

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д. В. Скобельцына

На правах рукописи

Джатдоев Тимур Ахматович

МНОГОМЕРНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
МАССОВОГО СОСТАВА ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ШАЛ

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2011

Работа выполнена в Отделе излучений и вычислительных методов
Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.
Скобельцына.

Научный руководитель:

Галкин Владимир Игоревич
доктор физико-математических наук,
профессор, физический факультет МГУ

Официальные оппоненты:

Калмыков Николай Николаевич
доктор физико-математических наук,
профессор, НИИЯФ МГУ
Мухамедшин Рауф Адгамович
доктор физико-математических наук,
Институт ядерных исследований РАН

Ведущая организация: Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Защита диссертации состоится «27» мая 2011 г. в 15⁰⁰ час. 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 «20» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций,

профессор



С.И. Страхова

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке методов разделения групп ядер первичных космических лучей (ПКЛ) с использованием характеристик черенковского света широких атмосферных ливней (ШАЛ). Работа основана на полном статистическом моделировании черенковского света ШАЛ в диапазоне энергий первичного ядра $10^{15} - 10^{17}$ эВ.

Актуальность темы

Исследование массового состава первичных космических лучей (ПКЛ) сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{15}$ эВ = 1 ПэВ) является одной из самых сложных, до конца еще не решенных задач современной астрофизики высоких энергий. Большой интерес с точки зрения выбора модели ускорения и распространения галактических космических лучей представляет проблема определения состава ПКЛ от 1 до 10 ПэВ. При энергии $E_{knee} = 3-4$ ПэВ показатель спектра космических лучей увеличивается приблизительно на 0.4 по мере повышения энергии, образуя излом (так называемое „колени“ [1]). Природа этого излома в настоящее время не выяснена. Для решения проблемы происхождения „колени“ очень важно знать парциальные спектры групп ядер ПКЛ при энергиях 1–10 ПэВ.

Эксперименты, направленные на прямое измерение состава ПКЛ с помощью детекторов на спутниках и стратосферных баллонах, в настоящее время возможны до первичных энергий $\sim 10^{15}$ эВ и все еще имеют недостаточно большой геометрический фактор для регистрации значительного числа частиц космических лучей сверхвысоких энергий. Поэтому при более высоких энергиях ($E_0 \geq 10^{15}$ эВ), как правило, используются косвенные методы. В этом случае оценка параметров первичной частицы производится посредством анализа характеристик различных компонент ядерно-электромагнитного каскада, инициированного первичным ядром сверхвысокой энергии в атмосфере, называемого широким атмосферным ливнем (ШАЛ). При этом восстановление массы первичного ядра существенно затруднено по сравнению со случаем прямой регистрации ПКЛ.

Результаты многочисленных экспериментов с различными компонентами ШАЛ не дают согласованных результатов не только о парциальных спектрах групп ядер ПКЛ сверхвысоких энергий, но и о зависимости среднего массового числа космических лучей от энергии. В частности, велики расхождения результатов нескольких экспериментов с черенковским светом (ЧС) ШАЛ (BLANCA [2], „Тунка“ [3], BASJE [4]).

Традиционно считается, что характеристики ЧС ШАЛ, используемые для восстановления среднего массового числа ПКЛ (например, широко используемый параметр глубины максимума ливня), слабее зависят от

тонких деталей модели ядро-ядерного взаимодействия, чем характеристики ядерно-активной компоненты ШАЛ. На практике, однако, возникла парадоксальная ситуация: расхождение результатов черенковских экспериментов значительно превышает разброс данных о массовом составе, полученных с помощью анализа заряженной компоненты ШАЛ [5]–[6].

Именно поэтому поиск новых параметров черенковского света ШАЛ, чувствительных к массе первичного ядра, является актуальным.

Цель работы

Целью настоящей работы был поиск критериев разделения групп ядер ПКЛ посредством анализа характеристик ЧС ШАЛ, чувствительных к массе первичного ядра. Задача заключалась в поиске таких величин, которые позволяют оценивать массовое число части событий, и построении критериев индивидуального разделения первичных ядер. При этом была поставлена цель использовать только те характеристики функции пространственного распределения (ФПР) и пространственно-углового распределения (ПУР) ЧС ШАЛ, которые могут быть непосредственно измерены в экспериментах по регистрации черенковского света ливней.

В диссертации получены следующие результаты:

1. На основании детального статистического моделирования формы функции пространственного распределения (ФПР) черенковского света ШАЛ, позволившего хорошо воспроизвести флуктуации этой функции, показана возможность выделения не менее 10 % протонов ПКЛ с зенитными углами в интервале $0-20^\circ$ при энергиях первичной частицы >10 ПэВ и подавлении не менее 99 % потока от более тяжелых ядер.
2. С учетом специфики регистрации ливней в эксперименте СФЕРА-2 показано, что идеализированная модель отклика этого детектора позволяет проводить исследование массового состава первичных космических лучей сверхвысоких энергий в случае расположения детектора на высоте до 1 км над поверхностью отражения.
3. С использованием массива экспериментальных данных, полученных в экспедиции эксперимента СФЕРА-2 на оз. Байкал в 2010 г., исследованы отличия реальных условий регистрации черенковского света ШАЛ от идеализированного случая и реализован комплекс программ, позволяющий производить восстановление наклона спектра всех ядер космических лучей.
4. С учетом флуктуаций пространственно-углового распределения черенковского света (ПУР ЧС) ШАЛ, рассчитанного путем детального

статистического моделирования, предложена новая многомерная методика разделения групп ядер ПКЛ сверхвысоких энергий, основанная на характеристиках этого распределения и обладающая наилучшей на сегодняшний день чувствительностью к массе первичного ядра, измеряемой по компонентам ШАЛ.

