

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени С. У. УМАРОВА

На правах рукописи

УДК: 524.1 (575.3)



Ризои Бахромзод

**Развитие методов выделения ливней от γ -квантов очень высокой энергии
по данным черенковских детекторов высокогорных установок**

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Душанбе – 2023

Работа выполнена на кафедре физики космоса физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и в Международном центре ядерно-физических исследований Физико-технического института им. С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана

- Научный руководитель** – **Галкин Владимир Игоревич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры физики космоса физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова
- Официальные оппоненты** – **Махсудов Барот Исломович**,
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры ядерной физики физического факультета
Таджикского национального университета
- Синицина Вера Георгиевна**,
кандидат физико-математических наук,
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева,
Отделение ядерной физики и астрономии, зав.
лабораторией, ведущий научный сотрудник
- Ведущая организация:** – Институт ядерных исследований Российской академии наук

Защита диссертации состоится “6” июля 2023 г. в 15⁰⁰ часов на заседании Объединенного диссертационного совета 6D.KOA-055 при Физико-техническом институте им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана, по адресу: 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Айни, 299/1, факс (+992-372)25- 79-14. Зал заседаний Ученого совета ФТИ им. С.У. Умарова НАНТ. E-mail: shuro.ift@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Физико-технического института им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана и на сайте www.phti.tj.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук, доцент**

Низомов З

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Регистрация гамма-лучей очень высокой энергии (больше 1 ТэВ) считается очень важным достижением последних лет в астрофизике, она поставила перед учеными новые вопросы о механизмах генерации и источниках этих лучей, о распространении и взаимодействии гамма-квантов с межзвездным веществом и полями. Изучение высокоэнергичных гамма-квантов дает ответы на вопросы о происхождении и ускорении космических лучей сверхвысокой энергии и указывает на их источники или области ускорения, также вносить ясность в такие проблемы как темная материя, нарушение Лоренц-инвариантности, изучение ранней Вселенной и др. [1-10].

Гамма-астрономия – важная часть современной астрофизики и физики элементарных частиц, которая занимается изучением космического гамма-излучения.

Ещё в 1972-ом году В.Л. Гинзбург написал, что «только что зарождающаяся гамма-астрономия будет в центре внимания учёных и будет не только существенно дополнять данные рентгеновской астрономии, но и позволит получить совершенно новые сведения, имеющие принципиально важное значение для всей астрофизики высоких энергий (включая сюда астрофизику космических лучей и проблему их происхождения)» [11].

Эти ожидания оправдались, и теперь из собрания обрывочных фактов гамма-астрономия превратилась в полноправную часть астрономии – наряду с оптической, радио и рентгеновской частями. Гамма-астрономия восприняла многие методы классической астрономии, среди прочих – сравнительный анализ различных участков спектра электромагнитного излучения.

Сложность изучения гамма-квантов очень высокой энергии заключается в невозможности прямого наблюдения, в силу очень низкого потока и непрозрачности земной атмосферы для этих лучей. В диапазоне энергии от $2 \cdot 10^6$ эВ до $3 \cdot 10^{11}$ эВ успешно работает космический гамма-телескоп Fermi-LAT [12-14]. Но космические частицы и гамма-кванты не доходят до Земли, поскольку взаимодействуют с атомами атмосферы, поэтому и наблюдать их напрямую наземными установками невозможно. Для изучения таких частиц и измерения их энергии приходится использовать специальный метод – регистрировать ливни из частиц, создаваемые космическими частицами высокой энергии в атмосфере Земли. Такие атмосферные ливни покрывают большие площади до сотен квадратных километров, что позволяет регистрировать события предельно высоких энергий с помощью установок из детекторов, распределённых по площадям сравнимых размеров [15].

