

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**им М.В. ЛОМОНОСОВА**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра общей физики**

На правах рукописи

Федунин Евгений Юрьевич

**Расчеты базы данных для оценивания энергии  
гигантских атмосферных ливней**

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2004

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор, Л.Г. Деденко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор, Н.Н. Калмыков  
кандидат физико-математических наук  
А.С. Лидванский

Ведущая организация: Институт космофизических  
исследований и аэронавтики им.  
Ю.Г.Шафера Якутского научного центра  
Сибирского отделения РАН

Защита диссертации состоится « 14 » октября 2004 г. в 15 час.  
на заседании диссертационного совета К-501.001.03 в Московском  
государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992,  
Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19 корп., ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 10 » \_\_\_\_\_ сентября 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

А.К. Манагадзе

### Актуальность темы:

Фундаментальными задачами физики космических лучей и астрофизики сверхвысоких энергий являются определение энергии и природы частиц первичного космического излучения (ПКИ), характеристик взаимодействий этих частиц с ядрами атомов воздуха, и возможных механизмов их генерации в области энергий  $E > 10^{18} \text{ эВ}$ . По современным представлениям наряду с традиционными механизмами ускорения в качестве альтернативных предлагаются процессы распадов гипотетических топологических дефектов [1, 2, 3 и 4] и гипотетических сверхтяжелых частиц с массами  $m_x \geq 10^{22} \div 10^{23} \text{ эВ}$  [5].

Важнейшая проблема – это возможное «обрезание» спектра космических лучей в области сверхвысоких энергий, предсказанное в 1966 году Грейзеном [6], Зацепиным и Кузьминым [7] (эффект ГЗК). Эффект состоит в следующем. Первичные протоны, энергия которых превышает порог  $(3 \div 5) \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ , теряют энергию в процессах фотоядерного рождения пионов на фотонах микроволнового реликтового излучения. Эти взаимодействия должны привести к резкому спаду («обрезанию») в энергетическом спектре космического излучения при энергии  $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ . В то же время некоторые современные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что такого «обрезания» не наблюдается: зарегистрировано около 11 ливней с энергией  $> 10^{20} \text{ эВ}$  [8,9,10]. Это может быть следствием относительной близости источников. В случае удаленных источников можно предположить слабое нарушение лоренцевской инвариантности [11,12] или искать другие причины для объяснения отсутствия резкого спада спектра.

Решение этих задач может быть достигнуто на основе экспериментальных данных, полученных при регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ).

В настоящее время в области сверхвысоких энергий работают Якутская установка ШАЛ и установка HiRes в США, в Аргентине полным ходом идет

строительство Auger Observatory, планируется запуск спутника с телескопом EUSO для регистрации флуоресцентного света от ШАЛ. Кроме того, начато строительство установки Telescope Array в США. Эти сложные и дорогие установки позволят регистрировать ШАЛ в области сверхвысоких энергий с хорошей статистикой.

Корректная интерпретация экспериментальных данных, основанная на адекватном моделировании, позволяет решать поставленные выше проблемы. Поэтому разработка различных методов моделирования актуальна.

Например, на Якутской установке ШАЛ процедура оценивания одного из основных параметров ливня, его энергии, основана на величине сигнала (отклика, энерговыделения) в детекторе на расстоянии 600 метров от оси ливня (классификационный параметр  $s_{600}(0^\circ)$  или  $s_{600}$ ) для вертикального ливня. Зарегистрированная в эксперименте величина  $s_{600}(\theta)$  в наклонном ливне с углом  $\theta$  пересчитывается в величину  $s_{600}(0^\circ)$  путем использования так называемых зенитно-угловых зависимостей для этого параметра. Стандартная и простейшая процедура основана на определении пробега  $\lambda$  для поглощения сигнала  $s_{600}(\theta)$  по этим зенитно-угловым зависимостям или по каскадным кривым, восстановленным методом сечения спектров ливней линиями равной интенсивности. Таким образом, от того, насколько корректно данный подход позволяет рассчитать пробег для поглощения, зависит точность определения энергии ливня.

В настоящее время существует множество методов моделирования ШАЛ. Прежде всего, следует выделить прямой метод Монте-Карло. Он позволяет провести адекватное моделирование ливня, и при достаточной статистике, оценить флуктуации тех или иных параметров. Проблема заключается в том, что применение прямого метода Монте-Карло требует для моделирования развития одного ливня от частицы с энергией  $10^{20}$  эВ примерно 10 лет при использовании компьютера с тактовой частотой 2-3 ГГц. Альтернативной процедурой, является широко распространенный метод

Монте-Карло с весами (предложенный в [13]), который позволяет проводить моделирование достаточно быстро, но вводит искусственные флуктуации и не позволяет моделировать индивидуальные каскады.

В настоящее время ввиду огромной значимости физических задач проводятся поиски альтернативных методов моделирования ливней. Так, в работе [14] был предложен гибридный метод, в рамках которого сначала используется метод Монте-Карло, а затем в области высоких энергий моделирование ливня осуществляется путем решения одномерных каскадных уравнений. В области низких энергий снова используется монте-карловский расчет, позволяющий проследить отдельные частицы. Недостатком предложенной схемы является то, что методом Монте-Карло прослеживаются все вторичные частицы, что требует много времени. Кроме того, пока не предусмотрен расчет откликов детекторных станций. В работе [15] был разработан другой подход, основанный на гибридном методе, который показал хорошее согласие с результатами расчетов по коду CORSIKA.

