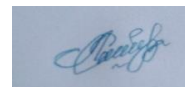


**ТАДЖИКСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**На правах рукописи**



**УДК: 524.1 (575.3)**

**ЛАТИПОВА Сарвиноз Зикуллоевна**

**ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ И НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ПО  
ОБРАЗУ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ В ОПТИЧЕСКИХ  
ДЕТЕКТОРАХ УСТАНОВКИ ПАМИР- XXI.**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени кандидата

физико-математических наук

**01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики**

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., проф.

Галкин Владимир Игоревич

Душанбе-2023

## Оглавление.

	стр
<b>Введение</b>	6
<b>Глава 1. Характеристика первичных космических лучей в диапазоне энергии 1-100 ПэВ</b>	15
1.1.1. Оценка энергии первичного космического излучения	19
1.1.2. Оценка точность направления	22
1.1.3. Оценка массового состава	23
1.2. Оценка первичных параметрах ШАЛ различными установками	28
<b>Глава 2. Проект Памир – XXI</b>	39
2.1. Оптическая часть установки Памир – XXI	41
2. 2. Генерация искусственных событий ШАЛ (CORSIKA)	44
2.3. Обработка событий	46
2.4. Заключение по главе II	49
<b>Глава 3. Оценка положения и направления оси ШАЛ</b>	50
3.1. Искусственные события ШАЛ и их использование	50
3.2. Выбор функции фронта и функции поперечного распределения (ФПР) ЧС ШАЛ для определения первичных параметров	51
3.3. Инструменты для определения направления и положения оси	57
3.4. Процедура определения положения и направления оси ЧС ШАЛ сетью быстрых оптических детекторов Памир – XXI	59
3.5. Определение ошибки первичного направления и положение оси для ШАЛ от различных ядер в диапазоне энергии 1-100 ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря	63

3.6.	Заключение по главе III	69
<b>Глава 4.</b>	<b>Оценка энергии широких атмосферных ливней оптической частью высокогорной установки</b>	<b>70</b>
4.1.	Общая процедура оценки энергии ШАЛ по характеристикам ЧС	71
4.1.1.	Проблема проскочивших ливней	71
4.2.	Введение поправок к оценкам энергии проскочивших ливней	74
4.2.1.	Общая процедура оценки энергии ШАЛ по характеристикам ЧС	78
4.2.2.	Общая процедура оценки энергии и массы ШАЛ по характеристикам ЧС	81
4.3.	Заключение по главе IV	83
	<b>Выводы</b>	<b>84</b>
	<b>Список литература</b>	<b>85</b>
	<b>Список публикаций соискателя по теме диссертации</b>	<b>101</b>

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПКЛ – первичные космические лучи.

ПКИ – первичные космические излучения.

ЧС – черенковский свет

ШАЛ — широкий атмосферный ливень.

КЛ — космические лучи

КЛ СВЭ - космические лучи сверхвысоких энергии

ПЭС - первичного энергетического спектра

МС - массовый состав

ПЭВ - петаэлектронВольт

РЭК – Рентгено эмульсионные камеры

ПАМИР [7,8,9], [111-123] Таджикистан, 4300 м н.у.м.),

ТШВНС [10,11] (Казахстан, 3400 м н.у.м.),

ЯБК (Японо-Бразильская коллаборация (Чакалтая), Канбала, Фуджи) [12]

(Канбала, Тибет, 5400 м н.у.м.; Чакалтая, Боливия, 5280 м н.у.м.; Фуджи, Япония, 3700 м н.у.м.), эксперименты на аэростатах JACEE (The Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment) и RUNJOB [13] с регистрацией гало СТРАНА [14-20].

ИВЧ — излучение Вавилова-Черенкова.

АЧТ - атмосферный черенковский телескоп.

ФПР — функция поперченного распределения.

ПВР ЧС - пространственно-временное распределение черенковского света.

ПУР ЧС - пространственно-угловое распределение черенковского света.

Эффект ГЗК — эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина

AGASA — Akeno Giant Shower Array

Fly'sEye- FiveMileHill.

HiRes — High Resolution Fly's Eye

TAIGA - Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy  
[106-110]

Auger — Pierre Auger Observatory

TA — Telescope Array

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность исследования.* Одной из актуальных проблем астрофизики является вопрос о происхождении космических лучей сверхвысоких энергий. Задачи определение параметров первичных частиц, такие как первичная энергия, тип частицы, массы, направления прихода и положение оси являются фундаментальными задачами физики и астрофизики частиц сверхвысоких энергий. Именно знание этих параметров существенно для большинства астрофизических задач, решаемых методом ШАЛ. Эти классические задачи определения энергетического спектра, массового состава и, может быть, исследование анизотропии для самых энергичных событий.

Конкретная задача работы заключается в решение проблемы первичных параметров, решить одну из классических задач физики космических лучей, а именно, получить энергетический спектр и определить первичные направление первичных космических лучей (ПКЛ) сверхвысоких энергий, важные с точки зрения астрофизики частиц сверхвысоких энергий.

*Степень изученности научной проблемы и методологическая основы исследований.* Характеристики ШАЛ на высотах гор заметно отличаются от таковых на уровне моря, что необходимо учитывать при построении методики оценки параметров первичной частицы. Это особенно важно, если ставится задача усовершенствовать существующие методы регистрации или даже выработать новые, основанные на детальном моделировании развития ШАЛ и использующие детекторы разных типов. Такая задача была поставлена в рамках проекта «Памир-XXI», предполагавшего создание комплексной установки нового поколения в горах Восточного Памира на высоте  $\sim 4250$  м над уровнем моря. На сегодня перспективы реализации проекта не ясны, но расчётная и методическая работа продолжается. Результаты её могут быть полезны как для других высокогорных проектов, так и для метода ШАЛ вообще. В этой работе

акцент делается на регистрации ШАЛ от первичных частиц в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ПэВ, методики оценки их параметров. 29 августа 2008 г. между Правительством Республики Таджикистан и Правительством Российской Федерации было подписано Соглашение о создании и деятельности Международного научно-исследовательского центра «Памир-Чакалтая». В рамках деятельности этого центра предполагалось строительство новой, большой гибридной установки – «Памир-XXI». Проект «Памир-XXI» планировался как комплексное исследование первичного космического излучения (ПКИ) в широком диапазоне энергий  $3 \cdot 10^{12}$  эВ –  $10^{18}$  эВ и характеристик ядерного взаимодействия, не доступных для изучения на ускорителях. Большая высота наблюдения (4250-4260 м над уровнем моря) даёт определенные преимущества для решения астрофизических задач: изучения энергетического спектра и направления прихода ПКИ. Несмотря на то, что в данный момент статус этого эксперимента не определен, мы продолжили развивать методы обработки сигнала и определения первичных параметров частицы в надежде на возобновление проекта «Памир-XXI». Для планировки, проектирования и создания экспериментальных установок необходимо провести тщательное моделирование и нужно разрабатывать способы обработки экспериментальных данных. Данное исследование направлено на решение этих задач.

***Связь исследования с программами (проектами), научной тематикой.*** Тема диссертационного исследования, в основном, соответствует Приоритетным направлениям научных и (или) научно-технических исследований и выполнена в рамках проекта «ПамирXXI». Исследование направлено для реализации Плана мероприятий на 2020-2025 годы по реализации объявления 2020-2040 годов «Двадцатилетием изучения и развития естественных, 5 точных и математических предметов в сфере

образования и науки» утверждённого Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июля 2020 года, №427.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### ***Цель диссертационной работы:***

1. Создание алгоритма оценки первичного направления для расчетных моделей фронта и поперечного распределения черенковского света ШАЛ от разных первичных ядер.

2. Создание алгоритма оценки энергии первичных космических ядер при энергиях выше  $10^{15}$  эВ (1ПэВ).

3. Определение точности оценки направления прихода, положения оси и энергии ШАЛ от первичной частицы в диапазоне энергий 1-100 ПэВ.

### ***Задачи диссертационной работы являются:***

1. Ставится задача выработать общие требования к набору черенковских детекторов, оптимизированному для решения проблемы оценки массы/типа первичной частицы.

2. Предлагаемый вариант оптической части установки будет анализировать импульсы (пространственно-временное распределение) ЧС и угловые черенковские образы (пространственно-угловое распределение ЧС) и для этого будет включать широкую сеть быстрых оптических детекторов и несколько широкоугольных телескопов.

3. Оптическая часть установки использует пространственно-временные и пространственно-угловые характеристики ЧС для оценки характеристик первичной частицы и, следовательно, должна включать два набора детекторов для решений задач об энергетическом спектре и массовом составе:

а) прямоугольную сетку 11 x 11 широкоугольных быстрых детекторов площадью  $\sim 1.0$  м<sup>2</sup> и апертурой  $\sim 1$  ср, размещенных с шагом 25 м, позволяющую определять направление поступления ливней с



достоверностью не хуже  $0,1^\circ$ , положение оси с точностью  $\sim 1$  м и энергии с точностью около 15% и анализировать форму черенковского импульса;

б) оптические телескопы с зеркальной площадью  $\sim 4$  м<sup>2</sup>, полем зрения диаметром около  $30^\circ$  и диаметром пиксела  $\sim 0,8^\circ$ , раздвинутые на 100-150 м друг от друга, позволяют анализировать пространственно-угловое распределение черенковского света вблизи оси, чувствительное к массе первичной частицы, причем методика разделения ядер по массе существенно опирается на точное определение направления первичной частицы.

**Объектами исследования** является изучение ПКЛ в области сверхвысоких энергий ( $E_0 > 10^{15}$  эВ). Изучение астрофизических аспектов характеристик ПКЛ при сверхвысоких энергиях.

**Предметом исследования является** новая технология измерения черенковского света ШАЛ, использующая набор из нескольких оптических телескопов с зеркалами площадью 2-4 м<sup>2</sup>, размером поля зрения не менее  $20^\circ$  и пикселями диаметром  $0,5-0,8^\circ$ , способных различать ливни, инициированные различными первичными ядрами, а также сеть быстрых широкоугольных ( $40-50^\circ$ ) оптических детекторов с размером ячейки  $\sim 30$  м, которая может определить направление прихода ШАЛ с высокой точностью ( $\sim 0,1^\circ$ ), а также положение оси ливня и энергию первичной частицы.

**Методы исследования.** Частью метода ШАЛ является оптическая методика черенковского света (ЧС). Регистрация ЧС используется для изучения ШАЛ на протяжении более пятидесяти лет. Есть много причин считать ЧС ШАЛ более информативным, чем другие компоненты ШАЛ, а именно электроны, позитроны, мюоны, адроны, радиоизлучение и флуоресцентный свет. Постепенно развитие вычислительной техники позволило реализовать расчёт характеристик ШАЛ методом Монте-Карло, дающим возможность количественно анализировать флуктуации измеряемых характеристик.

**Областью исследования является** изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально

новых приборов и методов экспериментальной физики, Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов. Моделирование физических явлений и процессов, а именно 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики.

***Основная информационная и экспериментальная база.***

Информационной базой настоящей диссертационной работы являются научные труды: учебники, статьи периодических научных журналов, материалы научных конференций, диссертации и монографии, посвященные изучением характеристик ПКИ и модели адронных взаимодействий.

При выполнении диссертационной работы были использованы экспериментальные базы данные искусственных событий, полученные с помощью моделирующих программ мирового уровня.

***Достоверность диссертационных результатов.*** Моделирование и обработка проводились с помощью кодов CORSIKA, MINUIT и ROOT, широко используемых в мировой практике. Результаты моделирования сопоставлялись с результатами, полученными на других аналогичных установках, а также проводились публикации по данной тематике.

***Научная новизна работы заключается в том, что впервые:***

**1. Проведены** аппроксимации фронта и поперечного распределения черенковского света широких атмосферных ливней от различных ядер с энергией 1-100 ПэВ для установки Памир - XXI.

Выбран вид аппроксимирующих функций для фронта и ФПР ЧС ШАЛ.

**2. Создан** алгоритм аппроксимации и анализа ошибок для оценки первичной энергии, положения оси, направления прихода и расчетные модели для черенковского фронта и поперечного распределения черенковского света ШАЛ от разных первичных ядер.

**3. Проведены** процедура оценки направления прихода ШАЛ и положение оси первичной частицы.

4. **Определены** ошибки оценки направления ШАЛ для вертикальных и наклонных ливней по пространственно-временному распределению черенковского света (ЧС).

5. **Разработана** процедура оценки направления прихода ШАЛ и положение оси первичной частицы, проведено минимизация.

6. **Разработана** процедура оценки энергии ШАЛ по интегралу ЧС и введены поправки к оценкам энергии для проскочивших ливней по крутизне ФПР ЧС.

***Теоретическая значимость работы:***

1. Планируется существенно продвинуть вперед решение обеих классических задач, поставленные перед установками ШАЛ (и проблемы модели взаимодействия) на основе новых подходов, в рамках проекта Памир-XXI.

2. Настоящая работа не касается адронных исследований в стволах ШАЛ. Она рассматривает возможности решения традиционных астрофизических задач: изучения энергетического спектра и массового состава ПКИ и регистрации  $\gamma$ -квантов сверхвысокой энергии как от точечных, так и от диффузных источников. Наша логика решения этих задач несколько отличается от используемой в прошлых и настоящих экспериментах.

3. Ставится задача, создать набор черенковских детекторов, оптимизированный для решения проблемы оценки массы/типа первичной частицы.

4. Предлагаемый вариант оптической части установки будет анализировать импульсы (пространственно-временное распределение) ЧС и угловые черенковские образы (пространственно-угловое распределение ЧС) и для этого будет включать широкую сеть быстрых оптических детекторов и несколько широкоугольных телескопов.

***Практическая значимость работы.*** Конкретная задача работы заключается в формулировке общих черт конструкции и демонстрации

возможностей установки для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), которая может решить одну из классических задач физики космических лучей, а именно, получить энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей (ПКЛ) сверхвысоких энергий, важные с точки зрения астрофизики частиц сверхвысоких энергий.

***На защиту выносятся следующие результаты научной деятельности:***

Разработаны основные научные выводы. На защиту выносятся следующие результаты научной деятельности;

1. Аппроксимации фронта и поперечного распределения черенковского света широких атмосферных ливней от различных ядер с энергией 1 и 100 ПэВ.

2. Создания алгоритма оценки первичного направления и положения оси ливня для ШАЛ от разных первичных ядер по данным распределенной сети быстрых оптических детекторов.

3. Оценки направления прихода первичной частицы и положение оси ШАЛ с помощью сети быстрых оптических детекторов Памир — XXI, оценки соответствующих ошибок.

4. Процедура оценки энергии ШАЛ по интегралу ЧС

5. Поправки к оценкам энергии для проскочивших ливней по крутизне ФПР ЧС.

***Соответствие диссертации паспорту научной специальности.***

Тема диссертационного исследования соответствует Паспорту номенклатуры специальностей ВАК при Президенте Республики Таджикистан по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, в частности следующим пунктам:

1. Изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики.

2. Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений. Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики. Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов. Моделирование физических явлений и процессов.

*Личный вклад* автора состоит в поиске и анализе литературных данных по выбранной теме, подготовке модельных расчётов и проведение моделирования, обработке результатов моделирования, их обсуждении и подготовке материалов к публикации.

*Этапы исследования* – планирование, моделирование, обработка искусственных событий **и их использование**, определить инструменты для определения первичных характеристик ШАЛ, получить результаты и сделать выводы.

*Апробация диссертации и информация об использовании её результатов.* Основные результаты исследований докладывались на следующих международных, всероссийских и республиканских конференциях: 3<sup>rd</sup> international cosmic rays workshop ICRW-2013 (Душанбе 2013) ; на Международной школе «Микромир и макромир» (Москва 2012 и 2013), Республиканская конференция по ядерно-физическим методам анализа состава биологических, геологических химических и медицинских объектов, Душанбе, Таджикистан, 2014; Международной школе молодых ученых стран СНГ «Смежные проблемы физики и астрофизики частиц сверхвысоких энергии» (Душанбе-2014) ; Международная школа молодых ученых стран СНГ. (Алматы-Казахстан, 24 - 30 сентября 2017 года); Международная школа молодых ученых стран СНГ. (Алматы-Казахстан 2018 года); Cambridge Central Asia Forum”- (Астана -Казахстан, 23.04.2018 - 25.04.201); 16-ая ШАЛ Курчатовская, междисциплинарная молодёжная научная школа. (Москва — 6-9-11.2018); Международная школа молодых ученых стран СНГ. (Иссык-кул

Киргизия - 17-22 сентября 2019 года); онлайн конференция по темам Международного научно-исследовательского центра “Памир-Чакалтая”. (27-февраля – 10-марта 2021г) и ежегодные республиканские апреловские конференции ТНУ, Душанбе. С 2012 до 2022.

Автор выступал с докладами на научных семинарах; научные семинары физического факультета Таджикского национального университета (ежегодно).

### ***Опубликование результатов диссертации.***

По материалам диссертационной работы опубликовано 8 работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 4 статьи в рецензируемых журналах ВАК при Президенте Республики Таджикистан, 2 тезисов и докладов в материалах международных и республиканских научных конференций.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертационная работа изложена на 104 страницах компьютерного набора, содержит 6 таблиц, 29- рисунка и состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка трудов автора, списка цитируемой литературы из популярных журналов наименований.

## ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИИ 1-100 ПЭВ

Классическими задачами физики космических лучей являются определение энергетического спектрального и массового состава (А) ПКЛ. В сфере сверхвысоких энергий ( $E_0 > 10^{15}$  эВ) эти задачи решаются путем измерения направления прихода, энергии и типа первичной частицы по данным характеристикам ШАЛ. Источников природы лучей, таких как галактические космические лучи (КЛ), имеющие высокую и сверхвысокую энергию полностью не изучено. Энергетический спектр КЛ, наблюдаемых на поверхности Земли, формируется как в сфере ускоряющих источников, так и за счет распространения частиц в Галактике. В области колена при энергии  $3 \cdot 10^{15}$  эВ представляется наиболее интересной областью спектра. Его детальная форма может много сказать о природе ускорения КЛ в источниках и в целом о характеристиках магнитных полей в Галактике. Исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей с энергией выше  $10^{15}$  эВ до сих пор возможно только с помощью регистрации ШАЛ [1-6].

Можно сказать, что физики космических лучей вынуждены использовать ШАЛ для исследования энергетического спектра и массового состава ПКЛ при энергиях выше  $10^{14}$  эВ. Это связано со следующими двумя обстоятельствами:

- 1) низкий поток частиц ПКЛ сверхвысоких энергий требует построения детекторов частиц столь большой площади, что они не могут быть развернуты за пределами атмосферы Земли,
- 2) для измерения энергии около  $10^{15}$  эВ, требуется большая масса поглотителя, что представляет проблему для орбитальных исследований в этой области энергий.

В середине XX века комплексные установки ШАЛ стали основным инструментом для решения проблемы первичного энергетического спектра и массового состава. Такая установка включает в себя различные типы

детекторов для изучения различных компонент ШАЛ, а именно: поверхностные детекторы заряженных частиц (для электронной и мюонной компоненты), подземные детекторы заряженных частиц (для мюонов высокой энергии), центральные калориметры (для адронов высокой энергии), оптические детекторы различных типов (для оптического черенковского излучения и флуоресцентного света), радио-детекторы и т.д.

В пользу необходимости таких исследований свидетельствует неожиданное открытие феномена компланарной генерации самых энергичных частиц в стволах ШАЛ, обнаруженного в высокогорных экспериментах на Памире в восьмидесятых годах прошлого века.

Начиная с 1971 до 1992 в связи изучение задач о космических лучах начала свою работу эксперимент "Памир". На большой высоте над уровнем моря (4250 - 4260 м над уровнем моря) регистрировались адронные и электромагнитные вторичные частицы космических лучей с высокой пороговой энергией в области ТэВ и ПэВ. Эти частицы образуются преимущественно в крайнем прямом направлении взаимодействий протонов космических лучей или ядер гелия в атмосфере с первичными энергиями, в основном, ниже 1 ПэВ.

Цель эксперимента Памир являлся, получение статистику высокоэнергичных семейств  $\gamma$ -квантов и провести анализ характеристик для семейств  $\gamma$ -квантов, сформированных ядрами ПКИ с  $E_0 \geq 0.1$  ПэВ. Тогда эксперимент Памир должен работать по методу Рентгено - Эмульсионных Камер. [7- 9].

При составлении полной экспозиции РЭК Памир  $ST = 3000 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср}$  обработкой 160-170  $\text{м}^2$  /год РГП в течение 18 лет. Глубина проникновение атмосферы Н Памир = 594 г/см<sup>2</sup> или 16.0 t-единиц. ЭФК ШАЛ, проходя через элемент свинца, образует каскадный переход, оставляющие на РГП области потемнений, называемые «адроны». Адроны в основном регистрируются, в итоге позволяет оценить энергию  $E_0$   $\gamma$  частиц ЭФК ШАЛ,



вызвавших ЭМ каскады в свинец. Смещение  $\gamma$ -кванта в двусторонней фотоэмульсии позволяет оценить зенитные углы  $\theta$  прихода ШАЛ.

С 2009-году возникла идея, создавать установку нового уровня. И это проект «Памир-XXI», который более современный и получает информацию быстрее, при этом занимает меньше времени. Была поставлена ряд задач в рамках проекта «Памир-XXI», предполагавшего создание комплексной установки нового поколения в горах Восточного Памира на высоте  $\sim 4250$  м над уровнем моря. На сегодня перспективы реализации проекта не ясны, но расчётная и методическая работа продолжается. Результаты её могут быть полезны как для других высокогорных проектов, так и для метода ШАЛ вообще [10- 12].

В некотором смысле сама идея новой установки была порождена неполнотой предыдущих научно-исследовательских проектов. А именно, исследовательская программа гибридного центрального калориметра будет продолжением исследования адронного взаимодействия Сотрудничества Памир; отсутствие достоверной информации о массовом составе ПКЛ, стимулировало появление нового подход к ЧС ШАЛ, основанного на регистрации пространственного и пространственно-углового распределения черенковского света в диапазоне 1-100 ПэВ. Эти задачи нужно решить с помощью оптической установки нового типа, оптические детекторы двух типов - широкоугольные быстрые детекторы, которые способны регистрировать ПВР ЧС и оптические телескопы, которые могут различать ливни от разных первичных ядер. Наш новый эксперимент «Памир-XXI» будет наследником эксперимента «Памир».

С самого начала установки ШАЛ были нацелены на изучение астрофизических аспектов характеристик ПКЛ, а также на выяснение особенностей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Появление коллайдеров сверхвысоких энергий (SPS, Тэватрон, RHIC, LHC), казалось, должно было отменить вторую задачу установок ШАЛ, оставив им только первую. Многие детекторы ШАЛ были построены только для

изучения первичного энергетического спектра (ПЭС) и массового состава (МС) и не пытались решать проблему взаимодействия адронов. Теперь ясно, что сама схема экспериментов на коллайдерах не позволяет им изучать некоторые важные особенности взаимодействий адронов при сверхвысоких энергиях, а именно, характеристики частиц с высокой скоростью и лидирующих частиц не доступны детекторам коллайдеров. Получается, что единственный способ для изучения характеристик наиболее энергичных вторичных частиц в ядерном взаимодействии сверхвысокой энергии является проведение эксперимента в космических лучах с фиксированной мишенью, т. е. использование центрального калориметра установки ШАЛ для выяснения поведения адронов переднего конуса [13-21].

Частью ШАЛ-овские методы является оптическая методика черенковского света (ЧС). Регистрация ЧС используется для изучения ШАЛ на протяжении более пятидесяти лет. Есть много причин считать ЧС ШАЛ более информативным, чем другие компоненты ШАЛ, а именно электроны, позитроны, мюоны, адроны, радиоизлучение и флуоресцентный свет.

Информационное богатство ЧС ШАЛ связано с его физическими особенностями, вытекающими из свойств атмосферы и структуры ШАЛ:

- низкая плотность воздуха приводит к небольшому углу излучения черенковского света ( $< 1,5^\circ$ ), что означает, что свет почти следует направлению излучающей частицы, и этот факт позволяет исследовать пространственно-угловые характеристики ливневых частиц, которые есть в основном электроны и позитроны;
- число черенковских фотонов ШАЛ в  $\sim 10^4$ - $10^5$  раз больше, чем число заряженных частиц на уровне наблюдения ( $N_{\text{cherenk}} \sim 3 \times 10^{10}$ ,  $N_{\text{charged}} \sim 3 \times 10^5$  для вертикальных ливней с энергией  $10^{15}$  эВ на уровне наблюдения 1 км в диапазоне длин волн 300-660 нм), что позволяет изучать довольно дифференциальные распределения ЧС ШАЛ;
- длина свободного пробега до рассеяния, поглощения оптического фотона в атмосфере может составлять до нескольких километров, то есть, ЧС несет в

себе информацию обо всем ливне, в отличие от заряженных частиц, в основном отражающих состояние ливня вблизи уровня наблюдения;

- обратной стороной малого угла черенковского излучения является относительно небольшой размер светового пятна на уровне наблюдения (несколько сотен метров) и невозможность наблюдать ЧС ШАЛ сбоку. Единственным существенным недостатком ЧС ШАЛ является то, что их регистрация возможна только в ясные безлунные ночи, которые, как правило, составляют только около 10% от общего календарного времени.

## **1.1. Характеристика первичных космических лучей в диапазоне энергии 1-100 ПэВ**

### **1.1.1. Оценка энергии первичного космического излучения**

Оценка энергии широкого атмосферного ливня (ШАЛ) – одна из классических задач метода ШАЛ, наряду с оценкой направления  $\theta$  и типа (массы  $A$ ) первичной частицы. Техника получения оценки существенно опирается на представление о ШАЛ как о ядерно-электромагнитном каскаде в атмосфере и использует модельные расчёты характеристик этого каскада. Для оценки первичной энергии  $E_0$  формально годится любая характеристика ШАЛ, сильно коррелирующая с  $E_0$ , меняющаяся примерно пропорционально ей и доступная в прямых измерениях (в крайнем случае – вычисляемая на основании показаний детекторов). В реальности при выборе подходящей характеристики приходится учитывать также её флуктуации и измерительные ошибки: и те, и другие должны быть по возможности минимальными.

Любая непосредственно измеряемая характеристика ШАЛ зависит от полного набора первичных параметров ( $E_0$ ,  $\theta$ ,  $A$ ), а также от взаимной геометрии ливня и детектора, и уровня наблюдения (положения детектора над уровнем моря). Из этого следует, что процедура оценки  $E_0$  должна учитывать  $\theta$ ,  $A$  (или хотя бы их оценки) и условия эксперимента. Иными словами, полноценное определение  $E_0$  возможно только в результате

самосогласованной процедуры определения всех первичных параметров, оптимизированной под конкретный эксперимент.

Ещё одно важное обстоятельство – неопределённость модели ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Поскольку процедура неизбежно базируется на модельных расчётах ШАЛ, она оказывается потенциально модельно зависимой. По существу, неопределённость модели взаимодействия составляет часть систематической ошибки энергии, которую надо постараться уменьшить.

