

На правах рукописи

ЯШИН Игорь Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА И  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ  
ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЯМИ ВЫШЕ  $10^{15}$  эВ ПО МЮОННОЙ  
КОМПОНЕНТЕ НАКЛОННЫХ ШАЛ**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автор:

*Автореферат*  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва, 2010

Работа выполнена в Научно-образовательном центре «НЕВОД»  
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Кузьмичев Леонид Александрович,  
НИИЯФ МГУ, г. Москва  
доктор физико-математических наук  
Мухамедшин Рауф Адгамович,  
Институт ядерных исследований РАН  
доктор физико-математических наук  
Ростовцев Андрей Африканович  
ГНЦ ИТЭФ

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится 9 февраля 2011 г. в 15 час. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета Д 212.130.07 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409,  
Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан \_\_ октября 2010 г.

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

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



С.Е. Улин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

Работа направлена на решение фундаментальной проблемы происхождения, ускорения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий. Для исследования природы первичных космических лучей (ПКЛ) необходимы сведения об их энергетическом спектре и массовом составе. Единственным источником информации о характеристиках потока и взаимодействия ПКЛ в области энергий выше  $10^{15}$  эВ являются широкие атмосферные ливни (ШАЛ), формирующиеся в результате развития ядерно-каскадного процесса в атмосфере. В основе метода ШАЛ лежит решение обратной задачи: восстановление параметров потока ПКЛ (энергетический спектр, массовый состав, анизотропия и др.) по откликам детекторов, входящих в состав экспериментальной установки. Однако характеристики ШАЛ одновременно зависят от всех этих неизвестных и, кроме того, от моделей адрон-ядерных взаимодействий, параметры которых получаются на основе экстраполяции ускорительных данных в область сверхвысоких энергий, где такие данные отсутствуют. Проблему пытаются решить путем анализа и сопоставления данных по различным компонентам широких атмосферных ливней, которые исследуются в многочисленных экспериментах, нацеленных на изучение разных областей энергий первичных частиц – от  $10^{14}$  до  $10^{20}$  эВ, и обладающих различной чувствительностью к разным параметрам потока КЛ. Измеренный спектр ШАЛ имеет несколько особенностей, физическая природа которых, несмотря на более чем 50 лет исследований, не выяснена до конца. В области  $10^{15}$  –  $10^{16}$  эВ большинство измерений указывает на существование излома (увеличение показателя наклона) энергетического спектра ШАЛ. Однако при этом полученные в этих экспериментах оценки массового состава КЛ являются неопределенными и зависящими от модели взаимодействия. В промежуточной области энергий  $10^{16}$  -  $10^{18}$  эВ имеются немногочисленные данные, указывающие на возможное существование второго излома в районе энергий  $10^{17}$  –  $10^{18}$  эВ. Результаты крупномасштабных установок выявили наличие обратного изгиба (уменьшение показателя наклона) спектра при энергиях между  $10^{18}$  и  $10^{19}$  эВ. В последнее время на установках HiRes и Pierre Auger Observatory было получено экспериментальное указание на существование обрезания спектра при энергиях  $> 10^{19.5}$  эВ (ГЗК эффект). Однако в целом при ультравысоких энергиях ( $> 10^{18}$  эВ) данные различных установок весьма противоречивы. Одной из основных причин существующей ситуации в исследованиях ПКЛ при энергиях  $> 10^{15}$  эВ является отсутствие установок, способных исследовать характеристики ШАЛ в широком диапазоне

первичных энергий (несколько порядков) в рамках единой экспериментальной методики. Разработка такого подхода и проведение с его помощью исследований потока первичных космических лучей сверхвысоких энергий является крайне актуальной задачей, так как позволит избежать многих неопределенностей и систематических неточностей, неизбежно возникающих при сопоставлениях данных разных экспериментов.

### **Цель работы**

Разработка нового метода исследования ШАЛ, создание для его реализации экспериментального комплекса, проведение исследований мюонной компоненты ШАЛ в широком интервале зенитных углов и изучение характеристик потока первичных космических лучей и их взаимодействий в диапазоне энергий от  $10^{15}$  до  $10^{19}$  эВ.

### **Научная новизна**

1. Разработан и апробирован новый метод исследования характеристик потока первичных космических лучей и их взаимодействий в диапазоне энергий  $10^{15}$  -  $10^{19}$  эВ с помощью новой характеристики - спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ).
2. Созданный экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР для регистрации мюонной компоненты космических лучей на поверхности Земли в широком диапазоне зенитных углов не имеет аналогов в мире.
3. Впервые экспериментально исследовано влияние геомагнитного поля на характеристики групп мюонов на поверхности Земли и обнаружен эффект компланарности треков частиц в группах в плоскости, определяемой осью ШАЛ и вектором силы Лоренца.
4. Впервые на основе данных по группам мюонов исследована область первичных энергий ПКЛ от  $10^{15}$  эВ до  $10^{18}$  эВ и выше на одной установке с помощью единой экспериментальной методики и получены следующие новые результаты:
  - в области энергий  $10^{16}$ – $10^{17}$  эВ обнаружен постепенный рост плотности мюонов по сравнению с ожидаемым для фиксированного состава ПКЛ, что можно интерпретировать как его утяжеление;
  - впервые измерена величина изменения наклона спектра плотности мюонов при энергиях в районе  $10^{17}$  эВ («второй излом»), которая соответствует  $\Delta\gamma \sim 0.2$ .
6. Впервые оценки интенсивности ПКЛ при ультравысоких энергиях в районе  $10^{18}$  эВ и выше получены на основе групп мюонов. Эти оценки оказались значительно выше данных о спектре ПКЛ, полученных

флуоресцентным методом, даже в предположении о тяжелом («железном») составе.

### **Практическая значимость**

Разработанный в работе новый метод исследования ПКЛ с использованием СЛПМ может применяться как самостоятельно, так и совместно с другими методами исследования ШАЛ и позволяет получать новые знания о спектре, составе и характеристиках взаимодействия космических лучей при сверхвысоких энергиях. Результаты работы могут быть использованы при оценке применимости различных моделей спектра и состава ПКЛ, адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях (выше предельных энергий ЛНС). Оснащение установкой, подобной ДЕКОР, современных комплексов для исследования ШАЛ значительно расширит их исследовательские возможности и повысит достоверность получаемых оценок о спектре, составе и характеристиках адронных взаимодействий.

### **На защиту выносятся:**

1. Новый подход к исследованию характеристик потока ПКЛ и их взаимодействий при энергиях  $> 10^{15}$  эВ с помощью спектров локальной плотности мюонов.
2. Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР, как новый тип детектора для исследования мюонной компоненты наклонных ШАЛ в широком диапазоне зенитных углов, вплоть до горизонта.
3. Методика отбора и обработки групп мюонов, зарегистрированных детектором ДЕКОР для различных зенитных углов, и методика построения СЛПМ в виде, независимом от типа детектора.
4. Результаты экспериментального исследования влияния магнитного поля Земли на характеристики мюонной компоненты при больших зенитных углах, которое приводит к уменьшению интенсивности мюонов в группах, и обнаруженный эффект компланарности треков в плоскости, определяемой осью ШАЛ и вектором силы Лоренца.
5. Результаты анализа экспериментальных СЛПМ и их сравнения с расчетными распределениями, полученными с использованием различных моделей первичного спектра всех частиц, в том числе при сверхвысоких энергиях по данным экспериментов HiRes и AGASA.
6. Результаты исследования ПКЛ в области энергий от  $10^{15}$  эВ до  $10^{18}$  эВ и выше на основе данных по группам мюонов:
  - укрупнение СЛПМ в районе 5 ПэВ, связанное с изломом первичного спектра;

- при энергиях  $10^{16}$ – $10^{17}$  эВ постепенный рост плотности мюонов по сравнению с ожидаемым для фиксированного состава ПКЛ, что можно интерпретировать как его утяжеление;
- изменение наклона спектра плотности мюонов («второй излом») при энергиях в районе  $10^{17}$  эВ, которое соответствует  $\Delta\gamma \sim 0.2$ .

8. Зависимость показателя наклона СЛПМ от среднего логарифма первичной энергии. В диапазоне энергий  $10^{15}$  –  $10^{18}$  эВ величина наклона спектров СЛПМ постепенно возрастает от  $\sim 1.9$  до  $\sim 2.3$ , что соответствует изменению  $\gamma$  интегрального спектра от  $\sim 1.7$  до  $\sim 2.1$ .

9. Оценки интенсивности ПКЛ с энергиями в районе  $10^{18}$  эВ, полученные по экспериментальным СЛПМ для двух предельных составов ПКЛ (чистые протоны и ядра железа) с использованием основных моделей адрон-ядерных взаимодействий (QGSJET01, QGSJET0II, SIBYLL2.1, EPOS1.6, EPOS1.99).

### **Вклад автора**

Автор принимал непосредственное и определяющее участие на всех этапах создания детекторов НЕВОД и ДЕКОР, начиная от проекта до ввода в режим экспозиции. Под его руководством была спроектирована, смонтирована и запущена в эксплуатацию верхняя часть координатного детектора ДЕКОР. Автор был руководителем многолетнего эксперимента по регистрации групп мюонов на комплексе НЕВОД ДЕКОР в течение 2001 – 2007 г.г. Автор принимал непосредственное участие в разработке нового подхода к изучению ШАЛ на основе спектров локальной плотности мюонов в широком диапазоне зенитных углов и в анализе результатов исследования характеристик потока первичных космических лучей и их взаимодействия.