Начиная с конца 30-х гг. XX в., свойства атмосферных ливней интенсивно исследуется многими учеными и исследовательскими группами [16, 17]. Суть явления состоит в том, что первичная частица высокой энергии, взаимодействуя с атомами атмосферы, образует ядерно-электромагнитный каскад, в котором энергия первичной частицы распределяется между вторичными частицами. Число вторичных частиц лавинообразно нарастает, и на уровне моря их число может достигать многих миллионов и миллиардов. Это явление называют широким атмосферным ливнем (ШАЛ) [15]. В ШАЛ сосуществуют различные компоненты: электронно-фотонная, адронная, мюонная, излучение Вавилова-Черенкова, ионизационное и радиоизлучение.

Регистрируя различные компоненты ШАЛ, можно оценить параметры первичной частицы, которая создала этот ливень: направление её прихода, энергию и тип (массу). Заряженные частицы из-за отклонения в магнитных полях космического пространства теряют

первоначальное направление, и по ним невозможно узнать направление на источник, но гамма-кванты в этом отношении имеют преимущества. Они не отклоняются в магнитных полях и при регистрации прямо указывают на источник излучения. В этом плане задачей гамма-астрономии является точное восстановление параметров первичного гамма-кванта. Это позволяет изучить процессы рождения гамма-квантов и физическое состояние источника гамма-излучения очень высокой энергии. Для всего этого необходимо детально изучать ШАЛ и по регистрации разных компонент правильно восстанавливать первичные параметры.

Степень изученности научной проблемы, теоретическая 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 ~4250 м над уровнем моря [18, 19]. 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 протонов и гамма-квантов в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 100 ТэВ, методики оценки их параметров и алгоритм выделения ливней от гамма-квантов на фоне протонных.

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 массового состава ПКИ и регистрации γ -квантов сверхвысокой энергии как от точечных, так и от диффузных источников. Дело в том, что высота уровня наблюдения близка к высоте максимума средних каскадных кривых от гамма-квантов с энергиями больше 100 ТэВ. 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 «Памир-XXI». Исследование направлено для реализации Плана мероприятий на 2020-2025 годы по реализации объявления 2020-2040 годов «Двадцатилетием изучения и развития естественных,

точных и математических предметов в сфере образования и науки» утверждённого Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июля 2020 года, №427.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цели диссертационной работы:

- Разработка и физическое обоснование нового метода выделения гамма-квантов на фоне протонных ливней в численном эксперименте;
- Рассмотрение конкретного варианта метода для практического применения в эксперименте Памир-XXI.

Задачи исследования:

- Создание банка искусственных событий для гамма-квантов и протонов в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 100 ТэВ;
- Поиск критериев для исключения проскочивших ливней из рассмотрения;
- Разработка метода выделения гамма-квантов на фоне протонов;
- Выяснение физических причин работоспособности предложенной методики;
- Проверка метода для искусственных событий от γ -квантов и протонов разных энергий в диапазоне от 30 ТэВ до 100 ТэВ;
- Учет флуктуаций черенковского света и фона звездного неба;
- Оценка чувствительности оптической части установки Памир-XXI и ожидаемое время наблюдения источников гамма-квантов очень высокой энергии.

Объектом исследования в настоящей работе являлись различные характеристики черенковского света ШАЛ (ПВР, ПУР) на высоте ~ 4250 м над уровнем моря.

Предметом исследования являлись способы регистрации и оптимальной обработки этих характеристик (ПВР, ПУР) для получения эффективных оценок параметров первичной частицы ШАЛ (первичная энергия E_0 , направление прихода Θ , положение оси x_0 и y_0).

Научная новизна исследования:

- Была предложена новая методика для гибридной установки, предназначенной для регистрации черенковского света, которая позволяет определять первичные параметры ШАЛ (первичная энергия E_0 , направление прихода Θ , положение оси x_0 и y_0) и эффективно выделять γ -кванты из фона протонных событий.
- Были найдены физические причины работоспособности методики отбора γ -квантов на основании анализа данных статистического моделирования;
- Был найден алгоритм исключения проскочивших ливней, использующий свойства черенковского света ШАЛ и основывающийся на данных оптических детекторов.

