборов, установленных на аэростатах и спутниках, область более 10 ТэВ стала предметом изучения на наземных ливневых установках. Поэтому энергетический диапазон 1-10 ТэВ является граничным между двумя типами измерений.

Поэтому было важно с большей надежностью за счет модернизации методики отбора событий и существенно увеличенной статистики провести измерения спектра протонов с помощью калориметра в диапазоне 1-10 ТэВ в эксперименте ПАМЕЛА.

В методике, использовавшейся ранее при отборе протонов, порог по полному энергосвыделению в калориметре был установлен равным 4000 мип (один мип равен энергосвыделению в одном слое детекторов при прохождении одной минимально ионизирующей частицы), что соответствовало энергии протонов выше 50 ГэВ. В новой модернизированной методике, созданной для измерений энергий около 1 ТэВ и выше, величина порога была поднята до 25000 мип.

Поставив задачу измерять спектр протонов в энергетическом диапазоне около 1 ТэВ и выше, удалось избежать необходимости использовать дополнительный отбор для режекции электронов, так как при этих энергиях вкладом электронов в анализируемые события можно пренебречь. Отказ от использования специального отбора для подавления электронов увеличивает количество отбираемых для анализа протонов примерно в три раза.

Для дальнейшего увеличения статистики протонов и ядер гелия были использованы не только те события, которые соответствуют «основной» апертуре прибора, но также часть событий, в которых частицы проходят в более широкой апертуре.

Отбор по величине заряда частиц осуществлялся по величине ионизационных потерь в сцинтилляторах время-пролетной системы, а для определения первоначальной энергии использовалась величина полного энергосвыделения в калориметре деленного на количество сработавших стрипов - E_{tot}/N_{hit} . Эффективность отборов и связь параметра E_{tot}/N_{hit} с начальной энергией частицы определялись с помощью моделирования.

В процессе восстановления энергетических спектров по экспериментальным данным для протонов и ядер гелия применялась основанная на теореме Байеса [44] итерационная методика.

Результаты в настоящей работе получены при обработке экспериментальных данных,

набранных в 2006-2013 гг.

На рис. 4а приведено сравнение последних результатов измерений при помощи калориметра ПАМЕЛА с результатами двух баллонных экспериментов – ATIC-2 [18] и CREAM [23], полученных также с использованием калориметра, входящего в состав установок в каждом из этих экспериментов.

Рис. 4б позволяет сравнить последние результаты измерений с помощью калориметра прибора ПАМЕЛА со спектрами, полученными ранее с помощью магнитного анализа в эксперименте ПАМЕЛА [45], а также с последними опубликованными результатами эксперимента AMS-02 по энергетическим спектрам протонов [4] и ядер гелия [46].

В результате измерений оказалось, что спектры протонов и ядер гелия имеют различные показатели: -2.67 ± 0.02 для протонов, -2.59 ± 0.03 для ядер гелия. Из приведенных на рис.4 результатов магнитного анализа видно, что у ядер гелия в области энергий 0.1 -1 ТэВ/н происходит изменение показателя спектра. Особенность в поведении спектра ядер гелия, зарегистрированная магнитным спектрометром ПАМЕЛА, соответствует в большей степени результатам, полученным при помощи калориметра ПАМЕЛА, чем результатам AMS-02. Аппроксимация спектра протонов AMS-02 простым степенным законом в область более высоких энергий противоречит результатам измерений при помощи калориметра ПАМЕЛА.

Уже после опубликования результатов по энергетическим спектрам протонов и ядер гелия, полученных с помощью калориметра ПАМЕЛА, были опубликованы результаты по спектрам протонов: CALET [47], DAMPE [48], FERMI [49], российского эксперимента НУКЛОН [51], а также результаты по спектрам ядер гелия: DAMPE [50] и НУКЛОН [51]. Результаты сравнения демонстрируются на рис.5 и рис.6. Из рисунков видно, что новые результаты других экспериментов хорошо подтверждают данные ПАМЕЛА, причем в ядрах гелия видно существенное изменение спектрального индекса в районе 1 ТэВ.

Избыток протонов и ядер гелия с энергией выше 1 ТэВ/нуклон можно объяснить вкладом местных молодых остатков сверхновых, чей вклад является определяющим при этих энергиях [52]. Рассматривая случай, в котором космические лучи могут покидать остатки сверхновых в зависимости от своей энергии, можно увидеть, что более тяжелые ядра имеют укрупнение в энергетическом спектре при более низких энергиях, чем протоны (соответственно у ядер гелия изменение в спектре будет наблюдаться раньше, чем у протонов) [53].

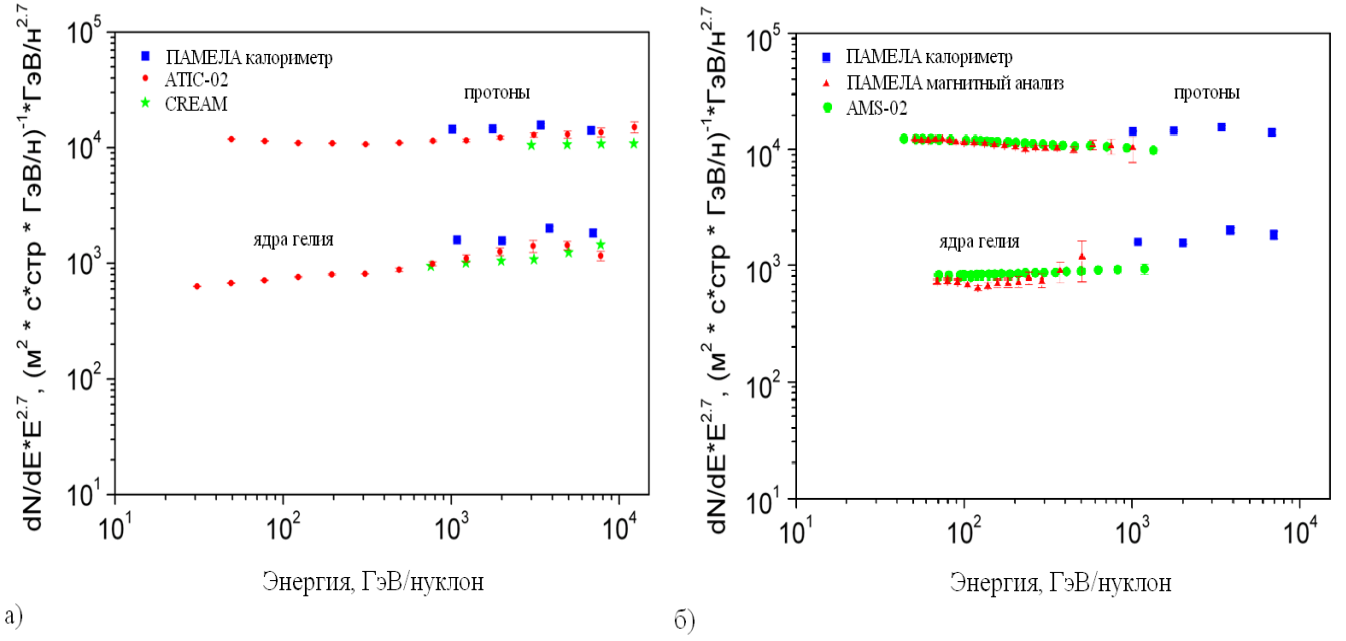


Рис. 4. Сравнение измеренных энергетических спектров протонов и ядер гелия с помощью калориметра ПАМЕЛА с а) результатами CREAM и ATIC-02, б) с результатами AMS-02 и магнитного спектрометра ПАМЕЛА

Изменение формы спектров при высоких энергиях (от несколько сот ГэВ и выше) может также вызываться изменением плотности газового потока в ударной волне предшествующей [54–56] в остатках сверхновой, которое в конечном счете меняет форму результирующего энергетического спектра [57].

В целом, полученные результаты могут быть хорошо описаны моделью Зацепина-Сокольской, в которой спектры космических лучей в окрестностях Земли определяются вкладом различных типов источников [58]. Похожая модель была ранее рассмотрена Т. Станевым и др. [59].

