

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. Скобельцына

на правах рукописи

Шозиёев Гулмурод Парвонашоевич

**Калибровка оценок энергии гигантских
атмосферных ливней для наземных
детекторов с помощью
черенковского и флуоресцентного света**

01.04.23 – физика высоких энергий
05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2006

Работа выполнена на кафедре космических лучей и физики космоса физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

Роганова Татьяна Михайловна
доктор физико-математических наук, НИИЯФ МГУ

Деденко Леонид Григорьевич
доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет МГУ

Официальные оппоненты:

Калмыков Николай Николаевич
доктор физико-математических наук, профессор, НИИЯФ МГУ

Лидванский Александр Сергеевич
кандидат физико-математических наук, Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

Ведущая организация:

Институт космофизических исследований и аэронауки имени Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск

Защита диссертации состоится « 23 » ноября 2006 г. в 15⁰⁰ 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 « 18 » октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А.К. Манагадзе

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Атмосфера Земли непрерывно бомбардируется релятивистскими частицами. Частицы с энергиями порядка 10^{20} эВ падают примерно один раз в год на 100 км^2 поверхности Земли. Они формируют самую высокоэнергичную часть спектра космических лучей, который простирается от 10^9 эВ до 10^{20} эВ. Из-за малой интенсивности таких частиц о них мало что известно. В частности, открытыми остаются вопросы о том, как и где частицы с энергией 10^{20} эВ получают такую большую энергию. Эти частицы, возможно, могут рождаться в неизвестных физических процессах или экзотических процессах, протекавших в ранней Вселенной.

Космические лучи с энергией $> 10^{15}$ эВ могут быть зарегистрированы только по вызываемым этими частицами в атмосфере Земли каскадам – широким атмосферным ливням (ШАЛ). Для обнаружения ШАЛ на поверхности Земли строятся гигантские детекторы, способные регистрировать различные характеристики каскадов, в том числе и создаваемое ими в атмосфере излучение.

Актуальность исследований самой высокоэнергичной части спектра космических лучей заключается в доказательстве или опровержении существования эффекта Грейзена-Зацепина-Кузьмина (эффекта ГЗК) – обрезания энергетического спектра космических лучей при энергиях $> 3 \cdot 10^{19}$ эВ из-за их взаимодействий с микроволновым фоном. Ответ на вопрос о существовании эффекта ГЗК может быть получен на основе экспериментальных данных о различных компонентах гигантских атмосферных ливней (ГАЛ). При этом центральным вопросом является точность определения энергии.

Черенковское излучение играет особую роль при исследовании ШАЛ. Достаточно большой световой выход в

оптическом диапазоне и слабое поглощение в чистой, безоблачной атмосфере позволяют эффективно определять полную энергию ШАЛ, а также проследить историю развития ливня в атмосфере. Помимо черенковского света актуально также использование флуоресцентного света. В настоящее время эти компоненты являются основными для определения энергии в современных экспериментах по изучению ШАЛ (например, "ТУНКА" и "ЯКУШАЛ" в России, установки высокого разрешения HiRes и TA в США и Pierre Auger Observatory (PAO) в Аргентине).

Результаты современных экспериментов, полученные на основе детектирования различных компонент ГАЛ, не дают согласованных результатов по спектрам космических лучей в диапазоне энергий 10^{18} – 10^{20} эВ. Энергия ливней в некоторых экспериментах ("ЯКУШАЛ" и AGASA в Японии) определяется на основе моделирования характеристик ГАЛ. Точность определения энергии зависит от корректности используемых для ее определения модели взаимодействия адронов и состава первичного космического излучения. Поэтому исключительно важны расчеты параметров черенковского излучения и флуоресцентного света, которые слабо зависят от модели взаимодействий адронов и состава космических лучей. Расчеты в этой области энергий исключительно трудоемки и требуют значительных вычислительных ресурсов. Последнее обстоятельство существенно затрудняет моделирование стандартным методом Монте-Карло каскадов от атмосферных ливней в области ультравысоких энергий. Для эффективного моделирования необходима разработка новых альтернативных процедур.