Семидесятилетняя история регистрации ШАЛ породила довольно разнообразный набор методов оценки первичной энергии. Одним из первых была оценка по полному числу заряженных частиц («размеру ливня») на уровне наблюдения с помощью годоскопической установки из счётчиков Гейгера, позволившая, в частности, обнаружить «колесо» в энергетическом спектре всех первичных частиц [22-26]. Процедура использовала показания счётчиков для восстановления поперечного распределения заряженных частиц путём аппроксимации некоторой пробной функцией, интеграл от которой давал размер ливня. Близкая по смыслу оценка была использована группой MIT при обработке данных установки Agassiz [27], состоявшей из жидких сцинтилляторов. Постепенно развитие вычислительной техники позволило реализовать расчёт характеристик ШАЛ методом Монте-Карло, дающим возможность количественно анализировать флуктуации измеряемых характеристик. В частности, анализ флуктуаций поперечного распределения позволил А.М. Хилласу [28] сделать радикальный вывод о существовании оптимального с точки зрения оценки  $E_0$  расстояния от оси ливня до детектора  $R_{opt}$  для измерения плотности частиц. Расстояние это зависит, прежде всего от конфигурации установки, оно использовалось и используется до сих пор многими экспериментальными группами, например, S (600) – группой AGASA [29] и S (1000) – группой Auger [30].

Использованию мер первичной энергии, аналогичных  $\rho_{500}$  на установке Haverah Park [31], обычно мешает большой шаг сетки детекторов, используемый на больших установках – от нескольких десятков метров до нескольких километров. В этом случае  $\rho(R_{opt})$  оценивается по аппроксимации  $\rho(R)$  поперечного распределения, полученной по показаниям удалённых друг от друга детекторов, что может привести к большой неопределённости оценки  $E_0$ .

Более сложные меры  $E_0$  могут включать данные сразу нескольких компонент ШАЛ. Например, эксперимент KASCADE-Grande [32] использовал соотношение

$$\log_{10}(E_0/\text{ГэВ}) = 0,313 \log_{10}(N_e) + 0,666 \log_{10}(N_\mu) + 1,24/\cos \theta + 0,580,$$

в которое входят электронный  $N_e$  и мюонный  $N_\mu$  размеры ливня, каждый из которых получался интегрированием аппроксимации соответствующего поперечного распределения частиц.

Процедуры оценки энергии по ЧС похожи на уже рассмотренные процедуры, основанные на характеристиках заряженных частиц. Они могут использовать: нормировку поперечного распределения света – BLANCA [33], плотность фотонов на фиксированном оптимальном расстоянии – Тунка-25 [34], полный поток черенковского света – Якутская установка [35].

Однако, есть одно существенное различие между измерениями плотности частиц и света: большинство частиц ливня живут недолго (порядка одной радиационной единицы), тогда как свет медленно поглощается, может приходить с высот 10 и более километров над уровнем наблюдения и, следовательно, накапливается. Грубо говоря, на уровне наблюдения мы видим текущее число заряженных частиц и интеграл черенковского света по всем высотам, на которых в ливне существовали частицы с энергией выше черенковского порога. Это приводит к разным последствиям в случае глубокого развития ШАЛ в атмосфере: при заданной энергии  $E_0$  полное число заряженных частиц растёт или убывает в

зависимости от того, находится ли максимум каскадной кривой выше или ниже уровня наблюдения; полное число оптических фотонов в этом случае всегда убывает. Это особенно сказывается на неопределённости оценки энергии ШАЛ от протонов, поскольку именно они демонстрируют максимальные каскадные флуктуации, в том числе флуктуации продольного развития.

Неопределённости оценки энергии в упомянутых выше методиках редко опускаются ниже 10%, чаще всего они лежат в диапазоне 15-20% и увеличиваются до 25-30% для ШАЛ с большими зенитными углами.

Мы устанавливаем верхние пределы точности оценки по поперечному распределению ЧС ШАЛ, близких к вертикали, для высокогорной установки с достаточно плотной сеткой оптических детекторов. Работа ведётся в рамках проекта «Памир-XXI», но мы уверены, что результаты наших расчётов будут полезны и другим экспериментам.

### **1.1.2. Оценка точность направления**

Оценка направления  $\theta$ , широкого атмосферного ливня (ШАЛ) – одна из классических задач метода ШАЛ, наряду с оценкой энергии  $E_0$  и типа (массы  $A$ ) первичной частицы. Техника получения оценки существенно опирается на представление о ШАЛ как о ядерно-электромагнитном каскаде в атмосфере и использует модельные расчёты характеристик этого каскада. В реальности при выборе подходящей характеристики приходится учитывать также её флуктуации и измерительные ошибки: и те, и другие должны быть по возможности минимальными.

Любая непосредственно измеряемая характеристика ШАЛ зависит от полного набора первичных параметров ( $E_0$ ,  $\theta$ ,  $A$ ), а также от взаимной геометрии ливня и детектора, и уровня наблюдения (положения детектора над уровнем моря). Из этого следует, что процедура оценки направление  $\theta$ , должна учитывать  $E_0$ ,  $A$  (или хотя бы их оценки) и условия эксперимента. Иными словами, полноценное определение направление  $\theta$ , возможно только

в результате самосогласованной процедуры определения всех первичных параметров, оптимизированной под конкретный эксперимент.

В частности, для измерения основных параметров ливня используется пространственное, угловое и временное распределение черенковского света (ЧС) ШАЛ.

Регистрация черенковского света (ЧС) ШАЛ требует специальных условий (безоблачные и безлунные ночи, минимум аэрозолей в атмосфере, отсутствие антропогенных засветок), но и даёт гораздо больше возможностей для восстановления первичных параметров ШАЛ. Число черенковских фотонов на 4-5 порядков больше, что позволяет существенно понизить порог детектирования ШАЛ и получить больше информации из его характеристик. Сумма потока черенковского света практически асимметричен полной первичной энергии космических частицы, оказавшейся в атмосфере Земли и создает условия образование ливня вторичных частиц. Эти условия позволяет использовать атмосферу Земли в качестве колоссального калориметра и оценивать независимую энергию от предполагаемых деталей взаимодействия первичной частицы с ядрами атомов, составляющих молекулы, входящие в состав воздуха.

Направление первичной частицы можно довольно хорошо реконструировать по времени различных попаданий, но энергия ливня требует обширной работы по методу Монте-Карло с моделями адронного взаимодействия, которые на несколько порядков превышают диапазон энергий ускорителя. Тип первичных частиц может быть изучен только в статистически больших выборках из-за колебаний в развитии отдельных ливней. Даже тогда на это сильно влияют различия в моделях адронного взаимодействия.

### **1.1.3. Оценка массового состава**

Знание массового состава, (A) наряду с иными характеристиками КЛ ВЭ, такими как сектор энергии и распределение направлении прихода, позволяет выделить необходимый сценарий ускорения частиц в источнике и

их распространения в космическом пространстве. Для определения типа первичной частицы, поступавшие на атмосферную границу Земной поверхности, в области высокой энергии употребят информация о продольном формировании ливня, которое можно наиболее точнее восстановить при помощи фиксации (регистрации) излучения ШАЛ. Известно, что усреднённая величина глубины проникновения атмосферы, по которой ливень достигает своего максимального размера, логарифмически зависит от энергии первичной частицы и ее массового числа ( $X_{\max}$ ). Так как величина ( $X_{\max}$ ) может быть непосредственно определена с измеренного продольного профиля ливня, то после оценки  $E_0$  можно извлечь информацию о типе первичной частицы. На практике чаще измеряют скорость изменения средней глубины максимума с первичной энергией  $E_0$ , которая является постоянной для заданного массового состава [41].

Знание массового состава, ( $A$ ) наряду с другими характеристиками КЛ ВЭ, такими как энергетический спектр и распределение направлении прихода, позволяет выделить необходимый сценарий ускорения частиц в источнике и их распространения в космическом пространстве. Для определения типа первичной частицы, пришедшей на границу атмосферы Земли, в области высоких энергий используют информацию о продольном развитии ливня, которое можно довольно точно восстановить при помощи регистрации излучения ШАЛ. Известно, что среднее значение глубины атмосферы, по которой ливень достигает своего максимального размера, логарифмически зависит от энергии первичной частицы и ее массового числа ( $X_{\max}$ ). Поскольку величина ( $X_{\max}$ ) может быть непосредственно определена из измеренного продольного профиля ливня, то после оценки  $E_0$  можно извлечь информацию о типе первичной частицы. На практике чаще измеряют скорость изменения средней глубины максимума с первичной энергией  $E_0$ , которая является постоянной для заданного массового состава.

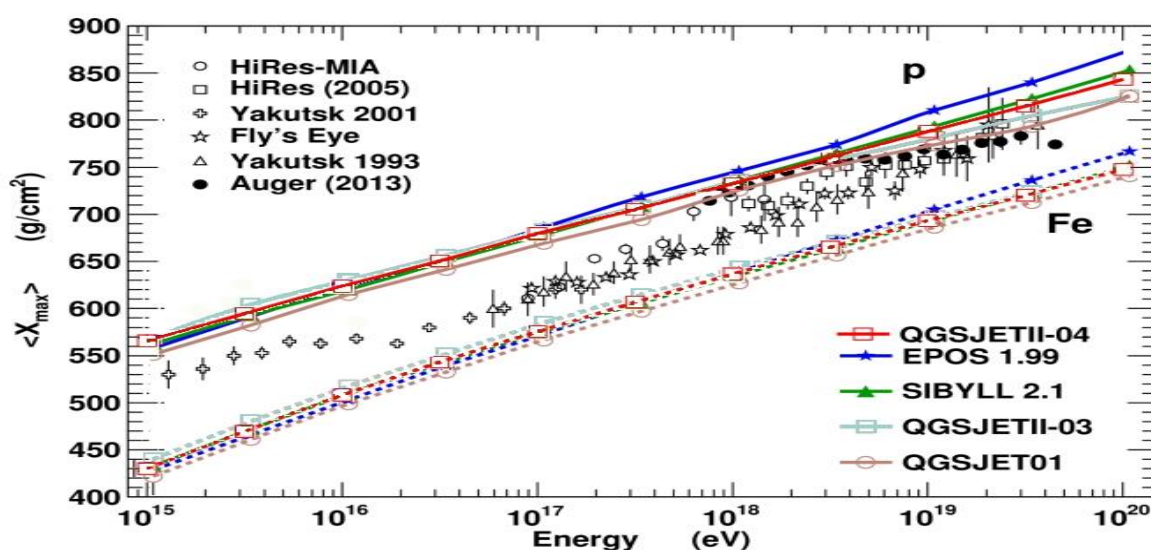
Для изучения массового состава и энергетического спектра ПКЛ достаточно измерить энергию, направление прихода и тип первичной частицы по



характеристикам ШАЛ. ЧС ШАЛ может предоставить нам всю эту информацию. Для измерения основных параметров частиц используются пространственное, угловое и временное распределения ЧС. Все эти характеристики несут информацию о развитии ливня, включая данные о его основной продольной характеристике, т.е. каскадной кривой.

### Каскадная кривая зависит от:

- свойств ядро - ядерных взаимодействий (которые до сих пор не известны достаточно хорошо);



**Рисунок 1. Данные  $\langle X_{\max} \rangle$  для разных моделей взаимодействия от разных установок**

- энергии первичной частицы;
- массы первичной частицы.

Увеличение первичной энергии и уменьшение массы приводит к росту продольного размера ШАЛ и смещению максимума  $X_{\max}$  каскадной кривой глубже в атмосферу. Это регулярное поведение размыто каскадными флуктуациями, если говорить об отдельных ливнях.

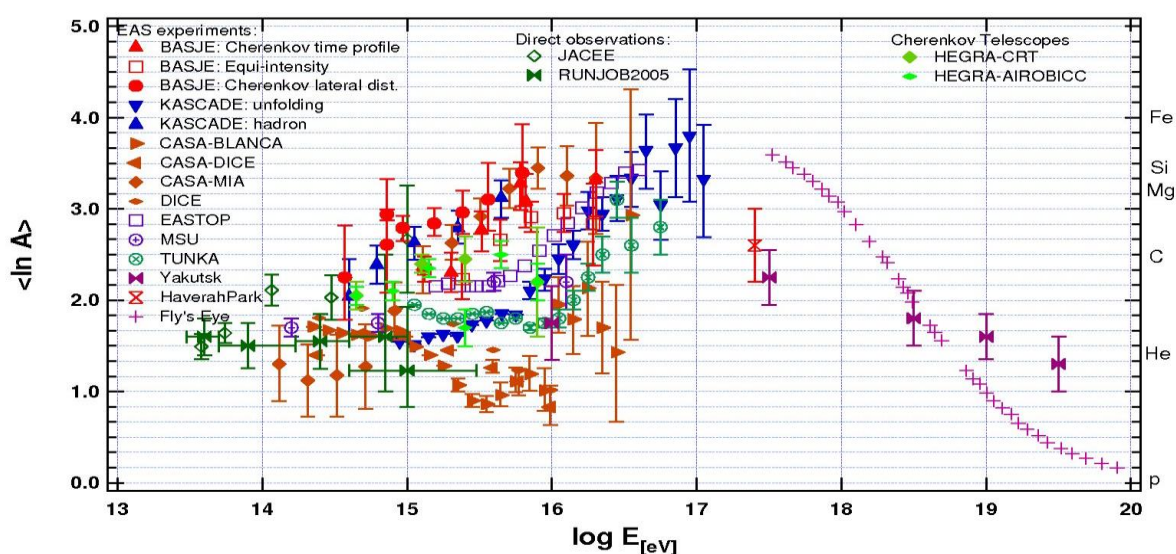
Последние 30 лет решение проблемы массового состава ПКЛ было неизменно связано с одновременной оценкой первичной энергии  $E_0$  и  $X_{\max}$ , поскольку в соответствии со средним поведением каскадной кривой, при

известной  $E_0$  положение максимума в основном определяется массой первичной частицы.

На Рис.2 показаны мировые данные по простейшей мере распределения первичных масс,  $\langle \ln A \rangle$ , полученные разными методами.

Из графика можно сделать следующие выводы:

- данные об  $A$  в районе «колена» отличаются на порядок;
- данные, получены близкими методами (скажем, по  $N_e$ - $N_\mu$ -корреляциям и крутизне поперечного распределения ЧС) сильно отличаются.



**Рисунок 2. Мировые данные по  $\langle \ln A \rangle$**

Большой разброс мировых данных по  $\langle \ln A \rangle$  в сочетании с небольшими систематическими ошибками, заявленными авторами, вызывает подозрение, что переоценены возможности используемых методов. Дополнительная неопределенность происходит от использования промежуточных параметров  $X_{\max}$ : из непосредственно измеренных характеристик каскада с помощью некоторых приближений данных моделирования извлекается только  $X_{\max}$ , в то время как другие возможные меры  $A$ , содержащиеся в каскадной кривой, игнорируются, наконец, значение  $A$  выводится из  $X_{\max}$  с помощью другого приближенного соотношения  $X_{\max}$ - $A$ , также полученного в результате моделирования. Все шаги включают в себя потерю информации об  $A$ .

Современное состояние проблемы массового состава ПКЛ требует серьезного пересмотра ее свойств. Следующие общие наблюдения почти очевидны, но кажутся уместными в данной ситуации:

- следует собирать гораздо больше данных о каждом событии, чем это делается сейчас, то есть установка должна быть более сложной, специализированной и тщательно калиброванной;
- надо измерять параметры ШАЛ, которые наиболее чувствительны к  $A$ ;
- при обработке данных наблюдений надо получать первичную массу, используя прямые связи между наблюдаемыми величинами и  $A$ , избегая использования промежуточных переменных (например,  $X_{\max}$ );
- методические неопределенности должны быть тщательно проверены и прозрачны для перекрестных проверок.

Две наиболее перспективных характеристики ЧС ШАЛ с точки зрения исследования массового состава ПКЛ пространственное и пространственно-угловое распределения.

Из рисунка 2, очевидно, что в области 1-10 ПэВ на других экспериментах никакого согласия даже по самому интегральному показателю массового состава ПКЛ нет. Даже данные, полученные близкими методами ( $X_{\max}$ ,  $N_e / N_{\mu}$ ), отличаются. Ошибки последние 30 лет решение проблемы массового состава ПКЛ было неизменно связано с одновременной оценкой первичной энергии  $E_0$  и  $X_{\max}$ , поскольку в соответствии со средним поведением каскадной кривой, при известной  $E_0$  положение максимума в основном определяется массой первичной частицы.

Эта логика кажется естественной, но на самом деле имеет серьезные недостатки: Причины больших неопределенностей массового состава ПКЛ:

1. оценка первичной массы требует гораздо больше информации о событии, чем оценка энергии и направления первичной частицы;
2. каскадные флуктуации замазывают отличия средних характеристик для разных первичных масс;
3. сильно мешает неопределенность модели сильного взаимодействия;

4. традиционно используемые критерии (меры) первичной массы не оптимизированы относительно, а детекторы установок – относительно используемых критериев.

Обстоятельство (1) означает, что  $X_{\max}$  играет роль промежуточной переменной для перехода к первичной массе, что неизбежно приводит к потере информации о соотношении  $A - X_{\max}$  — это соотношение не является детерминированным. Обстоятельство (2) указывает на недостаточную информативность  $X_{\max}$ , что заставляет нас искать более информативные меры  $A$ .

## **1.2. Оценка первичных параметрах ШАЛ различными установками Pierre Auger Observatory**

Обсерватория Пьера Оже предназначена для изучения происхождения и природы космических лучей с наивысшей энергией. Обсерватория собирает данные в гибридном режиме, на заключительном этапе, включающем как наземный массив из 1600 резервуаров для воды Черенкова, расположенных на площади 3000 км<sup>2</sup>, так и 24 широкоугольных флуоресцентных телескопа Шмидта, размещенных в четырех местах на границе наземного массива. Гибридное обнаружение протяженных воздушных ливней значительно повышает точность восстановленных параметров первичных космических лучей и служит перекрестной калибровкой между двумя методами.

Неопределенность положения оси зависит от внутренних свойств ливня и варьируется от 100 м при самых низких энергиях до 50 м при самых высоких энергиях. Ими было показано, что угловое разрешение восстановленного направления прибытия составляет порядка 1° и приближается к 0,5° для самых больших размеров ливня, разрешение по первичной энергии составляет от 15% для самых маленьких ливней до - 6% для самых больших. Эти значения соответствуют первичным энергиям приблизительно 10<sup>18,5</sup> эВ и выше 10<sup>19,5</sup> эВ соответственно.

### Telescope Array (TA)

В Fly's Eye с высоким разрешением использовались более крупные зеркала и меньшие пиксели по сравнению с оригинальным Fly's Eye, отсюда и название. Прототип эксперимента HiRes проводился в период с 1993 по 1996 год на первоначальный участок для Fly'sEye-I (FiveMileHill). High Resolution Fly's Eye (HiRes) [39] (1997-2006гг) стал преемником проекта Fly's Eye. Как и в Fly's Eye, установка HiRes располагалась в Западной пустыне штата Юта, США и представляла собой эксперимент по изучению космических лучей высоких и сверхвысоких энергий методом регистрации по флуоресцентного излучения, вызываемого ШАЛ-а. По своей итоговой конфигурации она состояла из целых 63 детекторов флуоресцентного типа излучения, объединенных в два независимых кольца. В первое кольцо входило 21 зеркало диаметром 3 м, во второе – 42 зеркала. В первом кольце зеркала были ориентированы так, чтобы просматривать небо в диапазоне от 3 до 16 градусов по вертикали во всем диапазоне азимутальных углов. Во втором кольце – так, чтобы просматривать небо в диапазоне углов от 3 до 31 градуса по вертикали при условии полного азимутального покрытия. Группы детекторов располагались на вершинах двух холмов на расстоянии 12.6 км друг от друга. В безлунную ночь в области наблюдения обоих колец находилась атмосфера Земли над территорией общей площадью около 3000 км<sup>2</sup>. В течение года работы на установке HiRes было зарегистрировано не менее 300 событий с энергией выше 10<sup>19</sup> эВ. Установка HiRes стала первым экспериментом, результаты работы которого указали на наличие эффекта Грейзена – Зацепина - Кузьмина (ГЗК) – обрезания в спектре ПКЛ (данные AGASA не подтверждали существования ультра - фиолетового обрезания).

Прототип HiRes был разобран в начале 1997 года, чтобы стать частью окончательной конфигурации HiRes. В своей окончательной конфигурации HiRes состоял из двух площадок, разделенных расстоянием 12,6 км. Участки были расположены на вершинах холмов в испытательном полигоне Дагвей, испытательном полигоне армии США в западной пустыне Юты. HiRes-я

(расположено на пять MileHill или Маленький Гранит горе ( $40,1953^\circ \text{ N}$   $112,8363^\circ \text{ W}$ )) имела одно кольцо из 22 телескопов просмотра из 3-17 градусов по высоте. HiRes-I был оснащен электроникой для отбора проб и удержания, которая сделала «снимок» обширного атмосферного ливня, образовавшегося при взаимодействии падающих космических лучей с атмосферой. В то же время, HiRes-II (расположен на заднем хребте верблюжьего ( $40,13194^\circ \text{ N}$   $112,95896^\circ \text{ W}$  Координаты:  $40,13194^\circ \text{ N}$   $112,95896^\circ \text{ W}$ )) имел два кольца телескопов, чтобы обеспечить просмотр выше, в атмосферу. Наблюдается от 3 до 31 градуса по высоте. Обе площадки обсерваторий обеспечивали полное азимутальное покрытие (360 градусов по азимуту). Их прооперировали самостоятельно в безлунные ясные ночи. Рабочий цикл HiRes был близок к 10%. После из HiRes перешел на новую установку Telescope Array (ТА) [71].

Обсерватория под названием Telescope Array (ТА) — это гибридный эксперимент, для регистрирующих ШАЛ, вызванные космическими лучами ультравысоких энергий. Эксперимент расположен в западной пустыне штата Юты в США и покрывает площадь около  $700 \text{ км}^2$ . Центр установки имеет географические координаты  $39.3^\circ$  северной широты и  $112.9^\circ$  западной долготы и находится в юго-западном направлении от Солт-Лейк-Сити на расстоянии 200 км. Центр управления экспериментом расположен в г. Дельта на северо-восточной стороне установки. Расположение установки на высоте от 1300 до 1500 м над уровнем моря позволяет регистрировать ШАЛ, вызванные космическими лучами ультравысоких энергий вблизи максимума развития каскада. Наблюдения на установке Telescope Array в полной конфигурации начались в марте 2008 г. Работа установки ТА была рассчитана на более, чем десятилетний период. Детекторы спроектированы с учетом устойчивой работы в условиях пустыни с большими вариациями температуры в течение дня в рамках общего диапазона температур от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Все системы включают системы мониторинга и регулярной калибровки для контроля изменения отклика детектора во времени [62-63].

Коллаборация TA также осуществила анализ крупномасштабной анизотропии КЛ СВЭ, но методика была другой. Вследствие эффекта ГЗК распространение КЛ самых высоких энергий ограничено расстояниями  $\sim 100$  Мпк — на этих масштабах Вселенная еще в значительной степени неоднородна. В подавляющем большинстве моделей возникновения КЛ таких энергий следует ожидать корреляции между направлениями их прихода и распределением галактик в этом объеме, которое, в свою очередь, хорошо известно из наблюдений. В предположении чисто протонного состава КЛ было найдено, что распределение событий с энергией более 10 ЭэВ и более 40 ЭэВ согласуется с гипотезой об изотропности и не следует крупномасштабному распределению материи на углах «размывания» направлений прихода менее  $20^\circ$  и менее  $10^\circ$  соответственно. В отличие от этого, для событий с энергией выше 57 ЭэВ оказалось, что их распределение согласуется с распределением материи и не согласуется с гипотезой изотропности на уровне значимости  $\sim 3$ . Важно отметить, что изучение крупномасштабной анизотропии направлений прихода КЛ представляет собой нетривиальную задачу, поскольку корректное определение полного набора мультипольных коэффициентов требует знания потока КЛ по всей небесной сфере, однако существующие наземные установки не в состоянии это обеспечить. По этой причине особый интерес представляет исследование анизотропии КЛ СВЭ, выполненное совместно коллаборацией TA и Оже [37,38]. Для взаимной калибровки потоков использовались данные, полученные в полосе по склонению, доступной наблюдению обоими экспериментами. Для анализа было отобрано 2560 событий с зенитными углами до  $55^\circ$  и энергией выше 10 ЭэВ, зарегистрированных за 6 лет работы TA, и 16835 событий с зенитными углами до  $80^\circ$  и энергией более 8.8 ЭэВ, набранных за 10 лет работы Оже. В результате не было найдено никаких статистически значимых отклонений от изотропного распределения потока КЛ, но удалось получить верхние оценки для амплитуд дипольного и квадрупольного моментов как функций направления на небесной сфере.

## **Якутская комплексная установка для регистрации широких атмосферных ливней**

Якутская установка занимает площадь  $12 \text{ км}^2$ , на которой детекторы на основе пластических сцинтилляторов толщиной 5 см и площадью  $2 \text{ м}^2$  каждый расположены по углам треугольника со сторонами 500, 1000 м. Такое расположение детекторов обусловлено тем, что космические лучи образуют лавинообразный процесс при прохождении атмосферы, сталкиваясь с ядрами атомов воздуха, и на поверхности земли охватывают большие площади. В центре установки имеются аналогичные станции с раздвиганиями от 50 до 250 м, которые дополнены приемниками черенковского излучения ШАЛ (черенковские интегральные детекторы). А также введены в эксплуатацию три черенковских дифференциальных детектора на основе камеры обскура [Garipov et al, 2001] для исследования продольного развития ШАЛ [62-70].

Установка предназначена для исследования космического излучения сверхвысоких энергий, достигающего атмосферы Земли. Изучаются развитие каскадных процессов в атмосфере Земли, а также характеристики первичного излучения: интенсивность, энергетический спектр, состав, источники (области), генерирующие частицы с энергией в сотни и тысячи раз превышающие энергии, достигнутые в настоящее время на современных ускорителях мира. В настоящее время Якутская установка ШАЛ является единственной в России и одной из крупнейших установок в мире, ведущих исследования в области энергий выше  $10^{17}$  эВ. В якутской установке при энергии первичной частицы  $E_0 \geq 10^{16}$  эВ ошибка определения координат оси ливня 15–35 м, а зенитный угол направления прихода находится с точностью  $\sim 3\text{--}5^\circ$ , при  $E_0 \geq 3 \cdot 10^{16}$  эВ - не более 10 м, а точность определения направления равно  $\sim 3\text{--}5^\circ$ .

При помощи разработанного программного обеспечения для установки предполагают восстанавливать координаты ливней с достаточной точностью до 10 м начиная с энергии  $5 \cdot 10^{16}$  эВ [62-70].



## **Установка Тунка –ТАЙГА**

Начиная с 1993 года в Тункинской долине (республик Бурятия) в 50 км от озера Байкал создается большой экспериментальный центр в области физики космических лучей и гамма-астрономии. Первая установка Тунка - ТАЙГА предназначена для регистрации космических лучей по черенковому свету, возникающему при прохождении частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ) через атмосферу. Тунка - ТАЙГА, включает в себя в настоящее время 175 оптических детекторов, регистрирующих черенковское излучение ШАЛ. Все детекторы сгруппированы в 25 кластеров, по 7 детекторов в каждом. Шесть детекторов одного кластера расположены в вершинах правильного шестиугольника, один в центре. Расстояние между детекторами 85 метров. Строительство центральной части установки, включающей в себя 19 кластеров, распределенных на площади около квадратного километра, было завершено в 2009 году. В 2010-2012 годах развернуто дополнительно 6 внешних кластеров, так что площадь установки Тунка-133 выросла до 3-х квадратных километров.