Модель, предложенная в работе [60] для описания спектров ядер космических лучей, полученных в эксперименте TRACER [61], использует целый ряд в принципе физически приемлемых предположений: общий показатель спектра для всех компонент в источнике (в отличие от других моделей, например [62]), ненулевая остаточная длина пробега в Галактике и т.п. Несмотря на то, что преимуществом этой модели является тот факт, что используется минимальное число свободных параметров, и с помощью ее достигается самосогласованное описание энергетических спектров тяжелых ядер с $Z > 8$, предсказания этой модели не согласуются с полученными результатами по спектрам ядер гелия и протонов

по калориметру ПАМЕЛА.

Стоит также подчеркнуть, что изменение спектров протонов и ядер гелия в начале ТэВ-го диапазона энергий важно с точки зрения объяснения избытка позитронов в космических лучах [8, 32]. Наблюдаемое изменение формы этих спектров, может напрямую быть связано с ростом потоков позитронов с энергией выше 100 ГэВ (до 60 %), как это показано в работе [63]. Оно же важно при вычислении потоков вторичных антипротонов в субтэвной области энергий (величина эффекта до 30% в спектре антипротонов [64]).

Также отметим, что полученные данные по энергетическим спектрам протонов и ядер гелия в окрестности Земли при высоких энергиях представляют собой особую важность для оценки галактического диффузного гамма излучения [65].

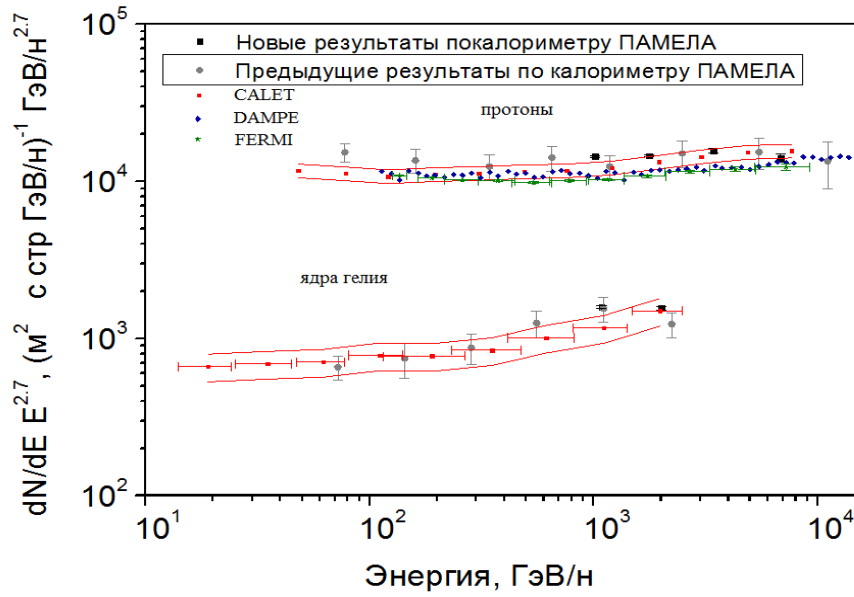


Рис. 5. Сравнение измеренных энергетических спектров протонов и ядер гелия с результатами CALET, DAMPE, FERMI.

В пятой главе рассматривается методика восстановления оси ливня в калориметре. Восстановление траектории первичной частицы в калориметре, позволило не только, определяя направление прилета частицы, измерить пространственную анизотропию частиц космического излучения, но и провести отделение ядер от электронов. Для последнего определение направления движения первичной частицы приобретает особенное значение в связи с тем, что параметры, позволяющие отличить адронные (инициированных ядрами) от чисто электромагнитных (инициированных электронами) ливней, тесно связаны с положением оси ливня (ось совпадает с направлением движения первичной ча-

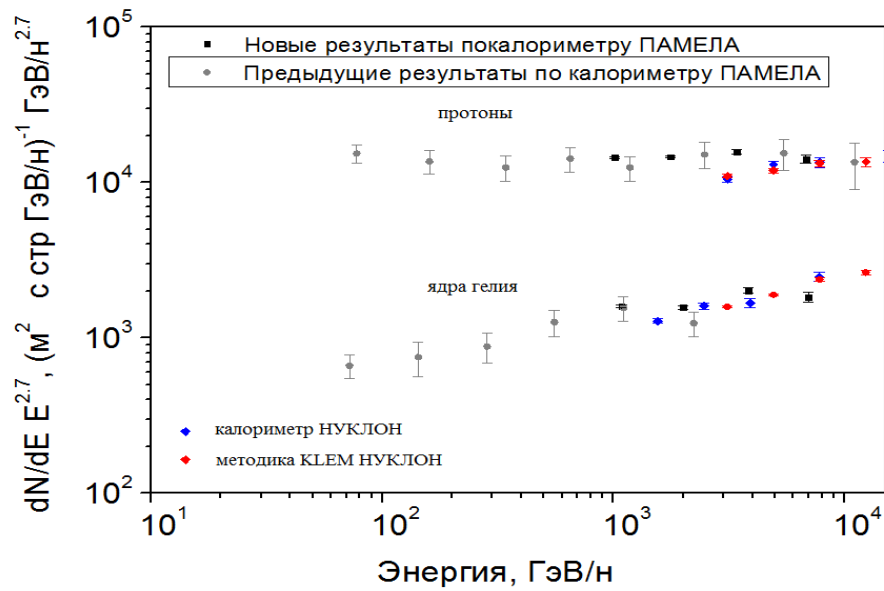


Рис. 6. Сравнение измеренных энергетических спектров протонов и ядер гелия с результатами эксперимента НУКЛОН.

стицы). Идентификация направления возможна для частиц приходящих под углом более 75 градусов к оси калориметра.

Для определения уравнения оси ливня в приборных координатах используется итерационный подход, причем определяются положения центров тяжести энерговывделений в каждой из 44 плоскостей.

Своего рода проверкой методики являлось проведение регистрации тени Луны в направлении прихода космических лучей, детектируемых калориметром ПАМЕЛА. Это было первой попыткой регистрации тени Луны в космических лучах на основе информации, полученной в спутниковом эксперименте.

Для обнаружения тени такого космического объекта как Луна необходимо, измерив темпы счета частиц со всевозможных направлений, зарегистрировать недостаток темпа счета частиц высоких энергий с направлений, соответствующих положениям Луны в фиксированные моменты времени.

Отобранные для анализа события соответствуют электронам с энергией выше 400 ГэВ и протонам выше 1.5 ТэВ. На полученной карте угловых распределений темпа счета, несмотря на недостаток статистики и большие флуктуации фона, наблюдается особенности в районах, соответствующих расположению Луны с учетом отклонения частиц магнитным полем Земли. Данные особенности могут быть обусловлены затемнением со-

ответствующего участка Луной.

В шестой главе приводятся характеристики методики измерений потоков заряженных частиц, проходящих под большими углами в калориметре ПАМЕЛА, полученные с помощью моделирования. Было показано, что угловое разрешение составляет в среднем величину не более 0.5 градуса. Также были получены и другие характеристики.

Седьмая глава посвящена измерению разности в интенсивностях потоков электронов галактических космических лучей в интервале энергий 75-250 ГэВ или, как его еще называют, эффекту восточно-западной асимметрии.

При измерении потоков космических лучей в околоземном пространстве огромную роль играет влияние магнитосферы. Одной из стандартных математических моделей для описания магнитного поля Земли является модель IGRF [66]. Обновляемая ежегодно, она учитывает новые различные экспериментальные данные, появляющиеся в мировой научной литературе, касающиеся измерений структуры и конфигурации магнитного поля Земли. Важным вкладом для проверки и уточнения этой и подобных ей моделей стали измерения отклонения магнитным полем Земли электронов высоких энергий 75-250 ГэВ по данным спутникового эксперимента ПАМЕЛА.

Заряженные частицы космических лучей отклоняются в магнитном поле Земли, поэтому интенсивность частиц одного знака, приходящих с восточного и западного направлений, будет различной. Этот эффект впервые был обнаружен в 30 годах прошлого века и получил название «восточно-западный» эффект космических лучей [67, 68].

В целом, на сегодняшний день результаты по измерению восточно-западной асимметрии космических лучей являются разрозненными и полной количественной картины асимметрии в потоках электронов в направлении с востока и запада до сих пор экспериментально не получено, поэтому данные эксперимента ПАМЕЛА представляют существенный интерес.

