

**Научно-исследовательский институт ядерной физики  
имени Д.В. Скобельцына  
Московского Государственного Университета  
имени М.В. Ломоносова**

на правах рукописи

Подгрудков Дмитрий Аркадьевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА СИГНАЛОВ  
В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРАХ ЧАСТИЦ И  
ДЕТЕКТОРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА ОТ  
ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ.**

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2011

Работа выполнена в отделе излучений и вычислительных методов Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, г. Москва.

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

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

**Рубцов Григорий Игоревич,**  
кандидат физико-математических наук,  
ОТФ ИЯИ РАН

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится «9» декабря 2011 года в \_\_\_\_\_ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1. стр. 5 («19-й корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 года.

Учёный секретарь  
Совета по защите докторских и  
кандидатских диссертаций  
Д 501.001.77, профессор

С.И. Страхова

## Актуальность темы

Во всех крупных экспериментах (Haverah Park [1,2], ЯкуШАЛ [3], AGASA [4], Fly's Eye [5], HiRes [6], Pierre Auger Observatory (Auger) [7,8]), проведенных ранее, были зафиксированы ливни с энергиями в области обрезания спектра ( $10^{19} - 10^{20}$  эВ). Это может быть связано с наличием близких источников частиц таких энергий или особенностями источников. На рис. 1 приведены результаты основных современных экспериментов по изучению космических лучей (КЛ) в области сверхвысоких энергий: ЯкуШАЛ [9,10], AGASA [4], HiRes [11], Auger [12]. Как видно из рисунка, нет достаточного согласия между экспериментами относительно наличия высокоэнергетичного обрезания – эффекта Грейзена-Зацепина-Кузьмина (эффект ГЗК) [13,14]. Расчётный спектр КЛ в приближении одинаковых, равномерно распределённых источников со степенным неограниченным спектром приведён на рисунке 2. Эксперимент AGASA прямо полагает отсутствие обрезания в области энергий более  $3 \cdot 10^{19}$  эВ и продолжение

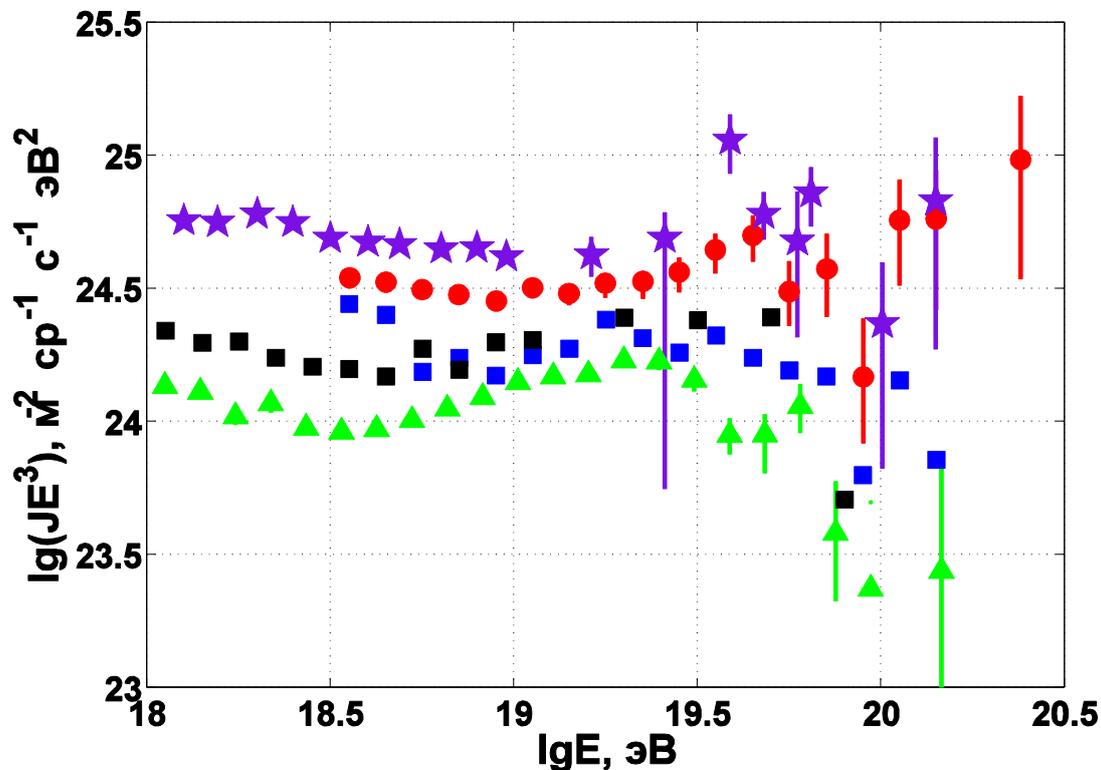


Рис. 1. Спектры КЛ в области сверхвысоких энергий согласно результатам основных экспериментов: Якутск (звёздочки) [9], AGASA (кружки) [4], HiRes I и II (чёрные и синие квадраты соответственно) [11] и Auger (треугольники) [12].