5. Предложен подход к поиску характеристик ПУР ЧС ШАЛ, обладающих высокой чувствительностью к массе первичного ядра. В качестве величин, используемых для разделения групп ядер ПКЛ, в данном случае используются отношения интегралов по различным областям ПУР ЧС ШАЛ.

Новизна основных результатов

В диссертации:

1. Впервые подробно исследованы критерии индивидуальной делимости групп ядер ПКЛ сверхвысоких энергий, основанные на форме ФПР ЧС ШАЛ.

2. Построена идеализированная модель детектора СФЕРА-2, способная осуществлять разделение групп ядер ПКЛ при энергиях > 10 ПэВ. Таким образом, впервые показана принципиальная возможность исследования массового состава ПКЛ по отраженному ЧС ШАЛ, несмотря на значительные флуктуации числа собираемых фотонов, характерные для этого метода регистрации ливней.

3. Разработана модель отклика детектора СФЕРА-2, методика расчета эффективного геометрического фактора регистрации ливней, оценки параметров ШАЛ и восстановления наклона спектра ПКЛ в этом эксперименте.

4. Впервые подробно исследованы многомерные критерии делимости групп ядер ПКЛ сверхвысоких энергий, основанные на характеристиках ПУР ЧС ШАЛ.

5. Найдены новые параметры, позволяющие существенно повысить чувствительность этой последней методики к массе первичного ядра.

Научная и практическая ценность работы

В диссертации:

1. Представлена подробная информация о флуктуациях формы ФПР ЧС ШАЛ, инициированных ПКЛ сверхвысоких энергий, в зависимости от массы первичного ядра для различных энергий и моделей ядро-ядерного взаимодействия.

2. Разработан общий подход к процедуре восстановления массы первичного ядра части ливней с учетом экспериментальных неопределенностей оценки параметров ШАЛ и описаны алгоритмы, реализующие этот подход.

3. На примере конкретного эксперимента СФЕРА-2 описан подход к

построению процедуры обработки данных в эксперименте по регистрации ЧС ШАЛ, а также описаны алгоритмы и характеристики программного кода, реализующего этот подход.

4. Даны новые сведения о флуктуациях ПУР ЧС ШАЛ, инициированных ПКЛ сверхвысоких энергий, в зависимости от массы первичного ядра, энергии первичной частицы и положения уровня наблюдения.

5. Разработан подход к поиску характеристик ПУР ЧС ШАЛ, обладающих высокой чувствительностью к типу первичного ядра.

Модели и методы, разработанные в диссертации, используются в процессе обработки данных эксперимента СФЕРА-2 и могут быть использованы при обработке следующего поколения экспериментов с ЧС ШАЛ, способных производить детальное измерение пространственного или пространственно-углового распределения черенковского света ливней.

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертации определяется использованием хорошо оттестированных кодов, которые применяются в подавляющем большинстве современных экспериментов с различными компонентами ШАЛ; использованием методов полного статистического моделирования, корректно описывающих флуктуации величин ЧС ШАЛ, а также сопоставлением с расчетами и результатами экспериментов, проведенных другими авторами.

Личный вклад автора

Автором диссертации разработаны: коды, предназначенные для разделения групп ядер ПКЛ сверхвысоких энергий по характеристикам ПУР ЧС ШАЛ, алгоритм разделения групп ядер ПКЛ сверхвысоких энергий с учетом экспериментальных неопределенностей оценки параметров ШАЛ, методика обработки данных в эксперименте СФЕРА-2 и алгоритм разделения групп ядер по характеристикам ПУР ЧС ШАЛ. Все публикации по теме диссертации написаны автором.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ в 2008 и 2010 г., Ломоносовских чтениях 2009–2010 гг., а также на следующих конференциях:

30-ая Всероссийская конференция по космическим лучам, Санкт-Петербург, 2–7 июля 2008 г.;

31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 7–15 July 2009 (31-ая

Международная конференция по космическим лучам, Лодзь, Польша, 2009); 31-ая Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 5–9 июля 2010 г.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, 5 приложений и списка литературы; содержит 37 рисунков и 10 таблиц; список литературы включает 95 наименований. Объем диссертации — 148 страниц.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели работы, описывается новизна использованного подхода к задаче исследования массового состава первичных космических лучей (ПКЛ), а также перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** подробно описан современный статус проблемы массового состава и источников космических лучей сверхвысоких энергий. Рассматриваются модели возможных источников космических лучей с энергиями $10^{15} - 10^{17}$ эВ. Показывается, что именно различные предсказания парциальных спектров групп ядер ПКЛ являются наиболее яркими характерными чертами многих моделей ускорения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий. Приводится обзор методов исследования состава ПКЛ по различным компонентам широких атмосферных ливней (ШАЛ). Отдельно рассматриваются результаты восстановления массового состава космических лучей, выполненного с использованием черенковского света ШАЛ. В целом, обзор состояния проблемы массового состава ПКЛ позволил выделить характерные черты методики, которая, по-видимому, способна обеспечить существенное продвижение в задаче восстановления парциальных спектров групп ядер ПКЛ.