Преобладание «восточных» событий над «западными» означает, что при указанных энерговыделениях в калориметре среди этих событий большее количество принадлежит к отрицательно заряженным частицам. Как известно, в космическом излучении соотношение потоков электронов к потокам протонов примерно 1 к 100 при заданной энергии. Однако, при прохождении через калориметр протоны дают существенно более низкое энерговыделение, при этом ливни генерирует только часть протонов, электроны же все взаимодействуют с веществом калориметра и дают развитые каскады. Таким образом, доля

электронов среди событий с высокими энергосвечениями в калориметре существенно увеличивается.

Направление на восток или запад определялось в эксперименте с помощью единичного вектора в системе координат, в которой Земля неподвижна. Положительные или отрицательные знаки проекции этого вектора на ось Y задают направления на запад или восток соответственно. Модуль проекции меняется в диапазоне значений от 0 до 1. Чем больше угол между вектором направления частицы и вертикалью (ось Z), тем больше величина проекции этого вектора на ось Y , будем называть этот угол зенитным углом.

Частицы с большими зенитными углами прихода наиболее сильно подвержены влиянию геомагнитного поля. На рис. 7 показано отношение $\frac{N_e - N_w}{N_e + N_w}$ для зарегистрированных и отобранных частиц в зависимости от энергосвечения при различных значениях L оболочек и величинах зенитных углов (выражено в абсолютных значениях проекций единичного вектора направления на ось Y). N_e - количество частиц, зарегистрированных с западного направления, а N_w - с восточного.

Как и ожидалось с увеличением номера L оболочки и уменьшением отклонения вектора направления частицы от вертикали (малые значения зенитного угла) отношение $\frac{N_e - N_w}{N_e + N_w}$ стремится к 0.

Для оценки эффекта восточно-западной асимметрии электронов использовалось следующее приближение. Зарегистрированные и прошедшие отбор события были иницированы как положительно, так и отрицательно заряженными частицами. Будем считать, что только отрицательно заряженные частицы (это в основном только электроны с пренебрежимо малой примесью антипротонов) в рассматриваемом диапазоне энергий выше 75 ГэВ подвержены действию магнитного поля, т.е. отклоняются им, в то время как положительные частицы (в основном протоны с пренебрежимо малой долей позитронов), обладая большой величиной импульса (энергией выше 200-250 ГэВ), сохраняют свое первоначальное направление. Тогда количество частиц приходящих с востока N_e и с запада N_w можно определить следующим образом:

$$N_w(E_{tot}) = N(E_{tot}) + N_{el_w}(E_{tot}) \quad (1)$$

$$N_e(E_{tot}) = N(E_{tot}) + N_{el_e}(E_{tot}) \quad (2)$$

где $N(E_{tot})$ – это фон положительно заряженных частиц, N_{el_e} и N_{el_w} – количества электронов, приходящих с востока и запада, соответственно, а E_{tot} – величина полно-

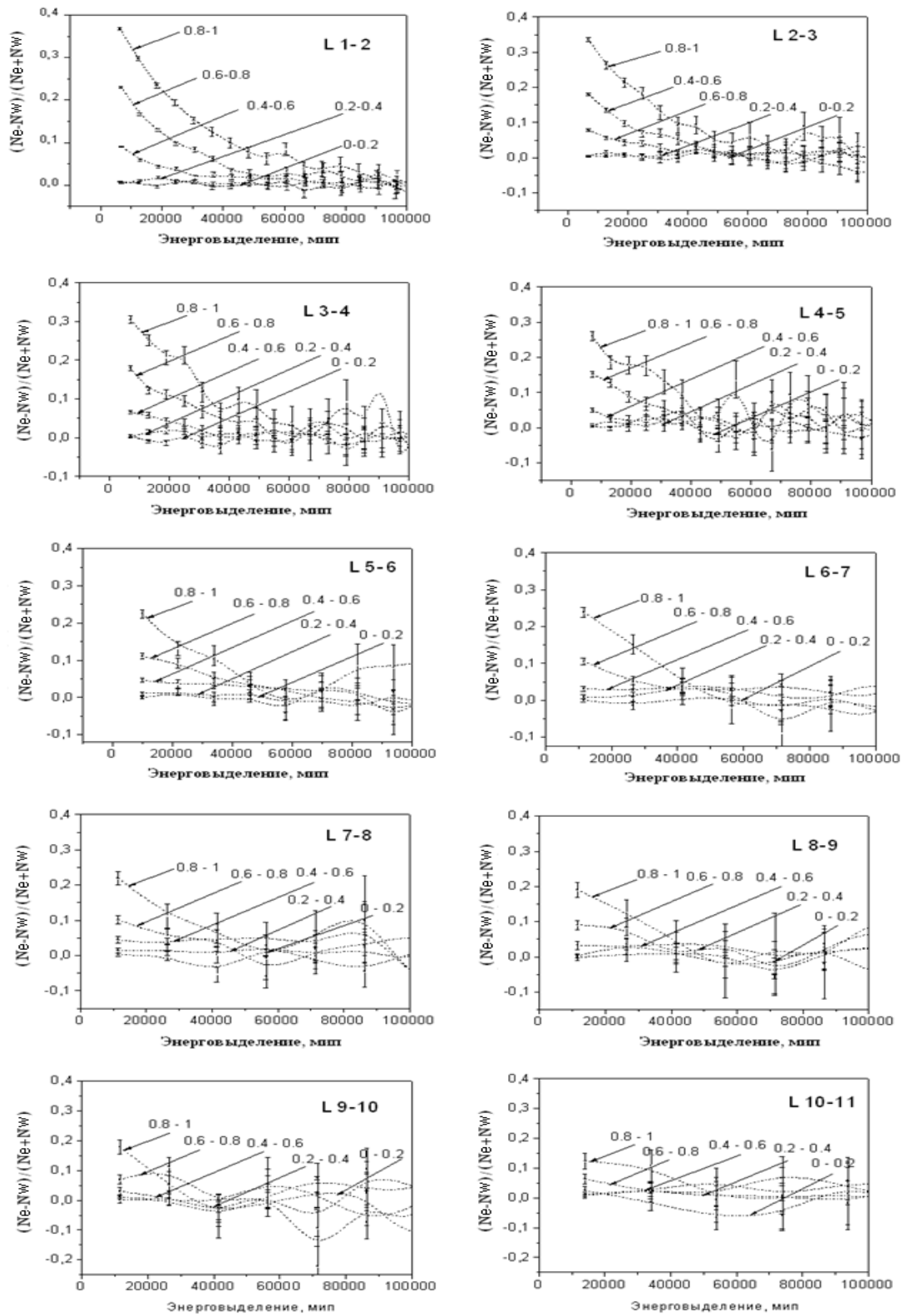


Рис. 7. Отношение $(Ne-Nw)/(Ne+Nw)$

го энерговыделения в калориметре, которая пропорциональна первоначальной энергии частиц. Зная первичный суммарный поток электронов, геометрический фактор, время измерения и эффективность регистрации и отбора, можно оценить общее число зарегистрированных и отобранных электронов $Nel(E_{tot}) = Nel_e(E_{tot}) + Nel_w(E_{tot})$, приходящих как с востока и с запада.

Отношение $\frac{Nel_e - Nel_w}{Nel_e + Nel_w}$ для количеств зарегистрированных и отобранных электронов с востока Nel_e и с запада Nel_w в зависимости от их энергии при разных L оболочках и без деления по L оболочкам приведено на рис 8.

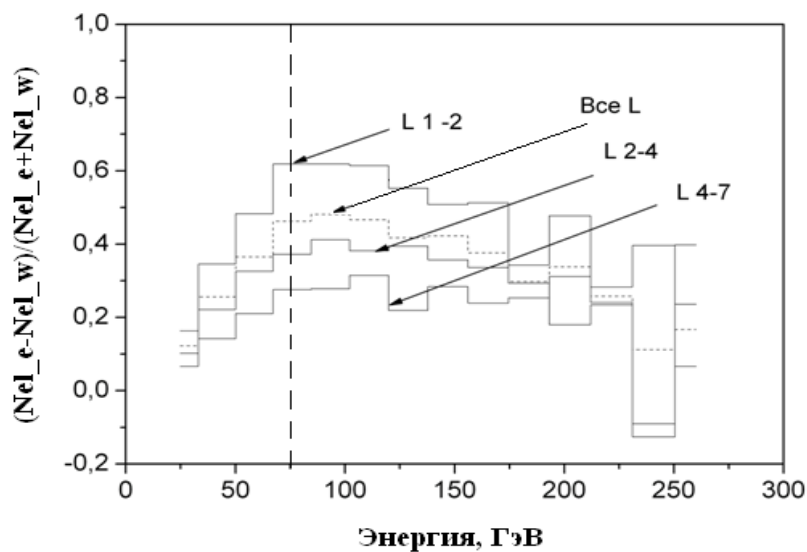


Рис. 8. Отношение $\frac{Nel_e - Nel_w}{Nel_e + Nel_w}$ для количеств зарегистрированных и отобранных электронов с востока Nel_e и с запада Nel_w в зависимости от их энергии при разных L оболочках и без деления по L оболочкам.