### **Достоверность**

Достоверность результатов обеспечивается применением современных методов обработки и анализа экспериментальных данных, а также тщательным отбором, анализом и перекрестной проверкой экспериментального материала несколькими независимыми операторами, что значительно повышало достоверность получаемых оценок СЛПМ. Группы мюонов регистрируются одновременно координатно-трековым детектором ДЕКОР и ЧВД НЕВОД. Это дало возможность осуществить взаимную проверку экспериментальных методов определения направления прихода групп, особенно при больших зенитных углах. Полученные экспериментальные распределения оказались в хорошем согласии с результатами моделирования на основе пакета CORSIKA при энергиях в районе  $10^{15}$  эВ, которые близки к энергиям, достигнутым на ускорителях,

где экстраполяция характеристик адронных взаимодействий достаточно надежна.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы доложены на российских (ВККЛ – 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, БМШ ЭТФ 2006, 2008, 2010) и международных (Vulcano Workshop – 2002, 2006, 2008; NANP – 2003, 2005; ECRS – 2004 (приглашенный доклад), 2006, 2008; Int. School Particle&Cosmology – 2003; 2007; CRIS – 2006, RICAP – 2007; ISVHECRI – 2006, 2008; ICRC – 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009) конференциях, школах, симпозиумах.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 50 работ, из них в рецензируемых журналах – 20, список которых приведён в конце автореферата:

Ядерная физика (3 статьи), Изв. РАН, Сер. физич. (8 статей), Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) (4 статьи), Приборы и техника эксперимента, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A., Инженерная физика, Astrophysics and Space Science, Intern. J. Mod. Phys. (по одной).

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 215 стр., 105 рисунков, 7 таблиц, 238 наименований цитируемой литературы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обосновывается актуальность разработки нового подхода к исследованию характеристик потока и взаимодействия первичных космических лучей с энергиями выше  $10^{15}$  эВ с помощью мюонной компоненты наклонных ШАЛ. Формулируется цель работы, её новизна и выносимые на защиту положения.

**В первой главе** рассматриваются феноменологические особенности нового метода изучения характеристик космических лучей сверхвысоких энергий, основанного на анализе новой характеристики ШАЛ - спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ), измеряемых на поверхности Земли в широком диапазоне зенитных углов. Метод позволяет в рамках одного эксперимента охватить интервал энергий первичных частиц  $10^{15}$ – $10^{19}$  эВ и связать, таким образом, области, исследуемые с помощью компактных и гигантских установок ШАЛ. Особенности метода иллюстрируются с помощью полуаналитической модели, в которой анализируется связь

первичного спектра и СЛПМ, а также чувствительность к форме спектра, составу ПКЛ и модели адронных взаимодействий.

При больших зенитных углах уровня наблюдения достигают только мюоны ШАЛ (и вторичные по отношению к ним частицы). Вследствие разлета мюонов, обусловленного поперечными импульсами, многократным рассеянием в атмосфере и отклонением в магнитном поле Земли (МПЗ), характерные поперечные размеры ШАЛ в мюонной компоненте достигают нескольких километров. Поэтому отдельные мюоны и даже группы мюонов могут регистрироваться на больших расстояниях от оси ливня, а область собирания таких событий определяется не размерами детектора, а эффективной площадью поперечного сечения ливня, которая при регистрации групп мюонов вблизи горизонта может достигать порядка  $10^7 \text{ м}^2$ , что достаточно для получения статистически обеспеченных результатов вплоть до энергий первичных частиц  $10^{18}$  эВ и выше. В этих условиях мюонный детектор площадью несколько десятков квадратных метров можно считать точечным и для него можно ввести понятие локальной плотности мюонов  $D$  (частиц/м<sup>2</sup>) как отношения числа мюонов в группе (множественность  $m$ ), зарегистрированной детектором, к площади установки  $S_{\text{дет}}$  для данного направления прихода ливня:  $D \sim m/S_{\text{дет}}$ . Вклад в события с фиксированной локальной плотностью мюонов дают ливни с различными энергиями, регистрируемые на разных расстояниях от оси. Однако, как показали оценки, полученные на основе моделирования ШАЛ с помощью программы CORSIKA, вследствие быстрого уменьшения интенсивности космических лучей с ростом энергии эффективный интервал энергий первичных частиц оказывается относительно узким.

В пренебрежении флуктуациями развития ливня в атмосфере интегральный спектр локальной плотности мюонов для определенного направления прихода событий может быть записан в виде:

$$F \geq D = \int N(\geq E(\mathbf{r}, D)) dS, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}$  – точка в поперечном сечении ливня (точка расположения детектора относительно оси ШАЛ),  $N(\geq E)$  – интегральный энергетический спектр ПКЛ, а минимальная энергия  $E$  первичных частиц, дающих вклад в события с плотностью мюонов  $> D$ , определяется решением уравнения:

$$\rho(E, \mathbf{r}) = D. \quad (2)$$

Здесь  $\rho(E, \mathbf{r})$  – средняя ФПР мюонов – плотность частиц в точке  $\mathbf{r}$ . Как следует из размерности уравнения (1), интегральный спектр локальной плотности мюонов выражается как число событий в единичной области телесного угла за единицу времени. Из уравнения (1) можно получить дифференциальный спектр событий по локальной плотности мюонов

$$dF/dD = \int (dN/dE) dS / [d\rho(E, \mathbf{r})/dE], \quad (3)$$



где соотношение между  $E$ ,  $\mathbf{r}$  и  $D$  по-прежнему определяется уравнением (2). Формулы (1) – (3) являются достаточно общими. Для иллюстрации особенностей метода СЛПМ и получения ряда практических оценок вводятся дополнительные приближения: если взять ФПР в виде масштабной функции энергии в окрестности некоторой энергии  $E_0$ :

$$\rho(E, \mathbf{r}) = (E/E_0)^{\kappa} \rho(E_0, \mathbf{r}), \quad (4)$$

где  $\kappa \sim 0.9$ , а спектр первичных частиц в степенном виде с интегральным показателем  $\gamma$  в окрестности энергии  $E_0$ :

$$N(\geq E) = N_0 (E/E_0)^{-\gamma}, \quad (5)$$

и подставить в формулы (1)–(2), получается приближенное выражение для интегрального спектра локальной плотности мюонов:

$$F(\geq D) = N_0 (D/D_0)^{-\beta} \int [\rho(E_0, \mathbf{r})/D_0]^{\beta} dS, \quad \beta = \gamma/\kappa. \quad (6)$$

Здесь  $D_0$  – некоторое нормировочное значение плотности.

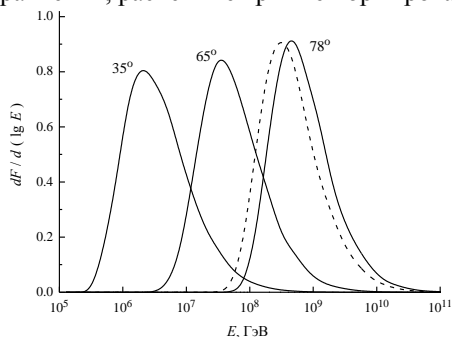
Непосредственно из формулы (6) следует: в рамках указанных выше приближений (степенной первичный спектр и масштабная ФПР) СЛПМ имеет также степенной вид с показателем наклона  $\beta$  несколько большим, чем показатель первичного спектра  $\gamma$ , причем эти параметры связаны простым соотношением; интенсивность событий пропорциональна интенсивности первичных частиц  $N_0$ . Подобно спектру ливней по числу мюонов, СЛПМ чувствительны к составу ПКЛ: с увеличением массового числа первичного ядра  $A$  плотность мюонов и, соответственно, интенсивность СЛПМ возрастают. Отличительной особенностью метода СЛПМ является также чувствительность к форме ФПР, т.к. в подынтегральной функции в формуле (6) плотность мюонов входит с показателем  $\beta \approx (1.9 - 2.4) > 1$ . Отбор событий по плотности мюонов усиливает чувствительность измеряемых распределений к центральной области ФПР мюонов ливня, где плотность частиц наиболее высока. Мюоны высоких энергий, распространяющиеся вблизи оси ливня, образуются за счет взаимодействия и распадов наиболее энергичных адронов ШАЛ, поэтому данные по СЛПМ несут важную информацию о взаимодействии адронов высоких энергий в передней кинематической области, где ускорительные данные отсутствуют, а неопределенности модельных предсказаний максимальны.

Существенное влияние на характеристики СЛПМ при больших зенитных углах оказывает магнитное поле Земли (МПЗ), которое искажает аксиальную симметрию ФПР мюонов.