Во **второй главе** разработана методика разделения групп ядер ПКЛ по данным о функции пространственного распределения (ФПР) ЧС ШАЛ $\rho(r)$. Моделирование ФПР и пространственно-временного распределения ЧС ШАЛ выполнено с помощью стандартного кода CORSIKA [7] с использованием двух вариантов моделей ядро-ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях — QGSJET-I [8] и QGSJET-II [9], а также модели ядро-ядерного взаимодействия при низких энергиях GHEISHA [10].

Для разделения групп ядер ПКЛ использовался параметр наклона ФПР ЧС η , равный отношению чисел черенковских фотонов, попадающих внутрь двух колец:

$$\eta(r_1, r_2, r_3, r_4) = \frac{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi\rho(r)dr}{\int_{r_3}^{r_4} 2\pi\rho(r)dr}, \quad (1)$$

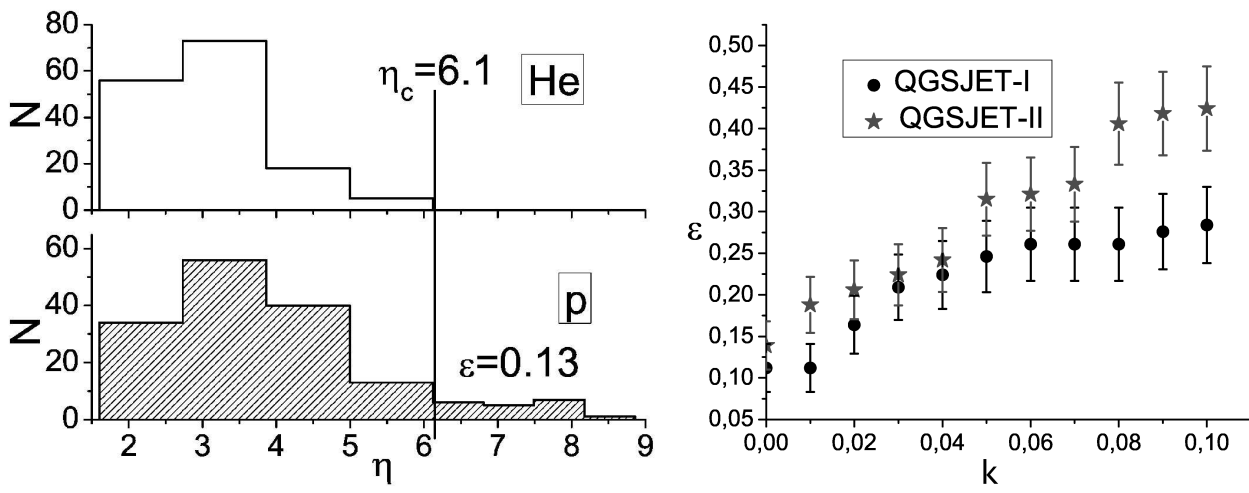


Рис. 1: Слева: Гистограммы распределений по величине $\eta_0 \equiv \eta(0, 130, 250, 350)$ для случая энергии 10 ПэВ и модели QGSJET-II для первичных ядер гелия (сверху) и протонов (снизу). Также на рисунке показаны η_c — порог выделения протонов (обозначен вертикальной линией с указанием численного значения) и ϵ — доля выделенных протонных событий. Справа: Зависимость доли выделенных первичных протонов ϵ от доли неправильно классифицированных событий от ядер гелия k для случая моделей QGSJET-I и QGSJET-II. Первичная энергия всех ливней 10 ПэВ

где (r_1, r_2) - внутренний и внешний радиус меньшего кольца, соответственно; (r_3, r_4) - внутренний и внешний радиус большего кольца.

Плотность вероятности $f(\eta)$ параметра наклона ФПР η в случае первичных протонов спадает с ростом η медленнее, чем в случае первичных ядер гелия. Этот факт позволяет выделять известную часть протонов из смешанной выборки протоны+гелий (см. рис. 1, слева). Доля выделенных событий определяется моделью развития ливня и может быть вычислена.

На рис. 1 (справа) приведена зависимость доли выделенных первичных протонов от доли ядер гелия, ошибочно классифицированных как протоны для случая этого критерия, моделей взаимодействия QGSJET-I/QGSJET-II и первичной энергии 10 ПэВ. Показан коридор значений $\epsilon \pm \sqrt{\epsilon}$, обозначающий характерную статистическую погрешность вычисления ϵ . В пределах значений $k= 0.02-0.04$ доля выделенных протонных событий ϵ слабо зависит от варианта модели ядро-ядерного взаимодействия QGSJET-I/QGSJET-II.

Исследована чувствительность критериев вида (1) к значениям параметров r_i . При этом учитывалась конечность пространственного разрешения δr модели детектора, с помощью которого проводится выделение части первичных протонов; это приводит к требованию $r_4 \geq r_3 + \delta r, r_2 \geq r_1 + \delta r$. Доля выделенных протонных событий ϵ уменьшается от 0.12 до 0.10 при увеличении δr от 40 до 280 м в случае модели QGSJET-I и от 0.15 до 0.10 в случае модели QGSJET-II при изменении δr в тех же пределах.