Целью диссертационной работы является создание и реализация нового гибридного метода расчета характеристик черенковского и флуоресцентного света ГАЛ, позволяющего получить данные для наземных и спутниковых экспериментов.

Научная новизна и практическая ценность

Научная значимость работы состоит в реализации нового метода расчета характеристик ГАЛ по черенковскому и флуоресцентному свету в широком диапазоне энергий от 10^{12} до 10^{20} эВ. Впервые с использованием гибридной схемы, включающей вычисления функции источника и базы данных (БД), на основе кодов CORSIKA и GEANT4 были рассчитаны характеристики черенковского и флуоресцентного света ГАЛ.

Практическая значимость состоит в том, что полученные результаты моделирования функции пространственного распределения (ФПР) черенковского света (ЧС) в реальной атмосфере могут быть использованы для дальнейших исследований в экспериментах "ЯКУШАЛ" и "Тунка". База данных черенковского света и база данных энерговыделений в реальной атмосфере, а также ФПР ЧС могут стать основой для расчетов ГАЛ для новых экспериментов, использующих черенковскую и флуоресцентную методику.

На защиту выносятся результаты:

- Комплексы программ для расчета черенковского света от ливней, созданные на базе программного пакета CORSIKA, и метод расчёта черенковского света от гигантских атмосферных ливней;
- Комплексы программ для расчета флуоресцентного света от ливней, созданные на базе программных пакетов CORSIKA и GEANT4, и метод расчёта флуоресцентного света от гигантских атмосферных ливней;
- Результаты расчетов функций пространственного распределения и полного потока черенковского света, необходимых для анализа экспериментов «ТУНКА» и «ЯКУШАЛ» в области энергий 10^{15} - 10^{20} эВ;
- Результаты расчетов пространственных распределений выделенной в атмосфере энергии, необходимых для анализа

экспериментов HiReS, PAO и TA в области энергий 10^{18} – 10^{20} эВ;

- Калибровка оценки энергии гигантских атмосферных ливней, полученной в сцинтилляционных детекторах, по черенковскому излучению.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, определяется

- использованием хорошо оттестированных и широко используемых в ускорительной и космической физике кодов CORSIKA и GEANT4;
- тестированием результатов расчетов с использованием калориметрического метода;
- сопоставлением с расчетными данными других авторов и результатами экспериментов.

Вклад автора

1. Написаны прикладные программы, которые на основе компьютерных комплексов CORSIKA+QGSJET и GEANT4, позволяют реализовать гибридную схему вычислений, и в рамках этой схемы рассчитать функции источника электронов и гамма-квантов в области энергий $E \leq 10$ ГэВ и базу данных для черенковского излучения и флуоресцентного света.

2. Написаны программы, которые по базе данных и функциям источника электронов и гамма-квантов позволяют рассчитать характеристики черенковского излучения и флуоресцентного света в ШАЛ.

3. С использованием разработанных диссертантом программ рассчитаны БД ЧС, БД поглощённой в реальной атмосфере энергии и функции источника гамма-квантов и электронов для ливней с энергиями 10^{15} – 10^{20} эВ.

4. Проведены расчеты функций пространственного распределения (ФПР) и полного потока черенковского света (ЧС) для широкого диапазона энергий 10^{12} – 10^{20} эВ в рамках гибридной

схемы, выполненной для двух разных условий эксперимента ("ЯКУШАЛ" и "Тунка").

5. Выполнены расчеты пространственного распределения поглощённой в реальной атмосфере энергии для широкого диапазона энергий 10^{12} – 10^{20} эВ в рамках гибридной схемы.