Ожидаемые спектры локальной плотности мюонов при различных предположениях о спектре, составе и моделях взаимодействия адронов рассчитывались численным интегрированием на основе формул (1) – (3). ФПР в плоскости, ортогональной оси ШАЛ, были получены в результате

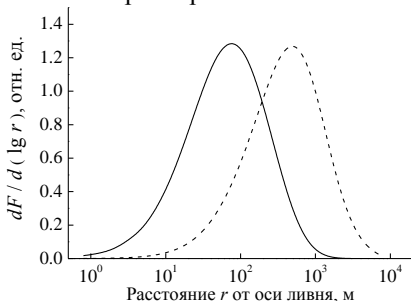
моделирования с помощью пакета CORSIKA для набора фиксированных зенитных углов от  $35^\circ$  до  $85^\circ$ , первичных энергий от  $10^{14}$  до  $10^{19}$  эВ и комбинаций моделей адронных взаимодействий QGSJET01 + GHEISHA, SIBYLL2.1 + FLUKA; EPOS1.61 + FLUKA с включением МПЗ и без него. В качестве опорной модели потока ПКЛ был использован дифференциальный спектр всех частиц в виде  $dN/dE = 5.0 \times (E, \text{ГэВ})^{-2.7} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ ГэВ}^{-1}$  до излома спектра (4 ПэВ) с укручением до  $(\gamma + 1) = 3.1$  после. Данный спектр достаточно хорошо описывает результаты большинства экспериментов в окрестности излома. В качестве двух предельных случаев массового состава ПКЛ моделировались ШАЛ только от протонов и только от ядер железа. Средние двумерные ФПР рассчитывались в плоскости, перпендикулярной оси ливня, в которой разбивалась прямоугольная сетка с постоянным шагом 0.2 по десятичному логарифму каждой из координат; одна из координатных осей выбиралась параллельно вектору силы Лоренца, а другая – перпендикулярно ему. Для каждой ячейки вычислялась средняя плотность мюонов  $\rho$  (для данной первичной энергии, зенитного угла, типа первичной частицы, модели взаимодействия). В дальнейших вычислениях использовалась линейная интерполяция по энергии первичной частицы в переменных ( $\lg E$ ,  $\lg \rho$ ).

Возможности нового метода оценки первичной энергии с помощью СЛПМ проиллюстрированы на рис. 1, на котором отображены результаты расчета распределений энергий первичных частиц, дающих вклад в события с плотностью мюонов  $D = 0.2 \text{ м}^{-2}$  в точке наблюдения для разных зенитных углов. Расчеты выполнены для первичных протонов (сплошные кривые) и ядер железа (штриховая кривая) на основе модели QGSJET01; значение показателя наклона первичного спектра принято равным 2.0 ( $\beta \approx 2.2$ ). Для удобства сравнения, расчетные кривые нормированы по площади.

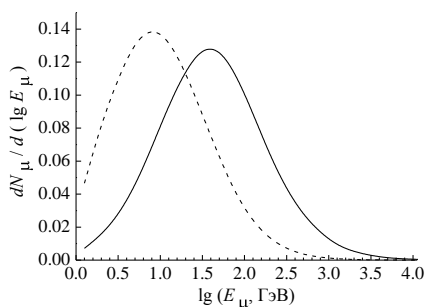


**Рис. 1.** Распределение энергий первичных частиц, дающих вклад в события с фиксированной плотностью мюонов.

Как видно из рисунка, при одинаковой плотности мюонов разным зенитным углом соответствуют существенно (на порядки) отличающиеся эффективные энергии первичных частиц, что связано с разлетом мюонов из-за поперечных импульсов при рождении и распаде материнских мезонов, многократного рассеяния в атмосфере и отклонения траекторий заряженных частиц в МПЗ. Типичная ширина распределений первичных энергий (для фиксированной плотности мюонов) характеризуется среднеквадратичным разбросом  $\sigma_{\lg E} \sim 0.4$ . Измерения СЛПМ в широком интервале зенитных углов дают возможность исследования характеристик потока и взаимодействия КЛ в очень широком энергетическом диапазоне в рамках одного эксперимента с помощью одной установки относительно небольших размеров.



**Рис. 2.** Вклад различных расстояний от оси ливня в спектр событий, отбираемых по плотности мюонов, и в полное число мюонов ШАЛ.



**Рис. 3.** Энергетический спектр всех мюонов ШАЛ (штриховая кривая) и мюонов, регистрируемых в составе групп (сплошная). Ливни от первичного протона,  $\theta = 60^\circ$ .

Вклад различных расстояний от оси ливня в спектр локальной плотности мюонов (для  $E_0 = 10^{17}$  эВ и  $\theta = 60^\circ$ ) иллюстрируется рис. 2 (сплошная кривая). Распределение по расстояниям от оси всех мюонов ШАЛ показано штриховой кривой; обе кривые нормированы по площади. Как видно из приведенных результатов, спектр событий по локальной плотности мюонов формируется за счет существенно меньших расстояний (примерно на порядок), чем полное число мюонов ШАЛ. Поэтому распределения групп мюонов имеют повышенную чувствительность к центральной области ливня, где плотность частиц наиболее высока.

На рис. 3 приведены энергетические спектры всех мюонов ШАЛ и мюонов в событиях, отбираемых по локальной плотности частиц в точке наблюдения, для  $\theta = 60^\circ$ . Сравнение полученных распределений показывает, что характерные энергии мюонов в группах в несколько раз

больше, чем для ШАЛ в целом: для  $\theta = 60^\circ$  медианное значение энергии мюонов в группах составляет  $\sim 40$  ГэВ; значительная часть мюонов имеет энергии, превышающие 1 ТэВ. Это обстоятельство предопределяет повышенную чувствительность метода СЛПМ к наиболее энергичным адронам ШАЛ, образующимся в передней области адронных взаимодействий, и открывает возможность поиска возможных аномалий в распределениях характеристик наиболее энергичных мюонов в ливнях.

Связь между спектром событий по локальной плотности мюонов и энергетическим спектром первичного космического излучения вытекает из соотношений (5) - (6). Для степенного спектра ПКЛ и масштабной ФПР мюонов (4) при определенном значении зенитного угла выполняется следующее равенство:

$$N(\geq E_0) = N_0 = F(\geq D_0) / \int [\rho(E_0, \mathbf{r}) / D_0]^\beta dS ; \quad (7)$$

$N_0$  - интегральная интенсивность ПКЛ ( $\text{м}^2\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ ). Таким образом, для восстановления интенсивности первичного потока по измеренному СЛПМ необходимо знать ФПР мюонов, которая определяется типом первичной частицы и моделью взаимодействия; показатель наклона СЛПМ получается непосредственно в эксперименте. Целесообразно выбрать значение  $D_0$  таким образом, чтобы оценка (7) была наименее чувствительна к вариации априорного (теоретического или экспериментального) значения параметра  $\beta$ . Вычисляя производную функции (7) по этому параметру и приравнявая ее нулю, находим:

$$\ln D_0 = \int [\rho(E_0, \mathbf{r})]^\beta \ln \rho(E_0, \mathbf{r}) dS / \int [\rho(E_0, \mathbf{r})]^\beta dS . \quad (8)$$

Таким образом, оптимальное в указанном смысле значение  $D_0$  является среднелогарифмической плотностью мюонов в ливнях с энергией  $E_0$ , взвешенной с ФПР мюонов в степени  $\beta$ . В этом случае оценка первичного потока (7) оказывается устойчивой по отношению к небольшим изменениям значения  $\beta$ . Для масштабной ФПР мюонов в виде (4) величина  $D_0$  пропорциональна  $E_0^k$ . Интеграл в знаменателе соотношения (7), вычисленный при значении  $D_0$ , определяемом формулой (8), имеет смысл эффективной площади собирания событий для метода СЛПМ:

$$S_{\text{эфф}} = \int [\rho(E_0, \mathbf{r}) / D_0]^\beta dS . \quad (9)$$

При такой площади установки для регистрации частиц первичного потока относительная статистическая погрешность измерения величин  $N(\geq E_0)$  и  $F(\geq D_0)$  за равный период времени в равной области телесного угла одинакова. Формула (7) в дальнейшем использовалась для перехода от экспериментально измеренных спектров локальной плотности мюонов к оценкам спектра ПКЛ (при определенных предположениях о массовом составе и модели взаимодействия).

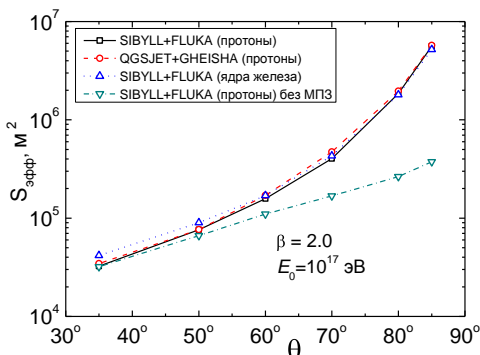
С помощью пакета CORSIKA были рассчитаны зависимости среднего логарифма энергии первичных частиц от локальной плотности мюонов (для набора зенитных углов) и от косинуса зенитного угла (для нескольких значений плотности мюонов в диапазоне, доступном для измерений на комплексе НЕВОД-ДЕКОР). Расчеты проводились для первичных протонов на основе QGSJET01 и модели энергетического спектра ПКЛ, описанной выше. В достаточно широком диапазоне плотностей ( $0.05 - 2.0 \text{ м}^{-2}$ ), зенитных углов ( $40^\circ - 80^\circ$ ), первичных энергий ( $10^{16} - 10^{18} \text{ эВ}$ ) эти зависимости хорошо (с точностью около 3% по оценке энергии) описываются степенными функциями в виде

$$E \sim D^{1.07} (\sec\theta)^{3.8}, \quad (10)$$

или для логарифмов энергии и плотности:

$$\lg(E, \text{ ГэВ}) = 8.00 + 1.07 (\lg D + 0.424) - 3.80 (\lg \cos\theta + 0.374). \quad (11)$$

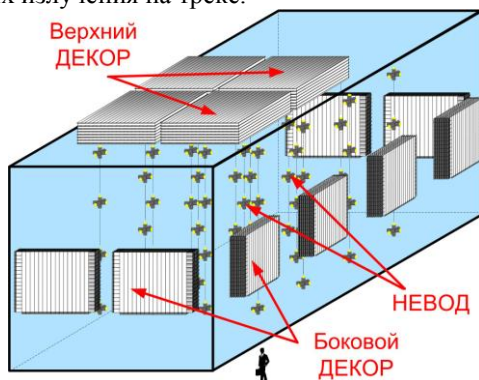
С точки зрения статистической точности восстановления энергетического спектра первичных частиц, потенциальные возможности метода удобно характеризовать эффективной площадью собирания событий (9), где связь оптимального значения  $D_0$  с первичной энергией дается формулой (8). На рис. 4 показаны зависимости величины  $S_{\text{эфф}}$  от  $\theta$  для разных моделей адронных взаимодействий и состава в окрестности энергии  $E_0 = 10^{17} \text{ эВ}$ . Расчеты производились с учетом МПЗ и без него. Как следует из рисунка, учет МПЗ приводит к существенному увеличению  $S_{\text{эфф}}$ . Это объясняется увеличением характерных поперечных размеров ШАЛ за счет отклонения мюонов в магнитном поле.