Кроме того, в главе 2 была разработана идеализированная модель отклика конкретного детектора СФЕРА-2, а также методика восстановления параметров ливней $(\theta_0, \phi_0, x_0, y_0, E_0)$ (θ_0 и ϕ_0) — зенитный и азимутальный углы плоскости ливня, соответственно, $(x_0$ и $y_0)$ — координаты оси ливня на плоскости наблюдения, E_0 — энергия первичного ядра).

СФЕРА-2— это черенковский телескоп, поднятый на высоту 1-3 км над уровнем поверхности о. Байкал с помощью аэростата и регистрирующий свет, отраженный от снежной поверхности. Оптическая схема детектора выполнена в виде камеры Шмидта, в фокальной поверхности которой установлена мозаика из 109 ФЭУ. Принципиальная идея подобного эксперимента была выдвинута в [11].

Путем полного статистического моделирования проведен расчет отклика детектора СФЕРА-2 на ливни, инициированные первичными протонами и ядрами гелия с учетом сложной геометрии регистрации, свойств оптической системы детектора и отражающей поверхности, а также флуктуаций сигнала и фона ночного неба.

Затем была проведена реконструкция параметров выборки модельных событий. Для этого в настоящей работе использовался вариационный метод, основанный на минимизации функционала квадрата отклонения модельных данных от зарегистрированного сигнала. При этом направление прихода ливня восстанавливалось по его временной структуре в рамках приближения плоского фронта, а положение оси ливня — посредством минимизации функционала, содержащего информацию о ФПР ЧС ШАЛ. Характерные погрешности измерения параметров ливней в случае высоты расположения детектора над поверхностью наблюдения 800 м и первичной энергии 10 ПэВ таковы: $\approx 1.5^\circ$ для θ_0 , для процедуры определения положения оси $\delta r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \approx 15$ м, и около 30 % для E_0 .

Наконец, было показано, что идеализированная модель отклика детектора СФЕРА-2 способна выделять около 10 % первичных протонов при энергии ливня 10 ПэВ и около 15 % — при энергии 30 ПэВ для случая модели ядроядерного взаимодействия QGSJET-II. При этом использовались критерии вида (1) с параметрами (0 м, 67 м, 67 м, 134 м). Критерии были построены для случая расстояния оси ливня от оси установки $\leq 250m$.

Таким образом, впервые показана принципиальная возможность исследования массового состава первичных космических лучей по отраженному черенковскому свету ШАЛ.

Третья глава посвящена развитию методики обработки данных в эксперименте СФЕРА-2. В значительной мере здесь рассматриваются те же процедуры восстановления параметров ливня $(\theta_0, \phi_0, x_0, y_0, E_0)$, что и во второй части главы 2, но с использованием более реалистичной модели отклика детектора и основанные на реальных экспериментальных данных, полученных в 2008–2010 гг. Кроме того, в главе 3 описана методика восстановления спектра ПКЛ.

Прежде всего, кратко рассматриваются свойства отражающей поверхности и общие условия наблюдений в 2008–2010 гг. Описана процедура первичной обработки данных в эксперименте, которая позволяет подготовить данные к последующей обработке, а также производить мониторинг состояния установки в течение периода наблюдений.

Свойства реального детектора СФЕРА-2 существенно отличаются от идеализированной модели, построенной в главе 2. Поэтому была проведена модификация исходной модели отклика детектора, в результате чего были учтены эффекты, связанные с формой аппаратного временного контура ФЭУ и последующей оцифровкой импульса.

Значительная высота расположения детектора СФЕРА-2 над поверхностью отражения (~ 1 км) приводит к тому, что лишь небольшая часть ($\sim 10^{-6}$) черенковских фотонов ливня попадает в пределы площади зеркала телескопа. С другой стороны, эксперимент работает в условиях значительного фона ночного неба, возможно и наличие посторонней засветки. Это приводит к тому, что часть срабатываний триггера вызывается не отраженным ЧС ШАЛ, а флуктуациями светового фона и другими причинами. Например, триггер установки может срабатывать при прохождении электронов ливня, генерирующих черенковский свет в стекле ФЭУ.

Поэтому была разработана процедура, которая позволяет проводить отделение тех событий, которые вызваны отраженным ЧС ШАЛ, от остальных. Это достигается использованием информации о временной структуре события. Алгоритм выделения ливней является итерационным; на каждом шаге процедуры отбора происходит аппроксимация временного фронта события модельным фронтом для ливня с определенным направлением прихода. Если доля каналов, для которых удастся подобрать параметры так, что фронт события согласуется с модельным в пределах 50 нс, превышает некоторую фиксированную величину (в данном случае $2/3$), то событие подвергается дальнейшей обработке. Пример события, вызванного отраженным ЧС ШАЛ, приведен на рис. 2.

На следующем шаге обработки с помощью методики, ранее разработанной в главе 2, в отобранных на предыдущем шаге событиях было проведено восстановление положения оси ливня и оценка энергии первичной частицы. Зависимость погрешности оценки энергии ливня от отношения расстояния оси ливня от центра поля зрения детектора R к радиусу поля зрения R_0 показана на рис. 3 (слева). Характерная точность оценки энергии составляет $\sim 30\%$ и падает по мере удаления оси ливня от центра поля зрения установки.