В восьмой главе описывается исследование северно-южной анизотропии частиц космического излучения, выполненное с помощью калориметра прибора ПАМЕЛА.

Интенсивность космических лучей одного знака может меняться в зависимости от того, через какие области гелиосферы они распространяются. В ряде экспериментов, выполненных с помощью нейтронных мониторов и на баллонах в верхних слоях атмосферы [69–71], были получены результаты, свидетельствующие об различии интенсивностей космических лучей, приходящих с северного и южного полушарий Земли при одинаковых геомагнитных условиях. При этом отличие в интенсивностях, полученных в атмосфере на Земле, оказывается около 3 процентов. Одно из возможных объяснений этому факту

было дано в ряде теоретических работ [72, 73], в которых было показано, что различие интенсивностей может быть связано с распространением космических лучей через южную или северную части гелиосферы.

В отобранных событиях по полному энергосодержанию преобладают протоны и ядра гелия в соответствии с их подавляющим содержанием в космических лучах (около 90 процентов протонов, около 10 процентов ядер гелия, а на остальные частицы приходится менее 1 процента). Тем не менее, так как низкоэнергичные тяжелые ядра дают во много раз большее, чем протоны и ядра гелия, энергосодержание в калориметре, их доля в отобранных для анализа событиях сильно возрастает. Так при пороге в 4000 мип относительное количество регистрируемых частиц примерно таково - 5% низкоэнергетичных тяжелых ядер, 55% протонов с энергией от 20 ГэВ, 15% ядер гелия с энергией от 10 ГэВ, 25% электронов с энергией от 7 ГэВ.

Чтобы зарегистрировать данный эффект, был проведен отбор событий по направлению в экваториальной системе координат. С помощью отбора выделялись частицы, пришедшие с южных и северных направлений во время нахождения спутника вблизи полярных областей.

Для характеристики асимметрии была использована величина $\frac{N_n - N_s}{N_n + N_s}$, где N_n - темп счета частиц приходящих с севера, а N_s - темп счета частиц приходящих с юга в геомагнитной системе координат.

В результате за период 06.2006-08.2009 была зарегистрирована северно-южная асимметрия частиц космического излучения. При этом величина асимметрии составляла около 3 процентов для частиц с энергией порядка 10 ГэВ и уменьшалось с ростом энергий.

Чтобы проверить гипотезу о связи наблюдаемой асимметрии в потоках галактических частиц с влиянием солнечного магнитного поля, в эксперименте ПАМЕЛА были проведены дополнительные измерения в период с 24.02.2010 по 31.07.2014, который включает в себя временной интервал, в течение которого происходила смена полярности магнитного поля Солнца. Идея эксперимента состояла в проверке гипотезы о связи асимметрии в потоках космических лучей с влиянием магнитного поля Солнца. Ожидалось, что такой глобальный процесс, как изменение полярности магнитного поля, будет оказывать влияние на величину эффекта асимметрии.

Изменение величины $\frac{N_n - N_s}{N_n + N_s}$ со временем показаны на рис. 9 при пороге 4000 мип. Время отсчитывается от 24 февраля 2010 года. Один временной интервал равен полным

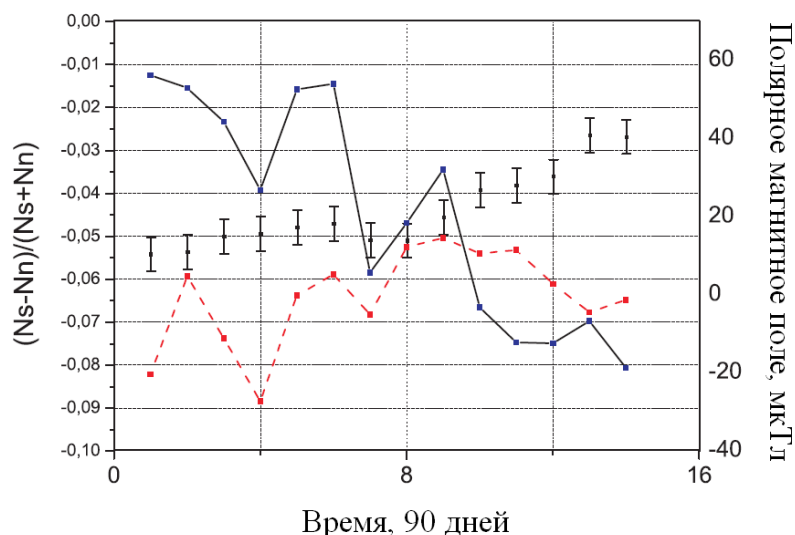


Рис. 9. Изменение величины $\frac{Nn - Ns}{Nn + Ns}$ со временем. Сплошной линией отмечена индукция южного, прерывистой - северного полярного магнитного поля Солнца по данным обсерватории Уилкоккс при Стэнфордском университете. Порог полного энергосодержания в калориметре для отбора событий равен 4000 мип.

90 дням работы. Данные приведены по 31 июля 2014 г.

Одновременно на рис. 9 показана динамика полярного магнитного поля Солнца в северном и южном полушариях Солнца (информация взята с сайта обсерватории Уилкоккс при Стэнфордском университете - wso.stanford.edu). Для 90-дневных интервалов значения были усреднены. До восьмого интервала темп счета на Южном географическом полюсе Земли выше, чем на Северном. Далее, начиная с восьмой точки, наблюдается уменьшение отношения. Восьмая точка соответствует временному интервалу 20.10.12-27.01.13. Согласно данным обсерватория Уилкоккс при Стэнфордском университете в июне 2012 произошло изменение полярности Солнца.

Таким образом, отношение начинает расти в период 20.10.12-27.01.13. В этот период впервые за данный солнечный цикл произошла переполусовка Солнца, что свидетельствует о корреляции асимметрии потоков в направлениях север-юг частиц космического излучения с солнечным магнитным полем. Полученные данные находятся в согласии с данными нейтронных мониторов для более низких энергий [74].

В заключении стоит отметить, что эффект северо-южной асимметрии потоков галактических космических лучей и его связь с эпохами активности Солнца может оказы-

вать влияние на земной климат. Например, понижение в количестве ГКЛ в околоземном пространстве может приводить к повышению температуры на поверхности Земли из-за возможной связи этих потоков с земной облачностью [75, 76].

В девятой главе приведены результаты по исследованию анизотропии космических лучей с помощью калориметра прибора ПАМЕЛА.

Считается, что космические лучи ТэВ-ной энергии рождаются в нашей Галактике. На первый взгляд, влияние галактического магнитного поля и множественные процессы рассеяния частиц космического излучения должны сделать невозможным определение первоначального направления частиц, а угловое распределение частиц космических лучей должно быть полностью изотропным.

Тем не менее, исследования распределения потоков частиц космических лучей на наземных установках показали наличие анизотропии порядка величин 10^{-3} - 10^{-4} [10–13, 77–81]. Величина анизотропии оказалась зависящей от энергии и не одинаковой в результатах, полученных на различных установках. Обычно, тип анизотропии в зависимости от размера областей с повышенной интенсивностью принято делить на крупномасштабную и мелко-масштабную анизотропию [82, 83].

Убедительного объяснения причин возникновения детектируемой крупномасштабной, а равно как и мелкомасштабной анизотропии, до сих пор нет. Однако существует целый ряд различных гипотез.