спектра с уменьшением наклона спектра. Эксперимент HiRes наблюдает эффект ГЗК [15], эксперимент Auger подтверждает данные HiRes [16]. Данные Якустка не позволяют сделать однозначный вывод о поведении спектра в области энергий выше  $10^{20}$  эВ. Относительно полного потока КЛ с энергией более  $10^{18}$  эВ также существуют серьёзные расхождения. Разница между данными Якутского эксперимента и данными Auger для энергии  $2 \cdot 10^{18}$  эВ составляет 7-8 раз. Выводы о типе первичной частицы в этой области энергий также расходятся: AGASA и HiRes полагают первичными частицами протоны, Auger – ядра железа. Более того, из приводимых этими экспериментами данных видно, что результаты Якутского эксперимента и эксперимента AGASA (оба – наземные массивы детекторов!) лежат выше данных HiRes и Auger (первый – это чисто флуоресцентный детектор, второй калибруется по флуоресцентным телескопам) на 30-35%. В эксперименте Telescope Array (гибридному эксперименту, откалиброванному по флуоресцентному свету) наблюдается систематическое 27-30% различие между энергией ливня, определённой по флуоресцентным данным, и энергией, определённой по данным наземных сцинтилляционных детекторов [17]. Т.е. существует противоречие между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными.

Таким образом, задача надёжного определения энергии ШАЛ является актуальной. Традиционно энергию ШАЛ оценивают по какому-либо ливневому параметру. Например, в экспериментах на установках AGASA и ЯкуШАЛ для оценки энергии ШАЛ используется плотность энерговыделения в сцинтилляционном детекторе на расстоянии 600 м от оси вертикального ливня (параметр  $s_0(600)$ ) [4,18]. В эксперименте Auger для оценки энергии применяется параметр  $s_{38}(1000)$  – плотность энерговыделения в детекторе на расстоянии 1000 м от оси ливня с зенитным углом  $38^\circ$  [19]. Так как необходимо оценивать энергию ливней, падающих на детектор под произвольными углами, а также оценивать энергию ливней, для которых нет прямых данных на заданном расстоянии от оси ливня, необходимо знать пространственную структуру ШАЛ.

Для любого детектора частиц ШАЛ существует проблема полной регистрации сигнала. Каждый детектор после

срабатывания (в детектор попадает частица, скорость счёта превышает некоторый уровень, приходит сигнал с другого детектора и т.д.) регистрирует сигнал в течение некоторого времени, так называемого времени сбора (или временных ворот). Время сбора должно быть достаточно большим, чтобы пропустить по возможности все частицы от данного ливня. С другой стороны, так как всегда присутствует фон от космических лучей низкой энергии или локальных источников (радиоактивность, световое загрязнение атмосферы и т.д.), время сбора сигнала не должно быть слишком большим, чтобы отношение сигнал/шум было всё ещё достаточно высоким. Таким образом, время сбора сигнала должно быть примерно равным толщине диска соответствующей компоненты ливня. На многих установках (Haverah Park, Volcano Ranch, Якутск) временные ворота были выбраны порядка 2 мкс [18].

А. Уотсон [20] предположил, что быстрый рост крутизны функции пространственного распределения (ФПР) сигналов от ливней с энергией более  $3 \cdot 10^{19}$  эВ, получаемой в эксперименте на Якутской установке, объясняется слишком узкими временными воротами, что приводит к неполному измерению сигнала и, как следствие, к недооценке числа частиц и переоценке энергии. Также им указано, что в экспериментах на Haverah Park были зафиксированы сигналы с шириной более 2.2 мкс.

Таким образом, моделирование пространственно-временной структуры ШАЛ необходимо для проверки корректности выбора ширины временных ворот и принятой методики оценки энергии.

В предыдущих работах [21, 22, 23, 24] рассматривался вопрос о форме диска ШАЛ и о ширине импульсов сигналов в детекторах. Однако, расчёты проводились для иной области энергий или в рамках иных моделей.

### **Цель диссертационной работы:**

- Расчёты временных импульсов сигналов в сцинтилляционных детекторах Якутской установки от частиц широких атмосферных ливней сверхвысокой энергии.

- Расчёты временных импульсов в детекторах излучения Вавилова-Черенкова для Якутской установки от широких атмосферных ливней в области сверхвысоких энергий.
- Моделирование пространственно-временной структуры различных компонент (электронной, гамма, мюонной и черенковской) широкого атмосферного ливня от различных первичных ядер в рамках различных моделей взаимодействия адронов высокой энергии.
- Анализ временных характеристик импульсов в сцинтилляционных детекторах и детекторах излучения Вавилова-Черенкова от ШАЛ в области сверхвысоких энергий.
- Расчёты матриц сигналов в сцинтилляционных детекторах, детекторах излучения Вавилова-Черенкова и матриц плотностей мюонов в подземных сцинтилляционных детекторах мюонов для интерпретации данных, наблюдаемых на Якутской установке.

**В диссертации получены следующие новые результаты:**

- В рамках модели QGSJet-II рассчитана пространственно-временная структура импульсов в сцинтилляционных детекторах, используемых на якутской установке, от ливней высокой энергии ( $10^{18}$ - $10^{21}$  эВ). Показано, что для расстояний 100, 600, 1000 и 1500 м от оси ливня 95% сигнала собирается за 0,1, 1,0, 2,5 и 4 мкс соответственно.
- В рамках модели QGSJet-II рассчитана пространственно-временная структура импульсов излучения Вавилова-Черенкова от ливней высокой энергии ( $10^{18}$ - $10^{21}$  эВ). Показано, что для расстояний 100, 400, 600 и 1000 м от оси ливня 95% сигнала собирается за 50, 100, 400 и 1000 нс соответственно.
- Показано, что в широком интервале расстояний (0 – 2000 м) наилучшей аппроксимацией переднего и заднего фронтов сигналов в сцинтилляционных детекторах и фронтов излучения Вавилова-Черенкова от ливней высокой энергии

( $10^{18}$ - $10^{21}$  эВ) является степенная функция вида  $\sigma = aR^b$  с параметрами  $a_f = 2,1 \cdot 10^{-6}$  и  $b_f = 2,15$  для переднего и  $a_b = 1,09$ ,  $b_b = 1,07$  для заднего фронта сигналов в сцинтилляционных детекторах и параметрами  $a_f = 1,63 \cdot 10^{-3}$  и  $b_f = 1,71$  для переднего и  $a_b = 3,95 \cdot 10^{-2}$  и  $b_b = 1,43$  для заднего фронта излучения Вавилова-Черенкова от вертикального ливня от первичного протона с энергией  $10^{18}$  эВ.