Первая выборка событий, вызванных ЧС ШАЛ, отраженным от снега, имеющая существенный объем, была получена в экспедиции 2010 г. и составила 36 ливней. 23 ливня из этого числа имели восстановленные значения параметров ($\theta_0 \leq 20^\circ$, $R/R_0 \leq 1.2$) и были отобраны для проверки методики восстановления спектра. Высота расположения детектора в течение периода наблюдений находилась в пределах ≈ 360 – 920 м. Поэтому

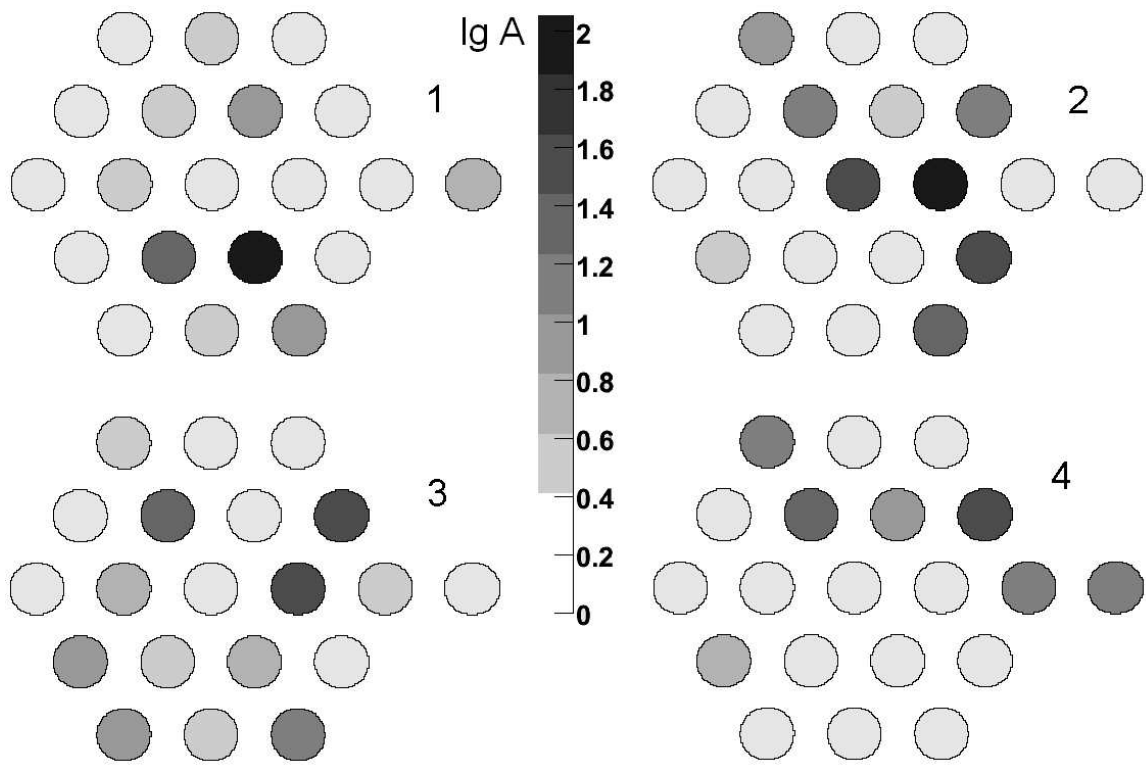


Рис. 2: Пример развертки, содержащей отраженный ЧС ливня (март 2008 года). Последовательные кадры сняты через 25 нс, цветом обозначена амплитуда в измерительных каналах. Высота расположения детектора над поверхностью наблюдения 710 м. Во время полета функционировало 20 каналов

в дальнейших расчетах оправдано использование погрешности измерения энергии, изображенной на рис. 3 (слева).

Распределение зарегистрированных событий по энергии показано маркерами на рис. 3 (справа). Для восстановления показателя первичного спектра было проведено моделирование этого распределения для случая первичных протонов с учетом эффективности регистрации ливней в зависимости от высоты расположения детектора над поверхностью отражения, энергии первичной частицы, вызвавшей ливень, и параметра R/R_0 .

Наилучшее среднеквадратичное согласие между модельными и экспериментальными распределениями событий по энергии достигается при значении показателя наклона спектра $\gamma = 3.05$, которому соответствует гистограмма на рис. 3 (справа). Погрешность восстановленного показателя спектра ПКЛ составляет ≈ 0.2 .

В **четвертой** главе разработана методика разделения групп ядер по характеристикам пространственно-углового распределения черенковского света (ПУР ЧС) ШАЛ в диапазоне энергий первичного ядра 10^{15} – 10^{16} эВ. Как хорошо известно [12], угловые образы черенковского света ливня весьма чувствительны к массе первичного ядра. В настоящей работе было показано, что одновременное использование нескольких угловых распределений ЧС