6. Проведена калибровка сигнала сцинтилляционного детектора по черенковскому излучению.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ, кафедры космических лучей и физики космоса физического факультета МГУ, а также на следующих рабочих встречах и конференциях:

1. 29th International Cosmic Ray Conference, August 03-10, 2005, Pune, India;
2. The 2nd International Workshop on Ultra-high-energy cosmic rays and their sources, INR, Moscow, April 14-16, 2005;
3. Международная научная конференция Ломоносов-2006, 12-15 апреля, 2006, Москва;
4. The 3rd International Workshop on Ultra-high-energy cosmic rays and their sources. GZK-40, INR, Moscow, May 16-18, 2006;
5. QUARKS-2006, 14th International Seminar on High Energy Physics, St. Petersburg, Russia, 19-25 May, 2006;
6. CRIS 2006, Cosmic Ray International Seminar, Ultra-High Energy Cosmic Rays: Status and Perspectives, Catania, Italy, May 29 - June 2, 2006;
7. 29-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 3 - 7 августа 2006.

Публикации

Основные результаты работы диссертации изложены в 7 публикациях, список которых приведён в конце автореферата.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 111 страницах, включает в себя 78 иллюстраций, 11 таблиц; состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 139 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется основная цель, новизна работы, раскрывается практическая и научная значимость исследования, а также перечисляются положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены различные наземные и спутниковые детекторы, созданные и предлагаемые в последние десятилетия, рассматривается используемая техника, процедуры обработки экспериментальных данных на различных установках по регистрации ШАЛ.

Во второй главе приводятся описания методов моделирования ШАЛ, рассматриваются их преимущества и недостатки. Также кратко рассмотрены программные пакеты и модели взаимодействия частиц, используемые для описания прохождения ливней через атмосферу и вещество. Приводится описание гибридной схемы, реализованной автором.

В третьей главе приведено описание геометрии детектора и описывается процедура расчета функций пространственного распределения и полного потока черенковского света в широких атмосферных ливнях.

Метод расчёта характеристик черенковского света в ГАЛ с энергией E_0 основан на вычислении функции источника, $S_\gamma(E_0, E, x)$ и $S_e(E_0, E, x)$ – гамма-квантов и электронов с энергиями $E \leq 10 \text{ ГэВ}$ и генерировавших каскады на глубине x с использованием кода CORSIKA и модели QGSJET01, и базы данных – функций пространственного распределения черенковского света

$ch_e(E, x, R)$, $ch_\gamma(E, x, R)$ в ливнях от электронов и гамма-квантов с энергиями $E \leq 10 \text{ ГэВ}$ и $E \geq 0.02 \text{ ГэВ}$. При интегрировании по энергии E и глубине x получаем функции пространственного распределения ЧС в ГАЛ с энергией E_0 на глубине x_0 :

$$\rho_{Ch}(E_0, R) = \int_0^{x_0} dx \int_{0.02}^{10} S_\gamma(E_0, E, x) \cdot ch_\gamma(E, x, R) dE + \int_0^{x_0} dx \int_{0.02}^{10} S_e(E_0, E, x) \cdot ch_e(E, x, R) dE \quad (1)$$

где $x_0 = 1020 \text{ г/см}^2$ - глубина уровня наблюдения.

База данных для черенковского света была получена для двух типов частиц, генерировавших ливень, - электронов и гамма-квантов. Использовалось 10 точек по энергии в диапазоне от 20 МэВ до 10 ГэВ; 21 точка для глубин зарождения в диапазоне от 0 г/см² до 1050 г/см²; 80 точек для расстояний от оси ливня в диапазоне от 0 до 2000 м; 14 точек для зенитных углов в диапазоне 0° - 60°. По радиусу шкала выбиралась в двух вариантах: линейном и логарифмическом. Статистика ливней для каждого набора параметров составляла 10⁴ - 10⁵ событий в зависимости от эксперимента. Всего было разыграно около 10⁹ ливней, что на 4-х машинах класса AMD Athlon 2200 МГц заняло около 3 месяцев. Для каждого из выбранных параметров рассчитывались как БД ЧС, так и функции источника для экспериментов "ЯКУШАЛ" и "Тунка".

По БД ЧС и функции источника вычислялись ФПР ЧС для первичного протона. В роли первичных частиц кроме протонов рассматривались также и ядра железа для значений углов 0° и 45°.