- Рассчитаны ФПР сигналов для крупнейших ливней, зафиксированных Якутской установкой, использованные для оценки энергии ШАЛ на основе сравнения экспериментальных данных с рассчитанным набором индивидуальных ливней. Данным методом получены новые оценки энергии ( $2 \cdot 10^{20}$  эВ для протона и  $1,7 \cdot 10^{20}$  эВ для ядра железа) самого мощного ливня, зафиксированного на Якутской установке. Получены оценки энергии четырёх крупнейших ШАЛ, зарегистрированных на Якутской установке, на основе трёх типов сигналов.

### **Новизна основных результатов.**

Впервые в рамках моделей QGSJet-II и Sibyll на основе пакета CORSIKA получены временные импульсы сигналов в сцинтилляционных детекторах Якутской установки от частиц ШАЛ в области сверхвысоких энергий.

Впервые в рамках моделей QGSJet-II и Sibyll на основе пакета CORSIKA получены временные импульсы излучения Вавилова-Черенкова для Якутской установки от ШАЛ в области сверхвысоких энергий.

Рассчитана в рамках моделей QGSJet-II и Sibyll на основе пакета CORSIKA новая форма фронта заряженных частиц и излучения Вавилова-Черенкова ШАЛ в области сверхвысоких энергий.

Рассчитаны в рамках моделей QGSJet-II и Sibyll на основе пакета CORSIKA матрицы сигналов в сцинтилляционных детекторах, детекторах излучения Вавилова-Черенкова и плотностей мюонов в подземных детекторах, которые необходимы для интерпретации результатов наблюдений Якутской установки.

Получены оценки энергии для нескольких ШАЛ, зафиксированных на Якутской установке, на основе рассчитанных матриц сигналов для разных компонент ливня.

### **Практическая значимость результатов работы.**

Практическая ценность работы состоит в том, что данные расчёты в рамках выбранных моделей позволяют проводить более корректную интерпретацию экспериментальных данных и, в частности, более корректно оценивать энергию ШАЛ и определять природу первичной частицы.

Практическая ценность работы состоит в реализации с помощью полученных баз данных импульсов сигналов сцинтилляционных детекторов и импульсов излучения Вавилова-Черенкова расчётов параметров ШАЛ самых высоких энергий в рамках многоуровневой схемы.

Проведённые расчёты позволяют сделать вывод о корректности измерения сигналов в сцинтилляционных детекторах и детекторах излучения Вавилова-Черенкова на Якутской установке.

Научная ценность работы состоит в корректном расчёте пространственно-временной структуры сигналов в реальных детекторах от ШАЛ высоких энергий, вызванных различными первичными частицами, в рамках различных моделей взаимодействия адронов высоких энергий.

### **Вклад автора.**

На базе оригинальной модификации пакета CORSIKA был разработан алгоритм получения функций источника частиц низкой энергии с произвольным порогом «частица низкой энергии»-«частица высокой энергии» для произвольных моделей.

С помощью модифицированного пакета CORSIKA получены функции источника частиц низкой энергии от ливней высокой энергии для различных моделей взаимодействия адронов высокой энергии.

Проведён анализ функций источника частиц низкой энергии в различных моделях и спектров этих частиц.

Получены базы данных сигналов в сцинтилляционных детекторах Якутской установки от ливней малой энергии и базы

данных импульсов излучения Вавилова-Черенкова в детекторах Якутской установки от ливней малой энергии.

Получены временные импульсы сигналов в сцинтилляционных детекторах Якутской установки от ливней сверхвысокой энергии.

Получены временные импульсы в детекторах излучения Вавилова-Черенкова Якутской установки от ливней сверхвысокой энергии.

### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались на конференциях: Cosmic Rays International Seminar (2004, Catania, Italy), 29<sup>th</sup> International Cosmic Rays Conference (2005, Pune, India), 28-й Всероссийской конференции по космическим лучам (2006, Москва), Cosmic Ray International Seminar (2007, Catania, Italy), 14<sup>th</sup> International Seminar «QUARKS-2006» (2007, Puschino), «Ломоносовские чтения - 2008» (апрель 2008, Москва), конференция «40 лет ГЗК» (2009, Москва), 30-й Всероссийской конференции по космическим лучам (2008, Санкт-Петербург), «Ломоносовские чтения - 2009» (апрель 2009, Москва), 31<sup>st</sup> International Cosmic Rays Conference (2009, Lodz, Poland).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 10 статей в журналах и 2 статьи в трудах конференций.