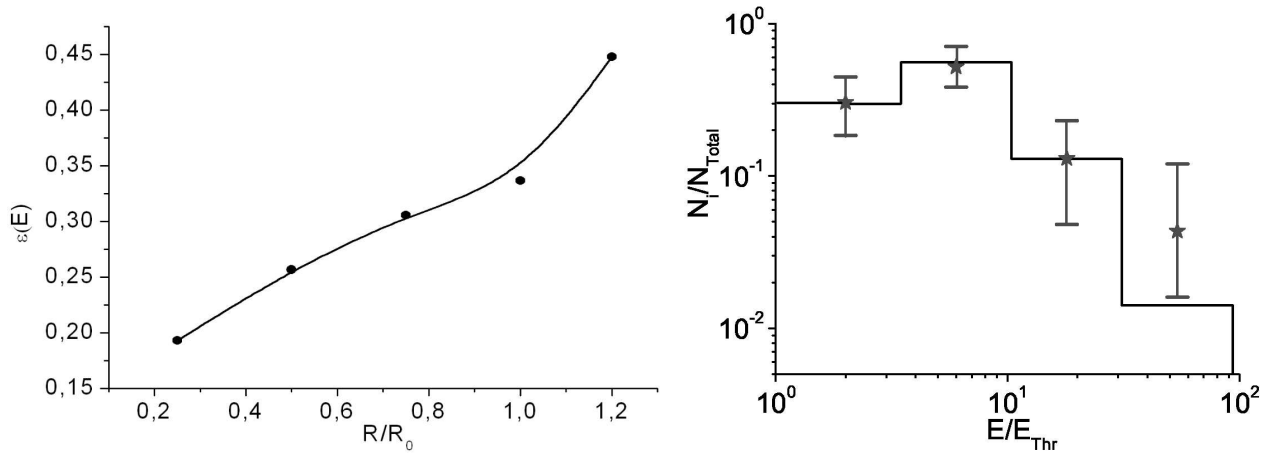


Рис. 3: Слева: Погрешность измерения энергии ливня в зависимости от параметра R/R_0 для случая первичных протонов с энергией 30 ПэВ и высоты расположения детектора над поверхностью отражения 900 м. Справа: Распределение экспериментальных (маркеры) и модельных (гистограмма) событий по энергии, рассчитанное для условий регистрации 2010 года и показателя спектра ПКЛ, равного 3.05

ШАЛ позволяет значительно повысить разрешающую способность методики разделения групп ядер ПКЛ.

Характерные особенности углового распределения ЧС ШАЛ показаны на рис. 4 (слева). По осям отложены углы (θ_x, θ_y) (в $^\circ$) так, что центр поля зрения (обозначен крестом) соответствует направлению в зенит. Уровни соответствуют изофотам интенсивности сигнала в ячейках. Логарифм интенсивности, соответствующий внешнему уровню- 0.5, внутреннему- 3.5; соседние уровни отличаются по интенсивности в $\sqrt{10} \approx 3.16$ раз. „Центр тяжести“ образа обозначен черным кружком. Также на рисунке изображены отрезки, соответствующие величинам D (угловое расстояние от направления первичной частицы до центра тяжести образа), L (среднеквадратичная полудлина образа), W (среднеквадратичная полуширина образа). Как и в [12], в настоящей работе использовалась также величина $Conc$ — концентрированность образа, равная отношению суммы сигнала в двух максимальных ячейках к интегральной интенсивности образа. Последние четыре величины часто относят к группе так называемых „параметров Хилласа“.

Возможны и другие параметризации ПУР ЧС ШАЛ, призванные выделить чувствительность угловых образов к массе первичного ядра. В настоящей работе используется вариант выбора переменных, основанный на характеристиках „продольных угловых распределений“ $F_x(\theta_x)$, т. е. угловых распределений, проинтегрированных вдоль короткой оси пятна в пределах некоторого интервала $(-\delta\theta_y, \delta\theta_y)$. Пример средних продольных угловых распределений для первичных протонов и ядер азота приведен на рис. 4 (справа) (в данном случае полуширина полосы интегрирования составила

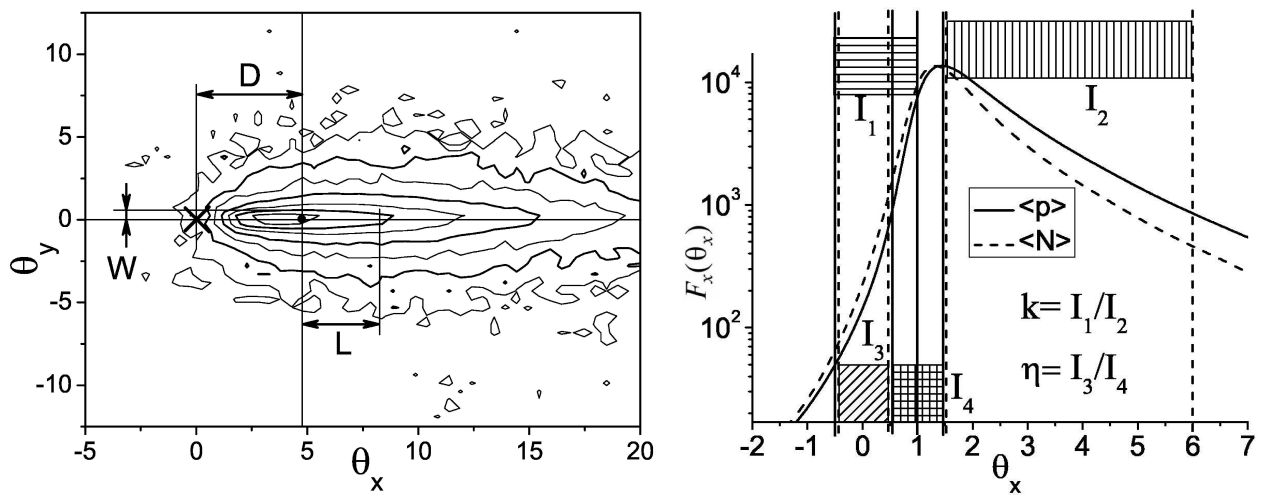


Рис. 4: Слева: Угловое распределение черенковского света ливня, инициированного первичным протоном с энергией 10 ПэВ на расстоянии 200 м от оси. Справа: Средние продольные угловые распределения ПУР ЧС ШАЛ от первичных протонов $\langle F_x^p(\theta_x) \rangle$ (сплошная кривая) и ядер азота $\langle F_x^n(\theta_x) \rangle$ (прерывистая кривая) с энергией 1 ПэВ на расстоянии 100 м от оси. Показана также схема выбора новых переменных, чувствительных к массе первичного ядра