Теоретическая и научно-практическая значимость исследования:

- предлагаемый способ анализа черенковского света ШАЛ может быть использован как для совершенствования критерия отбора гамма-ливней в черенковской гамма-астрономии, так и для улучшения разделения ШАЛ по массам первичных ядер при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий;
- анализ физических причин работы найденных критериев создает основу для дальнейшего совершенствования критериев отбора гамма-событий;

- разработана конкретная гибридная методика анализа угловых и пространственно-временных распределений ЧС ШАЛ для высокогорных установок (практическая значимость).

Положения, выносимые на защиту:

- Разработанный метод для выделения гамма-квантов на фоне протонов космических лучей в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 100 ТэВ;
- Алгоритм нахождения и исключения проскочивших ливней;
- Объяснение физических причин работоспособности выбранных критериев;
- Оценка чувствительности установки, использующей новый метод, к источникам гамма-квантов сверхвысоких энергий.

Степень достоверности результатов. Для генерации искусственных событий использовался признанный во всем мире код CORSIKA, для каждого события сохранялась детальная информация о пространственно-временном и пространственно-угловом распределении черенковского света, а также полные стандартные файлы с информацией о вторичных частицах. При обработке использовались данные о фоне ночного неба в горах Восточного Памира. В работе использовались стандартные программные инструменты CERN и процедуры, реализующие общепризнанные численные методы.

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.
8. Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов. Моделирование физических явлений и процессов.

Личный вклад автора. Автор участвовал во всех стадиях численного эксперимента: генерации искусственных событий, формирования угловых и пространственно-временных черенковских образов и их обработки.

Вся обработка искусственных событий ШАЛ, оптимизация алгоритмов, поиск и оптимизация критериев отбора событий по данным оптической части установки, оценки неопределенностей восстановления первичных параметров ливней и чувствительности установки к гамма-источникам выполнены лично автором.

Этапы исследования включают определение первичных параметров для моделирования, моделирование развития ШАЛ в атмосфере для выбранных типов частиц и энергий, создание банка искусственных событий, выбор моделей для аппроксимации функций поперечного распределения и функции фронта, определение конфигурации установки, разработка методики регистрации и выделения гамма-квантов и проверка работоспособности разработанной методики.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов. Основные результаты исследований докладывались на следующих международных, всероссийских и республиканских конференциях: Республиканская конференция по ядерно-физическим методам анализа состава биологических, геологических химических и медицинских объектов, Душанбе, Таджикистан, 2014; 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Москва, Россия, 22-27 августа 2016; Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017; 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Республика Корея, 12-20 июля 2017; 4-я Международная школа молодых ученых стран СНГ «Смежные проблемы физики и астрофизики частиц сверхвысоких энергий», Алматы, Казахстан, 24-30 сентября 2017; XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018». Секция «Физика», Москва, Россия, 9-13 апреля 2018; XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов – 2017", МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 20 апреля 2017; V Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ», ФТИ им. С.У. Умарова АН РТ, Душанбе, Таджикистан, 18-19 ноября 2016; VI Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ», ФТИ им. С.У. Умарова АН РТ, Душанбе, Таджикистан, 29-30 июня 2018; Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики», ТНУ, Душанбе, Таджикистан, 19 февраля 2020.

Автор выступал с докладами на научных семинарах; Научные семинары физического факультета Таджикского национального университета (09. 01. 2018), Физико-технического института им. С.У. Умарова НАНТ (10.01.2018 и 02.04.2019), семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т.Зацепина, ИЯИ РАН, (19.10.2018) и научный семинар «Астрофизика космических лучей и физика космоса» им. М.И. Панасюка НИИЯФ МГУ (28.04.2021).