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

1. Л.Г. Деденко, А.В. Глушков, В.А. Колосов, М.И. Правдин, Т.М. Роганова, И.Е. Слепцов, Г.Ф. Федорова, Е.Ю. Федунин, Д.А. Подгрудков «Интерпретация откликов детекторных станций от гигантского атмосферного ливня с учетом магнитного поля Земли», Известия РАН, сер. физическая, 2004 г, т. 68, № 11, с.1640-1642.
2. L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, D.A. Podgrudkov, A.V. Glushkov, V.A. Kolosov, M.I. Pravdin, T.M. Roganova, I.E. Sleptsov «Energy estimation of inclined air showers with help of detector responses», Nuclear

- Physics B (Proceeding Supplements of Cosmic Ray International Seminar), 2004, N136, pp. 12-17, Catania, Italy.
3. L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, D.A. Podgrudkov, V.I. Galkin, T.M. Roganova, G.P. Shoziyoev, M.I. Pravdin, I.E. Sleptsov, V.A. Kolosov, A.V. Glushkov, S.P. Knurenko «A calibration of energy estimates of giant air showers with help of Cherenkov radiation», Proceeding Supplements of 29<sup>th</sup> International Cosmic Rays Conference, 2005, N 7, p.219-222, Pune, India.
  4. Л.Г. Деденко, Т.М. Роганова, Г.Ф. Федорова, Е.Ю. Федунин, Д.А. Подгрудков, Г.П. Шозиев «Калибровка энергии гигантских атмосферных ливней с использованием черенковского и флуоресцентного света», Ядерная физика, 2007, т.70, №10, с.1806-1811.
  5. Л.Г. Деденко, Т.М. Роганова, Г.Ф. Федорова, Е.Ю. Федунин, Д.А. Подгрудков, Г.П. Шозиев «Методы получения оценок энергии широких атмосферных ливней», Известия РАН, сер. физическая, 2007, т. 71, ном. 4, с. 470-472.
  6. L.G. Dedenko, T.M. Roganova, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, D.A. Podgrudkov, G.P. Shoziyoev «New estimates of energy of giant air showers observed at the Yakutsk array», Nuclear Physics B (Proceeding Supplements of Cosmic Ray International Seminar), 2007, N165, p.27-32., Catania, Italy.
  7. L.G. Dedenko, G.F. Fedorova, E.Yu. Fedunin, D.A. Podgrudkov, G.P. Shoziyoev «Various approaches of energy estimation of giant air showers», Proceeding supplements of the 14<sup>th</sup> International Seminar «QUARKS-2006», 2007, v. 2, p. 333-340.
  8. Л.Г. Деденко, Д.А. Подгрудков, Т.М. Роганова, Г.Ф. Фёдорова «Электронно-фотонные каскады в области сверхвысоких энергий», Вестник Московского университета, 2008 г., №3, с.26-32.

9. Л.Г. Деденко, Д.А. Подгрудков, Т.М. Роганова, Г.Ф. Фёдорова, Г.П. Шозиёв «Расчёт функций пространственного распределения черенковского света ШАЛ в рамках многоуровневой схемы», Вестник Московского университета, 2008 г., №4, с. 6-11.
10. Л.Г. Деденко, Н. Иноуэ, Д.А. Подгрудков, Т.М. Роганова, Г.Ф. Фёдорова «Пространственно-временная структура сигналов в сцинтилляционных детекторах широких атмосферных ливней», Известия РАН, сер. физическая, 2009 г., т. 73, № 5, с. 639-641.
11. Л.Г. Деденко, А.В. Глушков, С.П. Кнуренко, И.Т. Макаров, М.И. Правдин, Д.А. Подгрудков, И.Е. Слепцов, Т.М. Роганова, Г.Ф. Фёдорова «Оценки энергии самого мощного широкого атмосферного ливня, наблюдаённого на Якутской установке», Письма в ЖЭТФ, 2009 г., т. 90, вып. 11, с. 787-792.
12. Д.А. Подгрудков, Л.Г. Деденко, Т.М. Роганова, Г.Ф. Фёдорова «Пространственно-временная структура импульсов в детекторах черенковского света от широких атмосферных ливней», Вестник МГУ, 2010 г., №2, с. 79-81.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из пяти глав, введения, списка литературы. Диссертация насчитывает 134 страницы, 51 иллюстрацию и 6 таблиц. Список литературы содержит 87 ссылок.

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

В **первой** главе диссертации дан обзор литературы по основным экспериментам по регистрации ШАЛ высоких энергий (Якутск, AGASA, HiRes, Auger, TA/TALE) и противоречиям в полученных результатах. Так, эксперимент AGASA противоречит гипотезе ГЗК о высокоэнергетическом обрезании спектра космических лучей в области энергии  $E > 10^{19}$  эВ; эксперимент HiRes, напротив, наблюдает резкое укрупнение спектра в рассматриваемой области; эксперимент Auger подтверждает результаты HiRes; данных Якутского эксперимента в данной области недостаточно для однозначного вывода. Относительно природы первичных частиц КЛ в этой области энергий также нет единого мнения: эксперименты AGASA и HiRes наблюдают лёгкий первичный состав космических лучей, Auger, напротив, наблюдает тяжёлые ядра. Рассмотренные эксперименты основаны на различных методах регистрации ШАЛ: по заряженной компоненте, по излучению Вавилова-Черенкова и флуоресцентному свету. В гибридном эксперименте Telescope Array (флуоресцентные телескопы и наземные тонкие сцинтилляционные детекторы) наблюдается различие между расчётными и экспериментальными данными: оценка энергии ШАЛ, полученная сравнением данных сцинтилляционных детекторов с расчётом, на 27% выше оценки энергии ШАЛ, полученной сравнением данных флуоресцентных телескопов с расчётными ливнями.