В работе [16] была разработана пятиуровневая схема моделирования ШАЛ от первичных частиц сверхвысоких энергий, которая позволяет относительно быстро моделировать каскады частиц и рассчитывать отклики детекторных станций (см. рис. 1). Кратко рассмотрим этапы расчета в рамках пятиуровневой схемы. Первичная частица (и, возможно, несколько лидирующих частиц) прослеживаются методом Монте-Карло. Транспорт вторичных частиц высоких энергий осуществляется путем решения одномерных уравнений переноса. Эти уравнения позволяют получить функцию источника  $\pi^0$ -пионов, на основе которой рассчитывается функция источника гамма-квантов высоких энергий ( $E_\gamma > 10 \text{ ГэВ}$ ). Полученная функция источника используется в одномерных уравнениях переноса, которые описывают развитие электронно-фотонных ливней (ЭФЛ) от гамма-квантов высоких энергий. Отметим, что в области высоких энергий ( $E > 10 \text{ ГэВ}$  для электронов и фотонов и  $E > 10^4 \text{ ГэВ}$  для адронов) одномерное приближение

вполне допустимо, так как характерные углы  $\theta$  разлета ( $\langle \theta^2 \rangle \approx (E_s/E)^2 \delta t$ , где  $E_s = 21 \text{ МэВ}$ ,  $E$  - энергия электронов,  $\delta t$  - интервал глубины в каскадных единицах, а для адронов  $\theta \approx c \cdot p_{\perp} / E$ , где  $p_{\perp} \sim 0.3 \text{ ГэВ}/c$ ) малы. Электронно-

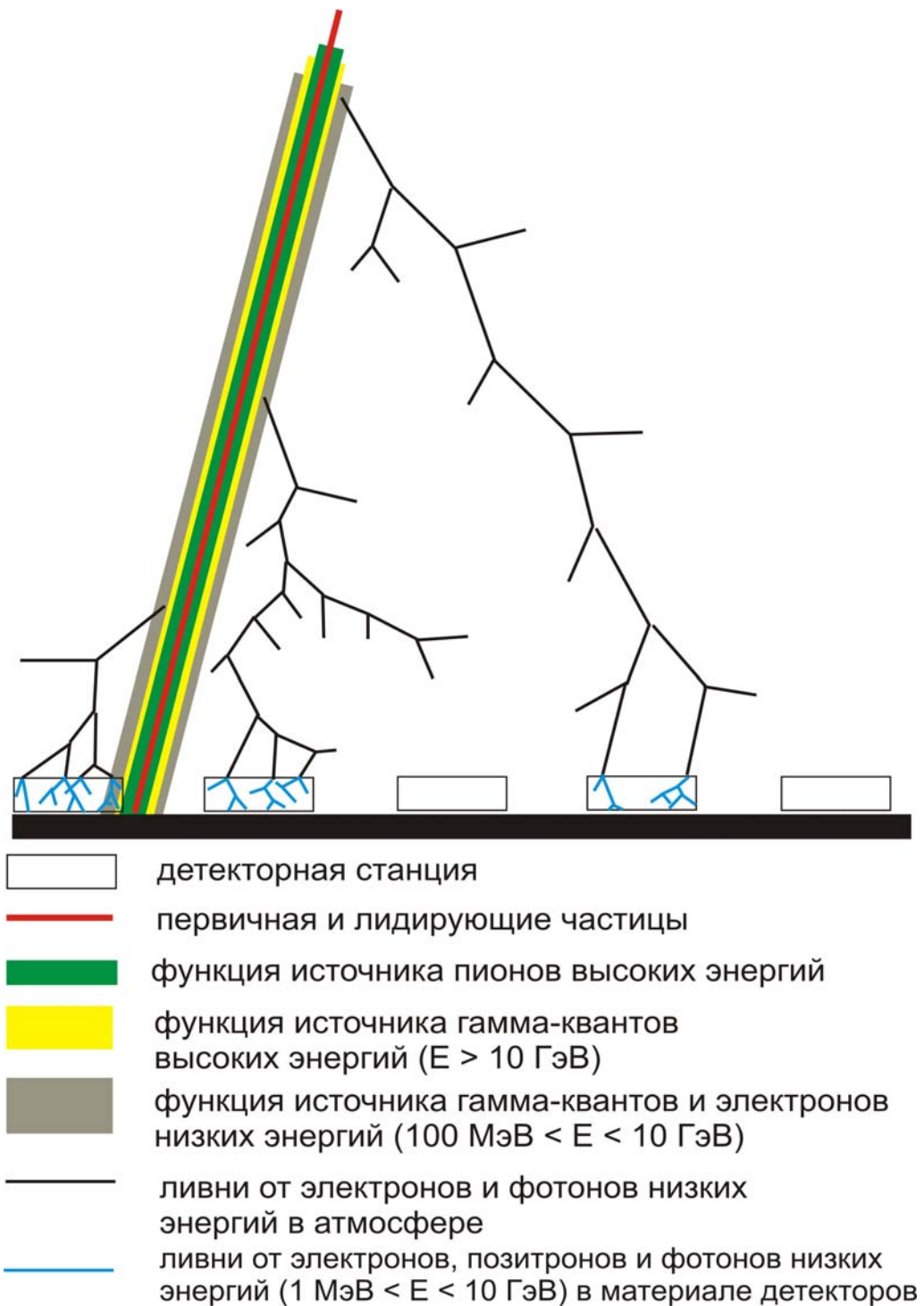


Рисунок 1. Пятиуровневая схема моделирования ШАЛ.

фотонные каскады прослеживаются до энергии  $E_{\text{порог}} = 10 \text{ ГэВ}$ . Решение транспортных уравнений для этих каскадов позволяет рассчитать функции источников электронов и гамма-квантов низких энергий (0.1–10 ГэВ).

Предварительно рассчитывается база данных (БД), которая представляет собой набор функций пространственного распределения (ФПР) энерговыделений в реальных детекторных станциях от ЭФЛ с энергиями ниже пороговой, генерированных в атмосфере. Так как светосбор в сцинтилляционном детекторе пропорционален энерговыделению в нем, то и отклик детектора напрямую связан с энерговыделением. Таким образом, БД включает в себя набор ФПР откликов детекторов, рассчитанный для ливней от электронов и гамма-квантов с энергиями  $E_k$  в диапазоне  $100 \leq E_k \leq 10^4 \text{ МэВ}$ , генерированных на разных глубинах  $x_i$  ( $0 \leq x_i \leq 1020 \text{ г/см}^2$ ) в реальной атмосфере. Ливни рассчитывались по программе, основанной на коде CORSIKA. Для каждой частицы ливня, дошедшей до уровня наблюдения, вычислялся ее вклад в отклик детектора, расположенного на соответствующем расстоянии от оси ливня, с помощью матрицы энерговыделений в детекторе от частиц разных типов с энергиями  $E_j$  в диапазоне  $100 \leq E_k \leq 10^4 \text{ МэВ}$ , падающих на детектор под различными зенитными углами  $\theta_m$ :  $0.1 \leq \cos \theta_m \leq 1$ . Матрица энерговыделений рассчитывалась при помощи программы, написанной в рамках кода GEANT4. На основе функций источника электронов и фотонов низких энергий и базы данных проводится расчет ФПР энерговыделений в детекторных станциях. Вычисленная ФПР может быть использована для интерпретации экспериментальных данных в рамках различных моделей взаимодействия адронов в области сверхвысоких энергий.