Опубликованные результаты диссертации. По материалам диссертационной работы опубликовано 11 работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 3 статьи в рецензируемых журналах ВАК при Президенте Республики Таджикистан.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 130 страницах текста и состоит из введения, трёх глав с подразделами, содержащих результаты собственных исследований и их обсуждение, выводов и списка литературы. Работа иллюстрирована 39 рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит 214 библиографических источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, приводится обоснование научной новизны, достоверности и практической значимости проведённых исследований, описана структура диссертационной работы. Также приводятся положения, выносимые на защиту, публикации и доклады по теме диссертации и отмечается личный вклад автора в полученные результаты.

В **первой главе** рассказывается про гамма-астрономию, про историю развития этой отрасли науки. Гамма-астрономию можно считать самой высокоэнергичной частью астрономии, потому что гамма-излучением заканчивается энергетический диапазон электромагнитных волн. В зависимости от энергии γ -квантов методика их регистрации отличается. Например, для более низких энергий используются космические эксперименты. Так как атмосфера Земли непрозрачна для γ -квантов, их прямое наблюдение стало возможным только после запуска космических аппаратов. С ростом энергии поток γ -излучения падает, и требуются большие площади экспериментальных установок, но отправка в космос таких установок обошлась бы очень дорого, и это пока невозможно. Поэтому при более высоких энергиях (больше ~ 100 ГэВ) используется косвенное наблюдение γ -лучей. Они, попадая в атмосферу, рожают ШАЛ, и, зарегистрировав эти ливни, можно восстановить параметры первичных γ -квантов.

Также рассматриваются проблемы, связанные с гамма-астрономией: Темная материя, нарушение Лоренц-инвариантности, проблемы ускорения космических лучей, изучение ранней Вселенной. Эти проблемы изучаются методами гамма-астрономии.

Далее описывается гибридный метод регистрации гамма-квантов.

Вторая глава посвящена эксперименту «Памир-XXI» и его оптической части. Проект «Памир-XXI» планировался как комплексное исследование первичного космического излучения (ПКИ) в широком диапазоне энергий 30 ТэВ – 1 ЭэВ 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 массового состава ПКИ и регистрации γ -квантов сверхвысокой энергии как от точечных, так и от диффузных источников. Дело в том, что высота уровня наблюдения близка к высоте максимума средних каскадных кривых от гамма-квантов с энергиями больше 100 ТэВ. 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».

Далее подробно описаны основные цели и задачи эксперимента «Памир-XXI»/

Вторая половина **второй главы** посвящена гамма-астрономической части эксперимента «Памир-XXI».

Для гамма-астрономических задач в эксперименте «Памир-XXI» используется оптическая часть установки (Рисунок 1), которая состоит из:

1. Прямоугольной сети из 11×11 широкоугольных быстрых детекторов площадью ~ 1 м² и апертурой ~ 1 ср, расположенных с шагом 25 м. Расстояние между детекторами, было выбрано после проверки методики оценок первичных параметров.

2. Угловых черенковских телескопов с зеркалами площадью ~ 4 м², диаметром поля зрения около 30° и диаметром пиксела $\sim 0.8^\circ$, удалённые друг от друга на расстояния ~ 100 м и обеспечивающие анализ ПУР ЧС на небольших расстояниях от оси, чувствительного к массе

первичной частицы. Для определения оптимального размера пикселя были рассмотрены 4 варианта: пиксели с размерами $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, $1.0^\circ \times 1.0^\circ$. Обработка результатов показала, что наилучший размер пикселя является $0.75^\circ \times 0.75^\circ$.

Такая комбинация детекторов позволяет зарегистрировать гамма-кванты от точечных и диффузных источников. В отличие от других экспериментов, регистрация диффузных источников обусловлена использованием не только информации о ПУР ЧС, но и ПВР ЧС.