**Рис. 4.** Зависимость  $S_{\text{эфф}}$  от зенитного угла для разных моделей адронных взаимодействий и состава ( $p$  и  $Fe$ ) (с учетом МПЗ); нижняя кривая - расчет без МПЗ ( $p$ );  $E_0 = 10^{17} \text{ эВ}$ ;  $\beta = 2.0$ .

**В главе 2** приводится описание экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР (НИЯУ МИФИ), предназначенного для регистрации групп мюонов на поверхности Земли в широком диапазоне зенитных углов.

Основой комплекса является черенковский водный детектор (ЧВД) НЕВОД большого объема ( $2000 \text{ м}^3$ ). Регистрирующая система ЧВД представляет собой пространственную решетку квазисферических измерительных модулей (КСМ) (см. рис. 5), позволяющих детектировать черенковское излучение релятивистских заряженных частиц в воде с любого направления, оценивать энерговыделение в объеме детектора и восстанавливать направление движения этих частиц. Реконструкция треков одиночных мюонов основывается на амплитудном анализе откликов КСМ, каждый из которых позволяет оценить направление прихода черенковских фотонов и точку их излучения на треке.



**Рис. 5.** Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР.

Созданный в рамках российско-итальянского сотрудничества координатно-трековый детектор ДЕКОР представляет собой многослойную систему пластиковых стримерных трубок с резистивным покрытием катода, развернутую вокруг ЧВД НЕВОД (см. рис. 5). Боковая часть ДЕКОР, размещенная в галерее здания с трех сторон от бассейна НЕВОД, включает 8 супермодулей (СМ) с рабочей площадью  $8.4 \text{ м}^2$  каждый, состоящих из восьми вертикальных плоскостей стримерных трубок, подвешенных на расстоянии 6 см друг от друга. Верхняя часть координатного детектора состоит из четырех СМ площадью по  $11.5 \text{ м}^2$ , смонтированных на горизонтальных платформах. Плоскости ДЕКОР оснащены внешней двухкоординатной системой считывания из алюминиевых полосок (стрипов), обеспечивающей точность локализации треков заряженных частиц не хуже 1 см по каждой из координат ( $X, Y$ ).

Триггерная система координатных детекторов является двухуровневой. Триггеры первого уровня вырабатываются в локальных станциях,

обслуживающих два СМ, при условии совпадения сигналов от не менее двух из 4-х четных и не менее двух из 4-х нечетных плоскостей СМ в течение временных ворот 300 нс. Отбор событий в ДЕКОР осуществляется на основе общесистемного триггера, в качестве которого были выбраны срабатывания нескольких СМ или совпадения промежуточных триггерных сигналов от супермодулей и от ЧВД НЕВОД. Основными общесистемными триггерами, выделяющими околоразноуровневые события, являются TrD2 (совпадение сигналов от трех любых СМ боковой части ДЕКОР в пределах временных ворот 250 нс, триггер используется для выделения событий большой множественности), TrD3 (совпадение сигналов от супермодулей, расположенных в противоположных коротких галереях) и TrD4 (совпадения сигналов СМ в длинной и короткой галереях).

Реконструкция событий в СМ осуществляется методом гистограммирования сработавших стрипов в двух координатных проекциях. Угловая точность реконструкции треков мюонов, пересекающих СМ, составляет примерно  $0.7^\circ$  и  $0.8^\circ$  для проекционных зенитных и азимутальных углов соответственно.

Эксперименты по регистрации мюонной компоненты ШАЛ при больших зенитных углах проводились в 2001 – 2007 гг. Суммарное «живое» время работы установки с полной конфигурацией боковой части ДЕКОР (8 СМ при неизменном наборе триггерных условий отбора событий) составило 19922 ч.

**В главе 3** приводится описание разработанной методики отбора групп мюонов и получения детекторо-независимых экспериментальных спектров локальной плотности мюонов по многомюонным событиям, зарегистрированным ЭК НЕВОД-ДЕКОР.

Методика отбора событий с группами мюонов в координатном детекторе основана на предположении, что треки мюонов, образованных в атмосфере (на большом расстоянии от установки), приблизительно параллельны. Процедура включала несколько этапов: аппаратный отбор на уровне триггера TrD2; геометрическую реконструкцию треков и мягкий программный отбор событий с квазипараллельными (в пределах 5-градусного конуса) треками; просмотр событий-кандидатов, их окончательная классификация и подсчет треков мюонов по меньшей мере двумя независимыми операторами при поддержке специального программного интерфейса. После сравнения результатов операторского отбора и дополнительного анализа событий с выявленными расхождениями составлялись списки мюонных групп, содержащие данные о множественности частиц, зенитном и азимутальном углах, номера событий и другую информацию.

При больших зенитных углах ( $\theta \geq 60^\circ - 70^\circ$ , в зависимости от энергии ливня) при большой множественности мюонов в группах интерпретация событий вполне однозначна. Однако при умеренных углах группы мюонов могут сопровождаться остаточной электронно-фотонной компонентой, что затрудняет идентификацию событий и подсчет числа мюонных треков. Чтобы расширить диапазон измерений в сторону меньших  $\theta$  (и, соответственно, меньших энергий первичных частиц), при отборе групп с углами  $\theta \leq 75^\circ$  использовалось дополнительное ограничение: анализировались только события в двух секторах азимутального угла (шириной по  $40^\circ$ ), где большинство супермодулей боковой части ДЕКОР (6 из 8) экранированы водным объемом детектора НЕВОД; при этом использовались данные только этих шести СМ. Такой подход обеспечил возможность надежного отбора и восстановления характеристик групп, начиная с  $\theta \geq 30^\circ$  и  $m \geq 3$ , определяемого триггерными условиями. При углах  $\theta \geq 75^\circ$  и большой множественности частиц ( $m \geq 10$ ) обрабатывались события для любых углов  $\phi$ . Минимальная энергия мюонов в группах, вообще говоря, зависит от направления; усредненное значение порога составляет около 2 ГэВ. Итоговые результаты отбора групп представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты отбора групп мюонов.

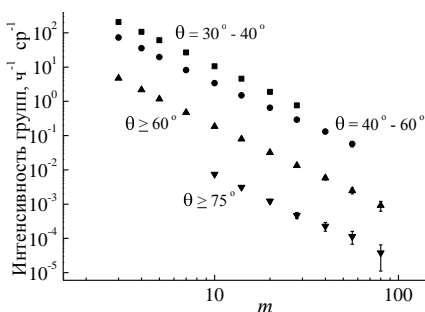
$m$	$\theta$ , град.	Время, ч	$N_{\text{соб}}$
$\geq 3$	30–40	758	6803
$\geq 5$	30–40	1296	3495
$\geq 10$	30–40	2680	1286
$\geq 3$	40–60	758	11334
$\geq 5$	40–60	1296	5369
$\geq 10$	40–60	2680	1986
$\geq 3$	$\geq 60$	1552	4109
$\geq 5$	$\geq 60$	10102	6786
$\geq 10$	$\geq 60$	19922	2013
$\geq 10$	$\geq 75$	19922	395

Поскольку процедура отбора событий операторами является довольно трудоемкой, а интенсивности групп в разных интервалах множественности мюонов  $m$  и  $\theta$  различаются на порядки, данные обрабатывались отдельно для разных диапазонов  $m$  и  $\theta$ . Соответственно, результаты для групп различных категорий получены за различные промежутки времени измерений. Интенсивность групп изменяется во времени вследствие, например, барометрического эффекта и изменения температурного профиля атмосферы, и формальное объединение данных для разных временных отрезков может привести к систематическим искажениям спектров множественности и зенитно-угловых зависимостей. Поэтому при

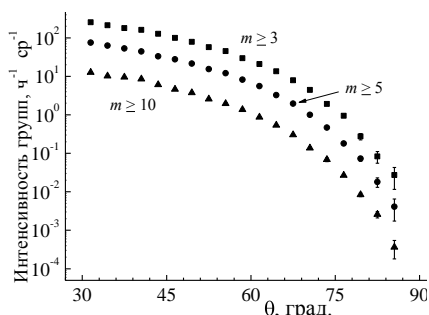


анализе использовалась взаимная нормировка распределений характеристик мюонных групп, полученных по разным выборкам: данные для всех временных отрезков были нормированы по числу программно отобранных событий-кандидатов с учетом их средней частоты за весь период наблюдений.

На рис. 6 и рис. 7 приведены зависимости интегральной интенсивности мюонных групп как функции  $m$  (для нескольких интервалов  $\theta$ ) и зенитного угла (для разных порогов по числу мюонов в группе). Число событий разделено на телесный угол и время наблюдения; введена поправка, учитывающая изменение средней площади детектора  $S_{\text{дет}}$  с зенитным углом. Как видно из рисунков, оценки интенсивности событий, полученные в рамках настоящего эксперимента, перекрывают более шести декад (что, учитывая наклон спектра, соответствует диапазону около трех порядков по энергии первичных частиц).