### **Цель диссертационной работы:**

- Моделирование стандартной методики оценивания зенитно-угловой зависимости для сигнала  $s_{600}$ .
- Вычисление откликов реальных детекторных станций на прохождение электронов, позитронов, гамма-квантов и мюонов для Якутской установки ШАЛ.

- Расчет трехмерных электронно-фотонных ливней от электронов и фотонов в реальной атмосфере, соответствующей якутским условиям.
- Расчет базы данных для моделирования индивидуальных ШАЛ от частиц сверхвысоких энергий в рамках пятиуровневой схемы.
- Моделирование основной экспериментальной формулы оценивания энергии, используемой на Якутской установке ШАЛ, с помощью БД и пробных функций источника.
- Оценивание энергии уникального гигантского атмосферного ливня, зарегистрированного на Якутской установке ШАЛ в 1987 г. с помощью рассчитанной базы данных.

### **Научные результаты и новизна работы:**

Впервые проведено моделирование стандартной процедуры восстановления зенитно-угловых зависимостей (каскадных кривых) для параметра  $s_{600}$  методом сечения спектров ливней линиями равной интенсивности. Было промоделировано  $10^5$  ливней. Показано, что использование стандартной методики может приводить к ошибкам 20-50% и более в определении энергии в индивидуальных событиях (в основном, в сторону занижения).

Впервые рассчитана матрица откликов реальных детекторных станций Якутской установки ШАЛ на гамма-кванты, электроны, позитроны и мюоны на основе моделирования  $10^6$  событий.

Впервые рассчитана база данных, представляющая собой матрицу отклика детекторных станций для интервала расстояний от 10 до 2000 метров от оси ливня для электронно-фотонных ливней, генерированных на различных глубинах в реальной атмосфере, на основе моделирования  $2 \cdot 10^8$  событий.

На основе прямого моделирования методом Монте-Карло получены пределы применимости расчетов по теории Нишимуры-Каматы [17] в приближении Грейзена [18] и по другим аппроксимационным функциям.



Моделирование основной экспериментальной формулы оценивания энергии, используемой на Якутской установке ШАЛ, с помощью базы данных и пробных функций источника показало, что энергии ливней в области  $\sim 10^{20}$  эВ недооцениваются.

К оригинальным результатам относятся:

а) детальное моделирование экспериментальной методики восстановления каскадных кривых;

б) расчет откликов детекторных станций Якутской установки ШАЛ на различные частицы в широком диапазоне энергий и углов падения;

в) расчет параметров ливней от первичных электронов и фотонов в широком диапазоне энергий для всего диапазона глубин в реальной атмосфере;

г) расчет базы данных для интервала расстояний от 10 до 2000 метров для Якутской установки ШАЛ;

д) моделирование основной экспериментальной формулы оценивания энергии, используемой на Якутской установке ШАЛ.

### **Практическая и научная ценность работы:**

Практическая ценность работы состоит в том, что создание базы данных позволяет реализовать пятиуровневую схему моделирования ШАЛ сверхвысоких энергий, которая используется для оценивания энергии и природы частиц ПКИ по экспериментальным данным.

Научная ценность работы состоит в адекватном расчете пространственных распределений энерговыделений в реальных детекторах от произвольных функций источника электронов и фотонов в реальной атмосфере с учетом всех основных физических процессов.

Вместе с другими этапами пятиуровневой схемы рассчитанная БД позволяет проводить корректную интерпретацию экспериментальных результатов и более корректно, чем это делается в рамках стандартной методики, оценивать энергию и определять природу частицы ПКИ.

### **Вклад автора:**

С использованием программы PRGLPM [19] был разработан комплекс программного обеспечения для моделирования экспериментальной методики восстановления зенитно-угловых зависимостей (каскадных кривых) и на основе этого комплекса проведено моделирование около  $10^5$  ливней.

В рамках программного комплекса GEANT была разработана программа для расчета энерговыделений в реальных детекторах, используемых на Якутской установке ШАЛ.

Был произведен ряд модификаций программного комплекса CORSIKA для получения наряду с информацией о ФПР заряженных частиц и гамма-квантов, также и данных о ФПР энерговыделений. По модифицированной программе было насчитано около  $2 \cdot 10^8$  ЭФЛ.

На основе рассчитанной базы данных был разработан алгоритм вычисления ФПР откликов детекторных станций от произвольных функций источника гамма-квантов, электронов и мюонов.

### **Апробация работы:**

Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались и опубликованы в трудах Международных конференций по космическим лучам (Солт Лейк Сити, 1999; Гамбург, 2001; Женева, 2002; Цукуба, 2003), Международной конференции по компьютерным методам физики (Аахен, 2001), Всероссийских конференциях по космическим лучам (Дубна, 2000; Москва, 2002; Москва, 2004) и представлены в статьях в журналах (Ядерная Физика; Письма в ЖЭТФ; Известия РАН, Сер. Физ.; Nucl. Phys. B; Computer Physics Communication).

### **На защиту выносятся:**

Результаты моделирования процедуры восстановления зенитно-угловых зависимостей (каскадных кривых) методом сечения спектров ливней линиями равной интенсивности.

Результаты расчетов откликов детекторных станций от электронов, позитронов, фотонов и мюонов в детекторах, применяемых на Якутской установке ШАЛ, и параметров  $\sim 2 \cdot 10^8$  ЭФЛ в реальной атмосфере в диапазоне энергий от 100 до  $10^4$  МэВ и в диапазоне глубин от 0 до 1020 г/см<sup>2</sup>.

Созданная расчетная база данных для интерпретации экспериментальных результатов.

Результаты моделирования основной экспериментальной формулы оценивания энергии, используемой на Якутской установке ШАЛ.

Оценка энергии уникального гигантского атмосферного ливня, зарегистрированного на Якутской установке ШАЛ в 1987 г., которая составляет величину  $3 \cdot 10^{20}$  эВ.

### **Публикации:**

По материалам диссертации опубликовано 5 статей в журналах и 8 статей в трудах конференций.