Для того, чтобы избежать влияния локальных неоднородностей распределения вещества в приборе и спутнике, неравномерной экспозиции, неизотропной эффективности регистрации и других факторов (например, неравномерность фона, что было отмечено в предыдущем пункте) применен метод создания изотропной карты [84]. Идея метода создания «изотропной» карты для последующего поиска анизотропии состоит в том, чтобы случайным образом распределить восстановленные направления внутри приборной системы координат в отобранном наборе экспериментальных данных. В случае идеального изотропного распределения по направлениям потоков космических лучей интенсивность, независимо от времени измерения, будет всегда одной и той же для данного направления в пространстве. Возможные временные изменения интенсивности будут обуславливаться только рабочими включениями-выключениями прибора в течение времени измерения.

Чтобы избавиться от частиц низких энергий, подверженных влиянию магнитного поля Земли, был повышен порог для отбора событий по полному энергосодержанию в ка-

лориметре. Порог повышался до тех пор, пока влиянием указанных частиц на конечное угловое распределение можно было полностью пренебречь. Таким образом, был установлен порог в 180000 мип.

В связи с малой величиной ожидаемой анизотропии, которая составляет величину порядка 10^{-3} , при недостаточном объеме статистики трехмерная карта распределения по двум координатам – прямому восхождению и склонению не строилась, а была построена только двумерная карта зависимости величины $\frac{I_r - I_s}{I_s}$ от прямого восхождения, где I_s – величина интенсивности потока частиц из изотропной фоновой карты в данном направлении, а I_r – измеренная интенсивность.

Область значений углов прямого восхождения (0° - 360°) разбивалась на два равных интервала. Измерение анизотропии делалось из предположения, что измеряется именно дипольная анизотропия. Для каждого интервала вычислялась величина $\frac{I_r - I_s}{I_s}$. Затем происходило смещение центров интервалов и величина $\frac{I_r - I_s}{I_s}$ вычислялась снова. Данным методом схож с анализом, используемым в пакете программ HEALPix [85], созданном для работы с данными в сферических системах координат. Таким образом, удалось существенно повысить статистическую значимость полученного результата, который приведен на рис. 10. Энергия отобранных событий лежит в интервале 1-20 ТэВ/нуклон.

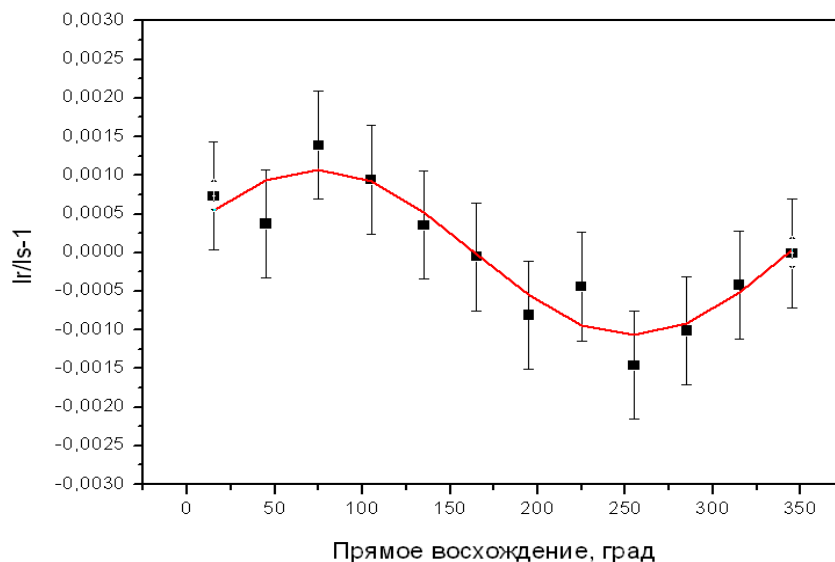


Рис. 10. Относительная интенсивность при пороге для полного энергосодержания в калориметре 180000 мип в зависимости от прямого восхождения. Красной линией обозначена аппроксимация периодической функцией.

В таблице 1 наряду с результатами, полученными с помощью калориметра прибора ПАМЕЛА, представлены данные по дипольной анизотропии, полученные за последние 20 лет измерений в различных экспериментах в диапазоне энергий доступном для измерения калориметром ПАМЕЛА - 1-20 ТэВ. Приведены годы, в течении которых проводились измерения, обозначены расположения установок в Северном или Южном полушарии, средние значения энергий первичных частиц, измеренные амплитуды и фазы диполя.

Таблица 1. Сравнение результатов измерения крупномасштабной анизотропии в диапазоне энергий 1-20 ТэВ, проводившихся с конца 90-ых годов прошлого века.

Название эксперимента	Период измерения, гг	Расположение, полусфера	Средняя энергия, ТэВ	Амплитуда, 10^{-3}	Фаза, град
Тибет [86]	1997-2005	Север	4-12	0,4	65
БПСД [87]	1982-1998	Север	$>2,5$	$1,1 \pm 0,07$	$27,6 \pm 4,2$
Супер-Камиоканде [88]	1996-2001	Север	10	0.7	35
АРГО [89]	2007-2009	Север	6	$0,68 \pm 0,05$	$39,1 \pm 0,5$
МИЛАРГО [12]	2000-2007	Север	6	0.400 ± 0.007	104.3 ± 0.5
Ice-Cube [90]	2007-2008	Юг	12,6	$0,73 \pm 0.03$	63,4
Ice-Cube [91]	2007-2012	Юг	20	~ 1	~ 100
НАВС [92]	2012	Север	2	~ 1	
МИНОС [93]	2010	Север	1	$0,82 \pm 0,17$	$8,9 \pm 12,1$
МИНОС [93]	2010	Север	11	$0,38 \pm 0,05$	$27,2 \pm 7,2$
Калориметр ПАМЕЛА	2006-2014	Север+Юг	5	$1,3 \pm 0,3$	20 ± 10

Как видно из таблицы 1, значения амплитуды в исследуемом диапазоне энергий разнятся от $0.4 \cdot 10^{-3}$ до $1.1 \cdot 10^{-3}$, а отличия в значениях фазы еще более значительны - значения разбросаны в диапазоне от 9 до 104 градусов. Полученные по калориметру ПАМЕЛА данные по измерению дипольной анизотропии очень хорошо согласуются с данными Баксанского подземного сцинтилляционного детектора, МИНОС и Ice-Cube и Супер-Камиоканде.

Полученные при помощи калориметра ПАМЕЛА результаты можно интерпретировать в рамках теории из работы [94]. Согласно данной теории наблюдаемая крупномасштабная анизотропия при энергиях около 10 ТэВ вызывается модифицированным эффектом Комптона-Геттинга. В данном случае эффект Комптона-Геттинга происходит в магнитных полях остатков старых сверхновых звезд. Распространение космических лучей определяется турбулентностью, описываемой уравнением Колмогорова, а доминирующим является перемещение частиц через звездный ветер старых сверхновых звезд. В результате амплитуда наблюдаемой дипольной анизотропии должна примерно в три раза превышать тот эффект Комптона-Геттинга, который получается от движения Земли вокруг Солнца, т.е., по крайней мере, составлять величину 10^{-3} . При больших энергиях анизотропия должна уменьшаться, что наблюдается по данным других экспериментов [95, 96].

Объяснить наблюдаемую крупномасштабную дипольную анизотропию можно также влиянием отдельного ближайшего источника космических лучей [97]. В данной работе уделяется важная роль величине амплитуды наблюдаемой анизотропии в диапазоне энергий 2 - 20 ТэВ, от которой зависит возможная максимальная энергия, до которой ускоряются космические лучи в источнике.

Полученная в данной работе фаза в пределах неопределенностей совпадает с координатами Галактического центра (около 268 градусов по прямому восхождению). В целом, теоретически возможно найти конкретное распределение галактических источников, ответственных за наблюдаемую амплитуду анизотропии [98, 99].

Однако, величина амплитуды в этих и подобных им моделях [100, 102, 103] может оказаться несколько завышенной (при рассматриваемых энергиях может достигать значений $\sim 2-3 \cdot 10^{-3}$), по сравнению с величиной амплитуды полученной в настоящей работе (см рис. 11). Перенос космических лучей в магнитных полях анизотропен [104–106], что остается верным даже для сильно возмущенного по сравнению со средним уровнем магнитного поля. Распространение частиц вдоль направления перпендикулярного направлению локального магнитного поля происходит медленнее, чем в параллельном направлении. Возможное несовпадение между регулярным магнитным полем и градиентом плотности потока космических лучей может привести к занижению величины амплитуды наблюдаемой анизотропии [107, 108]. Кроме того, в данном случае направление анизотропии не будет соответствовать какому-либо конкретному источнику космических лучей.