Каждый детектор содержит один ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см. Энергетический порог установки  $10^{15}$  эВ. Энергетическое разрешение 15%, точность определения глубины максимума ШАЛ не хуже  $25 \text{ г/см}^2$ , точность восстановления положения оси ШАЛ – 6 – 10м, направления оси ШАЛ -0,5 град. Установка в полном объеме начала работать в 2012 году. В настоящее время это крупнейшая в мире широкоугольная черенковская установка [36-40].

## **Астрофизическая обсерватория ТАЙГА**

TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy). Основная цель коллаборации - проведение исследований в области астрофизики частиц высоких энергий на новом уровне чувствительности. В последние несколько лет на астрофизическом полигоне в Тункинской долине (50 км от озера Байкал) началось развертывание

обсерватории для проведения исследований в области астрофизики частиц высоких энергий.

В последние несколько лет на астрофизическом полигоне в Тункинской долине (50 км от озера Байкал) началось развертывание обсерватории для проведения исследований в области астрофизики частиц высоких энергий. Ближайшая цель построить до конца 2019 года первую часть обсерватории TAIGA, которая будет состоять из: 100–110 оптических станций установки TAIGA- HiSCORE, расположенных на площади 1 км<sup>2</sup>, три атмосферных черенковских телескопа с анализом изображений (АЧТ) и 200 м<sup>2</sup> детекторов мюонов (установка TAIGA-MUON). Такая установка позволит доказать эффективность гибридного подхода для гамма-астрономии сверхвысоких энергий и начать проведение серьезной научной программы.

Главным преимуществом работы Астрофизическая обсерватория ТАЙГА (АЧТ) в сети широкоугольных черенковских станций является более эффективное выделение событий от гамма-квантов на фоне ШАЛ от заряженных космических лучей. Информация о параметрах изображения ШАЛ (параметрах Хилласа) дополняется параметрами ШАЛ (положение оси, направление, энергия), хорошо восстанавливаемыми широкоугольной установкой. Высокая эффективность подавления событий от космических лучей в современных гамма-обсерваториях достигается при стереоскопическом подходе, при котором ШАЛ регистрируется несколькими АЧТ.

Декларируемое энергетическое разрешение в АЧТ для первичной энергии приближается к 10 - 15% при высоких энергиях [39], ошибка положения оси ливня составляет ~10-15м. Ошибка направления оси указывается в виде зависимости “углового разрешения от числа включившихся быстрых детекторов” и лежит между 0,4°-0,5° при 4-5 сработавших детекторах и 0,10° при 10 [36-40].

## **Эксперимент LHAASO**

Гибридный эксперимент с двумя телескопами и массивом ПКЛ ARGO-YBJ, расположенным в Янбаджине Лаборатория космических лучей (Тибет, Китайская Народная Республика, 4300 м над уровнем моря) начала наблюдения за воздушными ливнями в 2008 году. Один из телескопов Черенкова, названный WFCT - 01, расположен на расстоянии 99,1 м от центра массива RPC за пределами северо-западного угла зала экспериментов ARGO. Другой, названный WFCT-02, расположен юго-восточном углу детектора ARGO-YBJ, примерно в 78,9 м от центра массива ПКЛ.

Установка LHAASO [38-39] расположена на высоте 4410 метров в китайской провинции. Площадь обсерватории достигает 1 квадратного километра, на котором расположены 5195 сцинтилляционных счетчиков и 1188 мюонных детекторов, а в центре — 3 водных черенковских детектора с общей площадью в 78 000 квадратных метров и 18 черенковских детекторов с широким полем зрения. Все эти детекторы могут работать как одновременно, так и отдельно. У всех них разные разрешение, и они по-разному могут оценить первичные параметры.

На установке энергетическое разрешение 10%, точность определения глубины максимума ШАЛ не хуже  $14 \text{ г/см}^2$ , точность восстановления положения оси ШАЛ – составляет около 4-9 м при 20 ТэВ и 2 - 4 м при 100 ТэВ, направления оси ШАЛ для вертикальных ливней равно  $0.31^\circ$  для ливни с зенитным углом  $45^\circ$  приблизительно составляет  $1.5^\circ$ .

## **Установка KASCADE**

Эксперимент KASCADE [41] состоит из трех основных компонентов: массива детекторов электронов и мюонов, центрального детектора, предназначенного в основном для измерения адронов, но со значительными областями обнаружения мюонов, и подземного детектора отслеживания мюонов (MTD).  $e/\gamma$ - и  $\mu$ -детекторы занимают площадь  $200 \times 200 \text{ м}^2$  и состоят

из 252 детекторных станций, расположенных на квадратной сетке из 13 м разделение, обеспечивающее в общей сложности около  $490 \text{ м}^2 \text{ e}/\gamma$  и  $622 \text{ м}^2$  мюонного покрытия.

Пороговые значения обнаружения для вертикального падения составляют  $E_e > 5 \text{ МэВ}$  и  $E_\mu > 230 \text{ МэВ}$ .

Точность восстановления направления мюона составляет  $\sigma \approx 0,35^\circ$  [42].

Благодаря покрытию мюонного детектора площадью около  $1000 \text{ м}^2$  KASCADE - Grande обеспечивает гораздо лучшую долю отбора мюонов (около  $1000 \text{ м}^2$ ), чем в любом другом предыдущем эксперименте.

KASCADE - Grande включает в себя 37 станций сцинтилляционных счетчиков площадью  $10 \text{ м}^2$ , повторно использованных из бывшего ШАЛ-ТОР эксперимент [43]. Станции расположены на среднее взаимное расстояние составляет около 130 м. Они подразделяются на 16 отдельных сцинтилляционных детекторы ( $80 \times 80 \text{ см}^2$ ), считываемые одной фототрубкой каждый. Внутренние четыре сцинтилляционных детектора представляют собой независимо считывается фототрубками с низким коэффициентом усиления для обеспечения высокого динамического диапазона с высококачественное измерение плотности частиц и времени менты от  $\approx 0,3$  до  $\approx 30000$  заряженных частиц на  $10 \text{ м}^2$  [44].

Из всех вышеуказанных существующих установках можно сделать вывод, что задача по массовому составу не решена, потому что они работают по положению ( $X_{\max}$ ) каскада заряженных частиц. Они работают по старой схеме, а на положение максимума влияет угловое распределение. Они используют старую идею оценки массового состава по положение ( $A_{\max}$ ) каскада.

Действующие эксперименты хорошо устроены, но они не смогут давать точные оценки. Например, установка KASCADE — Grande, решает проблему массового состава в ПэВ-ном диапазоне энергии. У них плотность детекторов

13 м между детекторами, и они не могли давать точность оценки первичным параметрам для определения первичной массы. У них угловое распределение частиц меньше, чем света и в этом диапазоне они не могут их точно оценить.

А в Эксперимент LHAASO первичные параметры оцениваются точно, но они не могут различать массу первичных ядер ( $X_{\max}$ ) ЧС.

В общем можно сделать следующие выводы:

- проблему решают уже несколько десятилетий, но солидного решения при  $E_0 > 1$  ПэВ до сих пор нет;
- более того, использование прежних методов не дает надежды решить проблему в будущем.
- должна быть другая установка, который может мерит, те характеристики, которые чувствительны к первичной массе.

И мы предлагаем, решить эти проблемы при помощи оптической части установки Памир-XXI.

### **Постановка задачи**

Мы планируем существенно продвинуть вперед решение обеих классических задач, поставленные перед установками ШАЛ (и проблемы модели взаимодействия) на основе новых подходов, в рамках проекта Памир-XXI.

Настоящая работа не касается адронных исследований в стволах ШАЛ. Она рассматривает возможности решения для традиционных астрофизических задач: изучения массового состава и энергетического спектра ПКИ и регистрации семейств  $\gamma$ -квантов сверхвысокой энергии от точечных и от диффузных источников. Наша логика решения этих задач несколько отличается от используемой в прошлых и настоящих экспериментах.

Ставится задача, создать набор черенковских детекторов, оптимизированный для решения проблемы оценки массы/типа первичной частицы. Предлагаемый вариант оптической части установки будет анализировать угловые черенковские образы (пространственно-угловое распределение ЧС) и импульсы (пространственно-временное распределение)

ЧС и для этого будет включать широкую сеть быстрых оптических детекторов и несколько широкоугольных телескопов.

Оптическая часть установки использует пространственно-временные и пространственно-угловые характеристики ЧС для оценки характеристик первичной частицы и, следовательно, должна включать два набора детекторов для решения задач об энергетическом спектре и массовом составе:

- 1) прямоугольную сетку 11 x 11 широкоугольных быстрых детекторов площадью  $\sim 1.0 \text{ м}^2$  и апертурой  $\sim 1 \text{ ср}$ , которые расположены с шагом 25 м, и позволяют определять направление прихода ливней с точностью не хуже  $0,1^\circ$ , положение оси с точностью  $\sim 1 \text{ м}$  и энергии с точностью около 15% и анализировать форму черенковского импульса;
- 2) оптические телескопы с зеркалами площадью  $\sim 4 \text{ м}^2$ , полем зрения диаметром около  $30^\circ$  и диаметром пиксела  $\sim 0,8^\circ$ , раздвинутые на 100-150 м друг от друга, позволяют анализировать пространственно-угловое распределение черенковского света вблизи оси, чувствительное к массе первичной частицы, причем методика разделения ядер по массе существенно опирается на точное определение направления первичной частицы.

Конструкция этих телескопов было исследовано в других наших работах. Мы поставили задачу сконструировать черенковские телескопы таким образом, чтобы обработки его данные по массам было лучшее, чем во всех предыдущих установках.

Функции оценка энергии первичной частицы лежит на сетки быстрых оптических детекторов. Сеть быстрых оптических детекторов с размером ячейки  $\sim 25 \text{ м}$  определяет энергии первичной частицы.

Массовый состав ПКИ на установке «Памир-XXI» будет в основном исследоваться по пространственно-угловым характеристикам черенковского света ШАЛ.

Для получения критерии направление первичной частицы надо знать точность не хуже  $0,1$  градуса.

## ГЛАВА 2. ПРОЕКТ ПАМИР – XXI

Проект «Памир-XXI» [44] который планировался как комплексное исследование первичного космического излучения (ПКИ) в широком диапазоне энергий от 30 ТэВ до 1 ЭэВ и характеристик ядерного взаимодействия, не доступных для изучения на ускорителях. Предполагается также использовать сети детекторов заряженных частиц, оптические детекторы и ионизационный калориметр для регистрации различных компонент ШАЛ: электронно-фотонной, мюонной, адронной и черенковского света (ЧС).

Большая высота уровня наблюдения (4250-4260 м над уровнем моря) даёт определённые преимущества для решения обеих поставленных задач:

- ливни регистрируются на более ранних стадиях развития, чем на уровне моря, что означает большие плотности заряженных частиц и большие энергии адронов в стволах ливней;
- оптические детекторы приближаются к излучающему ЧС источнику, что позволяет разглядеть больше деталей, чем с уровня моря.

Решено было использовать эти преимущества при выборе измеряемых характеристик, типов используемых детекторов и их расположения на основании детального моделирования развития ШАЛ. Предлагаемые конфигурации оптической части установки и сети детекторов заряженных частиц, а также способы обработки их данных действительно обеспечивают принципиально меньшие неопределённости при оценке энергии направления и типа первичной частицы, чем дают традиционные методы на меньших высотах наблюдения.

Анализ результатов работы многих установок для регистрации ШАЛ, начиная с середины прошлого века и до наших дней, показывает, что не удаётся успешно оценивать энергию и направление первичной частицы, а массу первичной частицы оценить как правило не удаётся. Практически это означает, что даже примерное знание массы первичного ядра требует получения гораздо большего объёма экспериментальной информации о

каждом ливне. Анализ расчётных характеристик ШАЛ [68, 69, 70] привел нас к такому же выводу, он также позволил понять причины такой ситуации: информация о массе первичной частицы доносится до уровня наблюдения в основном черенковским светом и энергичными мюонами, но и её трудно выделить, поскольку она маскируется значительными каскадными флуктуациями. Это подводит нас к первому важному для постановки задачи детектирования ШАЛ тезису: конструкция детекторов установки, их расположение и методы обработки их данных должны быть оптимизированы относительно самых информационно требовательных проблем, именно, проблем оценки первичной массы и выделения  $\gamma$ -событий.

Второй важный тезис является естественным продолжением первого: при многокомпонентных измерениях в качестве базовой (эталонной) должна быть выбрана наиболее информационно богатая компонента, каковой в выбранном энергетическом диапазоне является ЧС. Забегая вперёд, можно сказать, что измерение характеристик ЧС позволяет решить все поставленные задачи, но небольшой ( $\leq 10\%$ ) рабочий цикл оптических измерений затрудняет получение статистики ШАЛ с энергиями выше 1 ЭэВ. Отсюда следует третий тезис: необходим такой набор детекторов для заряженных частиц, способный определять характеристики первичной частицы в диапазоне энергии  $E_0 \geq 1$  ПэВ; если эта часть установки окажется способной оценивать массу первичной частицы, настройка метода должна основываться на данных эталонной оптической части.

В свете произнесённых тезисов, нам необходимо создать набор черенковских детекторов, оптимизированный для решения проблемы оценки массы/типа первичной частицы. Предлагаемый вариант оптической части установки будет анализировать импульсы, угловые черенковские образы (пространственно-угловое распределение ЧС) и (пространственно - временное распределение) ЧС и для этого будет включать широкую сеть быстрых оптических детекторов и несколько широкоугольных телескопов. Широкая сеть детекторов заряженных частиц будет работать при  $E_0 \geq 1$  ПэВ



для получения оценок  $E_0$ ,  $\theta$ ,  $X_{\text{core}}$ , которые будут использоваться центральным калориметром и/или мюонными детекторами (предположительно, мюонными треккерами) для получения оценки первичной массы  $A$ . Метод оценки  $A$  по детекторам заряженных частиц следует настраивать по данным оптической части в общей области диапазона первичных энергий.

Описанный ниже предлагаемый вариант установки не является завершённым: построена в области заряженных частиц демонстрирует хорошие точности оценок  $E_0$ ,  $\theta$ ,  $-x_{\text{core}}$ , но пока не может оценивать массу первичной частицы. Обе части построены на основании полного статистического моделирования ШАЛ.



**Рисунок 3. Схема расположения детекторов в установке Памир – XXI**

### **2.1. Оптическая часть установки Памир – XXI**

Оптическая часть установки (рис.3) предназначена прежде всего для решения проблем массового состава и энергетического спектра и ПКЛ в диапазоне энергий  $10^{14}$ - $10^{17}$  эВ, на основании измерений характеристик ЧС ШАЛ [45].

Установка должна включать в себя оптические детекторы двух типов --- широкоугольные быстрые детекторы площадью  $\sim 1.0 \text{ м}^2$  и полем зрения диаметром  $40\text{-}50^\circ$ , способные регистрировать пространственно-временное распределение (ПВР) ЧС, и оптические телескопы с зеркалами площадью  $\sim 4 \text{ м}^2$ , полем зрения диаметром не менее  $20^\circ$  и диаметром пиксела  $0,7\text{-}0,8^\circ$ , регистрирующие пространственно-угловое распределение (ПУР) ЧС.

Сеть быстрых детекторов с размером ячейки  $\sim 25 \text{ м}$  определяет направление прихода ливней, положение осей и энергии и позволяет анализировать форму импульса ЧС.

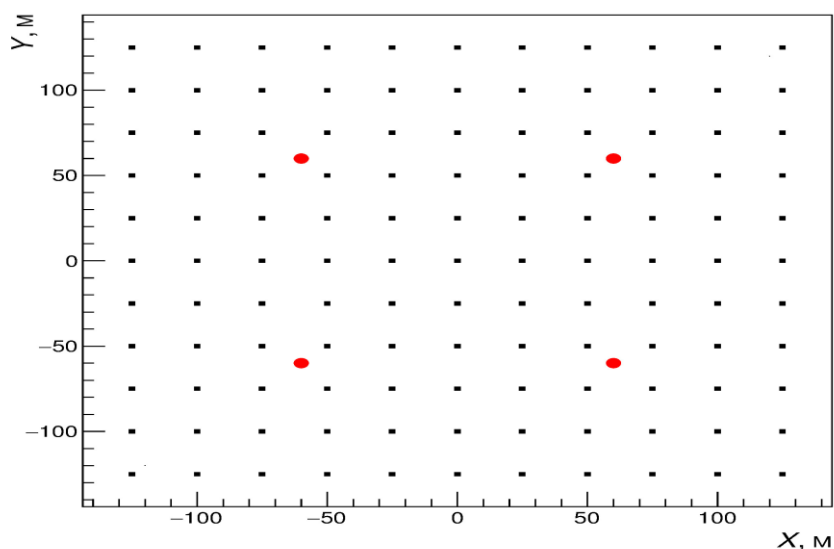
Набор из нескольких (3-4) телескопов, раздвинутых на  $100\text{-}150 \text{ м}$  друг от друга, позволяет анализировать ПУР ЧС для оценки первичной массы с использованием данных о положении оси ливня, его направления и энергии.

Все детекторы массива должны быть направлены одинаково в зенит, или если толщина слоя воздуха выше уровня наблюдения слишком мала для того, чтобы ливни интересующей энергии генерировали достаточно света, под определенным углом к вертикали. Телескопы должны быть расположены в центральной части сети быстрых детекторов. Измерения для энергий выше  $10^{16} \text{ эВ}$ , вероятно, потребуют увеличения масштаба установки и следовательно, ее структура должна быть масштабируемой.

Возможности оптической части установки «Памир-XXI» были рассмотрены в предыдущих наших работах [46-52]. Здесь мы обсуждаем её способность оценивать энергию, направление и положение первичных частиц ШАЛ с помощью данных сети быстрых оптических детекторов. Поскольку мы разрабатываем методику регистрации ливней с малыми зенитными углами ( $\theta < 10^\circ\text{-}30^\circ$ ), пока используются вертикальные искусственные события. Расчётный уровень наблюдения –  $4250 \text{ м}$  над уровнем моря.

1) прямоугольная сеть из  $11 \times 11$  широкоугольных быстрых детекторов площадью  $\sim 1 \text{ м}^2$  и апертурой  $\sim 1 \text{ ср}$ , расположенных с шагом  $25 \text{ м}$  (квадраты), позволяющая определить направление оси ливня с точностью лучше  $0,1^\circ$ , её положение с точностью  $\sim 1 \text{ м}$  и первичную энергию с

точностью не хуже 15%, а также позволяет анализировать форму импульса ЧС;



**Рисунок 4. Расположение оптических детекторов установки**

2) угловые черенковские телескопы (кружки) с зеркалами площадью  $\sim 4 \text{ м}^2$ , диаметром поля зрения около  $30^\circ$  и диаметром пиксела  $\sim 0,8^\circ$ , удалённые друг от друга на расстояния  $\sim 100 \text{ м}$  и обеспечивающие анализ ПУР ЧС на небольших расстояниях от оси, чувствительного к массе первичной частицы.

Использование угловых черенковских телескопов для решения задачи о массовом составе не является общепринятым в методе ШАЛ, но широко используется в черенковской  $\gamma$ -астрономии [53-61]. Оценка массы первичной частицы и выделения  $\gamma$ -событий на фоне ядерных практически одинаков для обеих задач и заметно отличается от устоявшейся  $\gamma$ -астрономической методики. Это обстоятельство требует некоторых пояснений. Поскольку была поставлена задача найти оптимальное решение задачи о массовом составе ПКИ на основе характеристик ЧС, естественно было использовать достижения черенковской  $\gamma$ -астрономии, но при этом учесть особенности

источника ЧС — ливня от первичного ядра, наблюдаемого на высоте гор. Необходимо было также найти наиболее чувствительный критерий для выделения групп первичных масс. Обычно в качестве меры первичной массы используется положение максимума  $X_{\max}$  ШАЛ. Такой выбор обусловлен давно известным фактом, что положение максимума среднего каскада однозначно зависит от массы ядра и первичной энергии для заданной модели адронного взаимодействия [62-65].  $X_{\max}$  используется в методе ШАЛ уже много десятилетий и является концентрированным выражением среднего подхода к обработке данных: оценка параметров ливня выполняется на основании средних расчётных характеристик, данные группируются на основании этих оценок, физические выводы делаются по средним величинам в каждой группе.  $X_{\max}$  как мера первичной массы имеет ряд существенных недостатков, главные из которых — её значительные флуктуации в индивидуальных ливнях при недостаточной корреляции с первичной массой и непосредственная не наблюдаемость (за исключением флуоресцентных наблюдений при предельно высоких энергиях). Это можно трактовать как недостаточную чувствительность  $X_{\max}$  к  $A$ , усугубляемую дополнительными погрешностями при её вычислениях на основе непосредственно наблюдаемых величин [66-70].

## 2.2. Генерация искусственных событий ШАЛ (CORSIKA)

Существуют ряд моделей для изучения ШАЛ. Модели ШАЛ реализованы, например, в программном комплексе (ПК) CORSIKA [71,72]. В моделях QGSjet, EPOS, EPOS-LHC, SIBYLL изучаются ШАЛ с энергиями отслеживаемых частиц  $>200$  ГэВ, в то время как для описания экспериментальных данных РЭК необходим учет более низких энергий отслеживаемых частиц. GEANT и FLUKA моделируют ШАЛ с энергиями отслеживаемых частиц  $<200$  ГэВ [73], однако максимальная энергия ядер ПКИ составляет 10 ТэВ в модели FLUKA, либо 10 ПэВ в составе с DPMJET.

Чтобы смоделировать развитие обширных воздушных ливней (ШАЛ) в атмосфере при сверхвысоких энергиях и сравнить моделируемые и экспериментальные отклики детекторов на взаимодействия частиц ШАЛ, необходимо, в частности, учитывать низкоэнергетические взаимодействия как барионов, так и мезонов, особенно на заключительном этапе разработки ШАЛ (см. Рис: 1).

Моделирование ЧС ШАЛ для уже выбранной экспериментальной площадки Куруч-Куль (4250 м над уровнем моря) показывают, что рассматриваемые оптические телескопы также позволят проводить отбор ШАЛ от гамма - квантов ультравысокой ( $> 30 \text{ TeV}$ ) энергии на фоне ШАЛ от ядер. Образы гамма-ливней существенно отличаются от образов ШАЛ от протонов, гораздо больше, чем образы ливней от различных ядер. Тем не менее, отбор гамма - событий представляет серьезную проблему, поскольку поток ядерных событий выше на 3-4 порядка. Использование описанных выше черенковских телескопов позволяет отбросить 99% ядерного фона при сохранении около 75% гамма – событий [74-80].

Объёмы выборок искусственных событий, разыгранных по CORSIKA/QGSJET01 и CORSIKA/QGSJET-II-04 [67], составляют от 600 для  $E_0=30\text{-}100 \text{ ТэВ}$  до 36 для  $E_0=100 \text{ ПэВ}$ , но имеющаяся обильная информация о каждом событии позволяет использовать его много раз. Данные о ПВР ЧС в каждом событии записываются в отдельный файл, содержащий массив  $600 \times 600 \times 302$  ячейки, причём первые две размерности соответствуют пространственным переменным на уровне наблюдения, последняя – времени прихода света в детектор. Пространственные ячейки массива имеют размер  $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$  и образуют сплошной ковёр с центром на оси ливня, размер временных ячеек 1 нс, причём последняя ячейка – интегральная. При фиксированной геометрии сетки быстрых оптических детекторов данные о ПВР ЧС одного и того же события в детекторы сетки выбираются по-разному в зависимости от расположения центра сетки по отношению к оси ливня.

Поскольку варианты данных формируются сдвигом сетки по ковру  $600 \text{ м} \times 600 \text{ м}$  с минимальным шагом  $1 \text{ м}$  по  $x$  и/или по  $y$ , то 1) вариантов может быть очень много ( $\sim 100000$ ) и 2) они не являются полностью независимыми в силу корреляций между соседними вариантами. Однако сравнение результатов для разного количества вариантов данных от каждого события не выявили существенных отличий в моментах распределений, характеризующих неопределённости первичных параметров. Поэтому в приводимых ниже результатах для каждого события были использованы все допустимые варианты (конфигурации) данных, что гарантировало непредубеждённый учёт различных относительных геометрий «детектор-ливень».

### 2.3. Обработка событий

Обработка пространственно - временных данных по ЧС требует модельных функции временного фронта (ВФ), поперечного распределения (ПР) и их флуктуаций. Модели строятся на основании выборок искусственных событий с одинаковыми первичными параметрами. При обработке таких отдельных событий эти модели подгоняются к данным по распределённой сети детекторов, что позволяет получать оценки  $(E_0, \theta, x_{\text{core}})$ . В большинстве случаев использовались простые полиномиальные аппроксимации:

$$F_{FS}(R) = R(b_0 + b_1R + b_2R^2) \quad (1)$$

- для индивидуальных и средних фронтов и их флуктуаций

$$F_{LD}(R) = \frac{a_0}{1 + a_1R + a_2R^2 + a_3 + R^3} \quad (2)$$

- для индивидуальных и средних ФПР ЧС и их флуктуаций.

где  $R$  — расстояние от оси до детектора.

Модели полностью оправдали себя при обработке ЧС во всем рассмотренном диапазоне первичных энергий  $1 - 100 \text{ ПэВ}$ .

Эти же модели (1,2) использовались для обработки данных по частицам. В этом случае модель (1) может давать нефизические знак переменные аппроксимации при обработке индивидуальных ПР частиц при  $E_0 \sim 1$  ПэВ, что иногда приводит к отрицательным полным числам частиц. Это объясняется большими флуктуациями плотностей частиц в индивидуальных событиях в пороговой области по первичным энергиям и гибкостью полиномиальной аппроксимации.

Обработка ПУР ЧС не требует модельных функций, она заключается в нахождении оси черенковского пятна на вычислении интегралов по определенным его областям. При этом важную роль играет оценка направления первичной частицы, полученная по пространство-временным данным.

### **Измерение первичной энергии ШАЛ оптической частью установки**

В нашей работе регистрация ШАЛ сеткой быстрых оптических детекторов амплитудная информация аппроксимируется простой моделью функции поперечного распределения (ФПР) ЧС, показанное в вышеупомянутой формуле (1).

Энергия ливней будет оцениваться по интегралу CL300 от ФПР ЧС в круге радиуса 300 м с центром на оси ливня [70]:

$$CL300 = 2\pi \int_0^{300} LDF(R)RdR . \quad (3)$$

Параметры ФПР получаются в результате одновременного приближения моделями ФПР ЧС и временного фронта (ВФ) ЧС данных по пространственно-временному распределению ЧС в каждом ливне. Неопределенности CL300 для  $E_0 = 1, 10, 100$  ПэВ приведены в Таблице 1. Добавление фона ночного неба и преобразование суммарного набора

фотонов в фотоэлектроны не меняют неопределённостей оценок первичной энергии.

### **Оценки направления первичных частиц оптической частью установки**

Для создания алгоритма оценки первичного направления необходимы расчетные модели черенковского фронта и поперечного распределения черенковского света ШАЛ от разных первичных ядер.

Информация о направлении первичной частицы важна сама по себе, но в нашем случае она также играет важную роль в оценке первичной массы. Погрешность определения направления, требуемая нашими первичными критериями выбора массы, должна составлять около  $0,1^\circ$ , что значительно лучше обычных ошибок направления ШАЛ ( $\approx 1^\circ$ ) и довольно характерно для угловой точности черенковской гамма-астрономии.