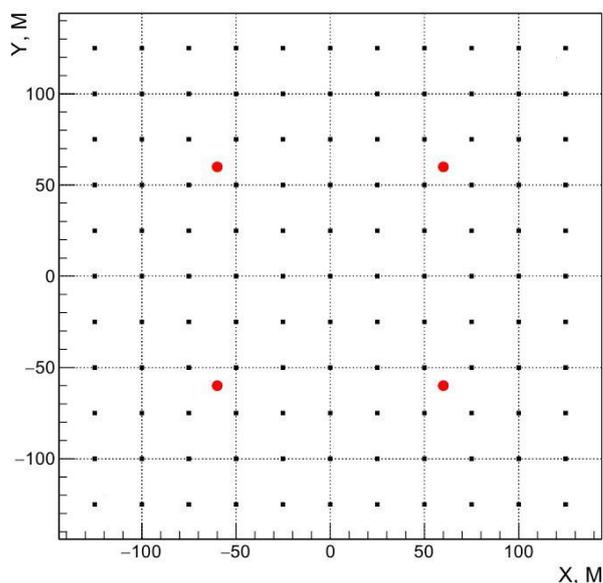


Рисунок 1. - Оптическая часть установки «Памир-XXI». Черные квадраты – быстрые оптические детекторы, красные кружки – угловые черенковские телескопы

Для проверки предполагаемой методики был создан банк искусственных данных. Искусственные события для уровня наблюдения 4250 м над уровнем моря моделировались с помощью CORSIKA6.990/QGSJET01 для набора фиксированных энергий от 30 ТэВ до 100 ТэВ и для двух типов первичных частиц: протонов и γ -квантов. Для каждого события сохранялись пространственно-временное распределение (ПВР) ЧС в квадратной области уровня наблюдения размером $600 \text{ м} \times 600 \text{ м}$ с центром на оси ливня, пространственно-угловое распределение (ПУР) ЧС в квадратной области $500 \text{ м} \times 500 \text{ м}$ с центром на оси и стандартный файл частиц CORSIKA. Массив ПВР ЧС имеет размерность $600 \times 600 \times 300$, причём первые два измерения делят большой квадрат на 360000 квадратов площадью 1 м^2 , а последнее воспроизводит форму импульса ЧС в диапазоне задержек 0-300 нс с шагом 1 нс. Таким образом, сохраняется вся информация с интересующей нас части уровня наблюдения с нужным пространственно-временным разрешением. Аналогично, массив ПУР ЧС имеет размерность $250 \times 250 \times 108 \times 108$. Здесь первые два измерения разбивают квадрат $500 \text{ м} \times 500 \text{ м}$ на 62500 квадратов площадью 4 м^2 , последние два воспроизводят квадратное поле зрения черенковского телескопа размером $27^\circ \times 27^\circ$, разделённое на квадратные ячейки размером $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Малый угловой размер ячейки был выбран с тем расчётом, чтобы позже можно было выбрать оптимальный её размер путем объединения нескольких соседних ячеек в одну.

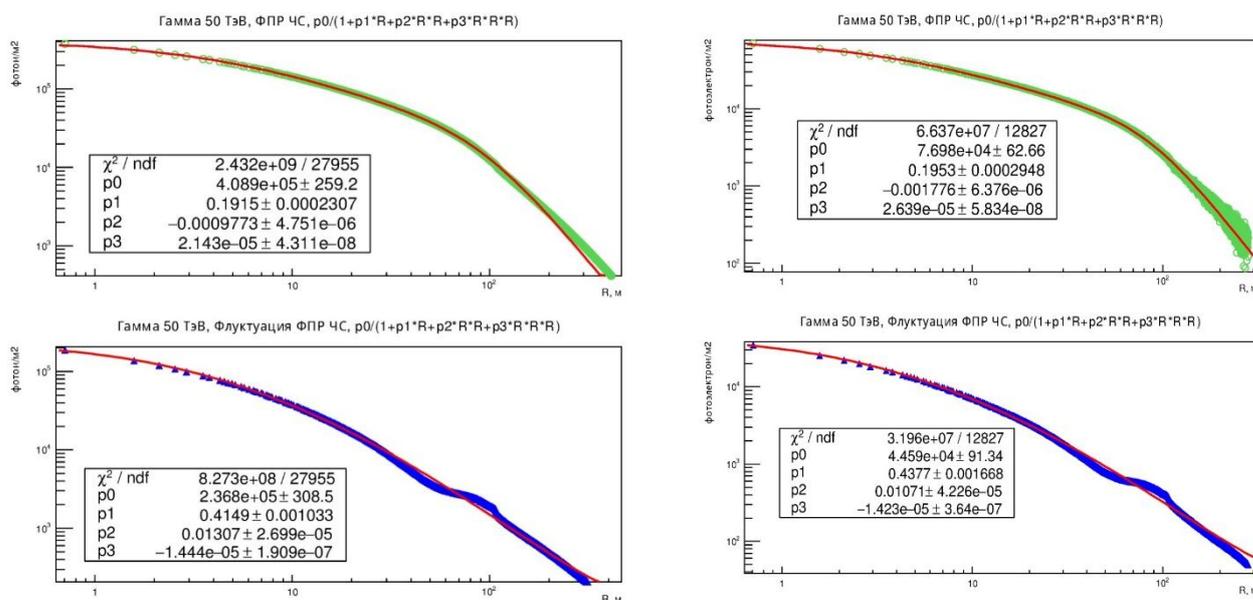
Для обработки пространственно-временных данных по ЧС и частицам были выбраны следующие модели поперечного распределения (ПР) и временного фронта (ВФ) и их флуктуаций.