**Рис.6.** Интегральная интенсивность групп мюонов в зависимости от  $m$  для разных интервалов зенитных углов.



**Рис. 6.** Зависимость интегральной интенсивности групп мюонов от  $\theta$  угла для разных порогов по числу частиц в группах.

Экспериментальные оценки СЛПМ восстанавливаются в две итерации. На первом этапе для каждой из категорий событий (табл. 1), оцениваются параметры полуэмпирической модели СЛПМ в виде

$$dF_0 / dD = CD^{-(\beta+1)} \cos^\alpha \theta. \quad (12)$$

Выбор степенной зависимости СЛПМ от плотности частиц следует из аналитического рассмотрения, приведенного в главе 1 (формула (6)). Результаты анализа зенитно-угловой зависимости интенсивности групп мюонов, полученные с помощью ДЕКОР, показали, что эти распределения хорошо описываются степенной функцией косинуса зенитного угла с показателем  $\alpha \sim 4.5$ . Значения  $C$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  находятся с помощью метода максимального правдоподобия по измеренным характеристикам групп. Функция отклика установки – ожидаемое распределение событий по

множественности и углам  $P(m, \theta, \varphi, \alpha, \beta)$  для модели СЛПМ в виде (12) – рассчитывалась с учетом пуассоновских флуктуаций числа частиц, попавших в площадь детектора при данной плотности мюонов  $D$ , вероятности срабатывания не менее 3 разных СМ боковой части ДЕКОР (условие триггерного отбора), эффективности регистрации плоскостей детектора, мертвого времени электроники триггера первого уровня (определяющей срабатывание СМ) и других существенных условий аппаратного, программного и операторского отбора. Затем для каждого интервала множественностей и углов ( $\Delta m$ ,  $\Delta \theta$ ) рассчитывалось ожидаемое число групп  $N_{\text{ож}}(\Delta m, \Delta \theta)$ .

На второй итерации экспериментальные оценки СЛПМ определяются как произведения отношения измеренных  $N_{\text{изм}}(\Delta m, \Delta \theta)$  и ожидаемых  $N_{\text{ож}}(\Delta m, \Delta \theta)$  чисел событий и пробной функции (12) с параметрами  $C$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , соответствующими наилучшей подгонке. Окончательно для спектров (умноженных для удобства на  $D^3$ ) используется соотношение:

$$D^3 dF / dD = [N_{\text{изм}}(\Delta m, \Delta \theta) / N_{\text{ож}}(\Delta m, \Delta \theta)] \cdot C D^{2-\beta} \cos^\alpha \theta. \quad (13)$$

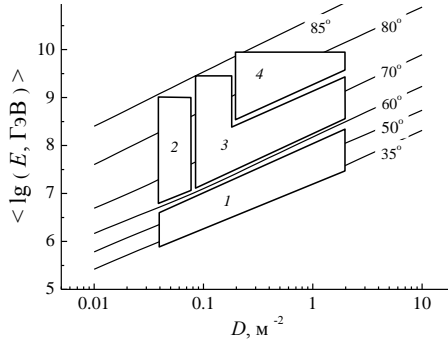
Оценки СЛПМ вычисляются в точках  $(D^*, \theta^*)$ , выбор которых оптимизирован с точки зрения устойчивости по отношению к вариации параметров  $(\alpha, \beta)$ . Для квазистепенных распределений наилучшим в этом смысле является выбор среднелогарифмических значений величин, дающих вклад в наблюдаемые события определенного класса. Поэтому в качестве  $D^*$  используется среднелогарифмическое значение локальной плотности мюонов в событиях, соответствующих регистрации групп с множественностью в интервале  $\Delta m$ . Аналогичным образом, учитывая степенной вид зависимости СЛПМ от косинуса зенитного угла (12), выбранные опорные значения  $\theta^*$  соответствуют среднелогарифмическим значениям  $\cos \theta$  для интервалов  $\Delta \theta$ .

**В главе 4** обсуждаются основные особенности и результаты экспериментального исследования влияния магнитного поля Земли на мюонную компоненту ШАЛ. Воздействие магнитного поля на траектории мюонов приводит к систематическому смещению координат частиц на уровне наблюдения, которое (в приближении малых углов) пропорционально поперечной составляющей вектора магнитной индукции, обратно пропорционально импульсу мюона и прямо пропорционально квадрату длины пути частицы. ФПР мюонов в плоскости, перпендикулярной оси ливня, искажается и приобретает форму «восьмерки», главная ось которой параллельна вектору силы Лоренца. Вследствие большой геометрической длины пути мюонов в геомагнитном поле низкоэнергичные частицы «выметаются» на периферию ливня, а мюоны более высоких энергий сепарируются по знаку заряда и импульсу, в результате чего аксиальная симметрия ФПР нарушается, а плотность

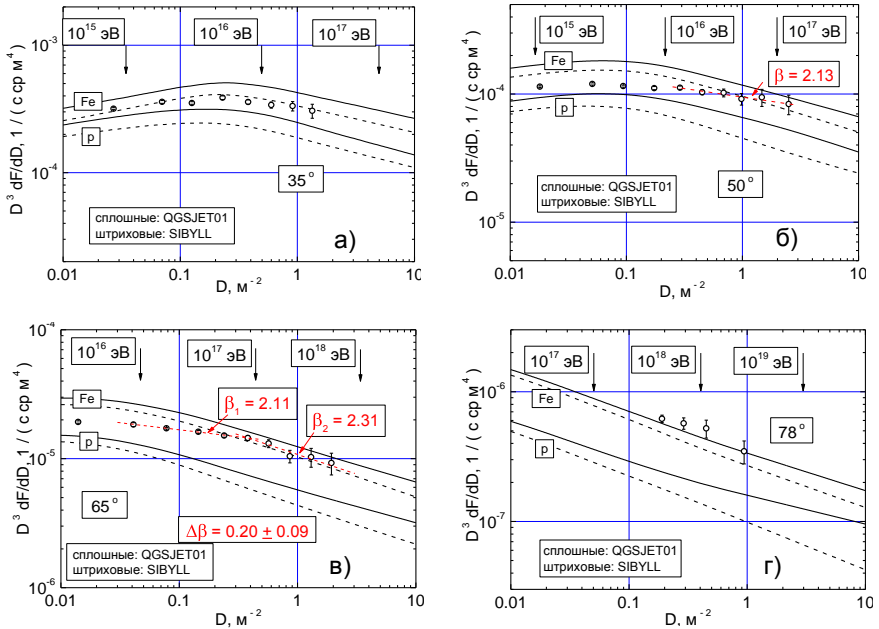
мюонов в центральной части ШАЛ падает. Абсолютная величина постоянной составляющей магнитного поля Земли в Москве, где расположена установка ДЕКОР, для периода наблюдений:  $B_0 = 52$  мкТл, восточное склонение  $9^\circ$ , наклонение  $71^\circ$  (то есть зенитный угол вектора МПЗ  $\theta = 19^\circ$ ). Анализировалась зависимость интенсивности групп мюонов, регистрируемых в детекторе ДЕКОР, от угла между направлением прихода группы и вектором магнитного поля Земли для нескольких интервалов зенитного угла в диапазоне от  $35^\circ$  до  $75^\circ$ . Обнаружено, что интенсивность групп уменьшается с увеличением поперечной составляющей вектора магнитного поля по сравнению с расчетом, выполненным в предположении азимутальной симметрии потока, причем величина эффекта существенно возрастает с ростом зенитного угла. Сравнение с результатами моделирования, выполненного с помощью пакета CORSIKA, показало, что это явление объясняется искажением ФПР мюонов при распространении ШАЛ в магнитном поле. Также впервые обнаружен эффект компланарности мюонов в группах - выстроенности направлений движения частиц в группах в плоскости, определяемой осью ШАЛ и вектором силы Лоренца.

**В главе 5** приводятся результаты исследования особенностей потока ПКЛ лучей и их взаимодействий в диапазоне  $10^{15} - 10^{18}$  эВ с помощью нового метода на основе спектров локальной плотности мюонов ШАЛ. Для этого были применены три различных варианта обработки экспериментальных данных: сопоставление измеренных СЛПМ с ожидаемыми спектрами (для набора конкретных вариантов первичного спектра, состава и моделей адронного взаимодействия); анализ зависимости показателя наклона спектров локальной плотности мюонов от эффективной энергии первичных частиц; восстановление оценок дифференциального энергетического спектра ПКЛ (при определенных предположениях о составе и модели взаимодействия) из экспериментальных СЛПМ и их прямое сравнение с данными независимых экспериментов, полученными с помощью других методов регистрации ШАЛ. На рис. 8 приведены результаты расчетов среднего логарифма энергии первичных частиц, дающих вклад в события с определенной локальной плотностью мюонов, для нескольких значений зенитного угла (цифры у кривых).

На рис. 9 сопоставлены измеренные и рассчитанные в рамках описанной выше модели дифференциальные СЛПМ для четырех значений зенитного угла:  $35^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $65^\circ$  и  $78^\circ$ . Для более наглядного отображения все спектры умножены на  $D^3$ . Экспериментальные точки получены на основе различных выборок данных ДЕКОР по группам (табл. 1).