Основным инструментом для определения первичного направления будет сеть быстрых оптических детекторов. На данный момент она рассматривается как ортогональная сеть с ячейкой  $25\text{ м} \times 25\text{ м}$ , площадь покрытия  $250\text{ м} \times 250\text{ м}$  (или  $11 \times 11 = 121$  детектор). Каждый детектор имеет чувствительную площадь  $1\text{ м}^2$  и принимает свет в пределах конуса шириной в половину  $60^\circ$ , направленного в зенит. Сенсорная электроника может отбирать импульсы ЧС с частотой 1 ГГц.

Для определения направления импульс интегрируется, а время прихода фронта КЛ определяется как момент, когда интеграл превышает 50% - ный уровень его полного значения.

Искусственные образы ливней, инициированных 1PeV и 10PeV p, N, Fe, были смоделированы с помощью CORSIKA/QGSJET01 для 4250 м над уровнем моря. В каждом ливне пространственно-временное распределение ЧС было сохранено в пределах квадрата  $600\text{ м} \times 600\text{ м}$  (с центром в ядре душа) и интервалом задержки 0-300 нск 3D-массиве ( $600 \times 600 \times 300$ ).



Используя эти образы, были построены простые криволинейные модели фронта ЧС (средние функции и флуктуации), а затем имплементированы в алгоритмы определения направления.

Для достижения наилучших результатов в определении первичного направления также необходим алгоритм определения местоположения ядра ливня, который, в свою очередь, требует моделей (2) поперечного распределения ЧС (средних функций и флуктуаций).

Для проверки алгоритмов оценки направления ШАЛ были использованы выборки вертикальные и наклонные ливни с энергиями 1ПэВ - 100 ПэВ, каждая из которых содержит 60 событий изотропно распределенными внутри конуса полуширины  $30^\circ$ . Небольшие объемы выборки компенсировались большим объемом данных, хранящихся в каждом событии: для каждого моделируемого ливня учитывалось  $150 \times 150$  различных положений детекторной сети, что с точки зрения алгоритма делает одно моделируемое событие эквивалентным 22500 ливням.

### **Заключение по главе II**

- 1) В данной работе мы используем пакет CORSIKA для получения лучшего результата.
- 2) Данные моделирования хорошо описывают аппроксимирующую функцию.

## ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ ОСИ ШАЛ

### 3.1. Искусственные события ШАЛ и их использование

Искусственные события для уровня наблюдения 4250 м над уровнем моря моделировались с помощью CORSIKA/QGSJET01 и QGSJET02 [80] для набора фиксированных энергий от 1 ПэВ до 100 ПэВ с зенитными углами меньше 30 – градусов, для различных типов первичных частиц: протонов, ядер N, и Fe. Для каждого события сохранялись пространственно-временное распределение (ПВР) ЧС в квадратной области уровня наблюдения размером 600 м × 600 м с центром на оси ливня в виде массива 600 × 600 × 302 ячейки (каждая ячейка содержит число фотонов в области 1 м × 1 м × 1 нс), пространственно-угловое распределение (ПУР) ЧС в квадратной области 500 м × 500 м с центром на оси в виде массива 250 × 250 × 108 × 108 и стандартный файл частиц CORSIKA. Отказ от стандартного файла CORSIKA для черенковских фотонов обусловлен огромным их числом и, соответственно, неприемлемо большим объёмом файла при первичных энергиях выше 1 ПэВ.

Число оптических фотонов можно было бы уменьшить путём генерации их группами (пучками). Однако, мы намеренно выбрали генерацию пакетом CORSIKA отдельных черенковских фотонов (параметр CERSIZ=1), чтобы гарантировать отсутствие нефизических флуктуаций при рассмотрении очень дифференциальных характеристик ЧС. Таким образом, сохраняется вся информация с интересующей нас части уровня наблюдения с нужным пространственно - временным разрешением.

По этим распределениям были найдены простые модели кривого фронта ЧС, описывающие индивидуальные и средние функции и флуктуации, которые затем были использованы в алгоритмах определения направления и положения оси ливня.

### 3.2. Выбор функций фронта и функции поперечного распределения (ФПР) ЧС ШАЛ для определения первичных параметров

В новой установке «Памир-XXI» для измерения основных параметров частиц будут использоваться пространственное, угловое и временное распределение черенковского света (ЧС) широких атмосферных ливней (ШАЛ).

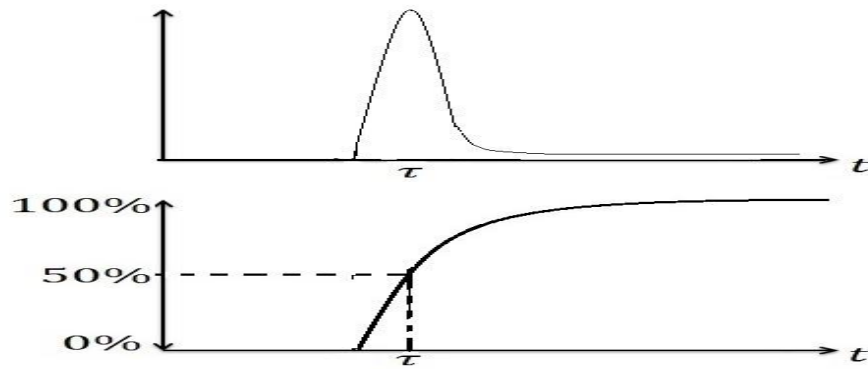
Все эти характеристики несут информации о развитии ливня, включая данные о его основной продольной характеристике, т.е каскадной кривой.

Увеличение первичной энергии и уменьшение массы приводит к росту продольного размера ШАЛ и смещения максимума  $X_{\max}$  средней каскадной кривой глубже в атмосферу. Это регулярное поведение размыто в индивидуальных событиях каскадными флуктуациями. Для определения положения оси ливня и направления его прихода на основании статистического моделирования ШАЛ были построены модели фронта и поперечного распределения ЧС.

Под фронтом в данной работе понимается геометрическое место точек движущегося облака черенковских фотонов, соответствующих фазе  $t$  черенковского импульса (рис.5), определяемой как момент достижения интегралом от импульса уровня 50%. Сетка быстрых детекторов позволяет определять направления прихода ливней по задержкам фронта, а положения осей и энергии - по полным интегралам импульсов, дающим поперечные распределения черенковского света.

Рисунок 5. Определение фронта черенковского света. Верхний рисунок – черенковский импульс, нижний – интеграл от импульса, момент  $t$  соответствует уровню 50% от полного интеграла.

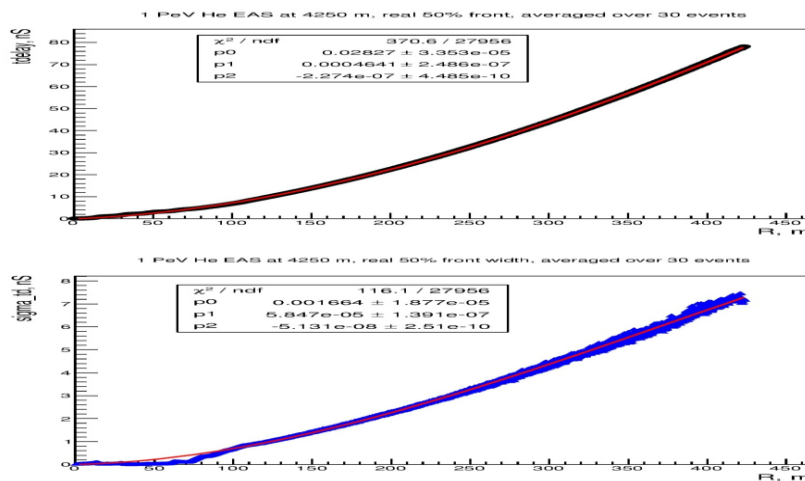
В данной работе для определения направления импульс от ЧС интегрируется, а время прихода фронта ШАЛ определяется как момент, когда интеграл превышает 50% - ный уровень его полного значения [78].



**Рисунок 5. Форма фронта ЧС**

Под фронтом в данной работе понимается геометрическое место точек движущегося облака черенковских фотонов, соответствующих фазе  $\tau$  черенковского импульса (рис.5), определяемой как момент достижения интегралом от импульса уровня 50%.

Сеть быстрых оптических детекторов позволяет определить направления прихода ливней по задержкам фронта, а положения осей и энергии по полным интегралам импульсов, дающим поперечные распределения черенковского света.

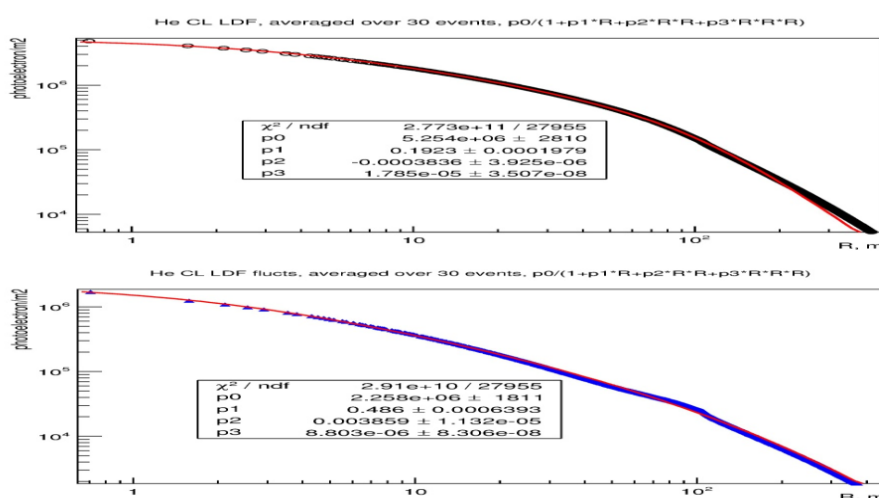


**Рисунок 6. Аппроксимации (красные линии) среднего фронта и флуктуаций фронта света ШАЛ от первичного ядра He с энергией 1 ПэВ и расчетные данные (черные и синие треугольники)**

На рисунке 6 приведены аппроксимации среднего фронта ( $\tau(R)$ ) и флуктуаций ( $\delta\tau(R)$ ) фронта черенковского света ШАЛ от первичного ядра He с энергий 1 ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря.

$$\text{Аппроксимирующие функции: } F(R)=P_0 \cdot R + P_1 \cdot R^2 + P_2 \cdot R^3. \quad (4)$$

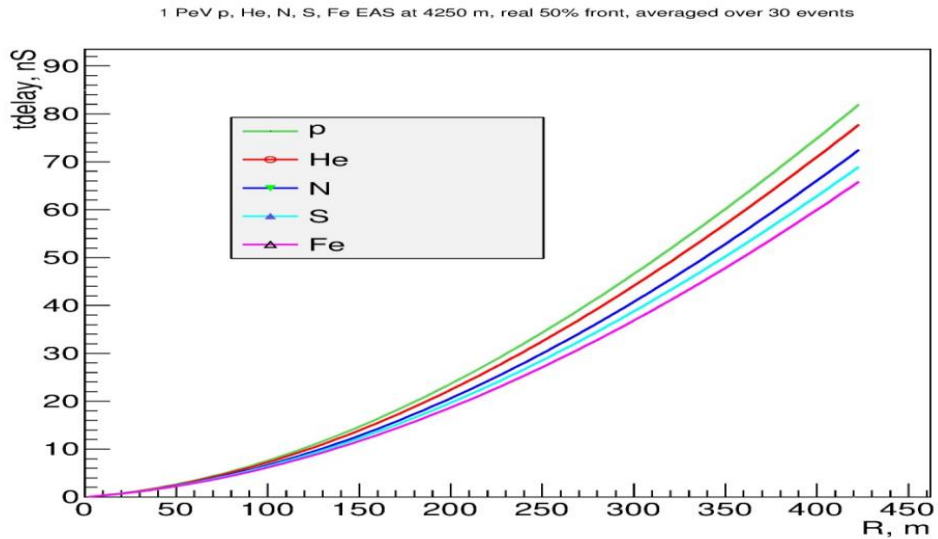
На рисунке 7 приведены аппроксимации среднего поперечного распределения ( $Q(R)$ ) и флуктуаций для поперечного распределения ( $\delta Q(R)$ ) от черенковского света ШАЛ для первичного ядра He с энергий 1 ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря.



**Рисунок 7. Аппроксимации (красные линии) среднего поперечного распределения и флуктуаций для поперечного распределения черенковского света ШАЛ от первичного ядра He с энергий 1 ПэВ и расчетные данные (черные кружки и синие треугольники)**

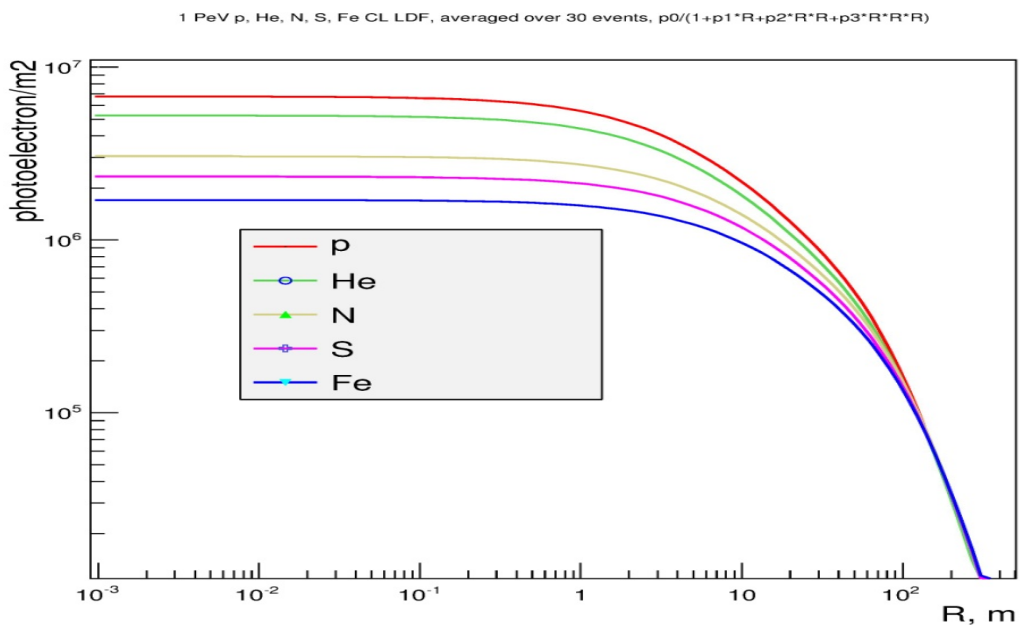
Аппроксимации  $Q(R)$ ,  $\delta Q(R)$ ,  $\tau(R)$ ,  $\delta\tau(R)$  для протонных ливней были использованы для создания процедуры определения положения оси и направления прихода протонных ливней с различными зенитными ( $0-30^\circ$ ) и азимутальными углами ( $0-360^\circ$ ) [81]. Направления ливней восстанавливались со средней точностью не хуже  $0,1^\circ$ , а положения осей — с точностью  $\sim 1$  м.

На рисунке 8: приведены аппроксимации среднего фронта ( $\tau(R)$ ) и флуктуация фронта ( $\delta\tau(R)$ ) света ШАЛ от первичных ядер He, p, N, S, Fe с энергией 1 ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря.



**Рисунок 8. Аппроксимации среднего фронта света ШАЛ от первичных ядер He, p, N, S, Fe с энергии 1 ПэВ по формуле (1)**

На рисунке 9 приведены аппроксимации поперечного распределения ( $\delta Q(R)$ ) и флуктуация поперечного распределения ( $\delta Q(R)$ ) черенковского света ШАЛ от первичных ядер He, p, N, S, Fe с энергии 1 ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря.

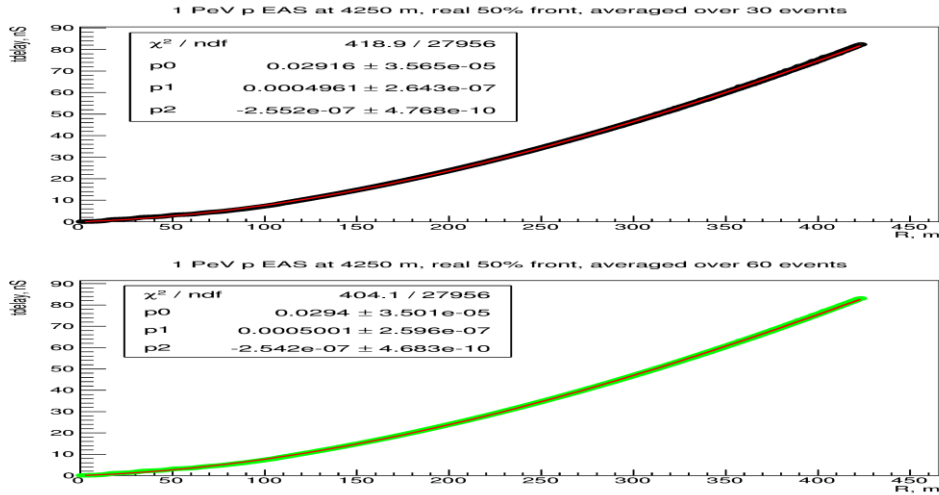


**Рисунок 9. Аппроксимации среднего поперечного распределения черенковского света ШАЛ от первичных ядер He, p, N, S, Fe с энергией 1 ПэВ**

**Таблица 1. Сравнение аппроксимации фронта и поперечного распределения между 30 и 60 события для черенковского света широких атмосферных ливней от различных ядер с энергией 1 ПэВ на высоте 4250 м над уровнем моря**

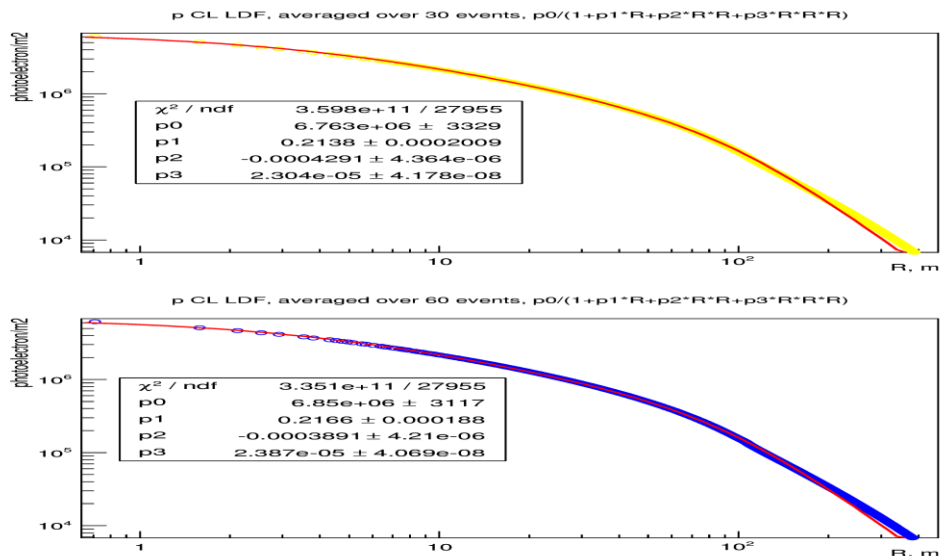
Час тица	Собы тия	фронт- P <sub>0</sub>	Фронт P <sub>1</sub>	фронт-P <sub>2</sub>	П\р-P <sub>0</sub>	П\р-P <sub>1</sub>	П\р-P <sub>2</sub>	П\р-P <sub>3</sub>
P	30	0,02916	0,000496	-2,522e-07	6,76e+06	0,2138	-0,0004291	2,304e-05
He	30	0,02827	0,000464	-2,274e-07	5,25e+06	0,1923	-0,0003836	1,785e-05
N	30	0,02727	0,000413	-1,729e-07	3,052e+0	0,1191	-0,0002049	9,111e-06
S	30	0,0278	0,000382	-1,482e-07	2,32e+06	0,0972	-8,408e-05	6,483e-06
F	30	0,0277	0,000352	-1,165e-07	1,704e+0	0,0772	8,08e-05	4,556e-06
P	60	0,0294	0,000500	-2,542e-07	6,85e+06	0,2166	-0,0003891	2,387e-05
He	60	0,0284	0,000461	-2,214e-07	5,137e+0	0,1892	-0,0003565	1,754e-05
N	60	0,02744	0,000412	-1,735e-07	3,086e+0	0,1216	-0,0002126	9,21e-06
S	60	0,02766	0,000382	-1,467e-07	2,307e+0	0,0969	-0,0001027	6,445e-06
F	60	0,02765	0,000356	-1,203e-07	1,745e+0	0,0774	-6,638e-05	4,648e-06

На рисунке 10 приведены аппроксимации среднего фронта ( $\tau(R)$ ) черенковского света ШАЛ от первичного р с энергий 1 ПэВ на высоте 4250 м над уровнем моря.



**Рисунок 10. Аппроксимации среднего фронта света ШАЛ от первичного  $p$  по 30-60 событии с энергией 1 ПэВ по формуле (1)**

На рисунке 11 приведены аппроксимации среднего поперечного распределения ( $Q(R)$ ,) черенковского света ШАЛ от первичного  $p$  по 30-60 событии с энергиями 1 ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря.



**Рисунок 11. Аппроксимации среднего поперечного распределения черенковского света ШАЛ от первичного  $p$  с энергии 1 ПэВ и расчетные данные (черные кружки и синие треугольники)**



### 3.3. Инструменты для определения направления и положения оси

Обработка пространственно - временных данных по ЧС требует модельных функции поперечного распределения (ПР), временного фронта (ВФ) и их флуктуаций. Модели строятся на основании выборок искусственных событий с одинаковыми первичными параметрами. При обработке отдельных событий эти модели подгоняются к данным распределённой сети детекторов, что позволяет получать оценки ( $E_0$ ,  $\theta$ ,  $x_{core}$ ). В большинстве случаев использовались простые полиномиальные аппроксимации: формулы (1) и (2).

Определение направления ливня (или направления первичной частицы) происходит одновременно с поиском положения оси путём аппроксимации измеренных времён прихода фронта моделью ВФ и измеренных чисел черенковских фотонов/фотоэлектронов моделью ПР.

Процедура оценки первичной направлении ШАЛ, начинается с использования массива данных о ПВР ЧС индивидуального события, где они записываются в отдельный файл, содержащего  $600 \times 600 \times 302$  ячейки.

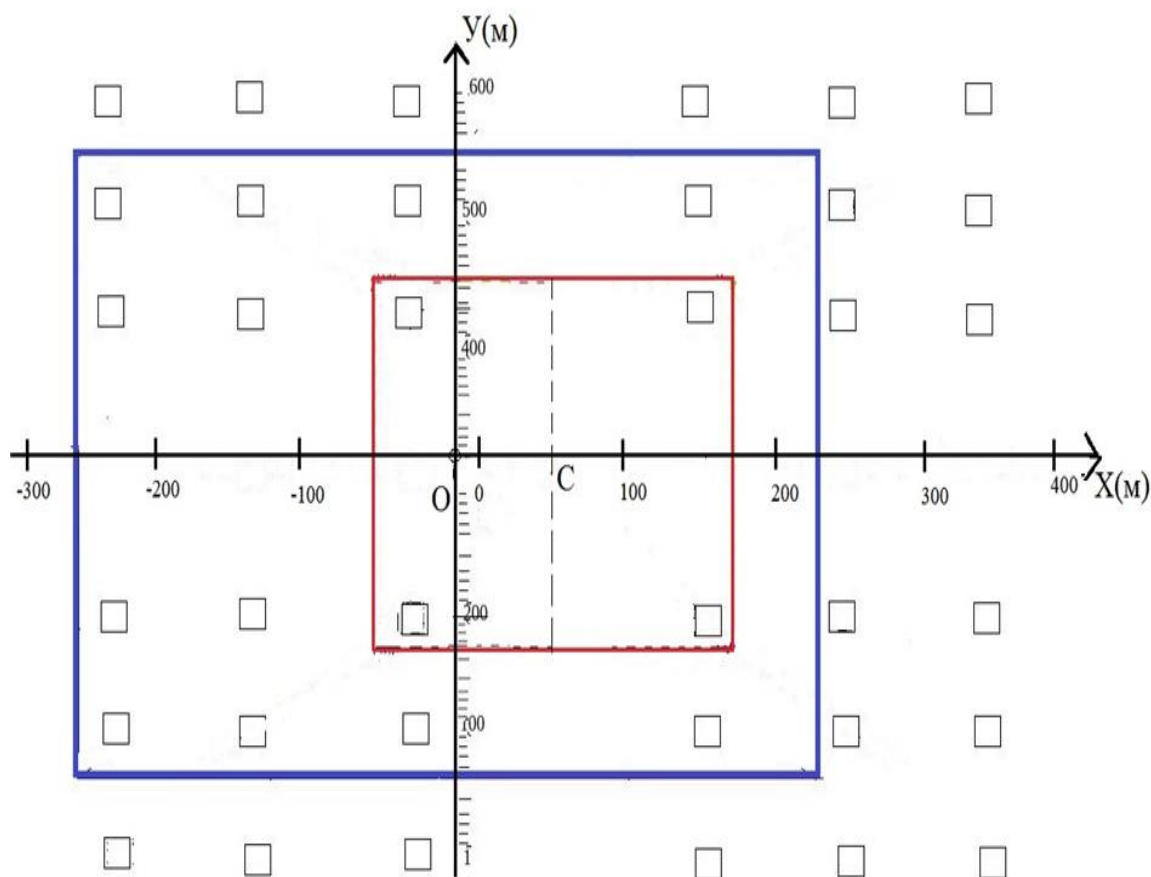
На данный момент сеть детекторов рассматривается как квадратная сеть с ячейкой  $25\text{м} \times 25\text{м}$ , площадь покрытия  $250\text{м} \times 250\text{м}$  (или  $11 \times 11 = 121$ ). Каждый детектор имеет чувствительную площадь  $1\text{ м}^2$  и принимает свет в пределах конуса шириной в половину  $60^\circ$ , направленного в зенит. Сенсорная электроника может оцифровывать импульсы ЧС с частотой 1 ГГц.

При данной геометрии сетки быстрых оптических детекторов данные о ПВР ЧС одного и того же события в детекторы сетки выбираются по-разному в зависимости от расположения центра сетки по отношению к оси ливня. Выбирается положение оси в пределах квадрата установки, затем «измеренные» детекторами значения числа фотонов и времена прихода фронта света определяются по соответствующим ячейкам большого массива.

Поскольку варианты данных формируются сдвигом сетки по ковру  $600\text{ м} \times 600\text{ м}$  с минимальным шагом 1 м по  $x$  и/или по  $y$ , то 1) вариантов

может быть очень много ( $\sim 100000$ ) и 2) они не являются полностью независимыми в силу корреляций между соседними вариантами. Однако сравнение результатов для разного количества вариантов данных от каждого события не выявили существенных отличий в моментах распределений, характеризующих неопределённости первичных параметров. Поэтому в приводимых ниже результатах для каждого события были использованы все допустимые варианты (конфигурации) данных, что гарантировало непредубеждённый учёт различных относительных геометрий «ливень-ливень».

Квадрат установки (малый квадрат) передвигался по ковру ливня (большой квадрат) шагами в 1 м по каждой из двух координат, при этом ось ливня всегда находилась внутри малого квадрата (Рис. 15). Каждое взаимное положение двух квадратов образовывало одну конфигурацию «ливень-установка».