$$F_{LD}(R) = \frac{a_0}{1+a_1R+a_2R^2+a_3R^3} \quad (1)$$

и для ВФ (индивидуального, среднего и флуктуаций):

$$F_{TF}(R) = R(b_0 + b_1 R + b_2 R^2), \quad (2)$$

где R – расстояние от оси до детектора.



а)

б)

Рисунок 2. - Аппроксимация средней ФПР ЧС и аппроксимация флуктуации ФПР ЧС для γ -квантов 50 ТэВ: а) для фотонов; б) после учета фона ночного неба и преобразования фотонов в фотоэлектроны

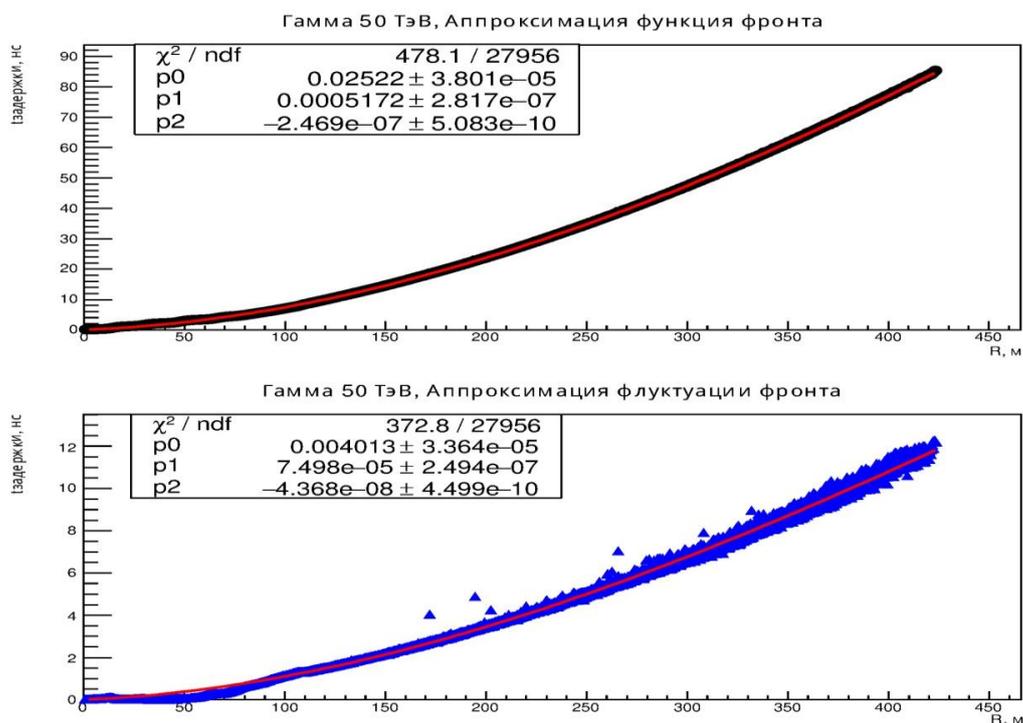


Рисунок 3. - Аппроксимация средней функции фронта и аппроксимация флуктуации фронта для γ -квантов 50 ТэВ