### **Структура диссертации:**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, приложения и списка литературы. Содержит 57 рисунков и 5 таблиц; список литературы включает 121 наименование. Объем диссертации: 117 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, излагается цель работы и приводится структура диссертации. Указан личный вклад автора в работу, кратко изложены основные результаты, новизна, научная и практическая ценность работы.

В **первой главе** рассмотрены основные методы регистрации ШАЛ сверхвысоких энергий и процедуры обработки экспериментальных данных на крупнейших установках ШАЛ.

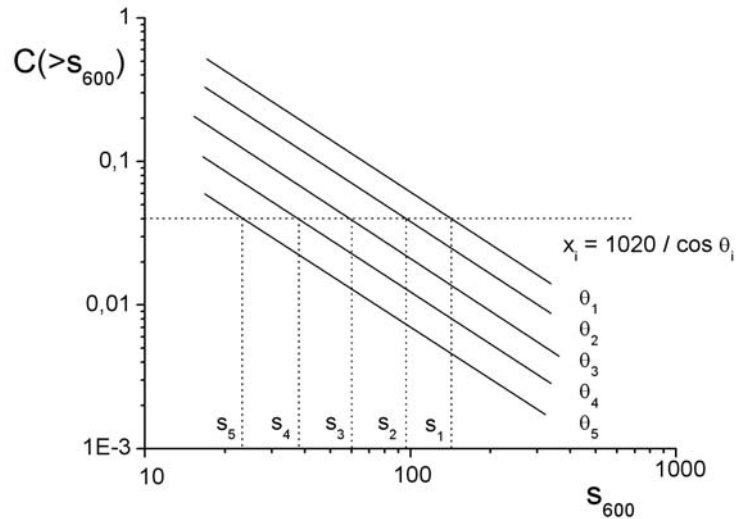


Рисунок 2. Восстановление зенитно-угловых зависимостей методом сечения спектров ливней с заданным значением сигнала  $s_{600}$  линиями равной интенсивности. Сплошные линии – спектры ливней для различных зенитных углов  $\theta_i$ . Пунктирная горизонтальная линия – линия равной интенсивности, пунктирные вертикальные линии указывают значения параметра  $s_{600}$  для спектров с различными углами  $\theta_i$ .

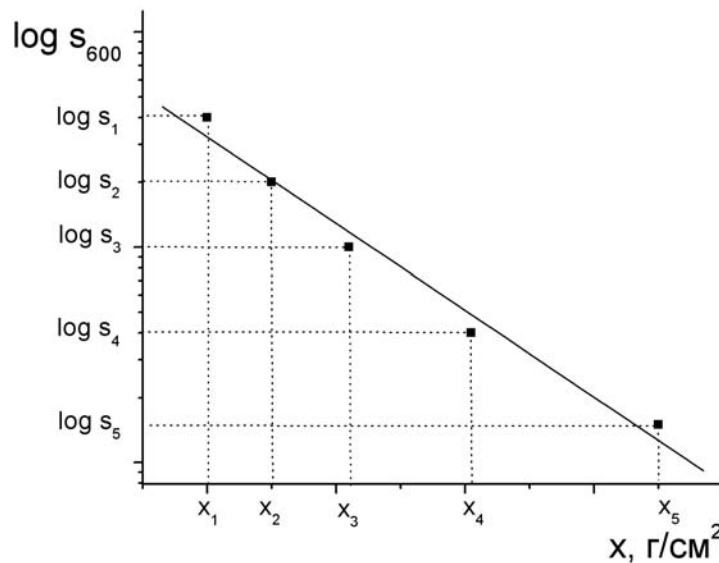


Рисунок 3. Восстановленная зенитно-угловая зависимость и ее аппроксимация убывающей экспонентой.

Во **второй главе** излагается процедура определения пробега для поглощения сигнала  $s_{600}$  методом сечения спектра ливней с этим значением параметра линиями равной интенсивности (см. рис. 2 и 3). Эта процедура используется экспериментаторами для оценивания энергии ливня. Далее, приводится методика, позволяющая провести моделирование стандартной

процедуры. Результаты такого моделирования показывают, что применение стандартной процедуры может приводить к ошибкам в определении энергии на 20-50% и более (в основном, в сторону занижения).

В **третьей главе** излагаются основные положения пятиуровневой схемы моделирования гигантских атмосферных ливней (см. рис. 1).

В **четвертой главе** изложена процедура расчета матрицы откликов детекторных станций Якутской установки ШАЛ на различные падающие частицы. Для расчета этой матрицы используется программа, написанная в рамках кода GEANT4 [20]. Вычисления проводились для слоистой модели реального детектора (см. рис. 4), который используется на Якутской установке ШАЛ.

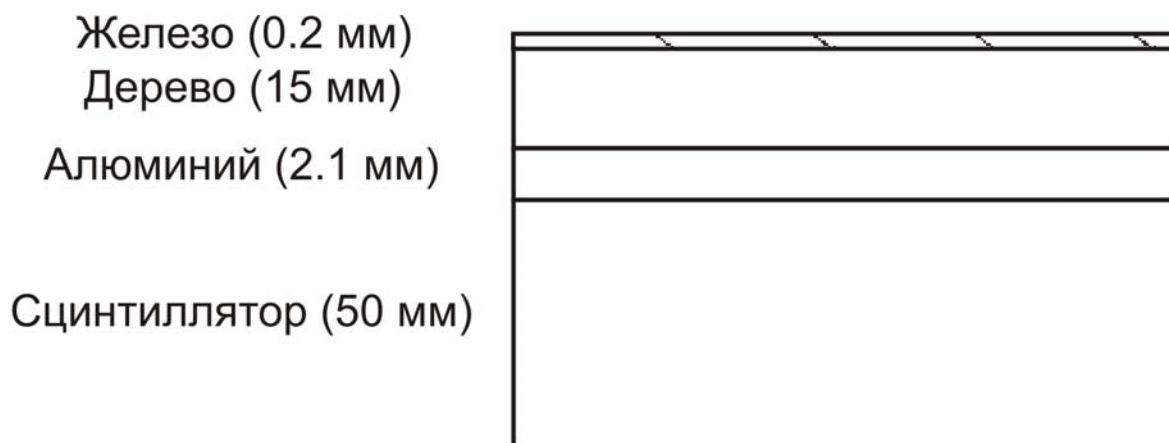


Рисунок 4. Слоистая модель детектора.