Отдельно осуществлялся поиск крупномасштабной анизотропии суммарного потока

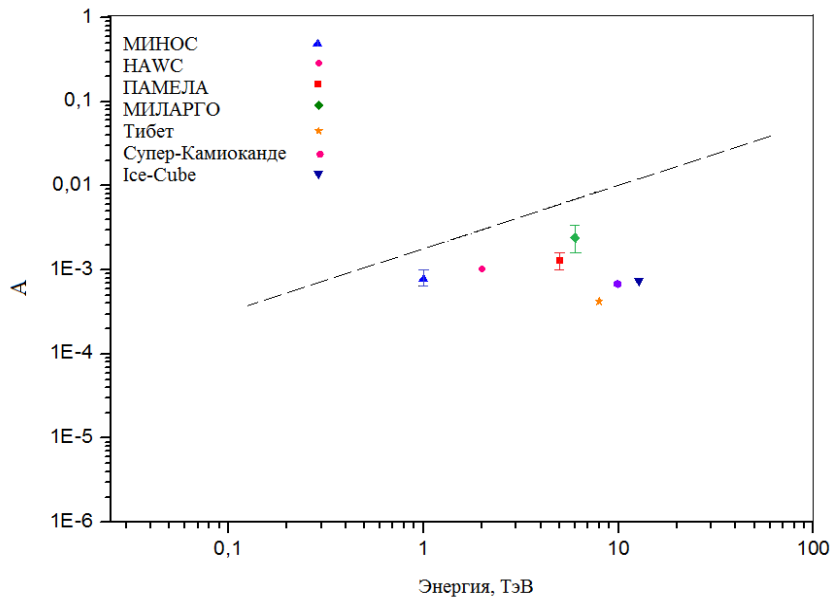


Рис. 11. Сравнение экспериментальных данных по амплитуде диполя из таблицы 1 с предсказанием модели со стандартной изотропной диффузией (пунктирная линия) [100, 101].

электронов и позитронов. Были установлены верхние пределы для такой анизотропии.

В Заключение приводятся основные результаты работы:

1. Была оптимизирована методика измерения оси ливня, развитого в калориметре ПАМЕЛА. Методика, основанная на итерационном подходе, позволила измерять ствол ливня не только от частиц приходящих под большими углами в прибор, но и от частиц, проходящих близко к боковым поверхностям калориметра. Это, в свою очередь привело к существенному увеличению аперттуры и, как следствие, объема статистики, позволило вовлечь в анализ частицы, приходящие с направлений, недоступных в основной апертуре (крайне важно для исследования угловых характеристик частиц в полярных областях). Знание координат оси ливня было необходимо для отбора частиц при измерении энергетического спектра электронов космических лучей, а также при исследовании угловых характеристик потоков частиц. В дальнейшем данная методика может быть использована в тех экспериментах, в которых нашел применение позиционно-чувствительный калориметр.

2. Была создана методика отбора электронов с помощью калориметра и нейтронного детектора. При более быстро спадающем спектре, чем у протонов и ядер гелия, доля электронов в отобранных событиях резко падает с энергией, что значительно повышает требуемый уровень режекции. Основным выводом из исследования, проведенного

при создании методики, является необходимость правильно учитывать остаточную примесь протонов среди отобранных событий при энергиях электронов от нескольких сот ГэВ и более. Протоны, дающие вклад в этот энергетический диапазон спектра электронов, обладают куда большей энергией, и, на первый взгляд, кажется, что ими можно пренебречь. Однако именно "загрязнение" протонами ТэВ-ных энергий приводит к "уплощению" экспериментально полученного спектра и образованию разных "наростов" или как их еще называют "бампов" (от английского bump - выпуклость). Предложенные выводы уже сейчас принимаются во внимание при разработке новых экспериментов.

3. Был измерен суммарный энергетический спектр электронов и позитронов космических лучей при энергиях от 300 до 3000 ГэВ. При энергии электронов около 1 ТэВ и выше до опубликования результатов настоящей работы существовало крайне мало других результатов измерений. Более того, до момента опубликования результатов настоящей работы данные наземных и спутниковых экспериментов находились в противоречии между собой о начале обрезания спектра электронов, т. е. о величине энергии при которой начинается резкий спад. Результаты, полученные с помощью калориметра ПАМЕЛА, склонили чашу весов на сторону измерений, выполненных до этого на наземных установках. Затем этот результат был подтвержден в других спутниковых экспериментах, включая АМС-02. Следовательно, итогом настоящей работы стали первые спутниковые данные обозначающие обрезание спектра электронов уже при энергиях порядка сотен ГэВ. Измерения спектров электронов и позитронов в ТэВ-ном диапазоне являются приоритетной задачей для современных космических экспериментов.

4. Была разработана методика измерения энергетических спектров протонов и ядер гелия космических лучей с помощью тонкого, с точки зрения ядерных взаимодействий, позиционно-чувствительного калориметра. Было показано, что в зависимости от параметра, используемого для восстановления первичной энергии частиц, форма измеряемого спектра может значительно искажаться. Выбранный в результате анализа параметр позволил избежать неправильного определения спектрального индекса. Данные выводы, как и сама методика, могут быть использованы в будущих экспериментах с аналогичным калориметром.

5. Были измерены энергетические спектры протонов и ядер гелия в интервале энергий 0.8 - 9 ТэВ/нук. Данный энергетический диапазон является наименее исследованным в наземных, спутниковых и аэростатных экспериментах. Полученные спектры протонов и

ядер гелия космических лучей позволяют сделать утверждение, что существует различие в формах спектра, а значит различны механизмы, ответственные за ускорения этих частиц в источниках. До сих пор не существует общепризнанной модели способной объяснить данное различие. Также удалось устранить существующие противоречия в полученных результатах в современных спутниковых экспериментах по энергетическим спектрам протонов и ядер гелия космических лучей. Путем комбинации полученных ранее с помощью калориметра ПАМЕЛА спектров протонов и ядер гелия с новыми результатами, было подтверждено существование изменения показателей спектров. Полученные данные крайне важны для построения космологических моделей происхождения и распространения космических лучей.

6. Было исследовано влияние магнитного поля Земли на потоки высокоэнергетичных электронов космических лучей. Была измерена величина так называемого "восточно-западного" эффекта для электронов с энергией от несколько десятков ГэВ до несколько сотен ГэВ на разных геомагнитных оболочках. Данные результаты могут быть использованы как при уточнении существующих, так и при создании новых моделей описывающих Геомагнитное поле, а также при измерении позитронов космических лучей высоких энергий.

7. Впервые в эксперименте, проводящемся не на наземной установке, был исследован эффект, связанный с затенением космических лучей Луной. Подобные исследования являются актуальными и на наземных установках. Анализ результатов позволил сделать выводы о возможностях методики определения направления прихода частиц в калориметре. Однако точность результата, измеренного положения Луны, была ограничена статистикой и влиянием Земного магнитного поля.

8. При исследовании темпов счета частиц в полярных областях, приходящих с северных и южных направлений, была зарегистрирована асимметрия в потоках галактических космических лучей. Число частиц приходящих с северного направления оказалось больше, чем с южного. Оказалось, что данный эффект зависит от энергии первичных частиц, уменьшаясь с ростом энергии.

9. Во время переполюсовки магнитного поля Солнца было зарегистрировано изменение асимметрии темпов счета частиц с северного и южного направлений. Начало этого процесса пришлось на 2012 год. Полученные результаты были проанализированы на основе данных Стэнфордской солнечной обсерватории, благодаря чему обнаружилась связь

между изменением асимметрии и полярными солнечными магнитными полями. Таким образом, впервые во время переполюсовки Солнца удалось измерить поведение северо-южной асимметрии в потоках частиц галактического происхождения и связать само существование данной асимметрии с Солнечным магнитным полем.