**Рисунок 12. Взаимная геометрия ливня и установки**

Ковёр ливня (большой квадрат – синий цвет), квадрат установки (малый квадрат – красный цвет), точка О – центр большого ковра и ось ливня, точка С – центр малого ковра и центр установки.

После выбора взаимной геометрии ливня и установки для оценки первичного направления ШАЛ также были выбраны формулы для минимизируемой функции в виде (4), где заданы параметры ливня – направление  $\vec{\theta}$ , положение оси  $\vec{r}$ , векторы параметров  $\vec{a}$  модели поперечного распределения и  $\vec{b}$  временного фронта – определяются в результате минимизации функции

$$f(\vec{\theta}, \vec{r}, \vec{a}, \vec{b}) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(t_i - t_m(\vec{b}, r_{\perp,i}))^2}{\sigma_t^2(r_{\perp,i})} + \frac{(n_i - n_m(\vec{a}, r_{\perp,i}))^2}{\sigma_n^2(r_{\perp,i})} \right\}, \quad (4)$$

где  $r_{\perp,i} = r_{\perp,i}(\vec{r} - \vec{r}_i, \vec{\theta})$  – расстояние от оси ливня до детектора в плоскости, перпендикулярной оси,  $\vec{r}_i$  – координаты  $i$ -го детектора сети быстрых детекторов на уровне наблюдения;  $t_i$  – измеренное время прихода фронта света в  $i$ -ый детектор,  $t_m$  – модельное время прихода фронта света;  $n_i$  – измеренное число черенковских фотонов (фотоэлектронов) в  $i$ -ом детекторе,  $n_m$  – модельное число черенковских фотонов (фотоэлектронов) в  $i$ -ом детекторе;  $\sigma_n(r_{\perp,i})$  – модельная вариация числа черенковских фотонов (фотоэлектронов) в  $i$ -ом детекторе.

При подгонке данных отдельного ШАЛ выполняется многомерная оптимизация  $\chi^2$ -подобной функции (4) с помощью MINUIT [99,100] с использованием обеих моделей, которая дает параметры ФПР и ВФ, а также оценки положения оси и направления прихода ШАЛ.

Восстановление направления и положения оси ливня проводилось на образах искусственных событий в широком диапазоне первичных энергий (1 ПэВ – 100 ПэВ), зенитных углов ( $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ ) и для различных типов первичных частиц. Плотная сетка быстрых детекторов обеспечивает довольно высокое угловое разрешение и точные оценки положения оси.

### 3.4. Процедура определения положения и направления оси ШАЛ с сетью быстрых оптических детекторов ПАМИР-XXI оценки направления первичных частиц

Информация о направлении первичной частицы важна сама по себе, но в нашем случае она также играет важную существенную роль в оценке первичной массы. Погрешность определения направления, должна составлять около  $0,1^\circ$ , что значительно лучше обычных ошибок направления ШАЛ ( $\approx 1^\circ$ ) установками, изучающими первичные космические ядра сверхвысокой энергии, и характерно для угловой точности черенковской гамма-астрономии.

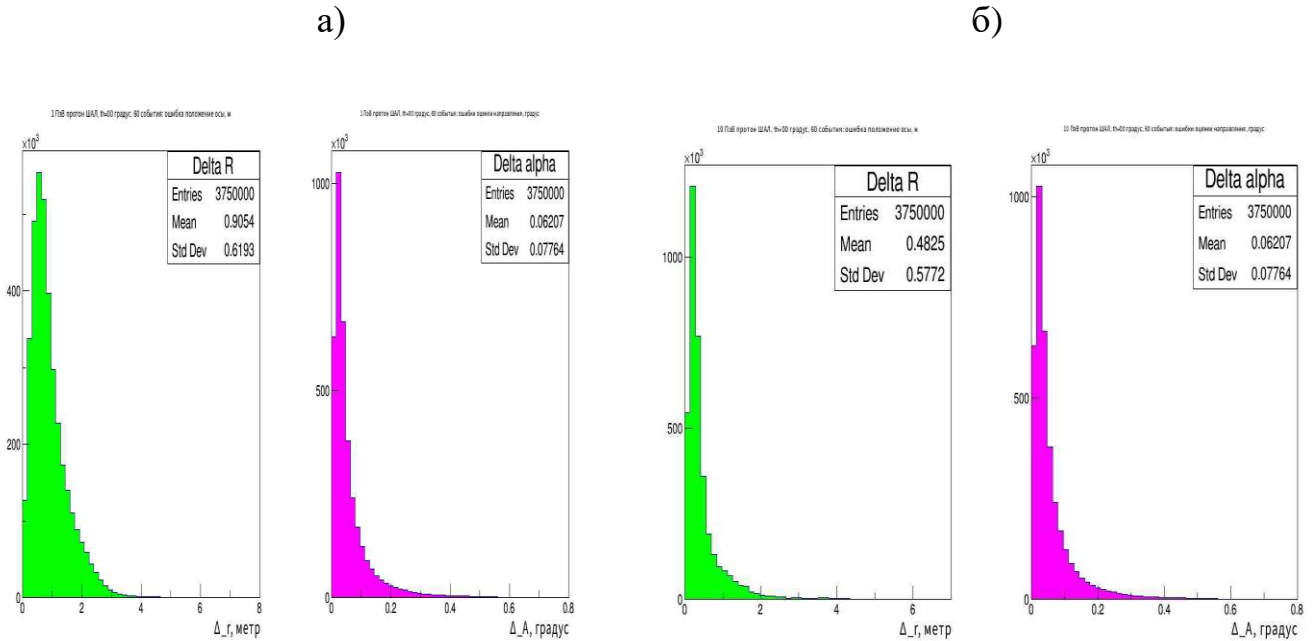
Предлагаемый вариант оптической части установки будет анализировать импульсы (пространственно-временное распределение) ЧС и угловые черенковские образы (пространственно-угловое распределение ЧС) и для этого будет включать широкую сеть быстрых оптических детекторов и несколько широкоугольных телескопов.

Неопределённости для оценки координат и направления прихода оси сетью быстрых оптических детекторов вычисляется путём обработки сырого ПВР ЧС в фотонах, так и после добавления к нему ещё фона ночного неба ( $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) и преобразования суммы в фотоэлектроны. В конечном случае предполагалось, что фон флуктуирует по Пуассону, так как и число выбиваемых фотоэлектронов. Неопределённости в координаты и направлений оси удовлетворяют заданными нами требованиям ( $\sim 1 \text{ м}$  и  $< 0.1^\circ$ ). Результаты для чистого ЧС в фотонах и черенковского сигнала с фоном ночного неба (ФНН,  $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) в фотоэлектронах почти одинаковы для  $E_0 \geq 1 \text{ ПэВ}$  [58-66].

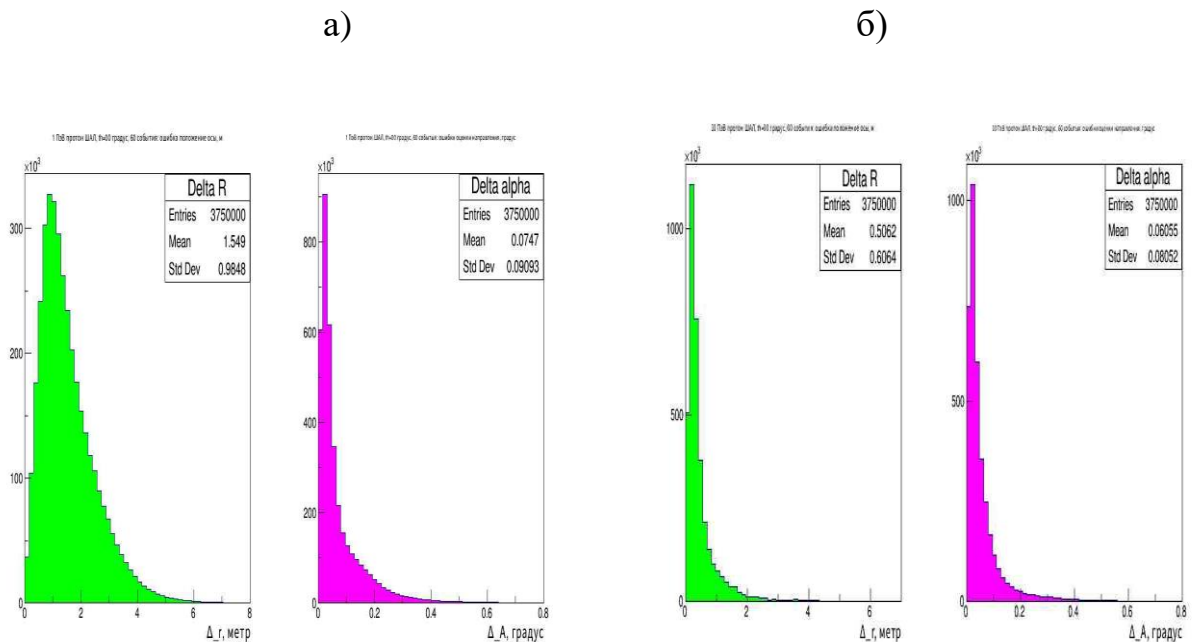
По вышеуказанной процедуре минимизации для ошибок положения оси и направления ШАЛ были получены результаты, представленные на рис. 13 и 14.

На рисунках 13-а, б, показаны распределения ошибок положения и направления оси без учёта фона ночного неба, а на 14 - а,б,в, с учётом фона

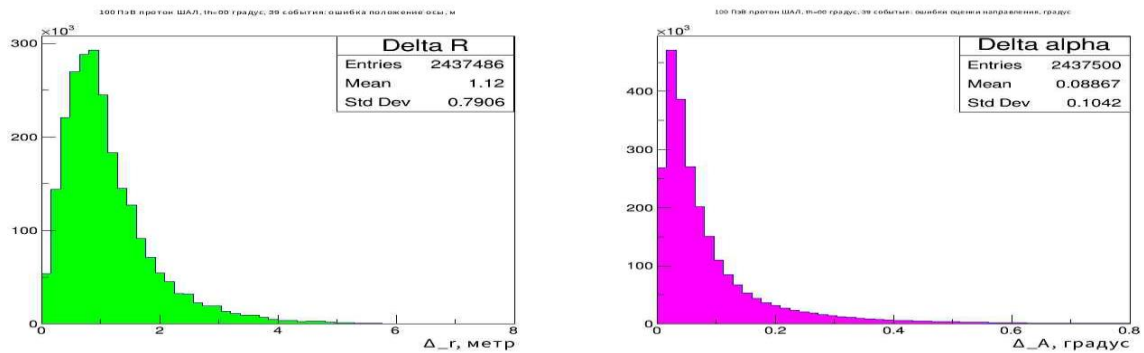
ночного неба для вертикальных ливней от протонов. Аналогичные распределения для протонных ливней, изотропно распределенных по направлениям в пределах вертикального конуса с полураствором  $30^\circ$ , без учета фона ночного неба приведены на рис.15-а, б.



**Рисунок 13. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ. Для всех случаев ошибки оценки направления ШАЛ от протонов без учёта фона ночного неба для вертикальных ливней на высоте 4250м над уровнем моря, ( $\theta=0^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода)**



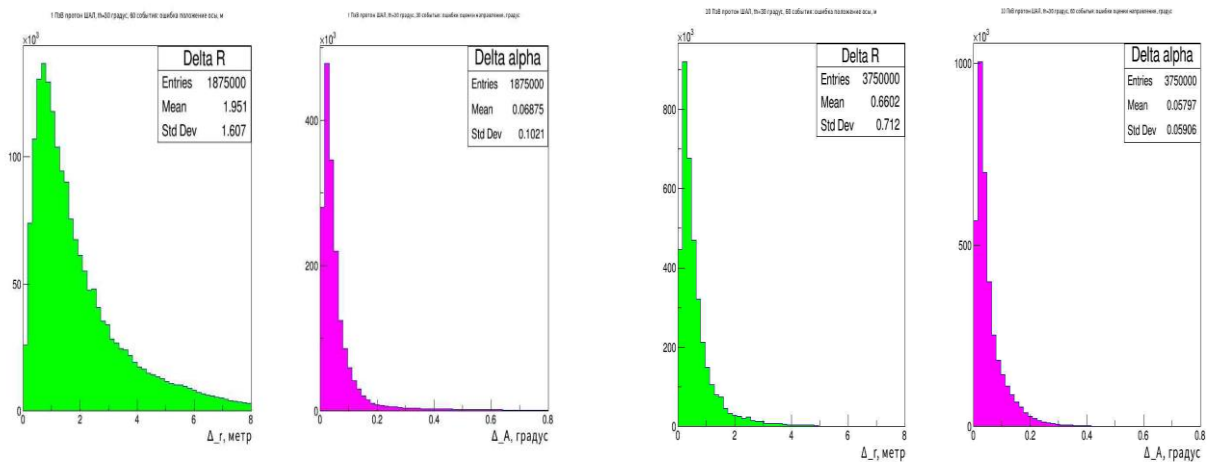
в)



**Рисунок 14. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ, в)100ПэВ. Для всех случаев ошибки оценки направления ШАЛ от протонов с учётом фона ночного неба для вертикальных ливней на высоте 4250м над уровнем моря. ( $\theta = 0^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода**

а)

б)



**Рисунок 15. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ. Для всех случаев ошибки оценки направления ШАЛ от протонов без учёта фона ночного неба для наклонных ливней на высоте 4250м над уровнем моря. ( $\theta=0-30^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода)**

По этим картинкам можно рассмотреть и сравнить два случая:

1) Данные протона с учетом фона звездного неба и без учета фона звездного неба.

2) Данные для протона с учетом фона звездного неба и наклонных (0-30 градусов) ливней.

В обоих случаях было получены хорошие результаты.

В первом случае ошибки меньше для данных протона без учёта фона звездной небе.

Во втором случае оценка положения оси и направления лучшие для вертикальных ливней, для наклонных мы тоже получили приемлемые результаты.

### 3.5. Определение ошибки первичного направления и положение оси для ЧС ШАЛ от различных ядер в диапазоне энергии 1-100ПэВ, на высоте 4250 м над уровнем моря

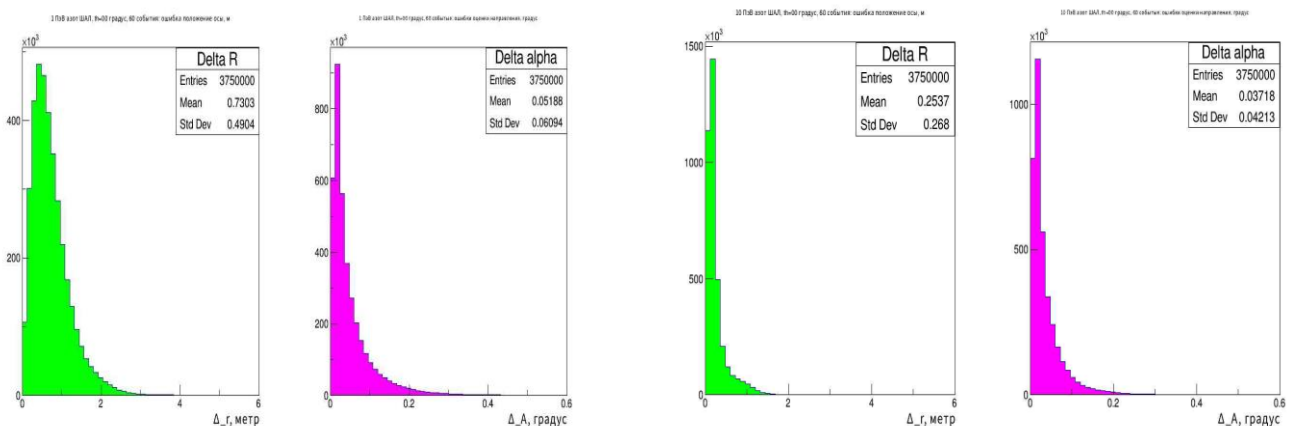
А также было оценено неопределённости оценки координат и направления оси сетью быстрых оптических детекторов для всех ядер с энергии 1-100 ПэВ.

По вышеуказанной процедуре минимизации для ошибок положения оси и направления ШАЛ были получены результаты для всех ядер с энергии 1-100 ПэВ и представленные на рис. 16 -18.

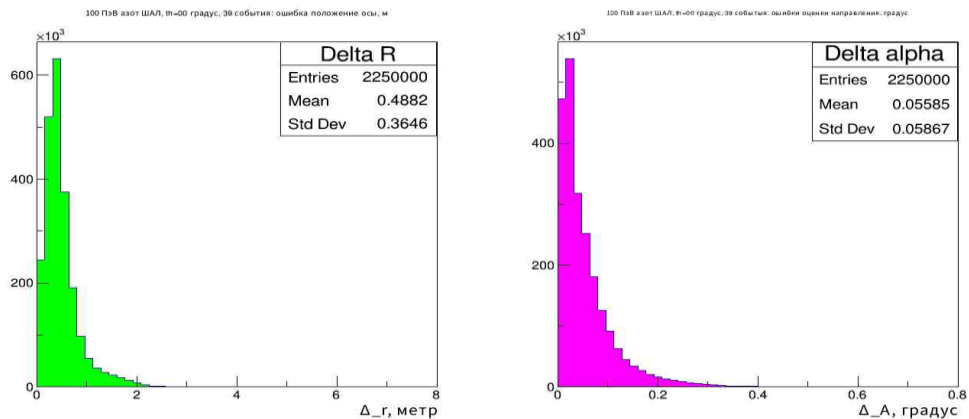
На рисунках 16-а, б, показаны распределения ошибок положения и направления оси без учёта фона ночного неба, а на 17- а,б,в, с учётом фона ночного неба для вертикальных ливней от азота. Аналогичные распределения для протонных ливней, изотропно распределенных по направлениям в пределах вертикального конуса с полураствором  $30^\circ$ , без учета фона ночного неба приведены на рис. 18-а, б.

а)

б)



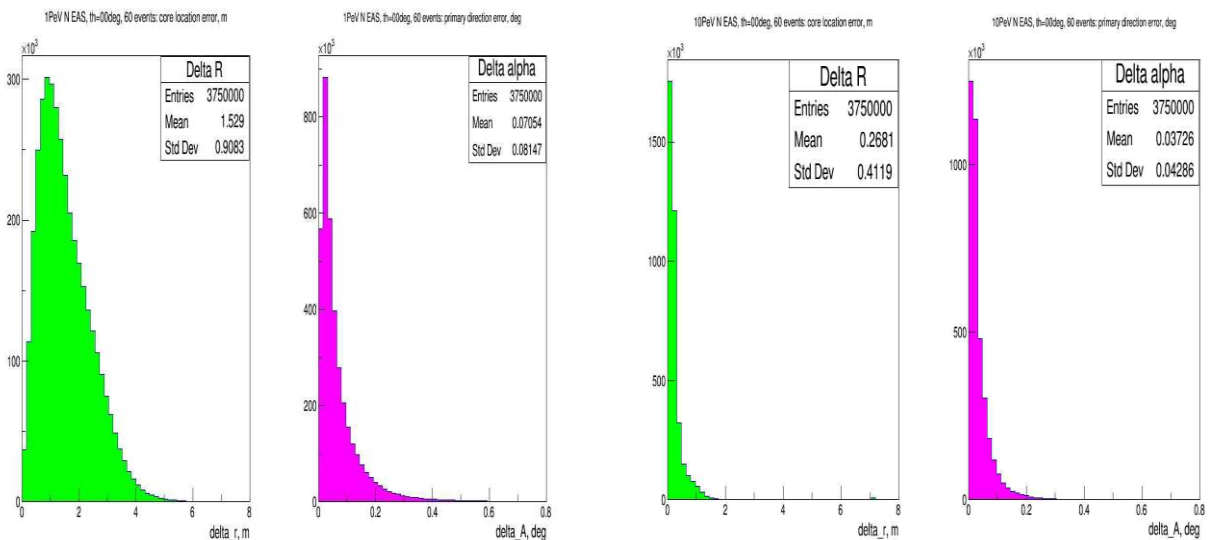
в)



**Рисунок 16. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ, в) 100 ПэВ. Для всех случаев ошибки оценки направления ШАЛ от протонов без учёта фона ночного неба для вертикальных ливней на высоте 4250м над уровнем моря, ( $\theta=0^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода)**

а)

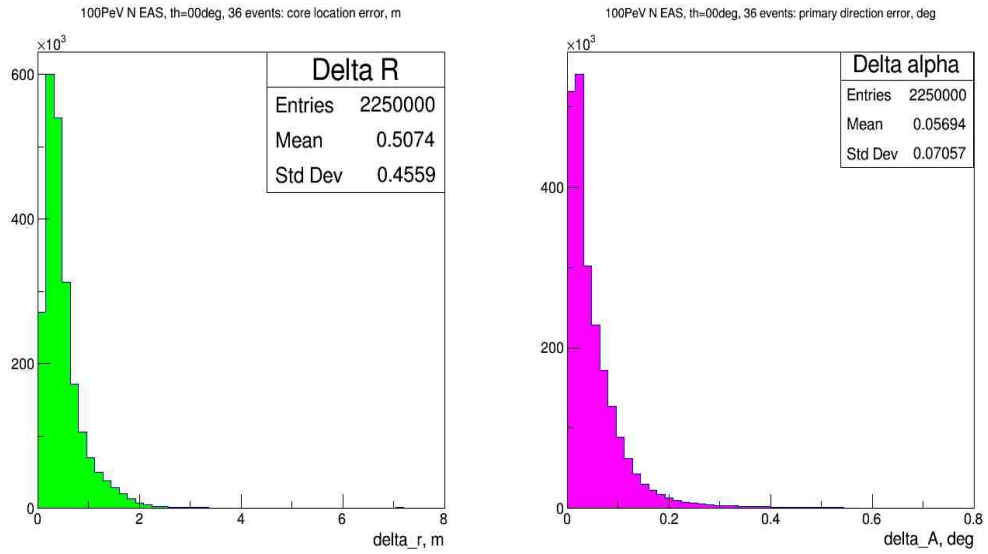
б)



**Рисунок 17. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ, в) 100 ПэВ. Для всех случаев ошибки оценки направления ШАЛ от азотов с учётом фона ночного неба для наклонных ливней на высоте 4250м над уровнем моря. ( $\theta=0^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода)**

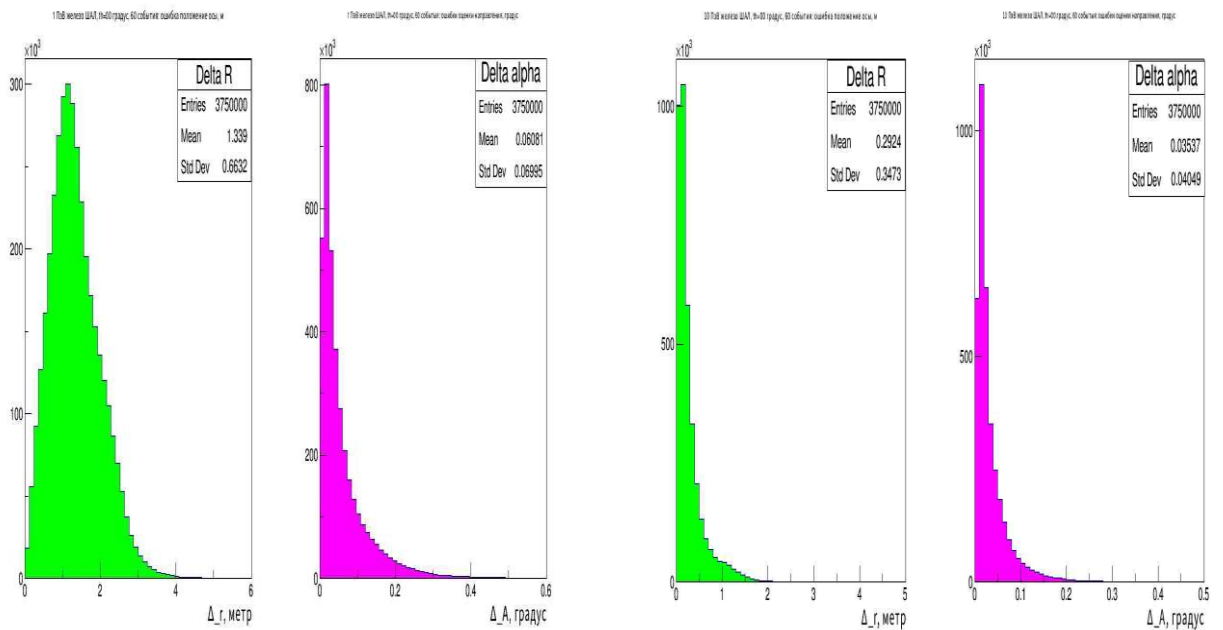


B)



a)

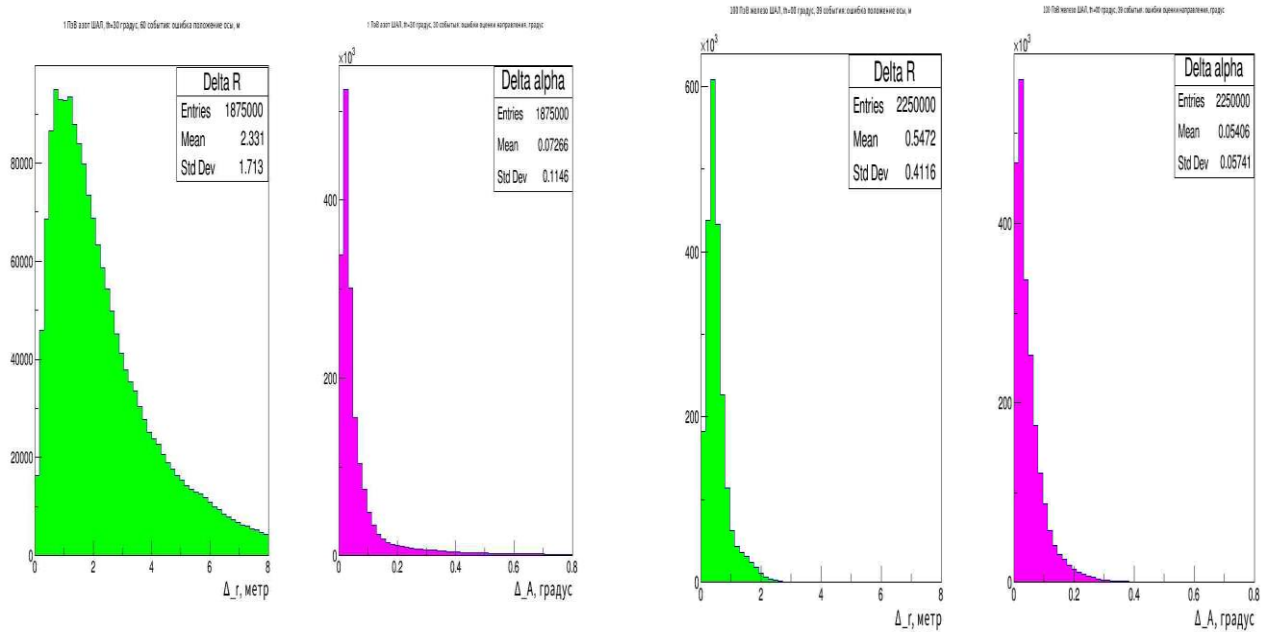
б)



**Рисунок 18. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ. Ошибки оценки направления ШАЛ от азота с энергии 1 ПэВ без учёта фона ночного неба для наклонных ливней на высоте 4250м над уровнем моря. ( $\theta=0-30^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода)**