При помощи упомянутой выше программы были проведены расчеты для электронов, позитронов, гамма-квантов и мюонов различных энергий, падающих на детектор под различными углами. Например, для мюонов получилась зависимость, представленная на рисунке 5.

В **пятой главе** излагается процедура расчета параметров ЭФЛ и откликов детекторных станций Якутской установки ШАЛ на ливни от электронов и фотонов, генерированных на различных глубинах. При этом использовался модифицированный код CORSIKA [21] и рассчитанные ранее (см. главу 4) матрицы энерговыделений в детекторах. Это позволяет получить набор ФПР энерговыделений на уровне наблюдения для

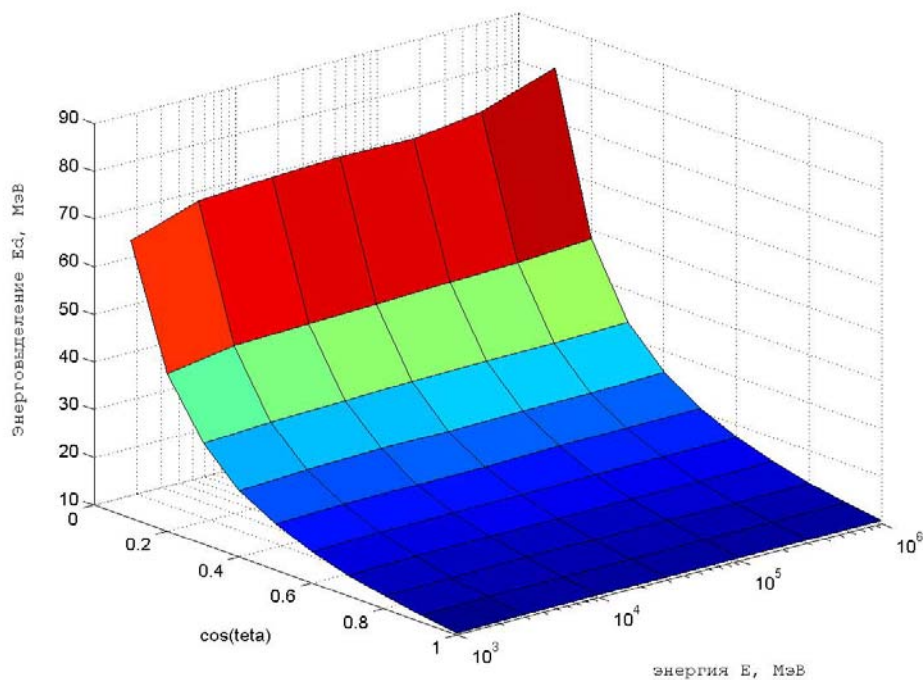


Рисунок 5. Зависимость энерговыведения в детекторе от зенитного угла и энергии падающего мюона.

расстояний от 10 до 2000 метров от оси ЭФЛ, генерированных электронами и фотонами на различных глубинах с различными энергиями.

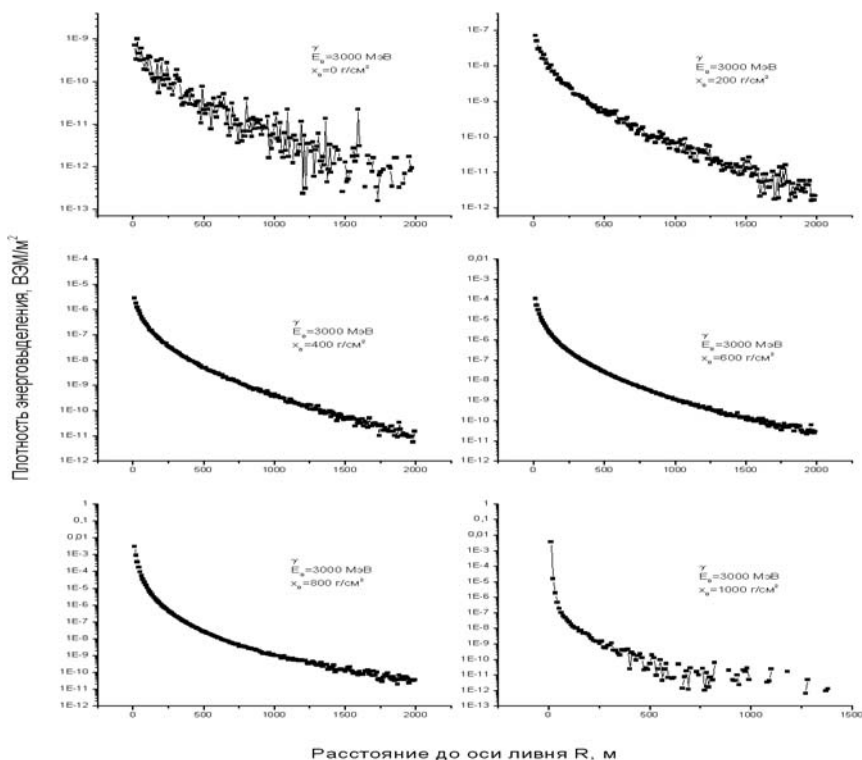


Рисунок 6. Набор ФПР энерговыведений для первичного гамма-кванта с энергией 3 ГэВ, генерированного на глубинах 0, 200, 400, 600, 800 и 1000 г/см<sup>2</sup>.

Энерговыведение вычислялось в единицах ВЭМ (вертикальный эквивалентный мюон), которая была выбрана равной 10.5 МэВ. Типичный набор ФПР энерговыведений представлен на рисунке 6. Отметим, что эти ФПР откликов детекторных станций и составляют базу данных, используемую при моделировании ШАЛ в рамках 5-ти уровневой схемы.

Для ЭФЛ от первичного гамма-кванта с энергией 10 ГэВ, генерированного на глубине 800 г/см<sup>2</sup> (возраст ливня S=1.15), в целях сравнения проводились расчеты как с использованием кодов CORSIKA+GEANT, так и в соответствии с теорией Нишимуры-Каматы в приближении Грейзена (НКГ), а также с использованием модифицированной функции НКГ с мольеровским радиусом  $R_m \approx 43 м$  и, наконец, формулы для ФПР, предложенной А.А. Лагутиным в работе [22]. Результаты сопоставления приведены на рисунке 7, который ясно демонстрирует отличие сигнала (пустые квадратики) от плотности заряженных частиц (сплошные квадратики).