10. Была разработана методика для получения характеристик дипольной анизотропии галактических лучей в спутниковом эксперименте. Было продемонстрировано, что несмотря на пренебрежимо малое, по сравнению с протонами, количество тяжелых ядер в первичном космическом излучении, их роль при исследовании таких малых эффектов, как анизотропия, может быть весьма огромной. Каскады, генерируемые ядрами в калориметре, неотличимы от протонных, а отсутствие зарядовой сепарации делает их идентификацию в отобранных по каскаду событиях невозможной. Единственной возможностью избавиться от низкоэнергетичных тяжелых ядер, подверженных эффекту геомагнитного обрезания является повышение порогов по полному энергосодержанию. Однако повышать порог пришлось до предельных значений, когда статистики едва хватает для получения надежного результата.

11. Были получены данные для амплитуды и фазы звездно-суточной волны или дипольной анизотропии галактического космического излучения. Результаты получены впервые не на наземной установке. Важной особенностью данных измерений является отсутствие атмосферы и возможность измерять анизотропию сразу в двух полушариях. Результаты были проверены с помощью численного моделирования, различными методами были получены величины неопределенностей для амплитуды и фазы.

12. Был осуществлен поиск крупномасштабной анизотропии потоков электронов и позитронов космических лучей. Итогом работы стало установление порога для дипольной анизотропии при энергиях 25 ГэВ - 1000 ГэВ.

Литература

1. V. Hess, Phys. Z **13**, 1084 (1912).
2. A. V. Gurevich and K. P. Zybin, Physics Today **58**, 37 (2005).
3. C. D. Anderson, Phys. Rev. **43**, 491 (1933).
4. S. Haino, Proceedings of the 33rd ICRC, Rio de Janeiro, Brazil (2013).
5. F. Aharonian, et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 261104, (2008).
6. T. Kobayashi, Y. Komori, K. Yoshida, N. J., Astrophys. J. **601**, 340 (2004).
7. M. Ackermann, et al., Phys. Rev. D **82**, 092004 (2010).
8. B. Bertucci, Proceedings of the 33rd ICRC, Rio de Janeiro, Brazil (2013).
9. O. Adriani et al., Nature **458** 607 (2009).
10. G. Guillian, J. Hosaka, K. Ishihara, 29th ICRC, Pune, India **6** 85 (2005).
11. M. Amenomori , S. Ayabe , S. W. Cui , Astrophys. J. **626** 29 (2005).
12. A. A. Abdo, B. T. Allen, T. Aune et al., Astrophys. J. **698** 2121 (2009).
13. R. Abbasi, Y. Abdou, T. Abu-Zayyad et al., Astrophys. J. **740** 16 (2011).
14. Ivan De Mitri, EPJ Web Conf. **136** 02010 (2017).
15. S.. Torii, PoS Proc, ICRC of 2015, **236** 0581 (2016).
16. P. Picozza, A. M. Galper, G. Castellini et al., ApJ. **27**, 296 (2007).
17. Н. Л. Григоров и др., Космические исследования **5** 3 395 (1967).
18. A. D. Panov et al., Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **73** 564 (2009).
19. M. Aguilar et al., Phys. Rev. Lett. **110** 14 141102 (2013).
20. O. Adriani et al., Physical Review Letters **106** 201101 (2011).
21. S. Torii, T. Tamura, N. Tateyama et al. Astrophys. J. **559** 973 (2001).

22. C. Meurer and N. Scharf *Astrophys. Space Sci. Trans.*, **7** 183 (2011).
23. H. S. Ahn et al., *ApJ Lett.* **714** 89 (2010).
24. K. Asakimori et al., *The Astrophysical Journal* **502** 278 (2009).
25. O. Adriani et al., *Journal of Physics Conference Series* **798** 012033 (2017)
26. С.В. Борисов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **37** 6 35 (2010).
27. R. Brun et al., computer code GEANT 3.21, CERN, Geneva, 1994.
28. G. Ambrosi, et al., *Nature* **552** 63 (2017).
29. O. Adriani et al., *Phys. Rev. Lett.* **119** 181101 (2017).
30. S. Abdollahi, *Phys. Rev. D* **95** 082007 (2017).
31. <https://cds.cern.ch/record/2320166>
32. O. Adriani et al., *Nature* **458** 607 (2009).
33. R. Tomaschitz, *Physica A* **451** 456 (2016).
34. Matthew D. Kistler et al., arXiv:1210.8180
35. A. Panov, *Journal of Physics: Conference Series* **409** 012004 (2013).
36. F. A. Aharonian et al., *Astron. & Astrophys.* **448** 43 (2006).
37. R. Attallah, arXiv:1607.06615 (2016).
38. R. P. Mignani, S. Zharikov, P. A. Caraveo, *Astron. Astrophys.* **473** 891 (2007).
39. A. D. Erlykin, A. W. Wolfendale, *Astropart. Phys.* **22** 47 (2004).
40. T. Satyendra et al., *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* **414** (2011).
41. P. L. Biermann et al., *Phys. Rev. Lett.* **103** 061101 (2009).
42. R. D. Parsons, J. A. Hinton, H. Schoorlemmer, *Astropart. Phys.* **84** 23 (2016).
43. И.П. Иваненко и др., *Известия АН серия физическая* **57** 7 76 (1993).
44. G. D'Agostini, *Nucl. Instr. Meth. A* **362** 487 (1995).

45. O. Adriani, et al., *Science* **332** 6025 69 (2011).
46. V. Choutko, Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro, Brazil (2013).
47. P. S. Marrocchesi, PoS ICRC2017 **156** (2017).
48. C. Yue, PoS ICRC2017 **1076** (2017).
49. D. M. Green, PoS ICRC2017 **159** (2017).
50. V. Gallo et al., PoS ICRC2017 **169** (2017).
51. A. D. Panov et al., PoS ICRC2017 **1094** (2017).
52. R. W. Ellsworth et al., *Astrophysics and Space Science* **52** 2 (1977).
53. S. Thoudam, J. R. Horandel, *MNRAS* **435** 3 2532 (2013).
54. D. C. Ellison, D. Eichler, *Physical Review Letters* **55** 2735 (1985).
55. E. G. Berezhko, V. K. Yelshin, L. T. Ksenofontov, *Astroparticle Physics* **2** 215 (1994).
56. A. Meli, *Journal of Physics: Conference Series* **409** 012059 (2013).
57. V. Ptuskin, V. Zirakashvili, E.-S. Seo, *ApJ* **763** 47 (2013).
58. V. I. Zatsepin, N. V. Sokolskaya, *Astron. & Astrophys.* **458** 1 (2006).
59. T. Stanev, P. L. Biermann, T. K. Gaisser, *Astron. & Astrophys.* **274** 902 (1993).
60. M. Ave et al., *Astrophys. J.* **678** 262 (2008).
61. M. Ave et al., *Astrophys. J.* **697** 106 (2009).
62. G. Bernard et al., *Astron. & Astrophys.* **555** 48 (2013).
63. J. Lavalley, *MNRAS* **414** 985 (2011).
64. F. Donato, P. D. Serpico, *Phys. Rev. D* **83** 023014 (2011).
65. T. Delahaye et al., *Astron. & Astrophys.* **531** A37 (2011).
66. S. Macmillan, C. Finlay, *IAGA Special Sopron Book Series* **5** 265 (2011).
67. T. H. Johnson, *Phys. Rev.* **43** 834 (1933).

68. L. W. Alvarez, A. H. Compton, Phys. Rev. **43** 835 (1933).
69. G. F. Krymsky et al, Geomagn. Aeron. **21** 923 (1981).
70. M. A. Shea, D. F. Smart, Soc. Ital. di Fisica, Bologna 398 (1988).
71. Y. I. Stozhkov et al., J. Geophys. Res. **101** A2 2523 (1996).
72. J. Chen, J. W. Bieber, M. A. Pomerantz, J. Geophys. Res. **96** 11 569 (1991).
73. D. B. Swinson, M. A. Shea, J. E. Humble, Geophys. Res. **91** 2943 (1986).
74. I.-H. Choa, et al., Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics **73** 13 1723 (2011).
75. H. Svensmark, E. Friis-Christensen, Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics **59** 11 1225 (1997).
76. H. Svensmark, M. B. Enghoff, J. O. P. Pedersen, Physics Letters A
77. D. J. Gutler, H. E. Bergeson, J. E. Davis and D. E. Groom, The Astrophysical journal **248** (1981).
78. А. С. Лидванский, В. А. Козяревский, В. Я. Поддубный и др., Известия Академии наук, сер. физ., **59** 200 (1995).
79. В. В. Алексеенко, Е. Н. Гулиева, В. Г. Сборщиков, Известия АН **18** 2126 (1984).
80. G. Di Sciacio and R. Iuppa, J. Phys.: Conf. Ser. **375** 052008 (2012).
81. J. K. de Jong, Proc. 32nd ICRC, Beijing, China (2011).
82. A. U. Abeysekara et al., Astrophys. J. **796** 2 108 (2014).
83. A. A. Abdo et al., Phys. Rev. Lett. **101** 221101 (2008).
84. D.J. Bird et al., Astrophys. J. **511** 739 (1999).
85. M. A. Green et al. Transactions on magnetics **MAG-23** 1240 (1987).
86. M. Amenomori et al., Science **314** 439 (2006).
87. A.S. Lidvansky et al., Proc 30th ICRC Merida, Mexico (2007).
88. G. Guillian et al. Phys. Rev. D **75** 062003 (2007).