**Рис.8.** Результаты расчета средних логарифмов энергии первичных частиц, ответственных за события с локальной плотностью мюонов  $D$ , для разных зенитных углов. Многоугольники – области, соответствующие отбору групп различных категорий в ДЕКОР: 1 –  $m \geq 3$ ,  $\theta = 30 - 60^\circ$ ; 2 –  $m \geq 3$ ,  $\theta \geq 60^\circ$ ; 3 –  $m \geq 5$ ,  $\theta \geq 60^\circ$ ; 4 –  $m \geq 10$ ,  $\theta \geq 75^\circ$ .



**Рис. 9.** Экспериментальные и расчетные дифференциальные спектры локальной плотности мюонов (а, б, в, г – для зенитных углов  $35^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $65^\circ$  и  $78^\circ$  соответственно). Точки – экспериментальные данные; сплошные кривые – расчет с моделью QGSJET01, штриховые – SIBYLL2.1. Нижние пары кривых на каждом рисунке – первичные протоны, верхние – ядра железа.

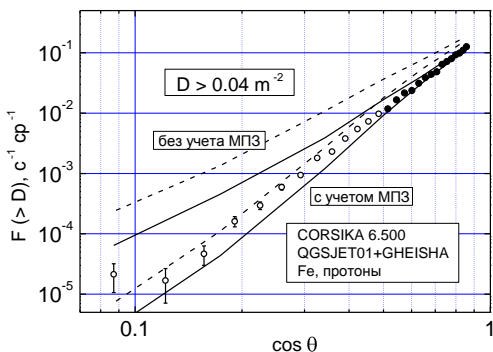
Кривые соответствуют результатам расчета с моделями QGSJET01 (сплошные) и SIBYLL2.1 (штриховые) для двух предельных предположений о массовом составе ПКЛ: верхние пары кривых на каждом рисунке рассчитаны для первичных ядер железа, нижние – для первичных протонов. Стрелки в верхней части рисунков указывают характерные (среднелогарифмические) энергии первичных частиц, ответственных за события с данной плотностью мюонов. При малых зенитных углах ( $35^\circ$ , рис. 9а) как в экспериментальном, так и в расчетном спектре наблюдается увеличение наклона, связанное с «изломом» в первичном спектре при ПэВ-ных энергиях. В целом, при энергиях менее  $10^{16}$  эВ имеется хорошее согласие между экспериментом и расчетом, в том числе и по абсолютной интенсивности; необходимо, однако, отметить, что результаты расчетов с моделью SIBYLL близки к экспериментальным точкам лишь для тяжелого массового состава ПКЛ. Данные для  $50^\circ$  (рис. 9б) соответствуют интервалу энергий 1–100 ПэВ, для  $65^\circ$  (рис. 9в) – от 3 до 500 ПэВ, для зенитного угла  $78^\circ$  и множественности групп  $m \geq 10$  (рис. 9г) – энергиям в окрестности 1 ЭэВ ( $10^{18}$  эВ).

В диапазоне энергий выше 10 ПэВ сравнение экспериментальных СЛПМ с результатами расчетов демонстрирует тенденцию к утяжелению первичного состава с ростом энергии. Нельзя также исключить, что использованные при расчетах модели не обеспечивают корректного описания характеристик адронных взаимодействий, что приводит к прогрессирующему с ростом энергии дефициту мюонов в центральной области ливней. Для зенитного угла  $65^\circ$  обнаружено изменение наклона СЛПМ («второй излом») при энергиях первичных частиц около  $10^{17}$  эВ. Аппроксимация данных, представленных на рис. 9в, степенными функциями на двух участках спектра (ниже и выше этой энергии) приводит к оценке увеличения показателя наклона на величину  $\Delta\beta = 0.20 \pm 0.09$  (от  $\beta = 2.11 \pm 0.02$  до  $2.31 \pm 0.09$ ). Именно в этой области можно ожидать изменения наклона спектра первичных ядер группы железа, если положение излома определяется жесткостью частиц.

На рис.10 показано распределение по зенитному углу событий с локальной плотностью мюонов, превышающей некоторое пороговое значение ( $D > 0.04$  мюонов/м<sup>2</sup>).

Кривые представляют результаты вычислений на основе пакета CORSIKA (QGSJET01+GHEISHA) для разных предельных случаев состава ПКЛ (только протоны и только железо), с учетом и без учета МПЗ. Как видно из рисунка, интегральный спектр событий по плотности мюонов в группах близок к степенной функции косинуса зенитного угла ( $\cos^{4.5}\theta$ ) практически во всем диапазоне зенитных углов. Из рис. 10 следует, что на широте расположения комплекса НЕВОД-ДЕКОР наблюдается сильная

зависимость характеристик рассчитанных распределений событий от магнитного поля Земли.



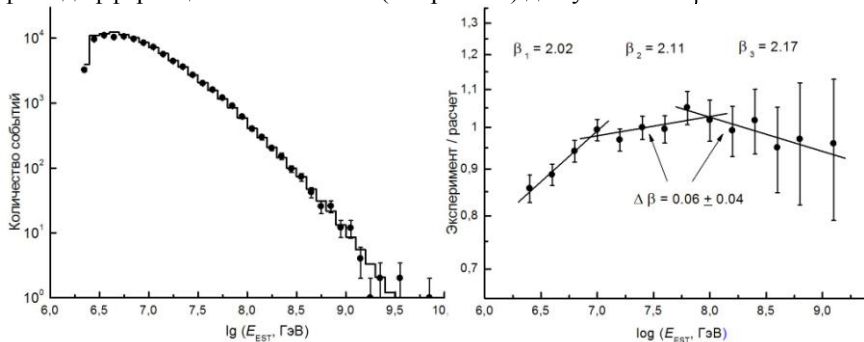
**Рис. 10.** Зависимость потока событий с  $D > 0.04 \text{ м}^{-2}$  от косинуса зенитного угла.

Для получения дополнительной информации о форме спектра в районе  $\sim 10^{17}$  эВ был применен комбинированный эстиматор эффективной энергии первичной частицы, которая ставится в соответствие набору наблюдаемых параметров события ( $m$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ). Как следует из рис. 8, каждому событию с определенными ( $m$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ) можно поставить в соответствие некоторую первичную энергию. В диапазонах плотностей ( $0.05 - 2.0 \text{ м}^{-2}$ ), зенитных углов ( $40 - 80^\circ$ ) и первичных энергий ( $10^{16} - 10^{18}$  эВ) зависимости на рис. 8 хорошо аппроксимируются степенными функциями в виде (10) и (11). Исходя из этого, был осуществлен пособытийный анализ с использованием комбинированного эстиматора первичной энергии  $E_{\text{EST}}(m, \theta, \varphi)$ . На рис. 11 (слева) приведены экспериментальные и расчетные распределения оценок энергии для групп мюонов с множественностью  $5 \leq m \leq 55$  и зенитных углов  $40^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ . Ожидаемые распределения рассчитаны для постоянного значения показателя СЛМП  $\beta = 2.13$  (без излома).

Экспериментальные распределения удовлетворительно согласуются с ожидаемыми. Однако в отношении экспериментального и расчетного распределений, представленном на рис. 11 (справа), явно виден плавный "завал" в области  $E_{\text{EST}} < 10^7$  ГэВ, близкой к первому излому, и указание на увеличение наклона при  $E_{\text{EST}} > 10^8$  ГэВ.

Чтобы исследовать эти особенности более детально, отношение спектров фитировалось степенными функциями для разных областей  $E_{\text{EST}}$ . Результаты фитирования приведены на рис. 11 (справа) и свидетельствуют о постепенном увеличении показателя наклона спектра в рассмотренном диапазоне. Тем не менее, разница в показателях ( $\Delta\beta = 0.06 \pm 0.04$ ) в районе

$10^8$  ГэВ заметно меньше значения, полученного в результате частичного фита дифференциальных СЛПМ (см. рис. 9в) для угла  $65^\circ$ :  $\Delta\beta = 0.20 \pm 0.09$ .



**Рис. 11.** Экспериментальные и расчетные распределения оценок энергии первичной частицы: точки в левой части рисунка – эксперимент, гистограмма – расчет; справа – отношение экспериментального и расчетного распределений.

Изменение наклона спектров локальной плотности мюонов в более широком диапазоне первичных энергий было ияяледовано с помощью оценок  $\beta$ , полученных на основе выборок с различной множественностью мюонов в группах ( $m \geq 3, \geq 5, \geq 10$ ) при разных зенитных углах (см. рис. 12). Точками на рис. 12 представлены экспериментальные оценки показателя наклона СЛПМ в зависимости от расчетной среднелогарифмической энергии первичных частиц. Отложенные на рисунке горизонтальные погрешности указывают характерный среднеквадратичный разброс логарифма первичных энергий для соответствующих выборок.

Символы соответствуют разным диапазонам зенитного угла; оценки наклона, полученные для разных углов, хорошо согласуются друг с другом в перекрывающихся энергетических интервалах. В доступном диапазоне энергий ( $10^{15}$ – $10^{18}$  эВ) величина  $\beta$  возрастает от  $\sim 1.9$  до  $\sim 2.3$ ; с учетом приближенной связи показателей наклона спектра ПКЛ и СЛПМ ( $\beta \approx \gamma/\kappa$ ;  $\kappa \approx 0.9$ ), это соответствует изменению  $\gamma$  от  $\sim 1.7$  до  $\sim 2.1$ .

Кривыми на рис. 12 показаны результаты расчета показателя  $\beta$  для разных предположений о характере изменения первичного спектра и состава при энергиях выше излома. Штриховые и сплошные кривые получены в предположении излома в спектре первичных частиц (протонов, железа) при фиксированной энергии на ядро ( $\Delta\gamma = 0.4$  при  $E_{\text{кnee}} = 4$  ПэВ).