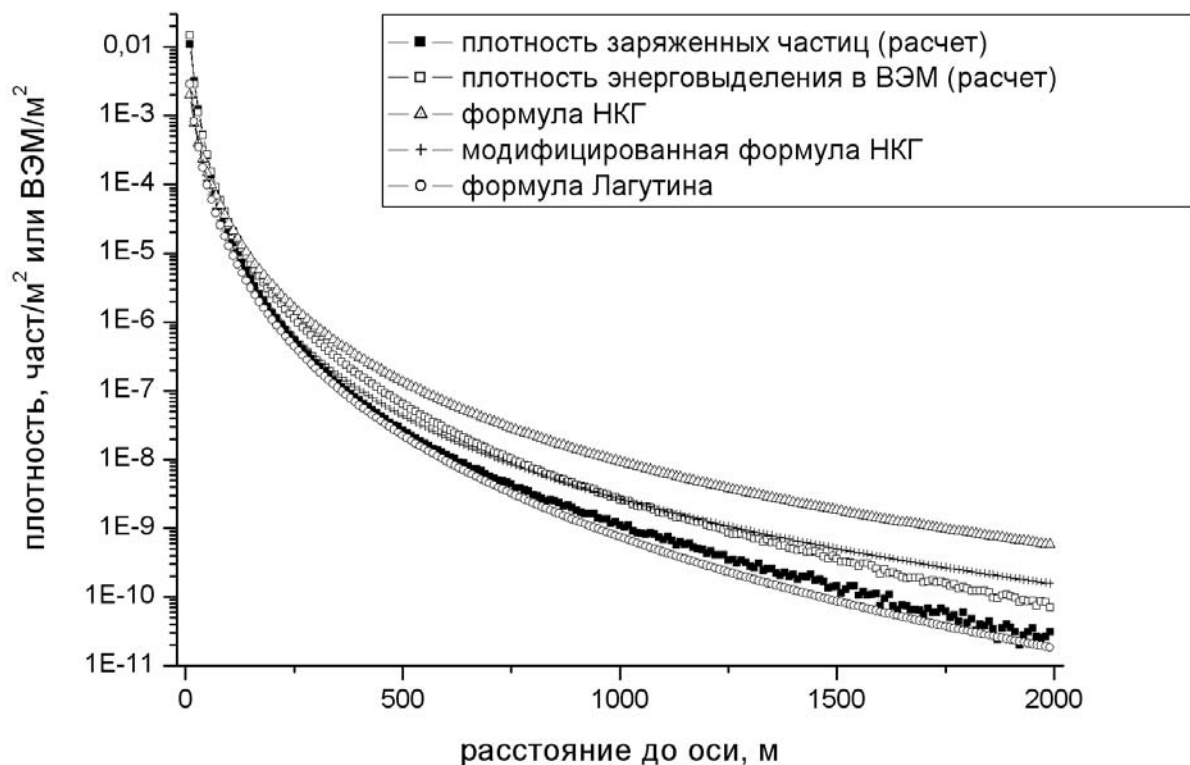


Рисунок 7. Сравнение различных ФПР заряженных частиц и энерговыведений.

В шестой главе приведены результаты моделирования основной экспериментальной калориметрической формулы, используемой на Якутской установке ШАЛ для оценивания энергии ливня, полученные с помощью пробных функций источника  $F(E, x) dx dE = f(E) dE \cdot K(x) dx$ , где функции  $f(E)$  и  $K(x)$  имеют вид  $f(E) = f_0 / E^{-\gamma}$ ,  $K(x) = K_0 \exp\left(-\frac{(x-C)^2}{A(x-C) + 2 \cdot B^2}\right)$  (см. рис. 8).

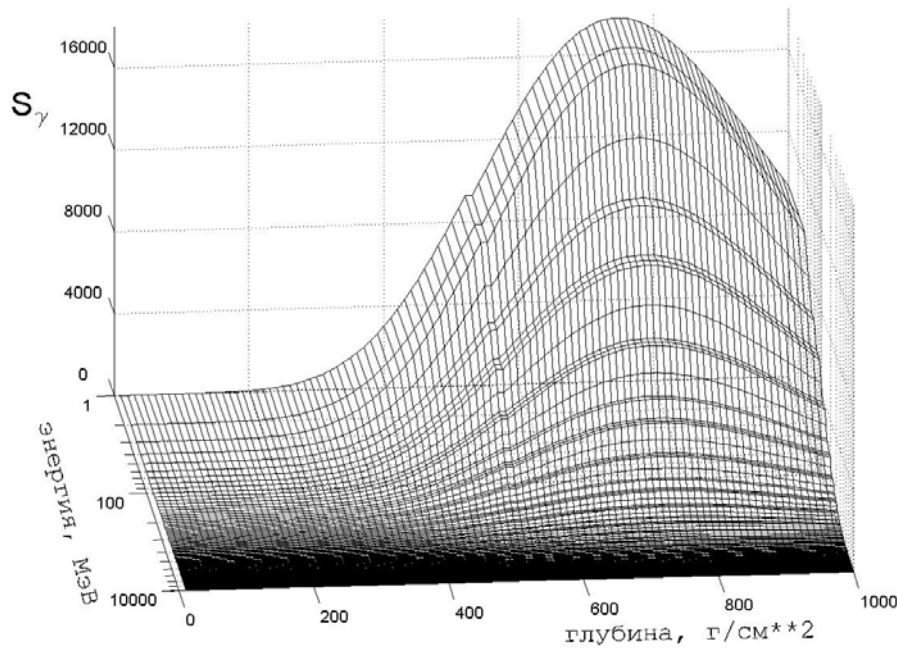


Рисунок 8. Пробная функция источника гамма-квантов.