Во **второй** главе приведены результаты расчётов импульсов сигналов в сцинтилляционных детекторах Якутской установки от вертикальных ливней от первичных протонов высокой энергии ( $10^{18} - 10^{21}$  эВ) в рамках пакетов CORSIKA 6.500 и GEANT4 методом Монте-Карло с весами. Приведены импульсы сигналов в приближении полубесконечного детектора для различных расстояний от оси ливня (100, 600, 1000, 1250 и 1500 м) и их интегральные характеристики. На рис. 2 приведён пример полученного импульса. Получены оценки времени сбора 95% сигнала детектором на разных расстояниях от оси ливня. Показано, что это время составляет 100 нс (100 м от оси ливня), 1,1 мкс (600 м от оси ливня), 2 мкс (1 км от оси ливня) и 2,5 мкс

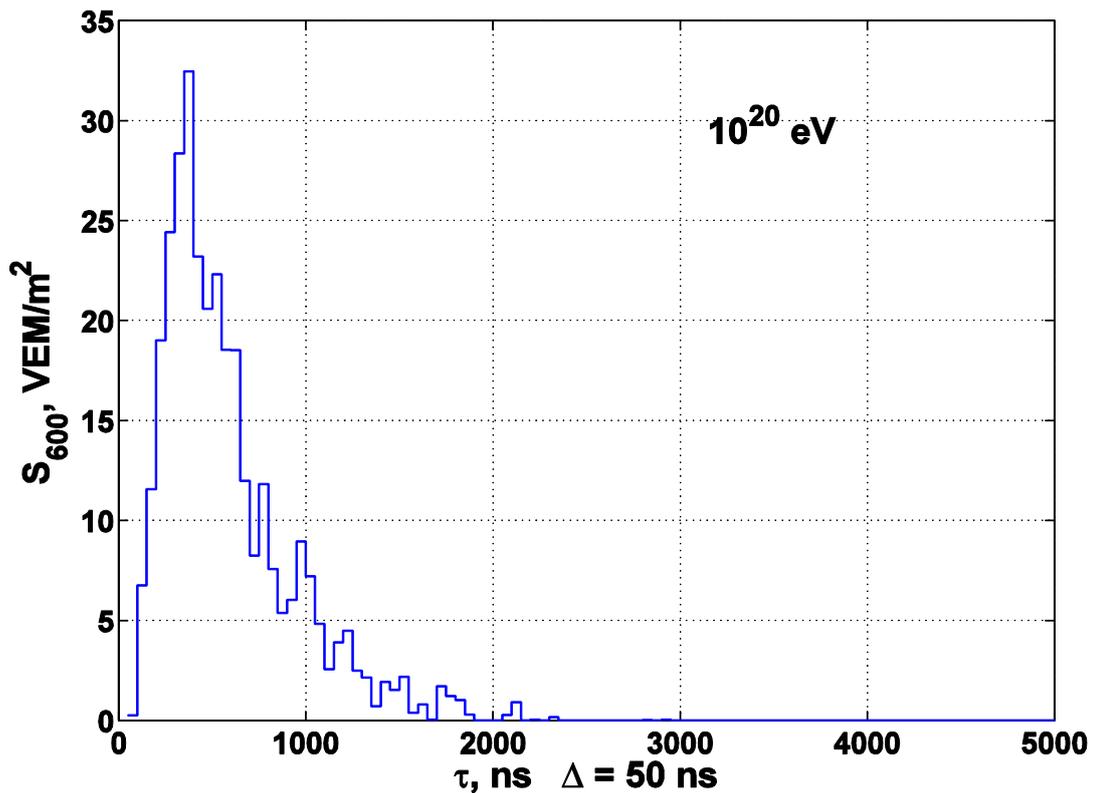


Рис. 2. Импульс сигнала в сцинтилляционном детекторе на расстоянии 600 м от оси вертикального ливня от первичного протона с энергией  $10^{20}$  эВ. Сигнал суммировался в бинах по 50 нс.

(1,5 км от оси ливня) при  $10^{18}$  эВ, и растёт с энергией до 0,1, 1,7, 2,5 и 3,5 мкс (на соответствующих расстояниях от оси ливня) при энергии  $10^{20}$  эВ. Также в данной главе рассмотрена форма переднего фронта ШАЛ в сравнении с экспериментальными данными (за передний фронт принимался момент прихода первой частицы на данное расстояние от оси ливня). Получена новая аппроксимация формы переднего фронта степенной функцией:

$$\sigma = aR^b$$

где параметры  $a$  и  $b$  зависят от энергии следующим образом:

$$a = (9,2 \pm 4,0) \cdot 10^{-5} - (4,2 \pm 2,0) \cdot 10^{-6} \lg(E/1\text{эВ})$$

$$b = (0,8 \pm 0,4) + (7,4 \pm 1,9) \cdot 10^{-2} \lg(E/1\text{эВ})$$

Та же процедура проведена для заднего фронта ливня (за задний фронт ливня принимался момент сбора 95% всего сигнала, выделенного в детекторе на данном расстоянии от оси ливня).

В третьей главе описывается процедура получения функций пространственного распределения излучения Вавилова-

Черенкова (ФПРИВЧ) от вертикальных ШАЛ высокой энергии ( $10^{18} - 10^{20}$  эВ) в рамках модернизированной многоуровневой схемы. Данная схема расчёта, основанная на идее [26], является развитием пятиуровневой схемы [27], и позволяет учесть основные флуктуации в развитии ливня, существенно сокращая при этом время счёта. Основная идея многоуровневой схемы состоит в замене повторяющихся расчётов каскадов от частиц низкой энергии, во множестве встречающихся в ливне, подстановкой к ним заранее насчитанных ФПР или иных распределений (например, по энергии или по углу). В ливне от частицы с энергией  $E_0 = 10^{19}$  эВ частиц с энергией  $E < E_{thr}$  (10 ГэВ) образуется  $E_0 / E_{thr} \sim 10^{10}$  шт, что больше числа ливней от частиц малой энергии, разыгрываемых для создания полной базы ливней малой энергии в рамках многоуровневой схемы. В главе подробно описывается данный метод моделирования ШАЛ на