Модели полностью оправдали себя при обработке ЧС во всём рассмотренном диапазоне первичных энергий (Рисунки 2 и 3).

Неопределённости оценки координат и направления оси сетью быстрых оптических детекторов вычислялись как путём обработки «сырого» ПВР ЧС в фотонах, так и после добавления к нему фона ночного неба ($10^8 \text{ см}^{-2}\text{ср}^{-1}\text{с}^{-1}$) и преобразования суммы в фотоэлектроны. В последнем случае предполагалось, что фон флуктуирует по Пуассону, как и число выбиваемых фотоэлектронов. Неопределённости координат и направлений оси удовлетворяют заданным требованиям ($\sim 1 \text{ м}$ и $< 0.1^\circ$) (Рисунок 4).

Для диапазона энергий 30-100 ТэВ влияние фона заметно, но неопределённости всё-таки лежат в заданных пределах, что позволяет надеется на регистрацию γ -квантов в этом диапазоне (Таблица 1).

Первичная энергия E_0 оценивается по интегралу CL300 от ПР ЧС в круге радиуса 300 м с центром на оси. Параметры ПР получаются в результате одновременного приближения моделями ПР ЧС и ВФ ЧС данных по пространственно-временному распределению ЧС в каждом ливне. При оценке энергии, когда фоновые и черенковские фотоны сложатся вместе, и их сумма преобразуется в фотоэлектроны, неопределенность увеличивается. Введение нижнего порога (например, 200 фотоэлектронов) по суммарному сигналу для каждого быстрого детектора несколько уменьшает неопределённости (Таблица 2 и Рисунок 5).

Таблица 1. - Неопределённости положения оси, м, и направления первичной частицы, градусы

Событие/сигнал	полож.оси, среднее	полож.оси, ср.кв.откл	перв.напр., среднее	перв.напр., ср.кв.откл.
60 ТэВ р, Чс, фотоны	1.6	0.93	0.044	0.033
60 ТэВ р, ЧС+ФНН	2.6	1.9	0.076	0.064
60 ТэВ р, ЧС+ФНН>200, фэл	2.4	1.67	0.072	0.062
30 ТэВ γ , Чс, фотоны	1.0	0.59	0.030	0.020
30 ТэВ γ , ЧС+ФНН	1.8	1.3	0.058	0.052
30 ТэВ γ , ЧС+ФНН>200, фэл	1.6	1.04	0.054	0.043

Надо отметить, что при рассмотрении ШАЛ от γ -квантов и протонов попадают ливни, максимумы каскадных кривых которых находятся близко к уровню наблюдения, и полное число черенковских фотонов в них на уровне наблюдения заметно меньше, чем в остальных. Это мешает правильной оценке энергии первичных частиц и их идентификации. Из рисунка 6 видно, что энергия проскочивших ливней оценивается как примерно в 2 раза меньшая. Нам удалось найти способ исключить проскочившие ливни из рассмотрения. Для этого мы используем крутизну функции поперечного распределения ЧС, т.е. отношение значения функции на разных расстояниях от оси ливня. Наиболее оптимальным вариантом оказалось отношение значений функции на расстояниях 5 м и 100 м (Рисунок 7). Другие варианты идентифицируют больше стандартных ливней как проскочившие, в тоже время большая часть проскочивших определяются как обычные ливни.