1.5°). Каждое угловое распределение характеризуется двумя переменными k и η , такими, что:

$$k = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\int_{\theta_{xk1}}^{\theta_{xk2}} F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_{\theta_{xk3}}^{\theta_{xk4}} F_x(\theta_x) d\theta_x} = \frac{\int_{-0.5}^1 F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_{1.5}^6 F_x(\theta_x) d\theta_x}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{I_3}{I_4} = \frac{\int_{\theta_{x\eta1}}^{\theta_{x\eta2}} F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_{\theta_{x\eta3}}^{\theta_{x\eta4}} F_x(\theta_x) d\theta_x} = \frac{\int_{-0.5}^{0.5} F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_{0.5}^{1.5} F_x(\theta_x) d\theta_x}, \quad (3)$$

т. е. k и η являются отношениями интегралов по областям „продольного углового распределения“.

На основании полного статистического моделирования пространственно-углового распределения черенковского света широких атмосферных ливней (ПУР ЧС ШАЛ) построено два семейства критериев разделения ливней, инициированных протонами и ядрами азота первичного космического излучения (ПКЛ) с энергией 1–10 ПэВ. Разделение групп ядер проводилось с помощью метода многомерной байесовой классификации в предположении о многомерном нормальном распределении признаков.

Было показано, что в случае использования четырех угловых образов, взятых на расстояниях от оси ливня (50 м, 100 м, 150 м, 200 м) (16-ти переменных) ошибки классификации ливней от первичных протонов, групп ядер азота и железа не превышают нескольких процентов. Кроме того, возможно частичное разделение всех пяти групп ядер.

Интересно, что использование уже двух переменных k и η позволяет добиться сравнительно хорошего разделения трех групп ядер ПКЛ (см. рис. 5). Более полное разделение групп ядер возможно при увеличении размерности вектора признаков. Была показана возможность выбрать границы интегрирования, входящие в определение новых переменных, так, что из „продольного углового распределения“ извлекается дополнительная информация по сравнению со случаем использования „продольных параметров Хилласа“ D и L .

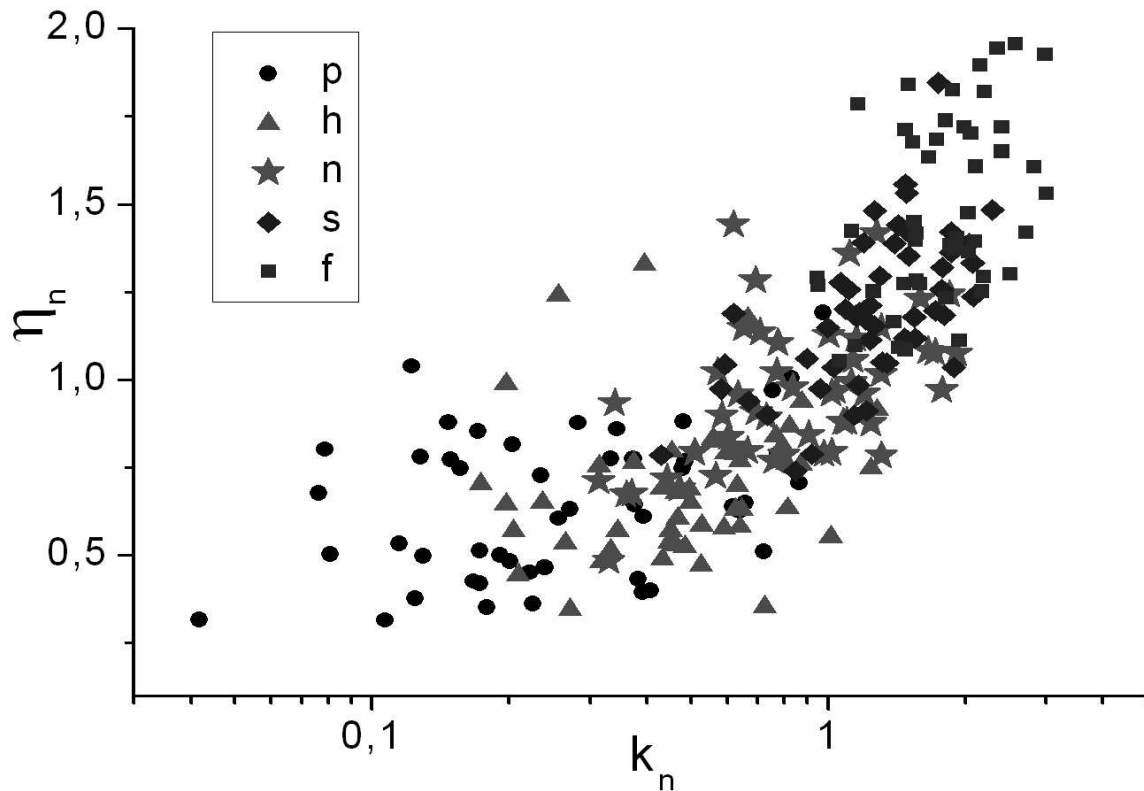


Рис. 5: Параметры k и η для случая выборки пяти различных типов ядер (p — первичные протоны, h — ядра гелия; n , s , f — ядра групп азота, серы и железа, соответственно). Величины k_n и η_n — это параметры k и η , нормированные на их средние значения

В целом, задача разработки конфигурации нового детектора, способного использовать найденные в настоящей работе критерии, не ставилась, хотя некоторые общие черты такой конфигурации изложены в конце главы 4.