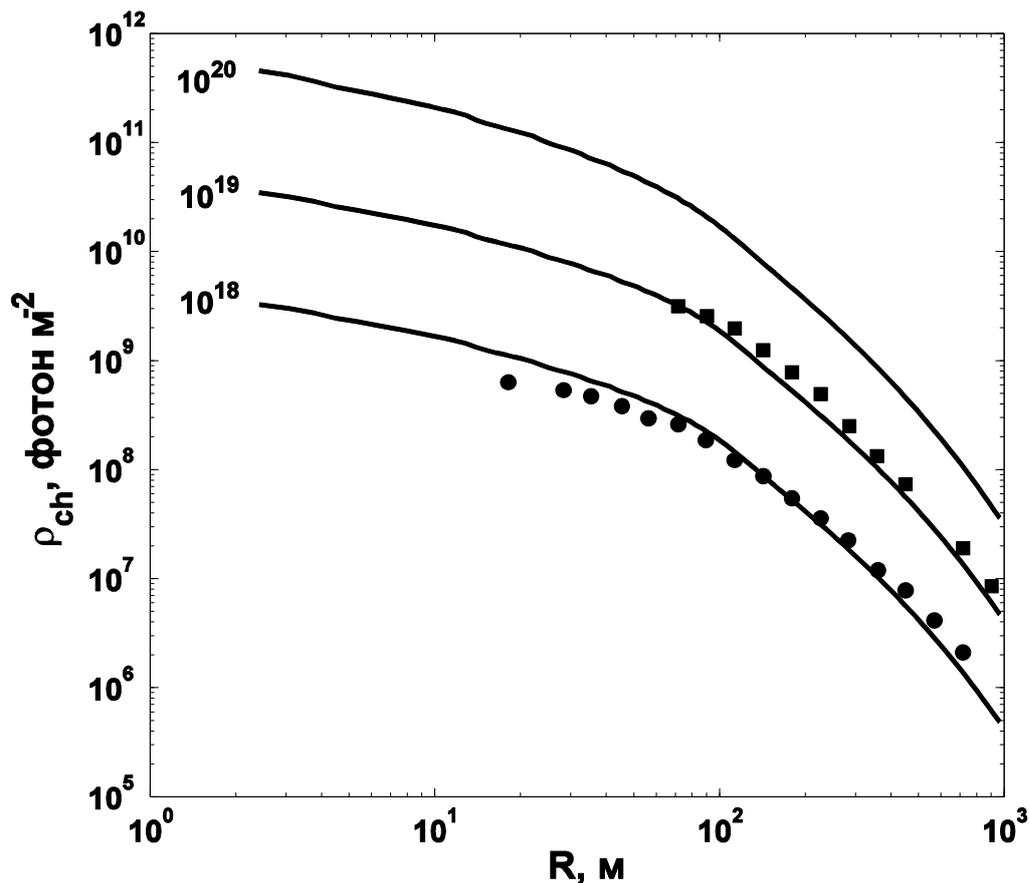


Рис.3. Функции пространственного распределения излучения Вавилова-Черенкова для вертикальных ливней от протона с энергиями  $10^{18}$ ,  $10^{19}$  и  $10^{20}$  эВ. Экспериментальные данные Якутской установки показаны кружками ( $10^{18}$  эВ) и квадратами ( $10^{19}$  эВ) [9].

примере расчётов с использованием пакета CORSIKA: расчёт базы ливней от частиц малой энергии, расчёт функций источника, учёт рассеяния частиц в функции источника. Приводятся результаты расчётов для Якутской установки, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными (см. рис. 3). Также получена связь плотности фотонов излучения Вавилова-Черенкова на расстоянии 400 м от оси ливня ( $Q_{400}$ ) с энергией первичной частицы. На основе этого соотношения получена оценка энергии ливня по параметру  $Q_{400}$ , согласующаяся в пределах ошибок с оценкой, принятой в эксперименте.

В **четвёртой** главе приведены результаты расчётов импульсов излучения Вавилова-Черенкова от вертикальных ШАЛ высокой энергии ( $10^{17} - 10^{20}$  эВ). Расчёты проводились в рамках модернизированной многоуровневой схемы для условий Якутской установки. Для решения этой задачи модернизированная многоуровневая схема была расширена на случай расчётов пространственно-временных распределений. В главе подробно рассмотрена процедура учёта задержки прихода ливня на уровень наблюдения и метод учёта времени при расчётах базы ливней малой энергии и функций источника, позволяющие существенно упростить расчёт и исключить необходимость интерполяции по времени при расчёте итогового пространственно-временного распределения. Далее, для различных расстояний от оси ливня (100, 400, 600 и 1000 м) приведены полученные в расчёте импульсы излучения Вавилова-Черенкова от вертикальных ШАЛ от первичных протонов высокой энергии ( $10^{17} - 10^{20}$  эВ) и их интегральные характеристики. Пример полученного импульса приведён на рис. 4. Показано, что в пределах расстояний  $R < 1$  км от оси ливня весь импульс излучения Вавилова-Черенкова собирается за время менее 750 нс. Рассмотрена форма «переднего» и «заднего» фронтов черенковской компоненты ШАЛ (за передний фронт принимался момент сбора 5% от всего попавшего на детектор излучения, за задний – 95% от полного сигнала). Получены коэффициенты аппроксимации фронта степенной функцией.