а)

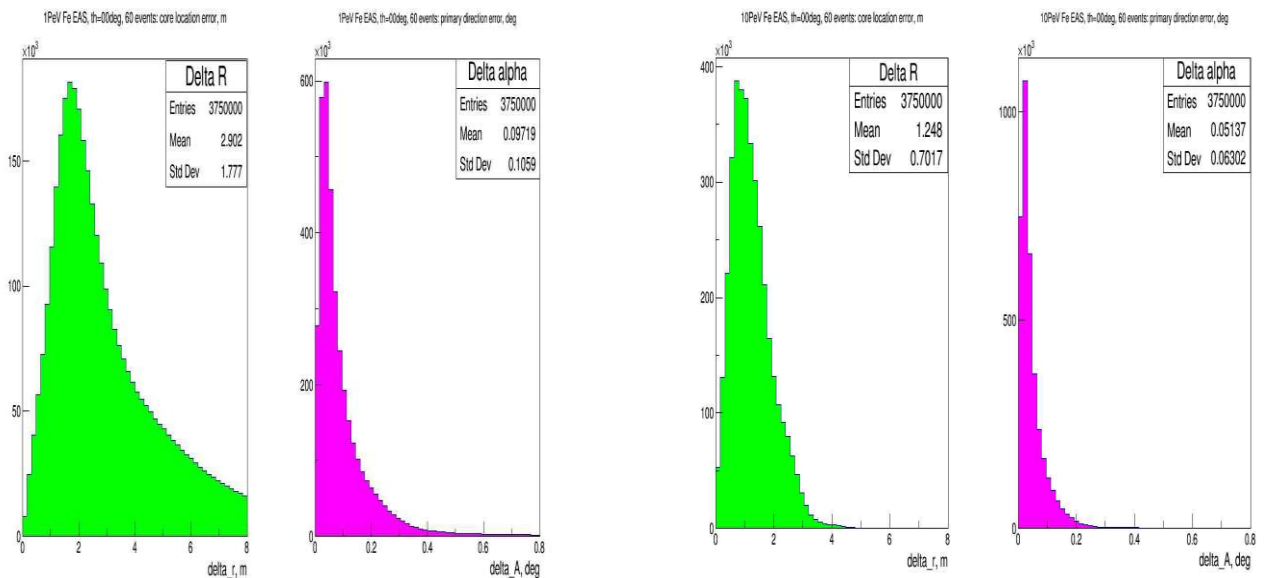
б)

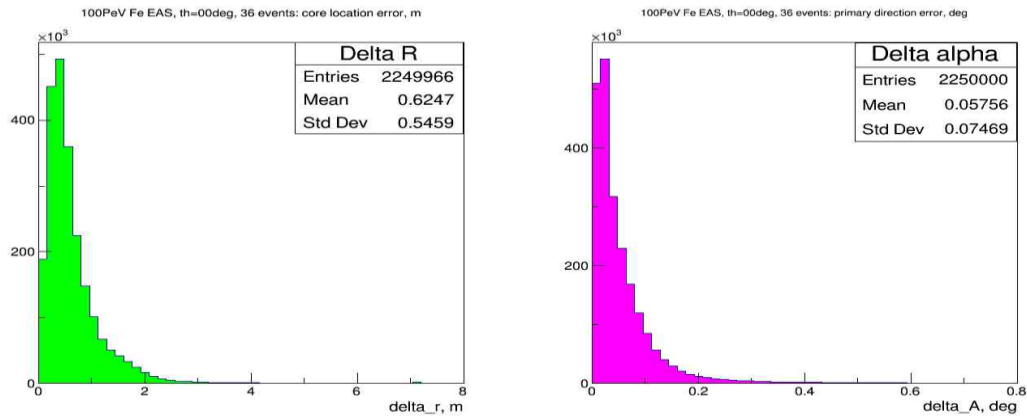


На рисунках 19-а, б, показаны распределения ошибок положения и направления оси без учёта фона ночного неба, а на 20- а,б,в, с учётом фона ночного неба для вертикальных ливней от железа

а)

б)





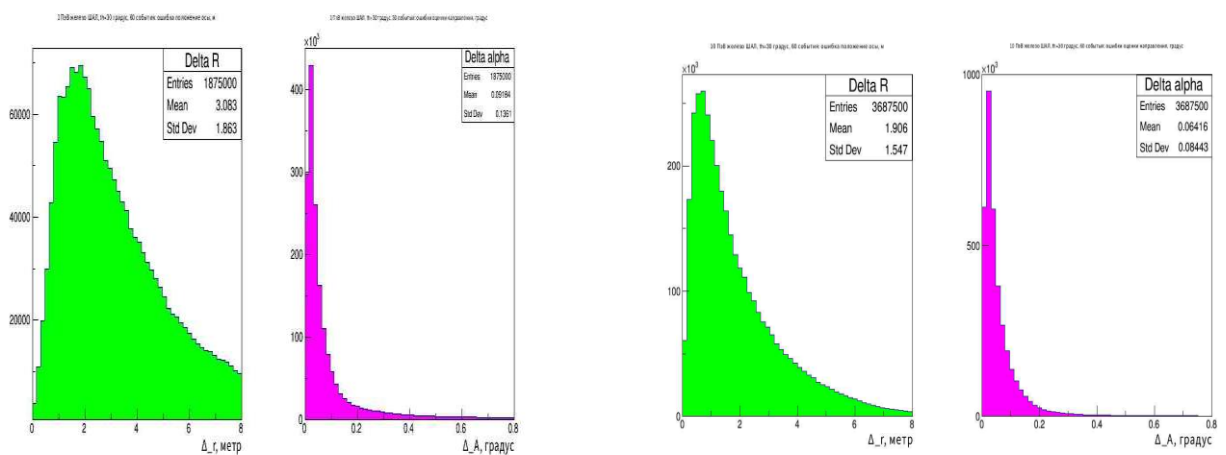
в)

**Рисунок 20. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ, в) 100 ПэВ. Для всех случаев ошибки оценки направления ШАЛ от железа с учётом фона ночного неба для наклонных ливней на высоте 4250м над уровнем моря. ( $\theta=0^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода)**

Аналогичные распределения для протонных ливней, изотропно распределенных по направлениям в пределах вертикального конуса с полураствором  $30^\circ$ , без учета фона ночного неба приведены на рис.21-а, б.

а)

б)



**Рисунок 21. а) 1ПэВ, б) 10ПэВ. Для всех случаев ошибки оценки направления ШАЛ от железа без учёта фона ночного неба для наклонных ливней на высоте 4250м над уровнем моря. ( $\theta=0-30^\circ$ ). (левая – положение оси, правая - направление прихода)**

Вся информация по процедуре минимизации для ошибок положения оси и направления ШАЛ, которые были получены в результате минимизации, их результат приведены в таблице 2 — данные для вертикальных и наклонных ливней протонов ядер азота и железа с энергиями 1-100 ПэВ.

**Таблица 2. Оценка ошибки определения положения оси и направления прихода ШАЛ для вертикальных и наклонных ливней**

$E_0$	Ядро	Ошибки положения оси $R$ , м. Вертикальные ливни.	Ошибки направления, $a$ , °. Вертикальные ливни.
1-ПэВ	p	0.9848	0.09093
	N	0.4904	0.06094
	Fe	0.6632	0.06995
10-ПэВ	p	0.6064	0.08052
	N	0.268	0.04213
	Fe	0.3473	0.04049
100-ПэВ	p	0.7906	0.1042
	N	0.3646	0.05867
	Fe	0.4116	0.05741
$E_0$	Ядро	Ошибки положения оси $R$ , м. Наклонные ливни -30 градусов.	Ошибки направления, $a$ , °. Наклонные ливни -30 градусов.
1-ПэВ	p	1.607	0.1021
	N	1.71	0.1146
	Fe	1.863	0.1361
10-ПэВ	p	0.712	0.05906
	Fe	1.547	0.08443

По показаниям сработавших быстрых оптических детекторов оцениваются: положение и направление оси ливня.

Данные таблицы 2 позволяют утверждать, что оценки направления ливня и положения его оси в результате аппроксимации ВФ и ПР для индивидуальных событий в диапазоне энергий 1-100 ПэВ и в диапазоне зенитных углов 0-30° могут быть сделаны с требуемыми точностями  $\sim 1$  м и  $\ll 0,1^\circ$ . Полученные оценки не учитывают влияния детекторов и обслуживающей их электроники. Они представляют собой ориентиры, к которым надо стремиться при создании детекторов установки.

### 3.4. Заключение по главе III

Нами исследована и получена процедура оценки первичного направления и положение оси ливня. Установлено, что для ливней от протонов использование данного метода позволяет оценить направления ШАЛ с требуемыми точностями.

1. Данные моделирование хорошо описываются аппроксимирующей функцией.

2. Форма фронта, особенно форма поперечного распределения, зависит от массы первичного ядра.

3. Решение обратной задачи для протонных ливней показало, что точность полученных аппроксимаций достаточна для определения направления ливня с неопределенностью  $\sim 0,1$  град и точки падения оси с неопределенностью  $\sim 1$  м.

4. ФПР зависит от массы, чем выше масса, тем ниже крутизна. На малых расстояниях параметры ФПР тяжелых ядер отличаются друг от друга.

5. Предлагаемая оптическая часть «Памир-XXI» позволяет достичь требуемых точностей определения направления оси ливня с точностью лучше  $0,1^\circ$ , её положение с точностью  $\sim 1$  м.

6. Как видно из рисунков 16-17 и таблицы 2, по процедуре минимизации для оценки ошибок положения оси и направления ШАЛ, были получены предполагаемые результаты.

## ГЛАВА IV. ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКИ

Оптическая часть установки (рис.5) предназначена прежде всего для решения проблем энергетического спектра и массового состава ПКЛ в диапазоне энергий  $10^{14}$ - $10^{17}$  эВ на основании измерений характеристик ЧС ШАЛ [101].

Установка должна включать в себя оптические детекторы двух типов --- широкоугольные быстрые детекторы площадью  $\sim 1.0$  м<sup>2</sup> и полем зрения диаметром 40-50 °, способные регистрировать пространственно-временное распределение (ПВР) ЧС, и оптические телескопы с зеркалами площадью  $\sim 4$  м<sup>2</sup>, полем зрения диаметром не менее 20 ° и диаметром пиксела 0,7-0,8°, регистрирующие пространственно-угловое распределение (ПУР) ЧС.

Набор из нескольких (3-4) телескопов, раздвинутых на 100-150 м друг от друга, позволяет анализировать ПУР ЧС для оценки первичной массы с использованием данных о положении оси ливня, его направления и энергии.

Все детекторы массива должны быть направлены одинаково в зенит, или, если толщина слоя воздуха выше уровня наблюдения слишком мала для того, чтобы ливни интересующей энергии генерировали достаточно света, под определенным углом к вертикали. Телескопы должны быть расположены в центральной части сети быстрых детекторов. Измерения при энергиях выше  $10^{16}$  эВ, вероятно, потребуют увеличения масштаба установки и, следовательно, ее структура должна быть масштабируемой.

Возможности оптической части установки «Памир-XXI» были рассмотрены в предыдущих наших работах [102-105]. Здесь мы обсуждаем её способность оценивать энергию первичных частиц ШАЛ с помощью данных сети быстрых оптических детекторов. Поскольку мы разрабатываем методику регистрации ливней с малыми зенитными углами ( $\theta < 10^\circ$ ), пока используются вертикальные искусственные события. Расчётный уровень наблюдения – 4250 м над уровнем моря.

#### 4.1. Общая процедура оценки энергии ШАЛ по характеристикам ЧС

В нашей работе регистрация ШАЛ сеткой быстрых оптических детекторов амплитудная информация аппроксимируется простой моделью функции поперечного распределения (ФПР) ЧС (2):

Энергия ливней оценивается по интегралу CL300 от ФПР ЧС в круге радиуса 300 м с центром на оси ливня из соотношения (3):

Параметры ФПР получаются в результате одновременного приближения моделями ФПР ЧС и временного фронта (ВФ) ЧС данных по пространственно-временному распределению ЧС в каждом ливне. Неопределенности CL300 для  $E_0 = 1, 10, 100$  ПэВ приведены в Таблице 6. Добавление фона ночного неба и преобразование суммарного набора фотонов в фотоэлектроны не меняют неопределённостей оценок первичной энергии.

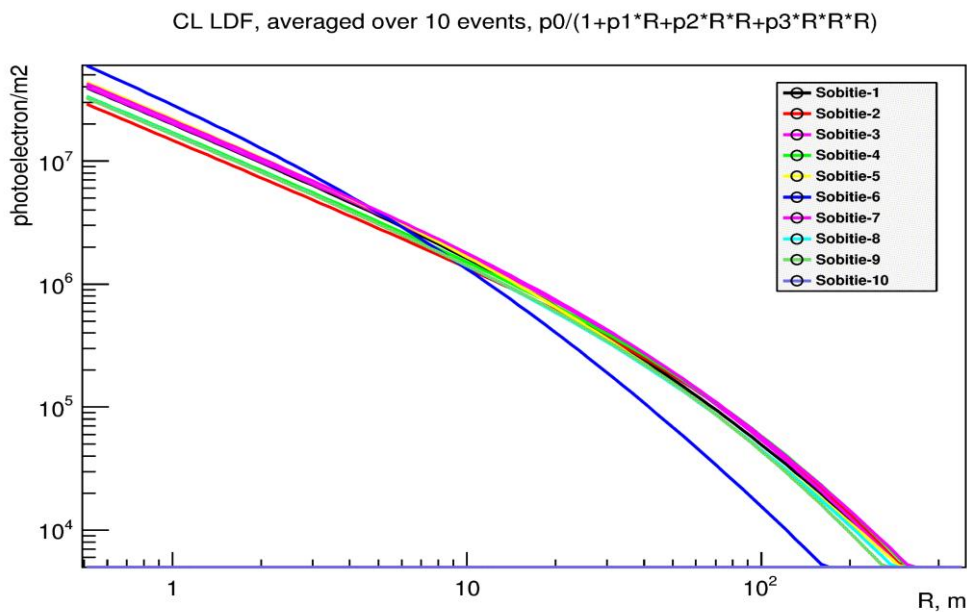
##### 4.1.1. Проблема проскочивших ливней

Ливни от протонов флуктуируют сильно в продольном развитии. При рассмотрении ШАЛ от протонов попадают ливни, максимумы, которые их каскадных кривых находятся где-то близко к уровню наблюдения, и полное число черенковских фотонов на уровне наблюдения в них заметно меньше, чем в остальных ливнях: ливень просто не успевает родить обычное для ливня такой энергии количество света. Это мешает правильной оценке первичной энергии первичных частиц и их идентификации. Задача состоит в выделении проскочивших протонных ливней на основании непосредственно измеряемых величин и корректировке оценки энергии таких ливней (Рис.24).

#### 4.2 Выделения проскочивших протонных ливней и оценка энергии таких ливней

Ливни от протонов флуктуируют сильно в продольном развитии. При рассмотрении ШАЛ от протонов попадают ливни, максимумы, которые их каскадных кривых находятся где-то близко к уровню наблюдения, и полное число черенковских фотонов на уровне наблюдения в них заметно меньше,

чем в остальных ливнях: ливень просто не успевает родить обычное для ливня такой энергии количество света. Это мешает правильной оценке первичной энергии первичных частиц и их идентификации. Задача состоит в выделении проскочивших протонных ливней на основании непосредственно измеряемых величин и корректировке оценки энергии таких ливней.



**Рисунок 22. Аппроксимации поперечного распределения ЧС ШАЛ от первичного протона с энергией 1 ПэВ**

Как отличить проскочившее протонные ливни от остальных?

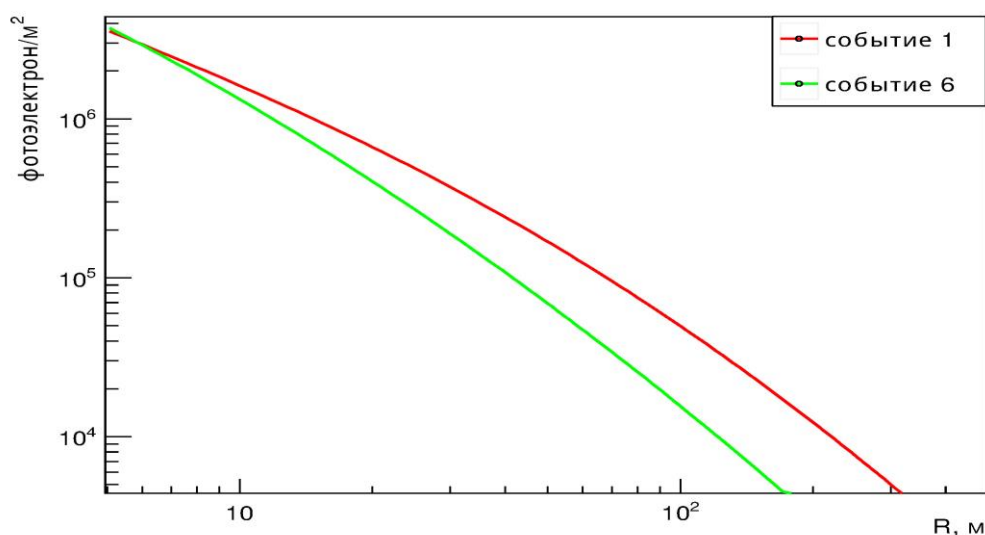
Можно использовать крутизну. Проскочившие ливни дают меньшие интегралы ЧС, чем остальные ливни.

Как видно на рис.23, шестое (проскочившее) событие отличается от первого (нормального) ливня крутизной ФПР, интеграл от ФПР протонного события №6 оказывается примерно вдвое меньше среднего интеграла CL300 в нормальных ливнях.

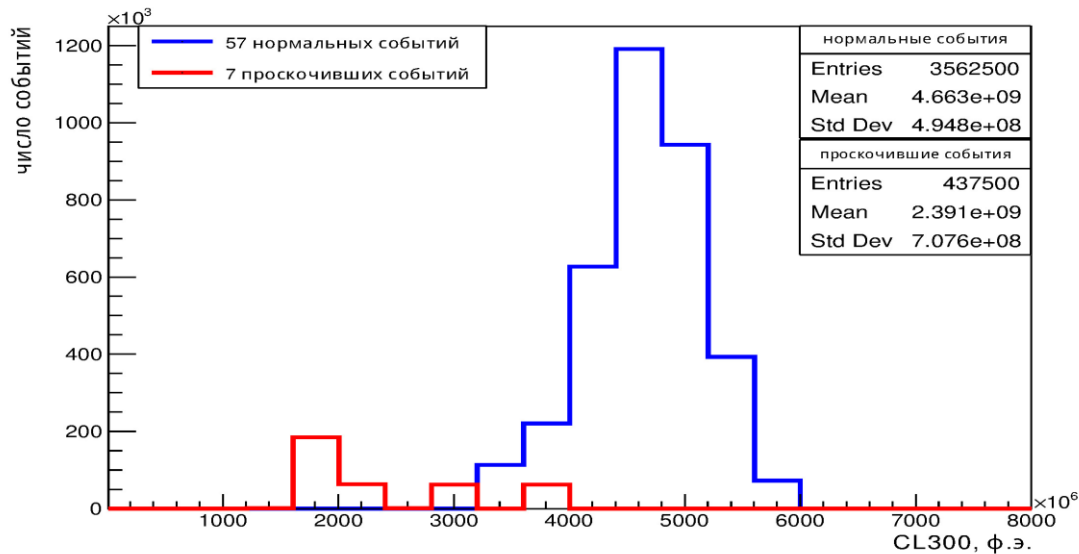


**Таблица 3. Плотность фотонов на разных расстоянии для определение первичных параметров**

<b>События</b>	<b>Плотность фотонов на расстоянии 10 м</b>	<b>Плотность фотонов на расстоянии 100 м</b>	<b>Отношение плотностей фотонов на расстоянии 10 м и 100 м</b>
p-1	1937421.50	120152.000	<b>16.1247540</b>
p-2	2312464.00	138691.000	16.6734962
p-3	2098656.50	127217.000	16.4966679
p-4	2095727.250	141734.250	14.7863131
p-5	1798434.25	110299.000	16.3050823
p-6	2108581.75	34149.5000	61.7456131
p-7	1975839.50	92829.0000	14.2847233
p-8	2135353.75	72183.0000	99.5825024
p-9	2905301.25	70072.2500	27.8180981
p-10	1997983.25	121904.000	16.3898087



**Рисунок 23. Аппроксимации поперечного распределения ЧС ШАЛ от первичного протона с энергией 1 ПэВ для нормального (1-го события, красная кривая) и проскочившего ливня (6-го события, зелёная кривая)**



**Рисунок 24. Оценка энергии ШАЛ от первичного протона 1 ПэВ до введения поправки, с учетом фона звездного неба. Из 64 событий 57 развиваются нормально, 7 развиваются глубоко в атмосфере**

За счёт проскочивших ливней распределение оценок первичной энергии оказывается слишком широким (рис.23), что приводит к слишком большой неопределённости этих оценок.

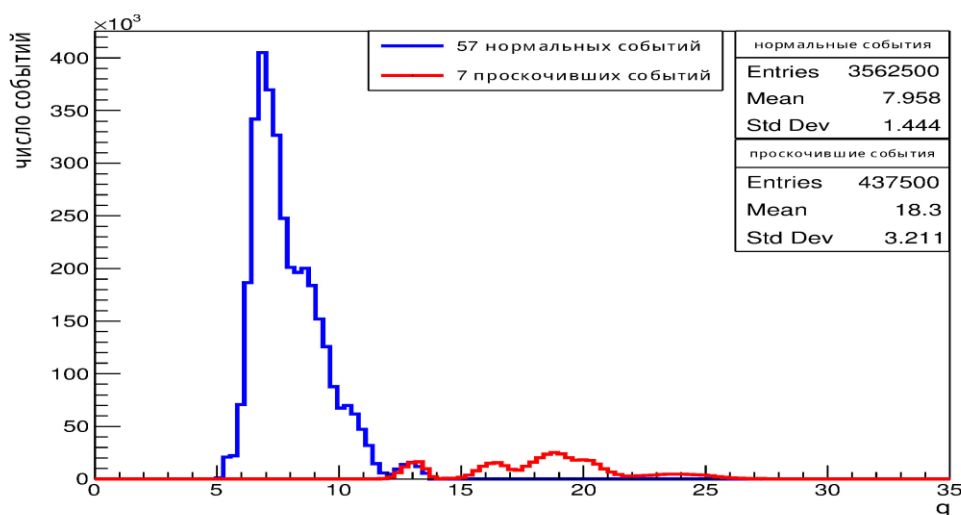
Плотная сетка быстрых оптических детекторов позволяет нам не только идентифицировать проскочившие ливни, но и скорректировать их CL300, тем самым понизив неопределённость оценки  $E_0$  для протонных ШАЛ.

#### **4.2. Введение поправок к оценкам энергии проскочивших ливней**

Глубокое развитие ШАЛ меняет форму ФПР ЧС: она становится более узкой, спадает быстрее с ростом расстояния от оси, а её нормировка уменьшается (Рис.23). При наличии достаточно плотной сетки оптических детекторов эти изменения можно анализировать количественно.

Мы рассмотрели распределения крутизны ФПР ЧС в протонных ливнях с энергиями 1, 10 и 100 ПэВ. В качестве мер крутизны были испробованы отношения  $q = \text{LDF}(R_1)/\text{LDF}(R_2)$  аппроксимаций индивидуальных ФПР ЧС

на расстояниях  $R_1 = 5, 10, 15, 20$  м и  $R_2 = 100, 150, 200$  м от оси ливня. В качестве основной меры была выбрана  $q = \text{LDF}(20 \text{ м})/\text{LDF}(100 \text{ м})$ , демонстрирующая приемлемое пересечение распределений крутизны для нормальных и проскочивших ливней (Рис.25).



**Рисунок 25. Распределения крутизны  $q = \text{LDF}(20 \text{ м})/\text{LDF}(100 \text{ м})$  для протонных ливней с энергией 1 ПэВ. Синяя гистограмма – нормально развивающиеся ливни, красная – проскочившие**

Поправка к интегралу CL300 вводится умножением его на коэффициент  $co(q)$ , большой единицы. Поскольку распределения крутизны нормальных и проскочивших ливней пересекаются, а поправлять CL300 нормально развивающихся ливней смысла нет, коэффициент должен отличаться от единицы, начиная с некоторого порогового значения крутизны  $q_{thr}$ :

$$co(q) = 1, \text{ если } q \leq q_{thr},$$

$$1 + a \cdot (q - q_{thr}), \text{ если } q > q_{thr}. \quad (6)$$

Линейный рост коэффициента  $co(q)$  был выбран для простоты реализации и оказался приемлемым. Порог введения поправки и коэффициент роста  $a$  выбирались отдельно для каждой первичной энергии из условий примерного совпадения средних значений распределений CL300 для

нормальных и проскочивших ливней и минимума ширины суммарного распределения. На рис.28 показаны результаты работы поправки для первичной энергии 1 ПэВ. Найденные параметры  $q_{thr}$  и  $a$  для трёх первичных энергий приведены в таблице 4.

**Таблица 4. таблица параметров поправочного коэффициента**

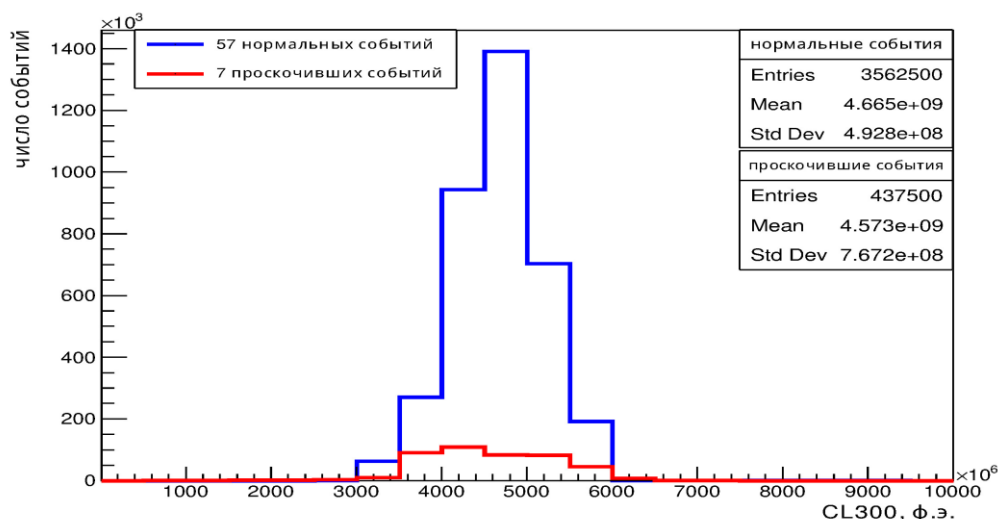
$$co(q) = 1 + a*(q - q_{thr})$$

Энергия $E_0$ , ПэВ	$a$ – коэффициент роста	$q_{thr}$ – порог по крутизне
1	0.24	13
10	0.24	13
100	0.29	17

**Таблица 5. Относительные флуктуации CL300 для  $E_0 \geq 1$  ПэВ, %**

**с учётом фона звездного неба**

Энергия $E_0$ -ПэВ Протон	Оценка ошибки энергии до поправки в %.	Оценка ошибки энергии после поправки в %
1	14.1	10.8
10	26.9	11.5
100	21.7	12.4



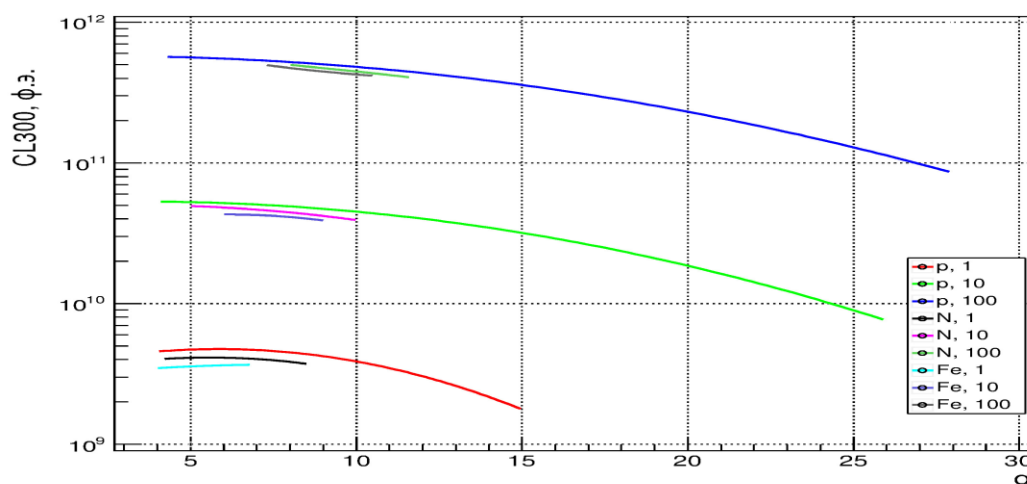
**Рисунок 26. Оценка энергии ШАЛ от первичного протона 1 ПэВ с введением поправки, с учетом фона звездного неба. Из 64 событий 57 развиваются нормально, 7 развиваются глубоко в атмосфере**

Введение поправок к CL300 позволяет заметно уменьшить неопределённость оценок первичной энергии (таблица 5). Правда, эти результаты получены на трёх выборках с фиксированными энергиями, тогда как в реальном эксперименте мы эти энергии должны определить. Параметры поправок в Таблице 5 даны в зависимости от  $E_0$ , причём они немного меняются только при энергиях выше 10 ПэВ.