89. C. Shuwang, L. Taoli, Z. Jianli, Proc. 32 ICRC ChinaBeijing (2011).
90. R. Abbasi, P. Desiati, *Astrophys. J.* **718** 194 (2010).
91. M. Santander et al., Proc. ICRC 33, Rio-de-Janeiro, Brazil (2013).
92. E. Benzavi et al., Proc. ICRC 33, Rio-de-Janeiro, Brazil (2013).
93. D. . Michel et al., *Nucl Instr and Methods A* **596** 190 (2008).
94. P. L. Biermann, J. K. Becker, E.-S. Seo, M. Mandelartz, *Astrophys. J.*
95. M. G. Aarsten et al., *ApJ* **765** 55 (2013).
96. P. L. Ghia, *Journal of Physics: Conference Series* **203** 012126 (2010).
97. V. Savchenko, M. Kachelrie, D. V. Semikoz, *Astrophys. J. Lett.* **809** 23 (2015).
98. L. Sveshnikova, O. Strelnikova, V. Ptuskin, *Astropart. Phys.* **33** 50 (2013).
99. M. G. Aartsen et al., *Astrophys. J. Lett.* **826** 2 (2016).
100. P. Blasi, E. Amato, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **1** 11 (2012).
101. P. Mertsch, S. Funk, *ASTRA Proc.* **2** 51 (2015).
102. M. Pohl, D. Eichler, *Astrophys. J.* **766** 4 (2013).
103. V. Ptuskin, *Astropart. Phys.* **39** 44 (2012).
104. J. Giacalone, J. R. Jokipii, *Astrophys. J.* **520** 204 (1999).
105. R. C. Tautz, *Astrophys. J.* **703** 1294 (2009).
106. A. Shalchi, *Physics of Plasmas* **22** 010704 (2015).
107. R. Kumar, D. Eichler, *Astrophys. J.* **785** 129 (2014).
108. F. Eenberger et al., *Astron. & Astrophys.* **547** A120 (2012).

Публикации автора по теме диссертации в рецензируемых журналах и сборниках, индексируемых *Web of Science*, *SCOPUS*, *RSCI*:

1. Borisov S., Voronov S., Galper A., Karelin A., High energy cosmic ray protons and helium // Cosmic Rays for Particle and Astroparticle Physics-Proceedings of the 12th ICATPP Conference. 2011. P. 190-195 – SJR 4.
2. Борисов С.В., Воронов С.А., Карелин А.В., Методика измерения энергетических спектров легких ядер в эксперименте ПАМЕЛА с помощью позиционно-чувствительного калориметра // Ядерная физика и инжиниринг. №5 (3). 2012. С. 469-473 – Импакт-фактор РИНЦ 0,112.
3. Adriani O., Bonechi L., Spillantini P., Karelin A. et al., Measurements of cosmic-ray proton and helium spectra with the PAMELA calorimeter // Advances in Space Research. №2 (5). 2013. P. 219-226 – IF 2,177.
4. Борисов С.В., Воронов С.А., Гальпер А.М., Карелин А.В., Определение направления прилета частиц в “расширенной” апертуре прибора ПАМЕЛА с помощью позиционно-чувствительного калориметра // Приборы и техника эксперимента. №1. 2013. С. 5-13 – Импакт-фактор РИНЦ 0,737.
5. Борисов С.В., Воронов С.А., Карелин А.В., Малахов В.В., Разделение электронной и протонной компонент космических лучей при помощи калориметра в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА при регистрации частиц в расширенной апертуре // Ядерная физика. №6 (76). 2013. С. 787-797 – IF 0,458.
6. Карелин А.В., Адриани О., Барбарино Дж., Базилевская Г.А. и др., Измерение спектра электронов в диапазоне энергий 300-1500 ГэВ в эксперименте ПАМЕЛА с помощью позиционно-чувствительного калориметра // Ядерная физика и инжиниринг. №7 (4). 2013. С. 624-630 – Импакт-фактор РИНЦ 0,112.
7. Karelin A., Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al., A search algorithm for finding cosmic-ray anisotropy with the PAMELA calorimeter // Journal of physics: conference series. №1 (409). 2013. P. 012029 – IF 0,540.
8. Карелин А.В., Воронов С.А., Гальпер А.М., Малахов В.В., Михайлов В.В., Измерение отклонения магнитным полем земли электронов космических лучей в интервале энергий 75-250 ГэВ по данным эксперимента ПАМЕЛА // ЖЭТФ. №1 (144) 2013. С. 75-84 – IF 1,119.
9. Giaccari U., Adriani O., Barbarino G.C., Karelin A.V. et al., Anisotropy studies in

the cosmic ray proton flux with the PAMELA experiment // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. (239-240). 2013. P. 123-128 – RG Journal Impact: 1.00.

10. Карелин А.В., Адриани О., Барбарино Дж., Базилевская Г.А. и др., Новые измерения энергетических спектров протонов и ядер гелия космических лучей высоких энергий при помощи калориметра в эксперименте ПАМЕЛА // ЖЭТФ. №3 (146). 2014. С. 513-517– IF 1.119.

11. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A., Karelin A.V. et al., The PAMELA mission: heralding a new era in precision cosmic ray physics // Physics Reports. №4 (544). 2014. P. 323-370 – IF 25,798.

12. Карелин А.В., Адриани О., Барбарино Дж., Базилевская Г.А. и др., Северо-южная асимметрия электронов космических лучей высоких энергий по данным эксперимента ПАМЕЛА // ЖЭТФ. №2 (144). 2013. С. 312-318 – IF 1.119.

13. Карелин А.В., Адриани О., Барбарино Дж., Базилевская Г.А. и др., Поиск анизотропии космических лучей с помощью калориметра в эксперименте ПАМЕЛА // Известия РАН. Серия Физическая. №11 (77). 2013. С.1548-1552 – Импакт-фактор РИНЦ 0,737.

14. Карелин А.В., Воронов С.А., Колдобский С.А., Наблюдение тени Луны в космических лучах с энергией более 400 ГэВ в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА // Космические исследования. №2 (53).2015. С. 136-140 – Импакт-фактор РИНЦ 1,152.

15. Карелин А.В., Адриани О., Барбарино Дж., Базилевская Г.А. и др., Измерение спектров частиц высоких энергий в космических лучах в эксперименте ПАМЕЛА // Известия РАН. Серия Физическая. №3 (79). 2015. С.322-326 – Импакт-фактор РИНЦ 0,737.

16. Карелин А.В., Адриани О., Барбарино Дж., Базилевская Г.А. и др., Измерение крупномасштабной анизотропии космических лучей в эксперименте ПАМЕЛА // Письма в ЖЭТФ. №5-6 (101) 2015. С. 321-325 – IF 1,412.

17. Карелин А.В., Адриани О., Барбарино Дж., Базилевская Г.А. и др., Регистрация изменения отношения темпов счета “север–юг” частиц космических лучей высоких энергий во время перемены полярности магнитного поля Солнца // Письма в ЖЭТФ. №4 (101). 2015 С. 246-249 – IF 1,412.

18. Карелин А.В., Воронов С.А., Гальпер А.М., Колдобский С.А., Измерение суммарного спектра электронов и позитронов в эксперименте ПАМЕЛА с помощью позиционно-чувствительного калориметра и нейтронного детектора в диапазоне энергий 300–1500 ГэВ // Ядерная физика. №3-4 (78). 2015. С. 307-318 – IF 0,458.