В **пятой** главе приведены результаты оценивания энергии 4 крупнейших ливней, зафиксированных на Якутской установке, по различным компонентам ШАЛ (сигналов в сцинтилляционных детекторах частиц, мюонов, ИВЧ). Расчёт выполнен в рамках

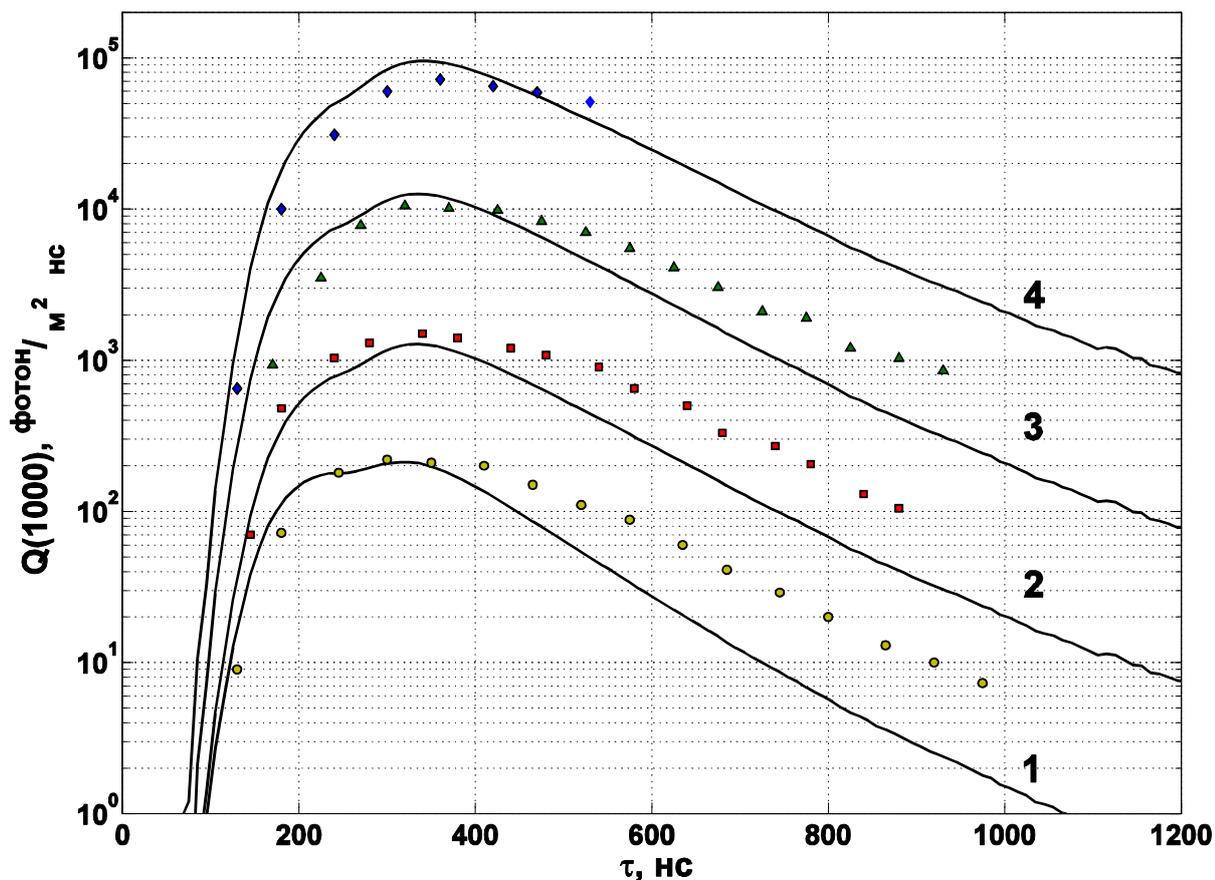


Рис. 5. Импульсы излучения Вавилова-Черенкова на расстоянии 1000 м от оси ливней с различными энергиями от первичных протонов в рамках модели QGSJet-II. Кривая 1 –  $10^{17}$ , кривая 2 –  $10^{18}$ , кривая 3 –  $10^{19}$ , синяя 4 –  $10^{20}$  эВ. Значками приведены данные из работы [22].

двух моделей взаимодействия адронов высокой энергии – QGSJet-II и Sibyll для различных первичных частиц (p и Fe для всех ливней, по 4 искусственных ливня для каждого типа первичной частицы и каждой модели, и дополнительно для самого мощного ливня в рамках модели QGSJet-II He, O и p с удвоенной энергией). Для каждого ливня одновременно рассчитывались все компоненты ливня (распределение заряженных частиц и гамма-квантов, распределение мюонов, распределение фотонов излучения Вавилова-Черенкова). Таким образом, всего (с учётом различных моделей) сгенерировано 76 ливней с энергиями от  $1,56 \cdot 10^{19}$  эВ до  $2 \cdot 10^{20}$  эВ. Оценка энергии ливня производилась методом «по изображению», т.е. путём сравнения экспериментальных данных с индивидуальными двумерными модельными ФПР. Основной целью данного расчёта была попытка оценить энергию ливня и определить тип

первичной частицы, проводя анализ всех компонент одного ШАЛ одновременно. Т.е. по данным сцинтилляционных детекторов определить положение оси ливня, по данным детекторов излучения Вавилова-Черенкова определить энергию ливня, по данным мюонных детекторов определить тип первичной частицы. В рамках данной работы получены новые оценки энергии для каждого ливня. Подтверждена ранее полученная оценка энергии самого мощного ливня, зафиксированного на Якутской установке (см. таблицу 1). По критерию  $\chi^2$  не удалось выбрать преимущественную модель взаимодействия адронов. Провести комплексную оценку ливней не удалось, т.к. оценка энергии по излучению Вавилова-Черенкова даёт на 30-50% более высокую энергию первичной частицы, нежели оценка по сигналам сцинтилляционных детекторов. Оценка энергии по данным мюонных детекторов также оказалась выше на 70-100% относительно энергии, оцененной по сигналам сцинтилляционных детекторов частиц.