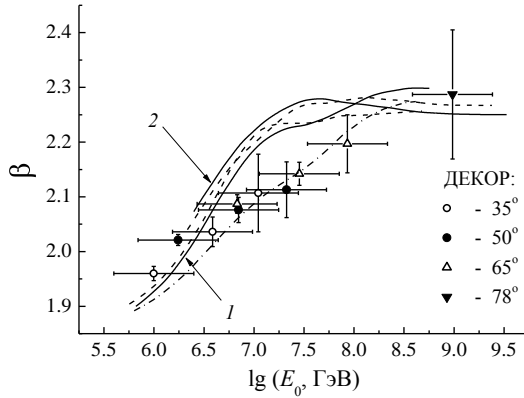


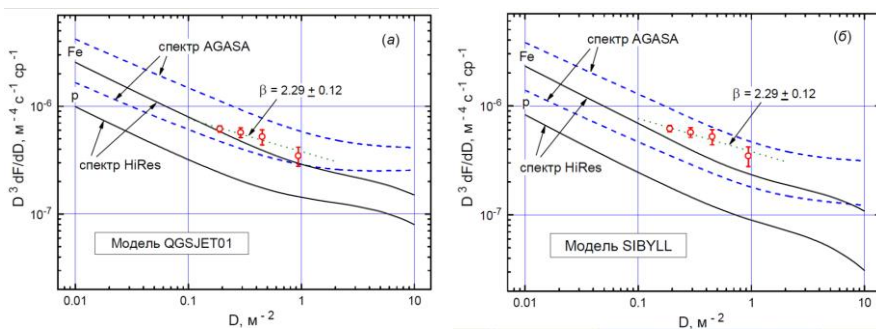
Рис. 12. Зависимость показателя наклона СЛПМ от среднего логарифма первичной энергии. Сплошные и штриховые кривые – расчет для протонов и ядер железа (1 и 2 – для зенитных углов  $50^\circ$  и  $65^\circ$  соответственно) с изломом первичного спектра при энергии  $E_{\text{кnee}}=4$  ПэВ на ядро. Штрихпунктирная кривая – смешанный состав (4 группы ядер) с изломом при фиксированной жесткости ( $E_{\text{кnee}}/Z=2.5$  ПэВ)

Как видно из рисунка, такая модель воспроизводит лишь асимптотические значения оценок показателя наклона. Значительно лучшее качественное описание экспериментальной зависимости достигается для модели ПКЛ со смешанным составом и изломом при фиксированной жесткости первичных частиц с параметрами, полученными в эксперименте ГАММА для групп ядер  $p$ , He, O, Fe (штрихпунктирная кривая). В рамках этой модели излому при фиксированной жесткости соответствуют различные точки излома в спектре по энергии ядер; массовый состав постепенно изменяется и происходит его обогащение более тяжелыми ядрами; вследствие этого ожидаемое значение показателя наклона СЛПМ изменяется с ростом энергии достаточно плавно. Такая особенность изменения спектра и состава наиболее ярко должна проявляться именно при наблюдениях в мюонной компоненте (в частности, в группах мюонов), так как в этом случае (в отличие от спектров ШАЛ по числу электронов) относительный вклад более тяжелых ядер оказывается подчеркнутым.

Экспериментальные данные ДЕКОР по группам мюонов при больших зенитных углах и множественностях ( $\theta \geq 75^\circ$ ,  $m \geq 10$ ) соответствуют энергиям первичных частиц порядка  $10^{18}$  эВ и выше. В этой области энергий имеются результаты измерений энергетического спектра, полученные различными методами с помощью ряда установок (AGASA, ЯкуШАЛ, HiRes, Pierre Auger). Все эти эксперименты указывают на наличие обратного изгиба (уменьшение показателя наклона) в спектре



ШАЛ при энергиях порядка нескольких ЭэВ, однако выводы о точке положения этой особенности и абсолютной интенсивности первичных частиц сильно различаются. В настоящее время считается, что основной причиной этих противоречий являются систематические погрешности в калибровке измерений энергии ливней. Для того, чтобы сопоставить данные, полученные на установке ДЕКОР, с данными других установок, были рассчитаны ожидаемые спектры плотности мюонов для двух моделей спектров «всех частиц», построенных на основе данных установок AGASA и HiRes в области энергий  $10^{18} - 10^{19}$  эВ с применением моделей адронных взаимодействий QGSJET01+GHEISHA и SIBYLL2.1+FLUKA.



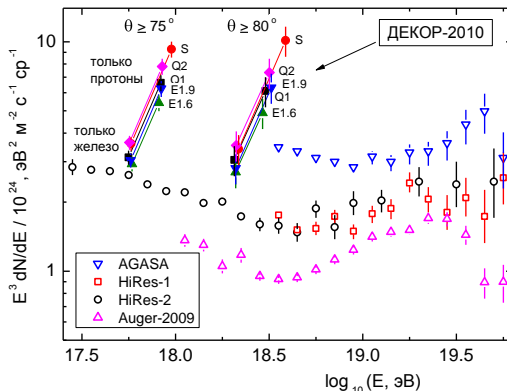
**Рис. 13.** СЛПМ для зенитного угла  $\theta = 78^\circ$ . Точки – данные ДЕКОР ( $\theta \geq 75^\circ$ ,  $t \geq 10$ ). Кривые – результаты расчетов для чистых протонов и ядер железа) и энергетических спектров ПКЛ на основе данных AGASA (штриховые линии) и HiRes (сплошные). QGSJET01 (а) и SIBYLL (б).

На рис. 13 приведено сопоставление экспериментальных СЛПМ с оценками на основе QGSJET01 и SIBYLL2.1 для чистых протонов и ядер железа для моделей спектров по данным AGASA и HiRes. Как следует из рисунка, в рамках использованных моделей измеренные СЛПМ не противоречат данным AGASA в предположении смешанного состава и не согласуются (даже для тяжелого массового состава первичных частиц с доминированием ядер группы железа) с данными HiRes. Расчты СЛПМ с использованием модели SIBYLL приводят к меньшей интенсивности ожидаемых спектров локальной плотности мюонов, особенно для первичных протонов. Следует отметить хорошее согласие наклонов спектров в этом энергетическом диапазоне. Если предположить, что энергетическая калибровка флуоресцентного метода в установке HiRes близка к истине, то представленные на рисунке данные указывают на неприменимость рассмотренных моделей взаимодействия для расчетов характеристик мюонной компоненты ШАЛ в области энергий порядка  $10^{18}$  эВ. Для объяснения наблюдаемой интенсивности мюонных групп при

больших зенитных углах необходима значительно большая (на десятки процентов) плотность мюонов в центральной области ливня.

Другой метод сопоставления экспериментальных данных ДЕКОР по спектрам локальной плотности мюонов с результатами других наблюдений заключается в переходе от измеренных СЛПМ к оценкам интенсивности первичного потока (при определенных предположениях о модели взаимодействия адронов и массовом составе) и прямом сравнении восстановленных спектров первичного космического излучения. Для анализа использовались две выборки данных ДЕКОР по группам мюонов: события с  $m \geq 10$  для углов  $\theta \geq 75^\circ$  и  $\theta \geq 80^\circ$  (395 и 49 событий соответственно).

Полученные СЛПМ были пересчитаны в оценки спектра ПКЛ с использованием пяти разных моделей адронных взаимодействий (QGSJET01, QGSJET-II, SIBYLL2.1, EPOS1.61 и EPOS1.99) для протонов и ядер железа. Оценки дифференциального энергетического спектра первичного космического излучения, полученные на основе экспериментальных данных комплекса НЕВОД-ДЕКОР по группам мюонов при больших зенитных углах, приведены на рис.14 (темные символы). Светлые точки на рисунке соответствуют результатам измерений энергетического спектра частиц ПКЛ на установках AGASA, HiRes и Auger.



**Рис. 14.** Дифференциальный спектр ПКЛ (по энергии на частицу). Светлые символы: данные установок AGASA, HiRes-1 и HiRes-2, Pierre Auger. Сплошные символы: оценки спектра по группам мюонов для p и Fe при использовании моделей взаимодействия: QGSJET01, QGSJET-II, SIBYLL2.1, EPOS1.61 и EPOS1.99 (метки Q1, Q2, S, E1.6 и E1.9).

Как видно из рис. 14, оценки, основанные на данных ДЕКОР по группам мюонов при больших зенитных углах, разумно согласуются с результатами

AGASA в предположении смешанного (или промежуточного по массе) первичного состава. Вероятно, при таком сравнении можно исключить лишь гипотезу легкого (преимущественно протонного) состава в сочетании с моделью SIBYLL. С другой стороны, ни одна из пяти рассмотренных моделей взаимодействия адронов не позволяет согласовать данные ДЕКОР с измерениями HiRes и Auger даже в предположении тяжелого (ядра железа) состава первичных частиц.

Это противоречие становится еще более значимым, если учесть, что на основе анализа распределений глубины максимума ливня в атмосфере коллаборациями HiRes и Auger был сделан вывод о преимущественно протонном составе ПКИ вблизи энергии  $10^{18}$  эВ. Как и для объяснения данных, приведенных на рисунке 13, для интерпретации полученных результатов необходима значительно большая плотность мюонов в центральной области моделированных ШАЛ. Возможными причинами обнаруженного расхождения могут быть либо некорректная экстраполяция моделей адронных взаимодействий в область сверхускорительных энергий, либо значительный вклад каких-либо новых физических процессов генерации многомюонных событий. Альтернативным вариантом объяснения может быть систематическая погрешность калибровки флуоресцентного метода измерения энергии ШАЛ. Необходимо отметить, что вопрос об энергетической калибровке данных является весьма важным, так как он количественно влияет на физическую интерпретацию данных в экспериментах HiRes и Auger, в том числе в области ГЗК-обрезания.