При численном счете плотности черенковских фотонов, для первичной частицы с энергией E_0 , в зависимости от расстояния R от оси ливня интеграл (1) считается интерполяцией по БД ЧС:

$$\rho_{Ch}(R) = \sum_{i=1}^{N_\gamma} W_i \cdot ch_\gamma(E_i, x_i, R) + \sum_{j=1}^{N_e} W_j \cdot ch_e(E_j, x_j, R), \quad (2)$$

где W_i, W_j - вес частицы из функции источника, N_γ - число гамма-квантов в ливне, N_e - число электронов в ливне.

Оценка полного потока ЧС Q проводилась интегрированием по расстоянию от оси R функции пространственного распределения ЧС:

$$Q(E_0) = 2\pi \int_0^{1000} R \cdot \rho_{Ch}(R, E_0) dR, \quad (3)$$

где $\rho_{Ch}(R, E_0)$ - ФПР ЧС ливня от частицы с энергией E_0 .

Были исследованы также флуктуации ФПР ЧС для энергий 10^{18} эВ и 10^{19} эВ.

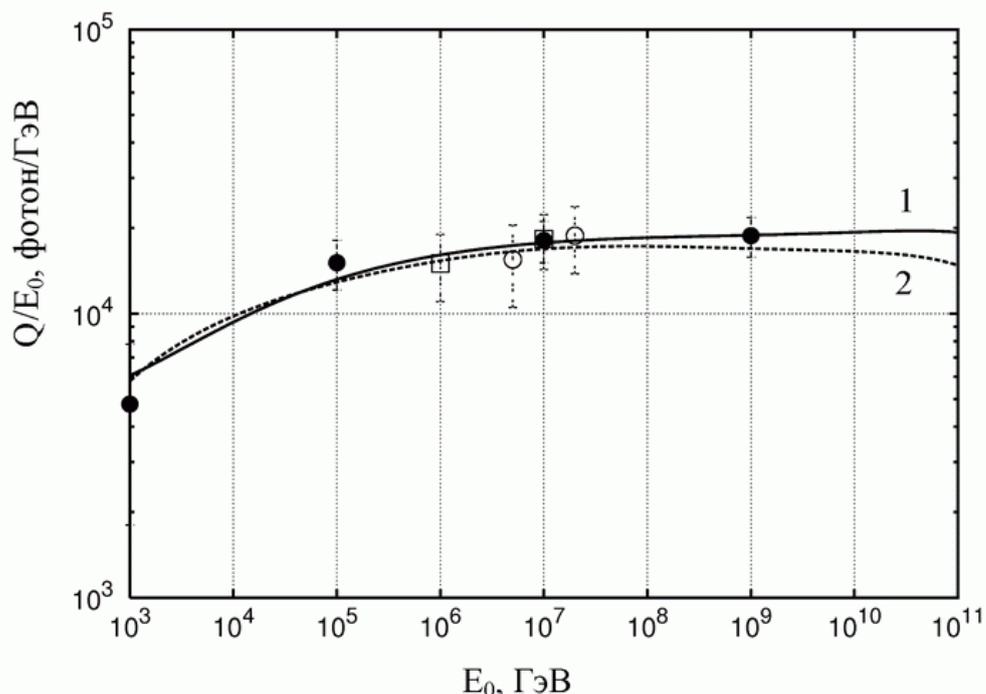


Рис.1. График зависимости полного потока черенковского света от первичной энергии. Сплошная кривая 1 - расчёт для эксперимента "ЯКУШАЛ", $\epsilon=10^{-6}$; пунктирная кривая 2 - расчёт для эксперимента "Тунка", $\epsilon=10^{-5}$; черные закрашенные кружки расчёт для эксперимента Тунка, $\epsilon=10^{-7}$; незакрашенные кружки - расчетные точки эксперимента "Тунка" [2]; незакрашенные квадраты - расчёт для эксперимента "Сфера-2" [1].