Продемонстрированная возможность использовать параметр крутизны ФПР для уточнения оценки  $E_0$  не может считаться полноценной, поскольку в реальном эксперименте ливни будут иметь произвольную (в диапазоне чувствительности установки) энергию и массу первичной частицы. Следовательно, нам необходимо представить логически замкнутую процедуру оценки энергии, опирающуюся на значения CL300,  $q$ , координаты оси ливня и данные о принадлежности события к одному из трёх рассматриваемых классов по массе ( $p$ ,  $N$ ,  $Fe$ ), то есть на все данные, возникающие в результате анализа пространственно-временного и пространственно-углового распределений ЧС ШАЛ.

#### 4.2.1. Общая процедура оценки энергии ШАЛ по характеристикам ЧС

Построение процедуры начнём с анализа зависимостей  $CL300(q; E_0, A)$  для диапазонов  $E_0$ : 1-100 ПэВ и  $A$ : 1-56. На рис.29 показаны регрессии  $CL300(q)$ , полученные в результате обработки корреляционных плотов  $CL300-q$  для первичных протонов с энергиями 1, 10 и 100 ПэВ, ядер азота и железа с энергией 10 ПэВ. Области определения и значений этих функций соответствуют диапазонам изменения  $q$  и  $CL300$  в соответствующих выборках с учётом всех конфигураций, удовлетворяющих триггерным условиям.



**Рисунок 27. Зависимости  $CL300(q; E_0, A)$  для первичных протонов, ядер азота и железа с энергиями 1, 10 и 100 ПэВ**

Бросается в глаза существенное отличие областей определения  $CL300(q)$  для протонов и ядер N и Fe: большие флуктуации в ливнях от протонов обуславливают широкие диапазоны крутизны, причём самые большие крутизны соответствуют ливням, развивающимся глубоко (проскочившим ливням). Количество света, приходящее на уровень наблюдения в круг радиуса 300 м в таких ливнях существенно меньше, чем в обычных ливнях. Небольшие продольные и поперечные флуктуации ШАЛ от ядер позволяют при их обработке пренебречь зависимостями  $CL300(q)$  и непосредственно связывать  $CL300$  и  $E_0$ :  $E_0 = E_0(CL300, A)$ . Эти зависимости мало отличаются при разных  $A$ , но полная процедура всё-таки должна

учитывать их различия. Иными словами, минимальную неопределённость может гарантировать только самосогласованная процедура, учитывающая все доступные данные о событии и оценивающая одновременно все первичные параметры. Мы описываем здесь несколько упрощённую процедуру, считая процесс оценки направления слабо зависящим от энергии и массы первичной частицы в указанных диапазонах, что примерно соответствует действительности [101-102].

Приведённые на рис.27 зависимости имеют функциональный вид:

$$CL300(q,\varepsilon) = \exp[\alpha(\varepsilon)+\beta(\varepsilon)\cdot(q+\gamma(\varepsilon))^2], \quad (7)$$

где  $\varepsilon = \ln(E_0/1 \text{ ПэВ})$ .

Итак, процедура оценки первичной энергии и массы выглядит следующим образом:

1. По показаниям сработавших быстрых оптических детекторов оцениваются: CL300, положение и направление оси ливня,  $q$ .
2. Если  $q$  больше или равно 12, первичной частицей считается протон (у других ядер таких крутизн практически не бывает), и остаётся только оценить  $E_0$ . Для этого равенство (1) преобразуется к виду

$$\ln(CL300_{\text{изм}}) = \alpha(\varepsilon)+\beta(\varepsilon)\cdot(q+\gamma(\varepsilon))^2 \quad (8)$$

и рассматривается как уравнение относительно  $\varepsilon$ . При этом для получения зависимостей  $\alpha(\varepsilon)$ ,  $\beta(\varepsilon)$ ,  $\gamma(\varepsilon)$  используется Лагранжева интерполяция по трём узлам:  $\varepsilon = 0, 2, 3, 4, 6$ , для которых существуют расчётные данные.

3. Если  $q$  меньше 12, сначала производится грубая оценка энергии по  $E_0 = E_0(CL300)$  для любого ядра, например, для ядра азота, поскольку оценки эти отличаются не более чем на 15%, а полученный нами в [84,87] критерий оценки массы не зависит от первичной энергии в рассматриваемом диапазоне.

В диапазоне 1-100 ПэВ связь  $E_0(CL300)$ , применяемая при небольших  $q$ , была аппроксимирована функцией

$$E_0(\text{CL300}) = 10^{p_0} \cdot \text{CL300}^{p_1} \quad (9)$$

где параметры  $p_0$  и  $p_1$  имели следующие значения:

для протонов:  $p_0 = -9,94 \pm 0,40$ ,  $p_1 = 1,028 \pm 0,038$ ,

для ядер азота:  $p_0 = -9,50 \pm 0,22$ ,  $p_1 = 0,987 \pm 0,021$ ,

для ядер железа:  $p_0 = -9,23 \pm 0,14$ ,  $p_1 = 0,964 \pm 0,013$ .

После определения наиболее вероятного класса  $i$  по первичной массе энергия должна быть уточнена по соответствующему соотношению

$$E_0 = E_0(\text{CL300}, A_i) \quad (10)$$

Если событие отнесено к классу протонов, уточнение энергии надо проводить так, как это описано в пункте 2.

Рассматривалась также систематическая ошибка оценки  $E_0$  по приведённой процедуре, обусловленная различием моделей сильного взаимодействия при сверхвысоких энергиях QGSJET01 и QGSJET-II-04. Для  $E_0=1$  ПэВ она не превышает 8%, для  $E_0=10$  ПэВ – 10%.

**Таблица 6. Неопределённости энергии первичной частицы, для ядер p, N, Fe**

Первичные ядра	$E_0$ , ПэВ	Ошибка оценки $E_0$ , %, CORSIKA/QGSJET01	Ошибка оценки $E_0$ , %, CORSIKA/QGSJET-II-04
p	1	14.1	20
	10	26.9	10
	100	21.7	
N	1	5.8	6.3
	10	6.2	8.9
	100	8.7	
Fe	1	5.1	4.5
	10	3.0	5.6
	100	4.3	



#### 4.2.2. Общая процедура оценки энергии и массы ШАЛ по характеристикам ЧС

Итак, процедура оценки первичной энергии и массы выглядит следующим образом:

1. По показаниям сработавших быстрых оптических детекторов оцениваются: CL300, положение и направление оси ливня,  $q$ .

2. Если  $q$  больше или равно 12, первичной частицей считается протон (у других ядер таких крутизн практически не бывает), и остаётся только оценить  $E_0$ . Для этого равенство (1) преобразуется к виду

$$\ln(\text{CL300}_{\text{изм}}) = \alpha(\varepsilon) + \beta(\varepsilon) \cdot (q + \gamma(\varepsilon))^2 \quad (9)$$

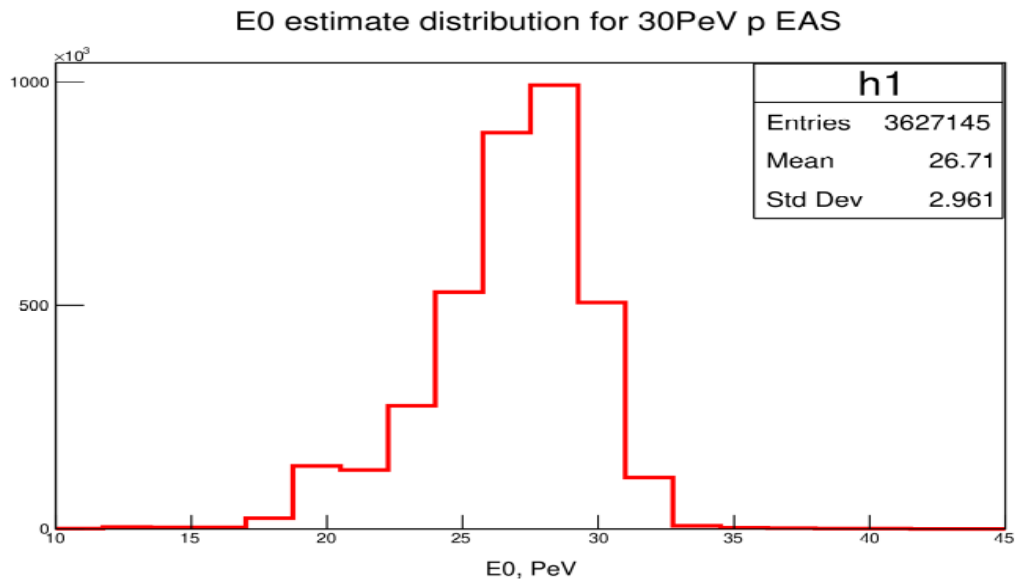
и рассматривается как уравнение относительно  $\varepsilon$ . При этом для получения зависимостей  $\alpha(\varepsilon)$ ,  $\beta(\varepsilon)$ ,  $\gamma(\varepsilon)$  используется Лагранжева интерполяция по трём узлам:  $\varepsilon = 0, 2.3, 4.6$ , для которых существуют расчётные данные.

После определения наиболее вероятного класса  $i$  по первичной массе энергия должна быть уточнена по соответствующему соотношению

$$E_0 = E_0(\text{CL300}, A_i).$$

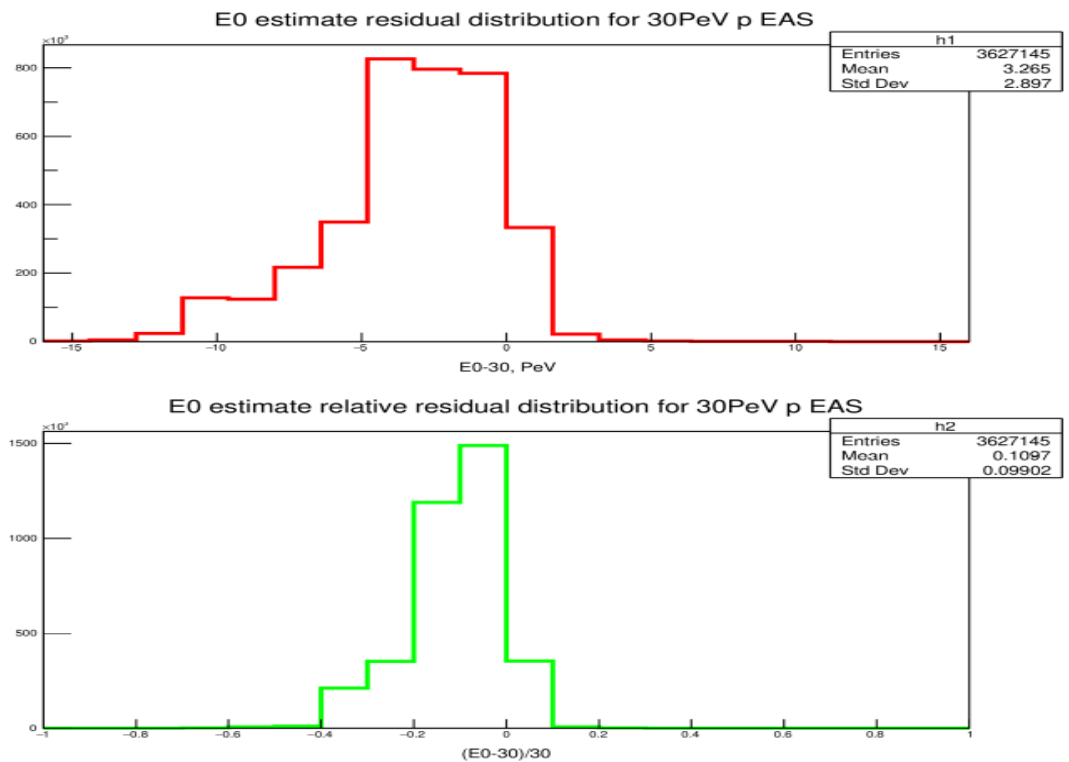
Если событие отнесено к классу протонов, уточнение энергии надо проводить так, как это описано в пункте 2.

Как сказано выше, мы провели проверку точности оценки первичной энергии общей процедурой на выборке ШАЛ от протонов 30 ПэВ. Была использована формула (2) как уравнение относительно  $\varepsilon$  при двух известных параметрах  $\text{CL300}_{\text{изм}}$  и  $q_{\text{изм}}$  – интеграл и крутизна, измеренных по ФПР ЧС в конкретной конфигурации. По найденным решениям  $\varepsilon^*$  вычислялись оценки  $E_0$ :  $E_0 = \exp(\varepsilon^*)$ . Результат процедуры приведен в рисунках 28 и 29.



**Рисунок 28. Распределение оценок энергии**

**ШАЛ от первичного протона 30 ПэВ по общей процедуре**



**Рисунок 29. Распределения отличий оценок энергии ШАЛ от истинной энергии 30 ПэВ. Верхняя панель – абсолютные отличия, нижняя панель – относительные отличия**

#### 4.5. Заключение по главе IV

Нами введена и исследована мера CL300 первичной энергии ливня. Установлено, что для ливней от протонов использование только этой меры не позволяет оценить энергию с требуемой точностью. Использование данных достаточно подробной сетки быстрых оптических детекторов позволяет ввести дополнительный параметр  $q$  крутизны ФПР ЧС. С помощью этого параметра удаётся внести поправку к измеренному значению CL300, зависящую от  $q$ . Поправленные значения CL300 в протонных ливнях ведут себя так же, как измеренные CL300 в ливнях от ядер, что оправдывает использование параметра  $q$  в процедуре оценки первичной энергии.

- 1) Построена процедура оценки первичной энергии ливня от произвольного ядра, включающая алгоритм оценки первичной массы. Среднеквадратичная ошибка оценки  $E_0$  в диапазоне 1-100 ПэВ не превосходит 15%, систематическая ошибка за счёт неопределённости модели взаимодействия в диапазоне 1-10 ПэВ не более 10%.
2. Проверка нашей процедуры оценки  $E_0$  на выборке протонов 30 ПэВ подтверждает заявленную точность оценок (не хуже 15%).
3. Можно использовать крутизну ФПР ЧС для поправки интеграла ЧС при оценке первичной энергии на проскочивших ливнях.
4. С учетом введенной поправки можно получить такую точность оценки энергии (10%), которую дают обычные непроскочившие ливни.

### ***Основные результаты и выводы диссертационной работы:***

Анализируя полученные результаты, можно подвести итоги. Благодаря полученным результатам, можно сделать следующие выводы:

1. Выбранные нами моделирования хорошо описывают аппроксимирующую функцию для фронта и функции поперечного распределения от различных ядер в диапазон энергии 1-100 ПэВ. [1-А, 2-А, 3-А, 4-А, 5-А].
2. Решение обратной задачи для протонных ливней показало, что точность полученных аппроксимаций достаточна для определения направления ливня с неопределенностью  $\sim 0,1$  град и точки падения оси с неопределенностью  $\sim 1$  м. [3-А, 4-А, 5-А, 7-А].
3. Модели фронта и поперечного распределения света, а также их флуктуаций успешно описывают имеющиеся выборки искусственных событий. Средние функции и флуктуации, полученные на выборках объемом 60 событий, практически не отличаются от аналогичных функций для выборок объемом 30 событий. [1-А, 2-А, 3-А, 4-А, 5-А].
4. Предлагаемая оптическая часть «Памир-XXI» позволяет достичь требуемых точностей определения направление и положения оси ливня для различных ядер в диапазон энергии 1-100 ПэВ. [1-А, 2-А, 3-А, 4-А, 5-А, 6-А, 7-А, 8-А].
5. Построена процедура оценки первичной энергии ливня от произвольного ядра, включающая алгоритм оценки первичной массы. Среднеквадратичная ошибка оценки  $E_0$  в диапазоне 1-100 ПэВ не превосходит 15%, систематическая ошибка за счёт неопределённости модели взаимодействия в диапазоне 1-10 ПэВ не более 10%. [1-А, 2-А, 3-А, 4-А, 6-А, 7-А, 8-А].
6. Проверка нашей процедуры оценки  $E_0$  на выборке протонов 30 ПэВ подтверждает заявленную точность оценок (не хуже 15%). [1-А, 2-А, 3-А, 6-А, 8-А].

### ***Рекомендации по практическому использованию результатов:***

Результаты данного исследования могут быть полезны при планировании, проектировании и создании высокогорных установок по изучению космических лучей высоких и сверхвысоких энергий. Созданный банк искусственных событий можно использовать в процессе учебы и проведения НИР среди студентов и аспирантов высших учебных заведений.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] Nakamura, K. Particle Data Group / K. Nakamura et al. // pdg.lbl.gov-2018 Hadronic-xsections. J. Phys. G **37**,075021.
- [2] Horandel, J.R. Recent results from the KASCADE-Grande cosmic-ray experiment —Test of hadronic interaction models with air-shower data / J.R. Horandel, W.D. Apel, J.C. Arteaga-Velazquez at all. // arXiv EDS Blois. - 2017. Prague, Czech Republic, June 26-30.
- [3] Borisov, A. S. Very High Energy Cosmic Ray Interactions / A.S Borisov et al. (Pamir Collaboration) // Proc. 4th Int. Symp. Beijing, -P. 4-29. -1986.
- [4] Borisov A.S. On the nature of gamma-hadron family alignment / A. S Borisov, R.A. Mukhamedshin b, V.S. Puchkov a, S.A. Slavatskiy a, G.B. Zdanov // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, -2001. -V. 97. -P.p.118-121.
- [5] Xue, L. A phenomenological model for simulation of coplanar particle generation in superhigh-energy hadron interactions / L. Xue et al. // Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City № 1. -V. 127. -1999.
- [6] Capdevielle J.N. FANSY 1.0: / J.N. Capdevielle et al. // Eur. Phys. J. C, -2009. 60: - P. 345–358. DOI 10.1140/epjc/s10052-009-0945-y. Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf., Merida, HE, № 120.
- [7] Mukhamedshin, R.A. Analysis of gamma-ray families with halos and estimation of mass composition of primary cosmic radiation at energies 1-100 PeV / R.A. Mukhamedshin, V.S.Puchkov, S.E. Pyatovsky, S.B. Shaulov // Astroparticle Physics. – 2018. –V. 102. –pp. 32-38.
- [8] Borisov, A.S. Recent results and modern status of the PAMIR experiment / A.S. Borisov, V.G. Denisova, Z.M. Guseva, J. Kempa, E.A. Kanevskaya, V.M. Maximenko, V.S. Puchkov, S.E. Pyatovsky, S.A. Slavatskiy // Nuclear physics B -Proceedings supplements. – 2008. – P. 175-176.
- [9] Басова Н.Г. Взаимодействие адронов космических лучей сверхвысоких энергий (эксперимент «Памир») / Н.Г.Басова, С.И. Никольского // Труды ФИАН; Т. 154 - С. 3-141.

- [10] Асейкин, В.С. Исследование электронной и мюонной компонент ШАЛ с энергией больше  $10^{13}$  эВ / В.С. Асейкин, Н.Г. Вильданов, и др. // Физический институт им. П.Н.Лебедева. – 1981.– Препринт - № 178.  
– URL: <http://preprints.lebedev.ru> (дата доступа: 28.01.2021).
- [11] Нестерова, Н.М. 50 лет Тянь-Шаньской комплексной установке ФИАН по исследованию широких атмосферных ливней космических лучей / Н.М. Нестерова, В.П. Павлюченко, и др.// История. Результаты. Проекты/ Физический институт им. П.Н. Лебедева. – 2014. – Препринт №10. – URL: <http://preprints.lebedev.ru> (дата доступа: 28.01.2021).
- [12] Semba H. Contribution from Chacaltaya emulsion chamber experiment of Brasil-Japan Collaboration / H. Semba, A. Ohsawa, et al. // Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokio. – 1983. – Aug. 5. – Tanashi, Tokyo - № 188, Japan.
- [13] Heck, D. Hadronic interaction models and the air showersimulation program CORSIKA / D. Heck, T.Antoni, et al. // roceedings of ICRC. – 2001. – Pp. 233-236. KASCADE Grande Collaboration.
- [14] Пучков, В.С. Доля легких ядер  $p+He$  в составе первичного космического излучения при  $E_0 = 1-100$  ПэВ и природа гало в стволах широких атмосферных ливней / В.С. Пучков, С.Е. Пятовский // ФИАН. Основные результаты научной деятельности. - 2018.  
- URL: <https://www.lebedev.ru/data/docs/2018.pdf> (дата доступа: 28.01.2021).
- [15] Мухамедшин, Р.А. Феноменологические ограничения на модель неупругих взаимодействий адронов с ядрами при энергиях выше  $10^{15}$  эВ по данным рентген-эмульсионных камер / Р.А. Мухамедшин, // дис.д.физ.-мат.наук: 01.04.23. –М. – 2006. - С. 233 с.
- [16] Mukhamedshin, R.A. FANSY 2.0: A Monte Carlo tool for study of superhigh-energy cosmic-ray interactions. Proton-proton interactions / R.A. Mukhamedshin // The European Physical Journal Plus. – 2019. – №584. –Pp. 134. – DOI: <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12933-2>

- [17] Mukhamedshin, R.A. FANSY 1.0: a phenomenological model for simulation of coplanar particle generation in superhigh-energy hadron interactions / R.A. Mukhamedshin // The European Physical Journal C – 2009. – V. 60. -P. 345-348. <https://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-009-0945-y>.
- [18] Mukhamedshin, R.A. Do LHC data contradict superhigh-energy cosmic-ray coplanarity of most energetic particles / R.A. Mukhamedshin, T.Sadykov // 26th Extended European Cosmic Ray Symposium. – 2019. – IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 1181. – 012089. – DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012089>
- [19] Bindi, M. On behalf of ATLAS and CMS Collaborations. Inelastic cross section measurements at LHC / M. Bindi // -14 th Workshop on Elastic and Diffractive Scattering. – 2011. Dec. 15-21. – Qui Nhon, Vietnam.
- [20] Valentinetti, S. On behalf of ATLAS and CMS. Total Inelastic Cross Section at LHC / S. Valentinetti // LHC13 Workshop. – European Centre for Theoretical studies in Nuclear Physics and Related Areas. – 2013. – Sep. 16-20. – Trento, Italy.
- [21] Baur, S. Measurements of the veryforward energy in pp collisions at the LHC and constraints for cosmic ray air showers / S. Baur., R. Ulrich. For the CMS collaboration // The Astroparticle Physics Conference. 36 th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, <https://www.icrc-2019.org> (accessed: 28.01.2021).
- [22] Kulikov, G.V. On the Size Spectrum of Extensive Air Showers / G.V. Kulikov, and G.B. Khristiansen // -1959. JETP, 35:635. ZhETF, -V. 35. - No. 3. - p. 635, (English translation - JETP, V. 8, No. 3, p. 441, March 1959 ).
- [23] Fukui, S. A Study on the Structure of the Extensive Air Shower / S. Fukui, H. Hasegawa, T. Matano, I. Miura, M. Oda, K. Suga, G. Tanahashi, Y. Tanaka // 1960. Prog.Theor. Phys. Supplement, 16:1–53. Progress of Theoretical Physics Supplement, - V. 16, - May 1960, - P. 153, <https://doi.org/10.1143/PTPS.16.1>.
- [24] Kameda, T. The Differential Electron Density Spectrum of Air Showers at High Densities / T Kameda., Y Toyoda., and T Maeda // - 1960. J Phys Soc Japan,

15:1565. Published under licence by IOP Publishing Ltd  
 Proceedings of the Physical Society, -V. 78, Number 1 **Citation** R J Reid et al -  
 1961 Proc. Phys. Soc. **78** 103.

[25] Allan, H.R. The Distribution of Energy in Extensive Air Showers and the  
 Shower Size Spectrum / H.R. Allan, et al. // 1962. Proc. Phys. Soc. 79:1170.  
 Proceedings of the Physical Society, -V 79, - №. 6 Citation H.R Allan et al -  
 1962 Proc. Phys. Soc. 79 1170.

[26] Khristiansen, G. B. The Energy Spectrum and the Mass Composition of the  
 Primary Cosmic Rays Around the Knee / G. B. Khristiansen, Y. A. Fomin, N. N.,  
 Kalmykov, G. V. Kulikov, S. S. Ostapchenko, V. I. Solovjeva, / - 1965. Proc. 9th  
 ICRC, London. **Journal:** 24th International Cosmic Ray Conference, -V. 2, held  
 - August 28-September 8, -1995 in Rome, Italy. Edited by N. Iucci and E.  
 Lamanna. International Union of Pure and Applied Physics, - 1995. - p.772.

[27] Clark, G.W. Strong interactions at high energies / G.W. Clark, et al. // Soviet  
 Physics Uspekhi, -V. 6, -№ 2 Citation N G Birger *et al* - 1963 *Sov. Phys.*  
*Usp.* 6 250 DOI 10.1070/PU1963v006n02ABEH003507 - 1957. Nature, 180:353.

[28] Hillas, A.M. The Spread in the Arrival Times of Particles in Air-Showers for  
 Photon and Anisotropy Searches above 10 EeV / A.M Hillas, // Acta Physica  
 Academiae Scientiarum Hungaricae, - 1970. - P.p. 29-355.

[29] Chiba, N. Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) covering 100 km<sup>2</sup> area/  
 N. Chiba *et al.* // Nucl. Instr. Methods **A311** -1992, - P. 338-349.