**В заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработан новый подход к исследованию ПКЛ с помощью новой феноменологической характеристики - спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ). Применение этого подхода к исследованиям ШАЛ позволяет получить сведения о форме первичного спектра, массовом составе и характеристиках взаимодействий адронов сверхвысоких энергий в передней кинематической области в широком диапазоне энергий первичных частиц  $10^{15}$  -  $10^{19}$  эВ в рамках единой методики с помощью одной экспериментальной установки относительно небольших размеров.
2. Создан не имеющий аналогов в мире экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР, предназначенный для регистрации групп мюонов на поверхности Земли в диапазоне плотностей  $0.04 - 2$  мюонов/ $m^2$  и зенитных углов  $30^\circ - 90^\circ$ .
3. Получены экспериментальные данные по многомюонным событиям в течение длительных серий измерений 2002-2007 гг. на комплексе

НЕВОД-ДЕКОР. Суммарное «живое» время работы установки составило 19922 часа, зарегистрировано около 3.2 млн. групп мюонов.

4. Впервые получены статистически обеспеченные зависимости интенсивности групп мюонов от множественности и зенитного угла. Данные перекрывают более шести порядков по интегральной интенсивности, что соответствует более чем трем порядкам по первичной энергии.
5. Впервые экспериментально исследовано влияние геомагнитного поля на характеристики групп мюонов на поверхности Земли. Это влияние искажает ФПР мюонов ШАЛ и приводит к уменьшению интенсивности групп, причем величина эффекта быстро увеличивается с ростом зенитного угла. Обнаружен эффект компланарности треков частиц в плоскости, определяемой осью ШАЛ и вектором силы Лоренца.
6. Разработана методика получения спектров локальной плотности мюонов в виде, независящем от типа детектора, изучена их феноменология для различных зенитных углов и получены дифференциальные СЛПМ, за формирование которых ответственны первичные частицы с энергиями в интервале от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  эВ и выше.
7. На основе моделирования с помощью пакета CORSIKA двумерных ФПР мюонов рассчитаны ожидаемые СЛПМ с учетом магнитного поля Земли для различных зенитных углов, двух предельных вариантов состава (чистые протоны и ядра железа), для разных комбинаций моделей адронных взаимодействий: QGSJET01 + GHEISHA, SIBYLL2.1 + FLUKA, EPOS1.6 + FLUKA при различных предположениях о дифференциальном спектре первичных частиц.
9. Впервые на основе данных по группам мюонов исследована область энергий ПКЛ от  $10^{15}$  эВ до  $10^{18}$  эВ и выше и получены следующие результаты:
  - при энергиях порядка 5 ПэВ наблюдается укручение СЛПМ, связанное с изломом первичного спектра, которое находится в согласии с результатами других методов исследований, в том числе и по абсолютной интенсивности;
  - в области энергий  $10^{16}$ – $10^{17}$  эВ обнаружен постепенный рост плотности мюонов по сравнению с ожидаемым для фиксированного состава ПКЛ, что можно интерпретировать как его утяжеление;

- при энергиях в районе  $10^{17}$  эВ выявлено изменение наклона спектра плотности мюонов («второй излом») и впервые измерена его величина, которая соответствует  $\Delta\gamma \sim 0.2$ .
10. Получена зависимость показателя наклона СЛПМ от первичной энергии. В диапазоне энергий  $10^{15} - 10^{18}$  эВ величина наклона СЛПМ постепенно возрастает от  $\sim 1.9$  до  $\sim 2.3$ , что соответствует изменению  $\gamma$  интегрального спектра ПКЛ от  $\sim 1.7$  до  $\sim 2.1$ . Характер изменения показателя наклона СЛПМ с ростом энергии противоречит предположению о фиксированной точке излома для всех ядер ПКЛ и свидетельствует в пользу смешанного массового состава с положением излома, зависящим от заряда (либо массы) первичных частиц.
  11. Впервые по мюонной компоненте КЛ при больших зенитных углах получены оценки абсолютной интенсивности ПКЛ с энергиями порядка  $10^{18}$  эВ. Эти оценки оказались значительно выше данных о спектре ПКЛ, полученных флуоресцентным методом, даже в предположении о тяжелом («железном») составе. Для объяснения этого результата необходим либо пересмотр используемой в настоящее время калибровки флуоресцентного метода оценки энергии ливней, либо существенное изменение характеристик взаимодействия адронов по сравнению с широко используемыми моделями.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих основных работах:**

1. V.M.Aynutdinov, V.V.Kindin, K.G.Kompaniets, ..., I.I.Yashin. Neutrino water detector on the Earth's surface (NEVOD) // Astrophysics and Space Science, Vol. 258 No. 1 – 12, (1997/1998) p. 105.
2. V.M.Aynutdinov, A.Castellina, D.V.Chernov, ..., I.I.Yashin. Detection of muon bundles at large zenith angles // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 75A (1999), p. 318.
3. В.М.Айнутдинов, С.Вернетто, Н.Н.Вонсовский, ..., И.И.Яшин. Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей // Изв. РАН. Сер. Физ., т. 63, № 3 (1999) с. 581.
4. В.М.Айнутдинов, М.Б.Амельчаков, Н.С.Барбашина, ..., И.И.Яшин. НЕВОД – многоцелевой нейтринный детектор на поверхности Земли // Инженерная физика, № 4, (2000) с. 71.
5. О.С.Золина, Р.П.Кокоулин, К.Г.Компаниец, ..., И.И.Яшин. Исследование групп мюонов под большими зенитными углами с помощью координатного детектора ДЕКОР. // Изв. РАН. Сер. физич., т. 66, № 11, 2002, с. 1614.

6. М.Б.Амельчаков, Н.С.Барбашина, О.С.Золина, ..., И.И.Яшин. Исследование альбедного потока мюонов вблизи поверхности Земли. Изв. РАН. Серия физич., т. 66, № 11, (2002) с. 1618.
7. Н.С.Барбашина, А.Г.Богданов, О.С.Золина, ..., И.И.Яшин. Группы мюонов в горизонтальном потоке космических лучей // Изв. РАН. Сер. физич., т. 69, № 3 (2005) с. 388.
8. I.I.Yashin, M.V.Amelchakov, N.S.Barbashina et al. Observation of UHECRs in horizontal flux // Intern. J. Mod. Phys., v. A20, No 29 (2005) p. 6937.
9. А.Н.Дмитриева, Р.П.Кокоулин, К.Г.Компаниец, ..., И.И.Яшин. Измерение интегральной интенсивности мюонов при больших зенитных углах // Ядерная физика, т. 69, № 5 (2006) с. 892.
10. M.V.Amelchakov, N.S.Barbashina, A.G.Bogdanov, ..., I.I.Yashin. Muon bundles produced by UHE cosmic rays at large zenith angles // Ядерная физика, т. 70, вып. 1 (2007) с. 181.
11. А.Г.Богданов, Р.П.Кокоулин, А.А.Петрухин, ..., И.И.Яшин. Экспериментальное наблюдение влияния магнитного поля Земли на мюонную компоненту ШАЛ // Изв. РАН. Сер. физич., т. 71, № 4 (2007), с. 545.
12. А.Н.Дмитриева, Р.П.Кокоулин, К.Г.Компаниец, ..., И.И.Яшин. Измерения интегральной интенсивности мюонов при больших зенитных углах // Изв. РАН. Сер. физич. т. 71, № 4 (2007) с. 569.
13. И.И.Яшин, Н.С.Барбашина, А.Г.Богданов и др. Исследования космических лучей выше излома посредством групп мюонов, регистрируемых в широком диапазоне зенитных углов // Изв. РАН. Сер. физич., т. 71, № 4 (2007) с. 573.
14. N.S.Barbashina, A.G.Bogdanov, D.V.Chernov, ..., I.I.Yashin. Ultra-high energy cosmic ray investigations by means of EAS muon density measurements // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), v. 165, (2007) p. 317.
15. A.G.Bogdanov, R.P.Kokoulin, A.A.Petrukhin, ..., I.I.Yashin. New approach to muon investigations in inclined EAS // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), v. 175-176, (2008) p. 342.
16. A.G.Bogdanov, R.P.Kokoulin, G.Mannocchi, ..., I.I.Yashin. A new approach to EAS investigations in the energy region  $10^{15}$ - $10^{19}$  eV // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, v. 588, no. 1-2 (2008) p. 189.
17. Н.С.Барбашина, Р.П.Кокоулин, К.Г.Компаниец, ..., И.И.Яшин. Широкоапертурный мюонный годоскоп большой площади УРАГАН // Приборы и техника эксперимента, № 2 (2008) с. 26.
18. R.P. Kokoulin, A.G. Bogdanov, G. Mannocchi, ..., I.I. Yashin. Local muon density spectra at large zenith angles as a probe of high-energy hadronic interaction models // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 196 (2009) p.106.

19. Яшин И.И., Богданов А.Г., Громушкин Д.М. и др. Исследование формы энергетического спектра ПКИ методом спектров локальной плотности мюонов // Изв. РАН. Сер. физич., т. 73 (2009) с. 616.
20. Богданов А.Г., Громушкин Д.М., Кокоулин Р.П., ..., Яшин И.И. Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов // Ядерная физика, т. 73. № 11 (2010) с. 1904.

Подписано в печать

Заказ

Тираж

---

Типография НИЯУ МИФИ. Москва, Каширское шоссе, 31