На рис.1. проведено сопоставление результатов наших расчётов полного потока черенковского света, отнесённого к энергии первичной частицы $Q(E_0)/E_0$, экспериментов "ЯКУШАЛ" и "Тунка" с

данными расчётов для эксперимента "Тунка" и для эксперимента "Сфера-2" других авторов [1,2]. Все данные приведены к интервалу длин волн, которые используются в эксперименте "Тунка". Для расчетных данных приводится соответствующий параметр thinning ε . Данные для эксперимента "Тунка" рассчитывались авторами работы [2] с использованием прямого метода Монте-Карло (МК) по программе CORSIKA. Данные для эксперимента "Сфера-2" тоже рассчитаны прямым МК-методом [1]. Как видно из рис.1, данные разных работ согласуются в пределах 10-15% в зависимости от значения энергии E_0 ливня.

В четвёртой главе описывается моделирование части процесса образования флуоресцентного света от ливней – а именно моделирование выделенной в атмосфере энергии в рамках гибридной схемы. Приводится описание процедуры расчёта БД выделенной энергии по созданной автором программе. Программа расчета базы данных основана на использовании кода GEANT4, поскольку было необходимо учитывать все физические процессы в области малых энергий и низкие пороги по энергии для вторичных частиц.

Атмосфера рассматривалась как огромный калориметр, в котором выделяется энергия ливня. Была получена зависимость величины выделенной энергии $\Delta E(E, R, h)$ в кольцевых цилиндрах от расстояния R до оси ливня, энергии E и типа частицы (электрона или гамма-кванта) и высоты в атмосфере h .

Геометрия детекторов выбиралась в форме цилиндра. Каждый цилиндр имел высоту 50 км и состоял из 100 полых цилиндров, которые в свою очередь разбивались по высоте на 1000 частей – цилиндрические кольца. Радиус самого внешнего цилиндра составлял 2 км. Всего таких объемов было 10^5 .

Для электронов и фотонов с энергиями 0.001 – 10 ГэВ методом Монте-Карло рассчитывались каскады, которые начинались на различных глубинах в атмосфере и оценивались величины выделенной энергии ΔE в заданных объемах. Расчет выделенной

энергии в ГАЛ выполнялся с помощью функций источника, как и в случае расчетов черенковского излучения (см. формулу (1)).

При численном счете зависимости поглощённой в атмосфере энергии, для первичной частицы с энергией E_0 , от расстояния r от оси ливня интеграл рассчитывается интерполяцией по БД поглощённой энергии:

$$\Delta E(R) = \sum_{i=1}^{N_\gamma} W_i \cdot \Delta E(E_i, x_i, R) + \sum_{j=1}^{N_e} W_j \cdot \Delta E(E_j, x_j, R), \quad (5)$$

где W_i, W_j - вес частицы из функции источника, N_γ - число гамма-квантов в ливне, N_e - число электронов в ливне.

В пятой главе на основе полученных результатов главы 3 оценивается энергия ГАЛ по черенковскому свету для эксперимента "ЯКУШАЛ". Плотность $Q(400)$ черенковских фотонов на расстоянии 400 м от оси ливня можно использовать как для оценки энергии E ливня, так и для калибровки других параметров (см. Рис.2), например, сигнала $s(600)$ и параметра $\rho_\mu(600)$ - плотности мюонов с энергией выше 1 ГэВ, регистрируемой на расстоянии 600 м от оси ливня.

При одном и том же значении параметра $Q(400)$, пропорциональном энергии ливня, расчетная плотность сигнала $s(600)$ в ~ 1.6 раз больше экспериментальной.

Приводится также анализ оценки энергии E_0 ливней по флуоресцентному свету ГАЛ. Этот анализ для зависимости доли полной энергии, выделенной в цилиндре с радиусом R м, от расстояния R для энергий 10^{18} , 10^{19} и 10^{20} эВ показал, что 90% энергии ливня заключено в пределах расстояний 280, 300 и 320 м от оси ливня соответственно (см. Рис.3). 95% энергии генерируется в пределах ~ 500 м. Это означает, что при регистрации флуоресцентного света с малых расстояний (порядка ~ 5 км) и при величине угла сбора света детектором порядка

$\sim 1.3^0$ собирается примерно 65% света. Только для расстояний > 25 км регистрируется $\geq 95\%$ света при таком же угле сбора.