Построенные критерии могут быть полезны при исследовании массового состава первичных космических лучей в указанном интервале энергий, где наблюдается излом в спектре ПКЛ. По-видимому, рассмотренная

методика может успешно применяться как при более низких (<1 ПэВ, в случае увеличения площади зеркала телескопа), так и при более высоких энергиях (>10 ПэВ, в случае увеличения эффективного геометрического фактора детектора путем расширения площади, занимаемой установкой и/или телесного угла, обозреваемого мозаикой ФЭУ).

Наконец, в **Заключении** перечислены основные результаты диссертации и делаются выводы из проделанной работы.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.М. Анохина, Р. А. Антонов, Е. А. Бонвеч, В. И. Галкин, Т. А. Джатдоев, А. А. Кириллов, Т. М. Роганова, Д. В. Чернов, С. Б. Шаулов. Метод регистрации спектра протонов ПКЛ в области энергий $> 10^{16}$ эВ. Краткие сообщения по физике. 2009. N 5. С. 32–38.
2. R.A. Antonov, A.M. Anokhina, E.A. Bonvech, D.V. Chernov, T.A. Dzhatdoyev, V.I. Galkin, A.A. Kirillov, T.M. Roganova. A Method for Primary Proton Spectrum Measurement at $E_0 \geq 10$ PeV with SPHERE-2 Telescope. 31st ICRC (Lodz). 2009. HE.1.3. id. 434.
3. В.И. Галкин, Т.А. Джатдоев. О чувствительности пространственно-углового распределения черенковского света широких атмосферных ливней к массовому составу первичных космических лучей с энергиями 10^{15} – 10^{16} эВ. Вестник МГУ. 2010. N 3. С. 37–43.
4. В. И. Галкин, Т. А. Джатдоев. Черенковский свет ШАЛ как инструмент изучения массового состава первичного космического излучения. Труды конференции III Черенковские чтения: новые методы в экспериментальной ядерной физике частиц, Москва (ФИАН). 2010. С. 21–29.
5. В. И. Галкин, Т. А. Джатдоев. Разделение групп ядер ПКЛ с энергиями 10^{15} – 10^{16} эВ с помощью пространственно-углового распределения черенковского света ШАЛ. Известия РАН, сер. физ. 2011. **75**. N3. С. 338–341.

Список литературы

- [1] Г. В. Куликов, Г. Б. Христиансен. О спектре широких атмосферных ливней по числу частиц. ЖЭТФ. 1958. **35**. С. 635–640.
- [2] J. W. Fowler et al. A Measurement of the Cosmic Ray Spectrum and Composition at the Knee. APh. 2001. **15**. P. 49–64.
- [3] D. V. Chernov et al. (Tunka Collaboration). Primary Energy Spectrum

and Mass Composition Determined with the Tunka EAS Cherenkov Array. IJMPA. 2005. **20**. P. 6799–6801.

- [4] Y. Tsunesada et al. (BASJE Collaboration). Cosmic Ray Observation at Mount Chacaltaya for beyond the Knee Region. Proc 30th ICRC (Merida). 2008. **4**. P. 127–130.
- [5] T. Antoni et al. (KASCADE Collaboration). KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems. APh. 2005. **24**. P. 1–25.
- [6] M. Aglietta et al. (EAS-TOP Collaboration). The cosmic ray primary composition in the „knee “ region through the EAS electromagnetic and muon measurements at EAS-TOP. APh. 2004. **21**. P. 583–596.
- [7] D. Heck et al. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA 6019. 1998.
- [8] N. N. Kalmykov et al. Quark-gluon-string model and EAS simulation problems at ultra-high energies. Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 1997. **52**. P. 17–28.
- [9] S. Ostapchenko. QGSJET-II: towards reliable description of very high energy hadronic interactions. Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 2006. **151**. P. 143–146.
- [10] H. C. Fesefeldt. Simulation of hadronic showers, physics and applications. Technical Report No. PITHA 85-02 RWTH. 1985.
- [11] А. Е. Чудаков. Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности Земли. Материалы Всесоюзного симпозиума „Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий“ , Якутск, 1972. 1972. С. 69–74.
- [12] F. A. Aharonian et al. On the potential of the imaging atmospheric Cherenkov technique for study of the mass composition of primary cosmic radiation in the energy region above 30 TeV. NIMPRB. 2003. **201**. P. 217–229.

Напечатано с готового оригинал-макета

Издательство ООО “МАКС Пресс”

Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.

Подписано в печать 18.04.2011 г.

Формат 60x90 1/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 162.

Тел. 939-3890. Тел./Факс 939-3891.

119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова,
2-й учебный корпус, 627 к.