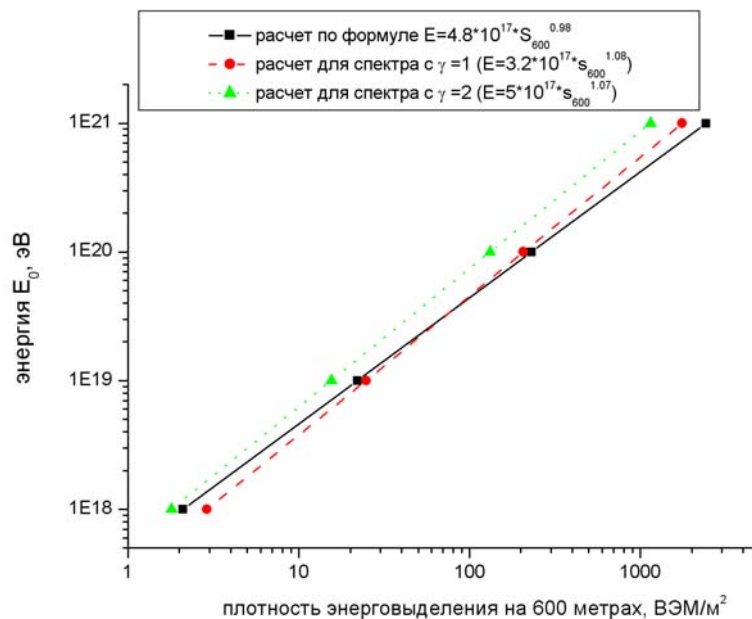


Рисунок 9. Зависимость энергии первичной частицы от плотности энерговыделения в детекторной станции на 600 метрах от оси ливня.



Показано, что экспериментальная зависимость для показателя степени  $\gamma=2$  близка расчетной в области энергий  $10^{18}$  эВ (см. рис. 9). В то же время, показатель степени  $b$  в основной формуле  $E = a \cdot (s_{600})^b$  для расчетной зависимости больше единицы (а не меньше единицы, как в Якутской формуле). Это позволяет сделать вывод, что использование стандартной формулы может приводить к недооценке энергии примерно на 40% в области энергий  $\sim 10^{20}$  эВ.

В конце главы для значения энергии  $E = 10^{18}$  эВ приводятся результаты сравнения расчетных ФПР с экспериментальной, которая используется на Якутской установке ШАЛ [23] (см. рис. 10).

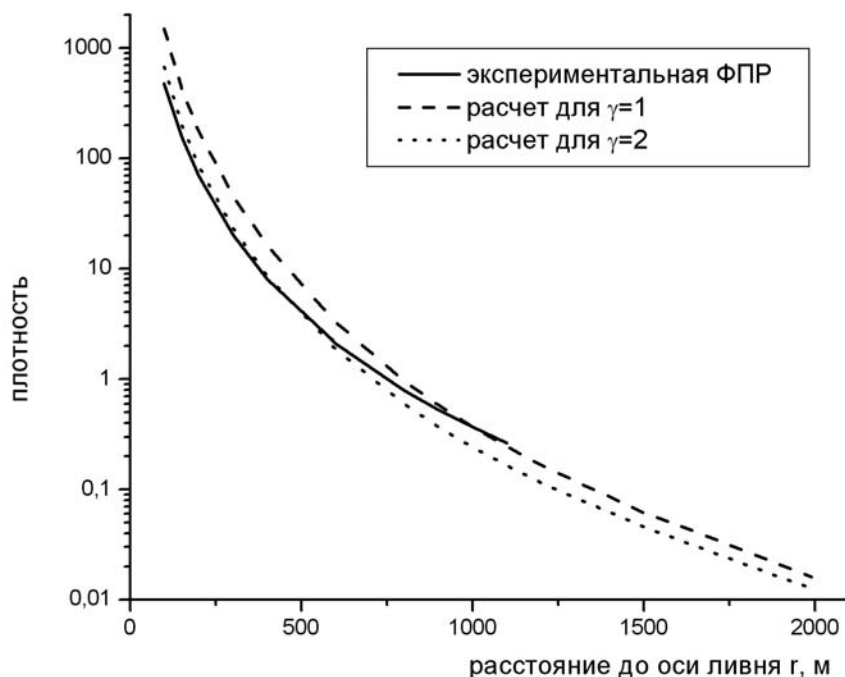


Рисунок 10. Сопоставление расчетных ФПР с функцией, которая используется на Якутской установке ШАЛ для обработки массовой статистики [23].

Также приводится оценка энергии уникального гигантского атмосферного ливня, зарегистрированного на Якутской установке ШАЛ в 1989 г., равная  $3 \cdot 10^{20}$  эВ, которая получена с помощью рассчитанной базы данных с учетом отклонений мюонов магнитным полем Земли.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Моделирование процедуры восстановления сигнала  $s_{600}$  для вертикального ливня по его измеренному значению в наклонном ливне методом сечения спектров ливней линиями равной интенсивности показало, что эта процедура приводит, в основном, к занижению оценок энергии частиц первичного космического излучения (систематические ошибки составляют  $\sim 20-50\%$ ).
2. Впервые проведено моделирование откликов (энерговывделений, сигналов) детекторных станций Якутской установки ШАЛ на электроны, позитроны, гамма-кванты и мюоны с энергиями в интервале от 1 до  $10^4$  МэВ и углами падения на детектор  $\theta$  в диапазоне  $0.05 \leq \cos \theta \leq 1$ .
3. Впервые для уровня наблюдения  $x_0 = 1020 \text{ г/см}^2$  и расстояний от 10 до 2000 метров от оси ливня вычислены матрица параметров для вертикальных электронно-фотонных ливней, генерированных электронами и гамма-квантами с энергиями от 0.1 до 10 ГэВ в диапазоне глубин от 0 до  $1020 \text{ г/см}^2$ , и матрица откликов детекторных станций на эти ливни, то есть база данных для оценивания энергии гигантских атмосферных ливней.
4. Показано, что модифицированная функция Нишимуры-Каматы-Грейзена аппроксимирует сигнал  $s(r)$  с погрешностью 10-20% на расстояниях 500-1000 м от оси.
5. Показано, что вычисленная с использованием рассчитанной базы данных и пробных функций источника ФПР сигнала  $s(r)$  совпадает с экспериментальной с погрешностью  $< 25\%$  на расстояниях свыше 600 м от оси ливня.
6. С помощью рассчитанной базы данных и пробных функций источника показано, что применение основной экспериментальной формулы, которая используется для оценивания энергии гигантских атмосферных ливней на Якутской установке ШАЛ, приводит к недооценке энергии на  $\sim 40\%$  в области энергии  $\sim 10^{20} \text{ эВ}$ .