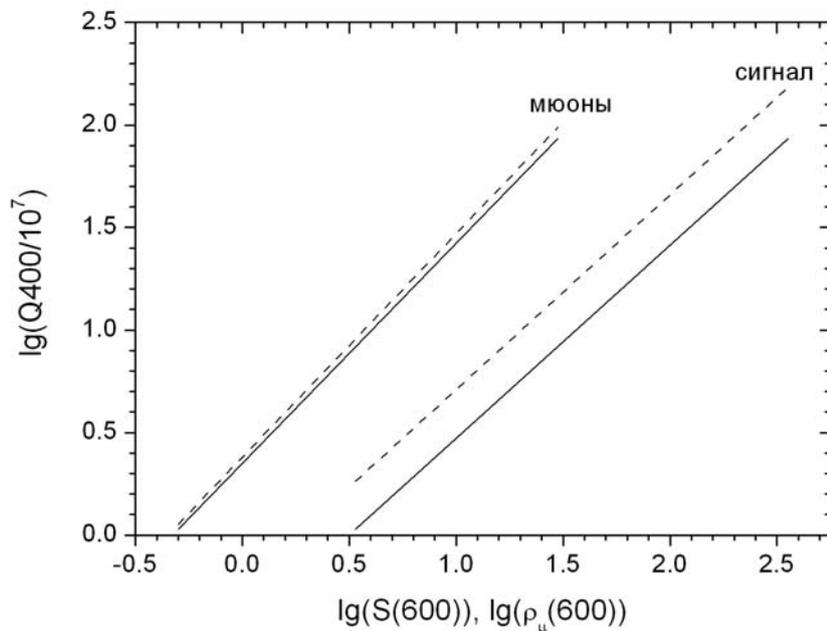


Рис.2. Зависимость параметра $Q(400)$ от сигнала $s(600)$ и плотности мюонов $\rho_\mu(600)$ с энергией выше 1 ГэВ. Сплошные линии – расчёт, пунктир – эксперимент “ЯКУШАЛ” [3,4].

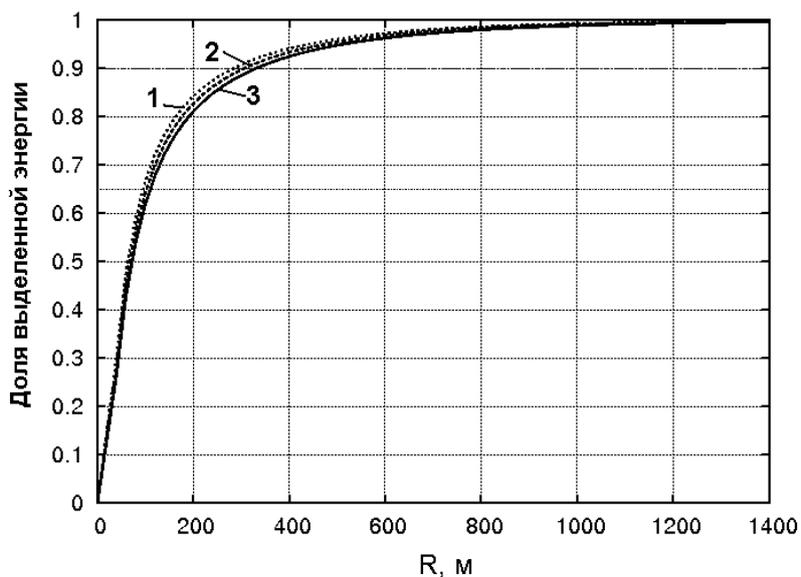


Рис.3. Доля выделенной энергии в зависимости от расстояния до оси ливня для различных первичных энергий: 1 – 10^{18} эВ, 2 – 10^{19} эВ, 3 – 10^{20} эВ