**Таблица 1. Оценки энергии крупнейшего ливня, зафиксированного Якутской установкой, по показаниям наземных сцинтилляционных детекторов.**

Ядро	№	s(600)	k	Xm	Ym	$\chi^2$
p	1	27,48	2,04	941	-374	0,88
	2	29,64	2,00	965	-406	0,95
	3	32,18	1,81	948	-425	1,02
	4	27,77	2,27	1011	-421	1,03
He	1	25,11	2,37	956	-408	0,86
	2	33,56	1,76	947	-421	1,00
	3	27,88	2,09	942	-389	0,95
	4	31,33	1,93	955	-439	1,00
O	1	30,73	1,78	909	-363	0,97
	2	31,03	1,86	943	-387	0,94
	3	29,90	1,94	940	-393	0,90
	4	31,66	1,75	912	-428	1,00
Fe	1	34,12	1,60	905	-353	1,08
	2	36,23	1,66	969	-429	1,04
	3	33,05	1,75	935	-437	1,05
	4	35,02	1,69	975	-389	1,01
Эксп.		55,88	1	1055	-406	

В конце диссертации приведены основные результаты и **выводы** диссертационной работы.

### **Цитируемая литература**

- [1] D.M. Edge et al., J. Phys. A, **6**, p 1612 (1973).
- [2] G. Brooke et al., Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, La Jolla, USA, Vol. 2, p.150 (1985).
- [3] G.I. Rubtsov, L.G. Dedenko, G.F. Fedorova et al., Phys.Rev.D, **73**, P. 063009 (2006), arXiv:astro-ph/0601449v1.
- [4] K. Shinozaki, M. Teshima for AGASA Collaboration, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 136, 18-27 (2004).
- [5] D.J. Bird, S.C. Corbato, H. U. Dai et al., Astrophys. J. 424, 491-502 (1994).
- [6] D.R. Bergman on behalf of the High Resolution Fly's Eye Collaboration, arXiv:astro-ph/0609453v1 (15 Sep 2006).
- [7] G. Matthiae on behalf of the Pierre Auger Collaboration, "New results from the Auger Observatory", Invited talk at NO-VE IV International Workshop on "Neutrino Oscillations in Venice" arXiv:0807.1024v1 [astro-ph] (2008).
- [8] F. Schussler for the Pierre Auger Collaboration, 31<sup>st</sup> ICRC, (Lodz, Poland), arXiv:0906.2189v2 [astro-ph.HE] (10 Jul 2009).
- [9] S.P. Knurenko, A.A. Ivanov, M.I. Pravdin et al., Nucl. Phys. B (Proc.Suppl.), **175-176**, p. 201-206 (2008) .
- [10] A.V. Glushkov, I.T. Makarov, M.I. Pravdin, and I.E. Sleptsov, arXiv:0907.0374v1 [astro-ph.HE] (2 Jul 2009).
- [11] D. Bergman for the HiRes Collaboration, Phys. Rev. Lett., 100:101101, (2008).
- [12] J. Abraham, for the Pierre Auger Collaboration, Phys. Lett. B, **685**, p. 239–246 (2010).
- [13] K. Greisen, Phys. Rev. Lett., **16**, 748-750 (1966).
- [14] Г.Т. Зацепин, В.А. Кузьмин, Письма ЖЭТФ, т. 4, вып. 3, с. 114-117 (1966).
- [15] J.W. Cronin, "Recent results from the Pierre Auger Observatory", arXiv:0911.4714v1 [astro-ph.HE] (24 Nov 2009).

- [16] R.U. Abbasia, T. Abu-Zayyada, M. Al-Seadya et al., *Astropart.Phys.*, 32, p. 53-60 (2009).
- [17] B.Stokes for Telescope Array Collaboration, *AIP Conference Proceedings*, **1367**, “International Symposium on the recent progress of ultra-high energy cosmic ray observations”, Aichi, Japan, (2010).
- [18] V.P. Egorova, A.V. Glushkov, A.A. Ivanov et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, **136**, 3-11 (2004).
- [19] C. Di Giulio for the Pierre Auger Collaboration, 31<sup>st</sup> ICRC, (Lodz, Poland), arXiv:0906.2189v2 [astro-ph.HE] (10 Jul 2009).
- [20] A.A. Watson, *Proceedings of the 28<sup>th</sup> ICRC (Tsukuba, Japan) N 1*, P. 373. (2003).
- [21] А.А. Беляев, И.П. Иваненко, Б.Л. Каневский и др., «Электронно-фотонные каскады в космических лучах при сверхвысоких энергиях», Москва, Наука, 1980. 306 с.
- [22] A.M. Anokhina, L.G. Dedenko, G .F. Fedorova et al., *Phys. Rev. D*. **60-3**, 1-14 (1999).
- [23] M. Tluczykont, T. Kneiske, D. Hampf, D. Horns, arXiv:0909.0445v1 [astro-ph.IM] (2 Sep 2009).
- [24] Просин В.В. «Энергетический спектр и массовый состав космических лучей в диапазоне энергий  $10^{15}$  -  $10^{17}$  эВ по данным установок для регистрации черенковского света от широких атмосферных ливней» (2006) Дис. доктора Физ.-мат. Наук. 01.04.16 М.:НИИЯФ.МГУ.
- [25] K. Honda, K. Hashimoto, N. Kawasumi et al., *Phys. Rev. D*, 56, 3833-3843 (1997).
- [26] L.G. Dedenko, *Canadian Journal of Physics*, vol. 46, issue 10, pp. S178-S180 (1968).
- [27] L.G. Dedenko et al., *Proceedings of the 28<sup>th</sup> ICRC (Tsukuba, Japan) N 2*, P. 643. (2003).