7. В рамках модели кварк-глюонных струн и 5-ти уровневой схемы с учетом отклонения мюонов геомагнитным полем показано, что оценка энергии уникального гигантского атмосферного ливня, зарегистрированного на Якутской установке ШАЛ в 1987 г., составляет  $3 \cdot 10^{20}$  эВ.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. A.V. Glushkov, L.G. Dedenko, V.B. Kosarev, I.T. Makarov, M.I. Pravdin, I.E. Sleptsov, S.A. Filippov, E.Yu. Fedunin. Temporal structure of the muon disk at large distances from core of EAS with  $E > 6 \cdot 10^{16}$  eV. – in *Proc. 26<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Salt Lake City, 1999, Vol. 1, p. 387.
2. E.E. Antonov, L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, A.V. Glushkov, A.A. Kirillov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, T.M. Roganova, I.E. Sleptsov. Reconstruction of charged particle density at fixed distance from the shower core by various methods. – in *Proc. 27<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Hamburg, 2001, Vol. 2, p. 512.
3. E.E. Antonov, L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, A.V. Glushkov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, T.M. Roganova, I.E. Sleptsov. Estimation of the attenuation length of the charged particle density at 600 meters from the shower axis. – *Computer Physics Communications*, Vol. 147, p. 484 (2002).
4. E.E. Antonov, L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, A.V. Glushkov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, Yu.P. Pyt'ev, T.M. Roganova, I.E. Sleptsov. Separation of muons in the giant air showers by the geomagnetic field. – *Computer Physics Communications*, Vol. 147, p. 501 (2002).
5. Е.Е. Антонов, Л.Г. Деденко, А.А. Кириллов, Т.М. Роганова, Г.Ф. Федорова, Е.Ю. Федунин. Продольное развитие гигантских атмосферных ливней и проблема оценки энергии частиц первичного космического излучения. – *Ядерная физика*, т. **65-10**, с. 1894 (2002).

6. Е.Е. Антонов, Л.Г. Деденко, А.В. Глушков, В.А. Колосов, М.И. Правдин, Т.М. Роганова, И.Е. Слепцов, Г.Ф. Федорова, Е.Ю. Федунин. Поглощение заряженных частиц на расстоянии 600 м от оси гигантского атмосферного ливня. – Известия РАН, сер. физ., т. **66**, № 11, с.1603 (2002).
7. L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, A.V. Glushkov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, T.M. Roganova, I.E. Sleptsov. Absorption of the charged particle density at 600 meters in giant air showers. – 18<sup>th</sup> European cosmic ray symposium, Moscow, Russia, July 8-12, Symposium Program and Abstracts, HE51P (2002).
8. L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, A.V. Glushkov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, T.M. Roganova, I.E. Sleptsov. The new energy estimates of the giant air showers. – 12<sup>th</sup> International symposium on very high energy cosmic ray interactions, CERN, Geneva, July 15-19, Abstracts, Session CP-9.3 (2002).
9. L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, A.V. Glushkov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, T.M. Roganova, I.E. Sleptsov. The muon deflection by the geomagnetic field in the giant air showers. – 12<sup>th</sup> International symposium on very high energy cosmic ray interactions, CERN, Geneva, July 15-19, Abstracts, Poster Session I.3.3 (2002).
10. L.G. Dedenko, A.A. Kirillov, I.A. Kirillov, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin. Description of cascades with energies above the GZK cut-off. – in *Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Tsukuba, 2003, Vol. 2, p. 531.
11. L.G. Dedenko, A.A. Kirillov, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin. The GZK paradox and estimation of energy of the primary cosmic rays. – in *Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Tsukuba, 2003, Vol. 2, p. 643.

12. L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, T.M. Roganova, A.V. Glushkov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, I.E. Sleptsov. The new energy estimates of giant air showers. – Nucl. Phys. B **122**, p. 329-332 (2003).

13. Л.Г. Деденко, Т.М. Роганова, Г.Ф. Федорова, Е.Ю. Федунин. Пионы в первичном космическом излучении в области сверхвысоких энергий. – Письма в ЖЭТФ, т. **78**, вып. 3, с. 131 (2003).

### Цитируемая литература:

1. C.T. Hill, Nucl. Phys. B **224**, 469 (1983).
2. F.A. Aharonian et al., Phys. Rev. D **46**, 4188 (1992).
3. P. Bhattacharjee et al., Phys. Rev. Lett. **69**, 567 (1992).
4. A.J. Gill et al., Phys. Rev. D **50**, 3660 (1994).
5. V.S. Berezhinsky et al., Phys. Rev. Lett. **79**, 4302 (1997).
6. K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966).
7. G.T. Zatsepin, V.A. Kuzmin, JETP Lett. **4**, 78 (1966).
8. N. Hayashida et al., Phys. Rev. Lett. **73**, 3491 (1994).
9. D.J. Bird et al., Astrophys. J. **441**, 144 (1995).
10. E.E. Antonov et al., JETP Lett. **69**, 614 (1999).
11. Д. А. Киржиц, В.А. Чечин, Письма ЖЭТФ **14**, 261 (1971).
12. Д. А. Киржиц, В.А. Чечин, Ядерная физика **15**, 1051 (1972).
13. A.M. Hillas, in *Proc. 17<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Paris, 1981, Vol. 8, p. 193.
14. H.J. Drescher et al., in *Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Tsukuba, 2003, Vol. 2, p. 507.
15. N.N. Kalmykov et al., in *Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Tsukuba, 2003, Vol. 2, p. 511.
16. L.G. Dedenko et al., in *Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference*, Tsukuba, 2003, Vol. 2, p. 643.
17. K. Kamata, J. Nishimura, Progr. Theor. Phys. **6**, 93 (1958).
18. К. Грейзен, Физика космических лучей, изд. ИЛ, том **3**, 3 (1958).

19. A.M. Anokhina, L.G. Dedenko, G.F. Fedorova et al., Phys. Rev. D **60-3**, 33004 (1999).
20. CERN/ASD Group, GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library W5013, CERN, 1994.
21. D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, Report FZKA 6019 (1998), Forschungszentrum Karlsruhe.
22. A.A. Lagutin et al., J. Phys. G **28**, 1259 (2002).
23. B.N. Afanasiev et al., in *Proc. of the Int. Symp. On Extremely High Energy Cosmic Rays: Astroph. And Future Observatories*, 1996, p. 32.

ООП МГУ. Заказ 96-100-04