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Реализован метод расчета характеристик черенковского и флуоресцентного света в ГАЛ, основанный на вычислениях функций источника и базы данных и позволяющий учитывать физические флуктуации при развитии индивидуальных ливней.
2. Созданы подробные базы данных по функциям пространственного распределения черенковского света и пространственным распределениям поглощённой в атмосфере энергии с использованием кодов CORSIKA и GEANT4 в ливнях, генерированных электронами и гамма-квантами с энергиями $\leq 10 \text{ ГэВ}$ на разных глубинах атмосферы.
3. Реализована модификация кода CORSIKA, позволившая получить функции источника электронов и гамма-квантов с энергиями E ниже пороговой ($E \leq 10 \text{ ГэВ}$).
4. Функция пространственного распределения черенковского света, рассчитанная автором для детекторов установки "Тунка", хорошо согласуется с экспериментальными данными и результатами расчетов из других работ в области энергий $10^{15} - 10^{16}$ эВ.
5. Показано, что рассчитанные зависимости как полного потока черенковского света, так и плотности потока на расстоянии 400 м от оси ливня от энергии ливня согласуются с используемыми данными в эксперименте "ЯКУШАЛ" с погрешностью 5 - 10%.
6. Из сопоставления расчетной зависимости параметра $Q(400)$ от величины сигнала $s(600)$ с экспериментальной показано, что оценки энергии ГАЛ, используемые в эксперименте "ЯКУШАЛ", отличаются в $\sim 1,6$ раза от расчётных.
7. Показано, что пространственное распределение флуоресцентного света очень широкое: на расстояниях более 100 м от оси ливня генерируется до 35-40% флуоресцентного света, а не $\sim 10\%$, как показано в работе [5].

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Galkin V.I., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Shoziyoev G.P., Pravdin M.I., Sleptsov I.E., Kolosov V.A., Glushkov A.V. and Knurenko S.P. A Calibration of Energy Estimates of Giant Air Showers with Help of the Cherenkov Radiation. Proc. of 29th ICRC, Pune, 2005, 07, pp.219-222.
2. Деденко Л.Г., Роганова Т.М., Шозиёев Г.П. Новый метод расчета функции пространственного распределения (ФПР) черенковского света в гигантских атмосферных ливнях (ГАЛ). Сборник трудов межд. конф. по фунда. наукам "Ломоносов-2006", секция "Физика", т.1. стр.21.
3. Kirillov A.A., Kirillov I.A., Shoziyoev G.P. Approximation of measured longitudinal development of EAS at ultra high-energies with errors taken into account. 29th ICRC, Pune, 2005, 07, pp.259-262.

Следующие работы приняты к публикации:

1. Деденко Л.Г., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Фёдорова Г.Ф., Федунин Е.Ю., Шозиёев Г.П. Калибровка энергии гигантских атмосферных ливней с использованием черенковского и флуоресцентного света. Ядерная физика (принята к публикации)
2. Dedenko L.G., Fedorova G.F., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Shoziyoev G.P. Various approaches of energy estimation of giant air showers. Proc. of 14th International Seminar on High Energy Physics, (accepted to publication)
3. Деденко Л.Г., Подгрудков Д.А., Роганова Т.М., Фёдорова Г.Ф., Федунин Е.Ю., Шозиёев Г.П.. Методы получения оценок энергии ГАЛ. Известия РАН (принята к публикации)
4. Dedenko L.G., Fedorova G. F., Fedunin E.Yu., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Shoziyoev G.P. New estimates of

energy of giant air showers observed at Yakutsk array.
Nucl. Phys. B (accepted to publication).

Ссылки на литературу:

- [1] А.М.Анохина и др. // Докл. на 29 ВККЛ, г.Москва. 2006. В публикации.
- [2] Буднев Н.М. et al. // Изв. РАН, 2005, Серия физическая, Том 69, №3, С.343.
- [3] Слепцов И.Е. Диссертация на соискание степени д.ф.-м.н. в форме научного доклада, ФИАН им. П.Н. Лебедева, 1991, Москва.
- [4] Knurenko S.P. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 2005; [arXiv:astro-ph/0411483].
- [5] Gora D. et al. // Proc. 29th ICRC. Pune. 2005. V. 7. P. 191.

Работа поступила в ОНТИ 17 октября 2006 г.
Цифровая печать. Тираж 100 экз.
Заказ № Т-259
Отпечатано в типографии КДУ
Тел. (495) 939-40-36. E-mail: press@kdu.ru