[30] Aabar, A. (The Pierre Auger Collaboration) . The Pierre Auger Cosmic Ray  
 Observatory / A. Aabar, P. Abreubn, M. Agliettabc, E.J. Ahnce, I. Al  
 Samaraiad, J.N. Albertae, I.F.M. Albuquerque, I. Allekotte, J. Allench / NIM  
 A 798, -2015, - P.172-213.

[31] Hillas, A.M. Observations of ultra-high energy cosmic rays / A.M. Hillas, //  
 -1971. Proc. 12th ICRC, Hobart, - 3:1001.

[32] Glasstetter, R. The energy spectrum of cosmic rays / R. Glasstetter et al.  
 (KASCADE Collab.) // Proc. of 29th Int. Cosmic Ray Conf., -№ 6. -2005. - P. 293.



- [33] Fowler, J. A Measurement of the Cosmic Ray Spectrum and Composition at the Knee / J. Fowler et al. (BLANCA Collab.) // *Astropart. Phys.* - №15. – 2001. - P. 49.
- [34] Chernov D. Observations of ultra-high energy cosmic rays / D. Chernov et al. // *Int. J. Mod. Phys.* - № 20, - 2005, - P. 6799.
- [35] Ivanov, A. A. Measuring extensive air showers with Cherenkov light detectors of the Yakutsk array / A. A. Ivanov et al // *New Journal of Physics* 11 - 2009, - 065008.
- [36] Budnev, N.M. Status and the development of data analysis method / N.M. Budnev et al. // *TUNKA-133: 2008 Bul. of RAS. Physics*, - 2009. 73. - No.5, - pp. 627-631.
- [37] Abraham, J. Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger observatory. / J. Abraham et al. // *In Nucl. Instrum.Meth*, - V. A 523. - pp. 50–95. - 2004.
- [38] LHAASO Collaboration. Energy Spectrum of Cosmic Protons and Helium Nuclei by a Hybrid Measurement at 4300 m a.s.l. //- (LHAASO Collaboration).
- [39] Tluczykont, M. TAIGA-HiSCORE: results from the first two operation seasons/ M. Tluczykont. // *PoS – 2017.* - V. 301. - pp. 759.
- [40] Буднев, Н.М. Ит физики космических лучей к гамма - астрономии в Тункинской долине / Н.М Буднев, И. И. Астапов и др. Эксперент ТАИГА: // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, - 2018. Т. 49. ВЫП. 4.С.1031-1048. PACS: 98.70. Rz; 98.70. Sa
- [41] Antoni T. Estimate of the Cosmic Ray Composition by a Pattern Analysis of the Core of PeV EAS / T. Antoni et al. // *Meth.* -2002.
- [42] Doll P. Muon Production Height investigated by the Air-Shower Experiment KASCADE-Grande / P. Doll et al. // -V. 196. - December 2009. - P. 305-308.
- [43] Bertaina M. Test of high-energy hadronic interaction models with KASCADE — Particle physics with air shower detectors / M. Bertaina et al. // - 27th ICRC, Hamburg, - 2001. - P. 792.

- [44] Borisov, A. S. Design of a Cherenkov telescope for the measurement of PCR composition above 1 PeV / A. S. Borisov and V. I. Galkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – V. 409. – № 1. – Pp. 012089.
- [45]. Antonov, R.A. Results on the primary CR spectrum and composition reconstructed with the SPHERE-2 detector / R.A. Antonov, S.P. Beschapov, E.A. Bonvech, et.al. // J. Phys.: Conf. Ser., - 2013. -V 409, - No.1. - 012088.
- [46]. Галкин, В.И. Многомерные критерии для восстановления массового состава первичных космических лучей по характеристикам черенковского света ШАЛ / В.И. Галкин и Т.А Джатдоев // Изв. РАН сер. физ. - 2011. - No. 75. - P. 338-341. (V.I. Galkin and T.A. Dzhatdov // Bull. Rus. Ac. Sci. Phys. 2011. No.75. - P. 309-312.
- [47] Галкин, В. И. Метод определения параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня высокогорной установкой / В. И. Галкин, А. С. Борисов, Р. Бахромзод, В. В. Батраев, С.З. Латипова, А.Р. Мукумов // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2018. – № 2.
- [48] Galkin, V.I. A Method for Estimation of the Parameters of the Primary Particle of an Extensive Air Shower by a High-Altitude Detector / V.I. Galkin, A.S. Borisov, R. Bakhromzod, V.V. Batraev, S.Z. Latipova, A.R. Muqumov // Moscow University Physics Bulletin. – 2018. – V. 73. – No. 2. – Pp. 179-186.
- [49] Topchiev, N.P. Designing of a comprehensive high altitude EAS array for primary particle determination within the PAMIR-XXI project / N.P. Topchiev, A.S. Borisov, V.V. Batraev, R.Bakhromzod, V.I. Galkin, A.R Muqumov // PoS (ICRC2017). -V. 301. -pp. 475. -2017.
- [50]. Galkin, V.I. EAS primary particle parameter estimation with the complex Pamir-XXI detector array / V.I. Galkin, A.S. Borisov, R. Bakhromzod, V.V. Batraev, S. Latipova and A. Muqumov // EPJ Web of Conferences. – 2017. – V. 145. – 15004.

- [51]. Бахромзод, Р. Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от  $\gamma$ -квантов / Р. Бахромзод, В.И. Галкин // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2018. – № 3. – 1830203.
- [52] Батраев, В.В. Разделение атмосферных ливней по массам первичных частиц на основании измеренных угловых распределений черенковского света на уровне гор / В.В. Батраев, В.И. Галкин // Ученые записки физического факультета Московского Университета. - 2018. т.3, с.1830202-1-1830202-5.
- [53] Weekes, T.C. Observation of TeV gamma rays from the Crab nebula using the atmospheric Cerenkov imaging technique / T.C. Weekes et al // The Astrophysical Journal. – 1989. – V. 342. – № 1. – P.p. 342-379.
- [54]. Aharonian, F.A. The potential of ground-based arrays of imaging atmospheric Cherenkov telescopes. I. Determination of shower parameters / F.A. Aharonian, W. Hofmann, A.K. Konopelko, et. al. // Astroparticle Physics. – 1997. – V. 6. – № 3-4. – Pp. 343-368.
- [55] Aleksic, J. The major upgrade of the MAGIC telescopes, Part I: The hardware improvements and the commissioning of the system / J. Aleksic, S. Ansoldi, L. A. Antonelli, et. al // Astropart. Phys. - 2016. 72. 61-DOI:10.1016/j.astropartphys.-2015.04.004
- [56] Acciari, V. A. INTEGRAL View of TeV Sources: A Legacy for the CTA Project / V. A. Acciari, M. Beilicke, G. Blaylock, et. al.// Ap. J. - 2008. 679, - No. 2. - Pp. 1427-1432.
- [57] Linsley, J. A review of measurements relating to the origin of cosmic rays above  $10^{18}$ eV / J. Linsley // Proc. 15th ICCR - 1977. - V.12. - p.89.
- [58] Linsley, J. Catalogue of highest energy cosmic rays / J. Linsley // Proc. 15th ICCR - 1979. - V. 9. - P. 274.
- [59] Linsley, J. Validity of Scaling to  $10^{20}$  eV and High-Energy Cosmic-Ray Composition / J. Linsley and A. A. Watson // Phys. Rev. Lett. -1981. V- 46. P.459.

- [60] Walker, R. Depth development of extensive air showers from muon time distributions / R. Walker, A. A Watson // J. Phys. G: Nucl. Phys. -1981. - No. 7. Pp. 1297-1309.
- [61] Unger, M. Mass sensitive observables of the Pierre Auger Observatory / M. Unger // EPJ Web of Conferences, - 2013, - No 53, - 04009. DOI:10.1051/epjconf/20135304009
- [62] Topchiev, N.P. Designing of a comprehensive high altitude EAS array for primary particle determination within the PAMIR-XXI project / N.P. Topchiev, A.S. Borisov, V.V. Batraev, R.Bakhromzod, V.I. Galkin, A.R Muqumov // PoS (ICRC2017). - V. 301, - pp. 475, -2017.
- [63]. Galkin, V. I., EAS primary particle parameter estimation with the complex Pamir-XXI detector array. / V. I. Galkin, A. S. Borisov, R. Bakhromzod, V. V. Batraev, S.Z. Latipova, A.R. Muqumov // EPJ Web of Conferences. - 2017. - V.145. - Pp. 15004.
- [64] Бахромзод Р. Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от  $\gamma$ -квантов / Бахромзод Р, Галкин В. И //Ученые записки физического факультета Моск. Ун-та.- 2018. -Т. 3. - № 3. - С. 1-6, - 1830203.
- [65] Латипова, С. З. Оценка энергии широких атмосферных ливней оптической частью высокогорной установк / С. З. Латипова, В. И Галкин //Учёные записки физического факультета Московского Университета. -2020. - № 3. - С. 265-271
- [66] Borisov, A.S. Design of a Cherenkov telescope for the measurement of PCR composition above 1 PeV / A.S. Borisov and V.I. Galkin // J. Phys.: Conf. Ser. - 2013. - №.1. - С. 409. -p.012089.
- [67] Heck, D. Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide / D. Heck and T. Pierog. – Karlsruhe, Germany: // KARLSRUHER INSTITUT FUR TECHNOLOGIE (KIT). –2011.
- [68] Afanasiev, B.N. The extremely high energy cosmic rays/ B.N. Afanasiev et al // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, - V 24, - №.5

**Citation** Shigeru Yoshida and Hongyue Dai - 1998 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 24 905.

[69] Postnikov, E.B. Primary gamma ray selection in a hybrid timing/imaging Cherenkov array / E.B. Postnikov, A.A. Grinyuk, L.A. Kuzmichev, and L.G. Sveshnikova, // EPJ Web of Conferences, / - 145, - 19005, - 2017.

[70] Borisov, A.S. Design of a Cherenkov telescope for the measurement of PCR composition above 1 PeV / A.S. Borisov and V.I. Galkin // J. Phys.: Conf. Ser. - 2013. - №.1. - C. 409. - p. 012089.

[71] Glasstetter, R. The energy spectrum of primary cosmic rays measured with the KASCADE-Grande experiment / R. Glasstetter et al // - Proc. of 29th Int. Cosmic Ray Conf., Pune 6 – 2005, - P. 293.

[72] Chernov D. The tunka experiment: towards a 1-km<sup>2</sup> eas Cerenkov light array in the tunka valley / D. Chernov et al // Int. J. Mod. Phys. - A 20, - 2005, -p. 6799.

[73] Borisov, A.S. Design of a Cherenkov telescope for the measurement of PCR composition above 1 PeV / A.S. Borisov and V.I. Galkin // J. Phys.: Conf. Ser. - 2013. - №.1. - C. 409. - p. 012089.

[74] Topchiev, N.P. Designing of a comprehensive high altitude EAS array for primary particle determination within the PAMIR-XXI project / N.P. Topchiev, A.S. Borisov, V.V. Batraev, R.Bakhromzod, V.I. Galkin, A.R Muqumov // PoS (ICRC2017). -V. 301, - pp. 475, - 2017.

[75] Galkin, V. I., EAS primary particle parameter estimation with the complex Pamir-XXI detector array. / V. I. Galkin, A. S. Borisov, R. Bakhromzod, V. V. Batraev, S.Z. Latipova, A.R. Muqumov // EPJ Web of Conferences. – 2017, V-145. - Pp. 15004.

[76] Бахромзод, Р. Анализ критерия отбора гамма-квантов по угловому распределению черенковского света установкой „Памир-XXI“ / Р. Бахромзод, В.И. Галкин // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2019. – № 6. – 1960201.

[77] Glushkov, A. V. Muon content of ultra-high-energy air showers: Yakutsk data versus simulations / A. V. Glushkov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, I. E. Sleptsov,

D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky // Письма ЖЭТФ. 2008. - 87. - С.220-224.

[78] Ракобольская, И.В. Особенности взаимодействий адронов космических лучей сверхвысоких энергий-по данным свинцовых рентгеноэмульсионных камер эксперимента «Памир» / И.В. Ракобольская // Издательство Московского университета - 2000.

[79] Галкин, В. И. Моделирование основных явлений и эксперимента в физике космоса и физике высоких энергий. Практикум. – М. – 2016. 106 стр.

[80] Galkin, V. I., EAS primary particle parameter estimation with the complex Pamir-XXI detector array. / V. I. Galkin, A. S. Borisov, R. Bakhromzod, V. V. Batraev, S.Z. Latipova, A.R. Muqumov//EPJ Web of Conferences. - 2017. -145. - 15004.

[81] Галкин В.И. Метод определения параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня высокогорной установкой / В.И. Галкин, А. С. Борисов, Р. Бахромзод, В.В. Батраев, С. З. Латипова, А.Р. Мукумов //Вестн. Моск. ун-та. Серия 3. Физика. Астрономия. -2018. -№2. - С. 56-62.

[82] Topchiev, N.P. Designing of a comprehensive high altitude EAS array for primary particle determination within the PAMIR-XXI project / N.P. Topchiev, A.S. Borisov, V.V. Batraev, R. Bakhromzod, V.I. Galkin, A.R. Muqumov. // ICRC. -2017. -Vol. 301.- p. 475.

[83] Galkin, V. I. EAS primary particle parameter estimation with the complex Pamir-XXI detector array / V. I. Galkin, A. S. Borisov, R. Bakhromzod, V. V. Batraev, S.Z. Latipova, A.R. Muqumov // EPJ Web of Conferences. - 2017. -Pp. 145.

[84] Бахромзод, Р. Проскочившие ливни и способы их выделения в высокогорных экспериментах по изучению космических лучей высоких энергий / Р. Бахромзод // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2022. –№ 3. – С. 238-245.

- [85] Латипова, С. З. Оценка энергии широких атмосферных ливней оптической частью высокогорной установок / С. З. Латипова, В. И. Галкин // Учёные записки физического факультета Московского Университета. -2020. - № 3. -С. 265-271
- [86] Полухина, Н.Г. Исследования актуальных проблем ядерной физики на основе методики полностью автоматизированной обработки трековых детекторов на многофункциональной установке ПАВИКОМ/ Полухина, Наталья Геннадьевна // дис.д.физ.-мат. наук. - Москва. – 2006. – 101 с.
- [88] Osedlo V.I. The halo and the high energy jet in stratospheric STRANA superfamily / V.I. Osedlo // 30 th International Cosmic Ray Conference. – Merida, Mexico. – 2007.
- [89] Osedlo V.I. Anisotropic and alignment effects in STRANA superfamily with  $E_0 > 10^{16}$  eV / V.I. Osedlo, A.K. Managadze et al. // 30 th International Cosmic Ray Conference. – Merida, Mexico. – 2007.
- [90] Оседло, В.И. Пространственно-энергетические характеристики ядерного взаимодействия при энергиях  $\sim 10^{13}$  эВ и  $\sim 10^{16}$  эВ, полученные в стратосферных экспериментах / В.И. Оседло / /дис.канд. физ.-мат.наук: 01.04.23. – Москва. –2007. – 123 с.
- [91] JACEE experiment. Nuclear interaction study using emulsions / JACEE collobaration // Department of cosmic ray research and neutrino studies. – URL: [https://auger.ifj.edu.pl/nowa\\_en/JACEE](https://auger.ifj.edu.pl/nowa_en/JACEE) (accessed: 28.01.2021).
- [92] Ракобольская, И.В. Результаты экспериментов в космических лучах с использованием эмульсионных детекторов / И.В. Ракобольская, Т. М. Роганова // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2010. – 4. –с. 47-55. –URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209759>. (дата доступа: 28.01.2021).
- [93] Арабкин, В.В. Энергетические характеристики гамма-семейств в широких атмосферных ливнях на высоте 3340 м / В.В. Арабкин // Диссертация кандидата физ.-мат. наук, 01.04.16. – М. – 1991. – 126 с.
- [94] Besshapor, S.P. Hybrid experiments with air-shower array and emulsion chamber at high mountains / S.P. Besshapor, K.V. Cherdintseva, et al // Nuclear

- Physics B-Proceedings Supplements. – 2009. – V.196. – Dec. 2009. – pp. 118-121.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.021>
- [95] Heck, D. Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide / D. Heck and T. Pierog. – Karlsruhe, Germany: KARLSRUHER INSTITUT FUR TECHNOLOGIE (KIT). –2011.
- [96] Borisov, A. S. Design of a Cherenkov telescope for the measurement of PCR composition above 1 PeV / A. S. Borisov and V. I. Galkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – V. 409. – № 1. – Pp. 012089.
- [97] A.S. Borisov. Modern status of the PAMIR-XXI Project / A.S. Borisov, V.I. Galkin, M.I. Ilolov, R.A. Mukhamedshin, H.H. Muminov, V.S. Puchkov, O. Saavedra // 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2013. – Pp. 0953.
- [98] Галкин, В. И. Метод определения параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня высокогорной установкой / В. И. Галкин, А. С. Борисов, Р. Бахромзод, В. В. Батраев, С.З. Латипова, А.Р. Мукумов // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2018. – № 2.
- [99] MINUIT – Function Minimization and Error Analysis, CERN Program Library Long Writeup D506, Geneva, 1994.
- [100] Borisov, A. S. Design of a Cherenkov telescope for the measurement of PCR composition above 1 PeV / A. S. Borisov and V. I. Galkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – V. 409. – № 1. – Pp. 012089.
- [101] Galkin, V.I. EAS primary particle parameter estimation with the complex Pamir-XXI detector array / V.I. Galkin, A.S. Borisov, R. Bakhromzod, V.V. Batraev, S. Latipova and A. Muqumov // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 145. – P. 15004.
- [102] Галкин, В. И. Метод определения параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня высокогорной установкой / В. И. Галкин, А. С. Борисов, Р. Бахромзод, В. В. Батраев, С.З. Латипова, А.Р. Мукумов // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2018. –



- № 2. (Galkin V. I., Borisov A. S., Bakhromzod R., Batraev V. V., Latipova S.Z., Muqumov A.R. // Moscow Univ. Phys. Bull. - 2018. 73. -N. 2, - P. 179).
- [103] Galkin, V.I. On the sensitivity of the spatial-angular distribution of the Cherenkov light in extensive air showers to the mass composition of primary cosmic 118 rays with energies of  $10^{15}$ – $10^{16}$  eV / V.I. Galkin and T.A. D.
- [104] Bakhromzod, R. The search and analysis of optimal criteria for the selection of extensive air showers from - quanta by Cherenkov telescopes / R. Bakhromzod, V.I. Galkin // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. – 2021. – V. 1018. – P. 165842. DOI: 10.1016/j.nima.2021.165842 – Impact factor: 1.455 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165842><https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0>.
- [105] Батраев, В.В. Разделение атмосферных ливней по массам первичных частиц на основании измеренных угловых распределений черенковского света на уровне гор / В.В. Батраев, В. И. Галкин // Ученые записки физического факультета Московского Университета. - 2018. т.3, - с.1830202. -1-1830202-5.
- [106] Anokhina, A.M. A method for primary proton spectrum measurement at  $E_0 \times 10$  PeV with SPHERE-2 telescope / A.M. Anokhina, R.A. Antonov, E.A. Bonvech et al. // Proceedings of 31st ICR C. Lodz. – 2009.
- [107] Acciari, V. A. «Spectral Energy Distribution of Markarian 501: Quiescent State vs. Extreme Outburst / V. A. Acciari at al. // The Astrophysical Journal. – 2011. – V. 729. – № 1. - Pp. 2-11.
- [108] Postnikov, E. Commissioning the joint operation of the wide-angle timing HiSCORE Cherenkov array with the first IACT of the TAIGA experiment / E. Postnikov at al. // Proceeding of science. – 2017. –V. 301. – P. 756.
- [109] Tluczykont, M. TAIGA-HiSCORE: results from the first two operation seasons / M. Tluczykont at al. // Proceeding of science. – 2017. – V. 301. – P. 759.
- [110] Krennrich, F. VERITAS: the Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System / F.Krennrich, I.H.Bond, P.J.Boyle, et. al. // New Astronomy Reviews. – 2004. – V. 48. – № 5-6. – Pp. 345-349.

- [111] Никольский, С. И. Широкие атмосферные ливни космического излучения / С. И. Никольский // УФН. – 1962. – №78. – Стр. 3.
- [112] Grigorov, N. L. Method of measuring particle energies above  $10^{11}$  eV / N. L. Grigorov, V. S. Murzin, and I. D. Rapoport // J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.), – 1958. – № 34. – Pp. 506-507.
- [113] Nesterova, N. M. On the Observation of Cerenkov Radiation Accompanying Broad Atmospheric Showers of Cosmic Rays / N. M. Nesterova, A.E. Chudakov // ЖЭТФ. – 1955. –V. 1, – № 2, - P. 388.
- [114] Lidvansky, A. S. A. E. Chudakov as scientific pioneer / A. S. Lidvansky // Phys. Usp. – 2022. – V. 65. – Pp. 969–979.
- [115] Puchkov, V.S. Estimation of the p+He Fraction in the Mass Composition of Primary Cosmic Radiation the Energy Range of  $E_0=1-100$  PeV according to Gamma - Ray Families Featuring Halo / Puchkov, V.S., Pyatovsky, S.E. // Phys. Atom. Nuclei. –2020. –V. 83. –Pp. 237–246.
- [116] Ohsawa, A. Preliminary report on the large halo event TADJIKISTAN / Ohsawa, A. // Il Nuovo Cimento C. –1996. –V. 19. – Pp. 1031–1038.
- [117] Slavatskiy, S.A. Results of emulsion chamber experiments with very high-energy cosmic rays which are difficult to explain in the framework of the standard model / S.A. Slavatskiy // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. – 2003. – V. 122. - Pp 3-11.
- [118] Pamir Collaboration. Nuclear interactions of super high-energy cosmic rays observed in mountain emulsion chambers / Pamir Collaboration, Mt. Fuji Collaboration and Chacaltaya Collaboration // Nuclear Physics B. – 1981. – V.191. – Pp. 1-25.
- [119] Pamir Collaboration. Observation of a high-energy cosmic-ray family caused by a Centauro-type nuclear interaction in the joint emulsion chamber experiment at the Pamirs / Pamir Collaboration, Chacaltaya Collaboration // Physics Letters B. – 1987. -V. 190, – № 1–2. –Pp. 226-233.
- [120] Chacaltaya and Pamir Collaboration. Observation of very high energy cosmic-ray families in emulsion chambers at high mountain altitudes (I) /

Chacaltaya and Pamir Collaboration // Nuclear Physics B. – 1992. – V. 370. – № 2.  
– Pp. 365-431.

[121] Mukhamedshin, R. A. Results of the experiment "Pamir" and strong interaction model at energy higher than 1015 eV/ R. A. Mukhamedshin // Bull. Soc. Sci. Lettr. Lodz, Ser. Rech. XVI. –1994. - Pp. 137-145.

[122] Tamada, M. Detection of high energy electromagnetic and hadron components of air-shower cores in the new hybrid experiment «Pamir-XXI» / M. Tamada, N. Inoue, A. Misaki and A. Ohsawa // EPJ Web of Conferences. – 2017. –V. 145. - P. 15001.

[123] Roesler, S. The Monte Carlo Event Generator DPMJET-III/ S. Roesler, R. Engel, J. Ranft // Proc. Monte Carlo 2000 Conf., Lisbon (Portugal) - Oct. 23-26, 2000.

- СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**
- [1-А]. **Латипова, С.З.** Аппроксимация фронта и поперечного распределения черенковского света широких атмосферных ливней от различных ядер с энергией 1ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря / **С.З. Латипова** // Вестник ТНУ. - 2013. - № 2.- С. 165-169.
- [2-А]. **Латипова, С. З.** Метод определения параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня высокогорной установкой / В. И. Галкин, А. С. Борисов, Р. Бахромзод, В. В. Батраев, **С. З. Латипова**, А. Р. Мукумов // Вестник Московского Университета. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ.- 2018. -№2. - С.56-62.
- [3-А]. **Латипова, С. З.** Поперечное распределение черенковского света широких атмосферных ливней от различных ядер с энергией 1 ПэВ на высоте 4250м над уровнем моря / **С.З.Латипова**, В.И., Галкин, Г.П. Шозиёв // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. -2017. - Т. 1. - № 3. -С. 69-75.
- [4-А]. **Латипова, С. З.** Оценка энергии широких атмосферных ливней оптической частью высокогорной установк. / **С. З. Латипова**, В. И. Галкин // Учёные записки физического факультета Московского Университета. - 2020. - № 3. - С. 265-271.
- [5-А]. **Латипова, С. З.** Оценка энергии широких атмосферных ливней оптической частью установки ПАМИР-XXI / **С. З. Латипова**, В. И. Галкин // Республиканский научно-практическая конференция посвящённой «Двадцатилетию изучения развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования) на тему «Современные проблемы физики конденсированное состояние и ядерная физика» - ТНУ, Душанбе - 2020. - № 3. - С. 205-207.
- [6-А]. **Латипова, С. З.** Процедура определения положения и направления оси ШАЛ сетью быстрых оптических детекторов ПАМИР-XXI / В. И. Галкин, **С. З. Латипова** // Вестник ТНУ-серия естественных наук. 2022.- №3. - С-224-238.

[7- A]. Galkin, V.I. EAS primary particle parameter estimation with the complex Pamir-XXI detector array/ V.I. Galkin, A.S. Borisov. R. Bakhromzod, V.V. Batraev, **S. Latipova**, and A. Muqumov // EPJ Web of Conferences 145, 15004 (2017) DOI: 10.1051/epjconf/201714515004/ EPJ Web Conf. /Volume 145, 2017.

[8-A]. **Латипова С. З.** Extensiv air shower energy estimate by optical part of Pamir-XXI detector array /Республиканский научно-практическая конференция посвященной «Двадцатилетию изучения развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования. ТНУ, Душанбе - 2020.- С.4.

УТВЕРЖДАЮ  
 Первый заместитель ректора, заместитель  
 ректора по учебной работе  
 Таджикского национального университета  
 д.э.н., проф. Собирзода Н. М.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научных исследований в учебный процесс

Заказчик-бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Таджикский национальный университет», кафедра ядерной физики.

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований, выполненных по теме «Оценка энергии и направления первичной частицы по образу широкого атмосферного ливня в оптических детекторах установки Памир- XXI.» ассистентом кафедры ядерной физики ТНУ Лапилова С. З. внедрены в учебный процесс.

1. Виды внедряемых результатов: новая методика для гибридной установки, предназначенной для регистрации черенковского света, которая позволяет определять первичные параметры ШАЛ и оценивать их; алгоритм исключения проскочивших ливней, использующий свойства черенковского света ШАЛ и основывающийся на данных оптических детекторов.
2. Форма внедрения: постановка учебно-исследовательских работ бакалавров и магистров по курсам дисциплин «Элементарные частицы и космические лучи», «Моделирование детекторов ядерного излучения» и «Компьютерное моделирование в ядерной физике».
3. Эффективность практической реализации: повышение качества подготовки бакалавров, магистров и Ph.D.

Факт практического использования  
 результатов научных исследований подтверждаем:

Декан физического факультета,  
 кандидат физ.-мат. наук, доцент

Кодирзода З. А.

Зам. декана физического факультета  
 по науке, к. ф.-м.н., доцент

Шарипов Дж. Г.

Зав. кафедры ядерной физики,  
 д. ф.-м.н., профессор

Махсудов Б. И.