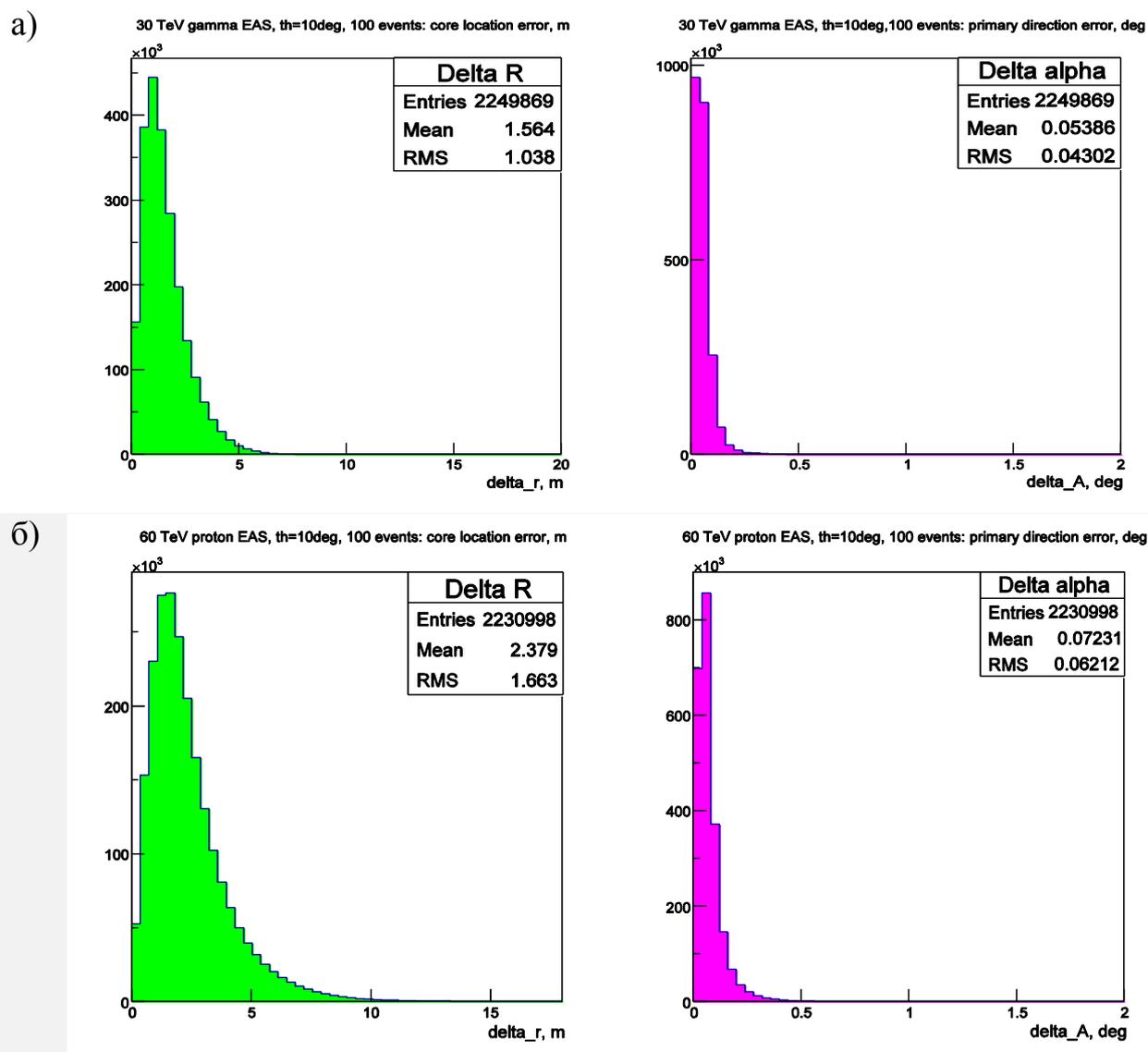


Рисунок 4. - Неопределенности оценки координат и направления оси ливня для а) γ -квантов 30 ТэВ и б) протонов 60 ТэВ с учетом фона ночного неба при пороге в 200 фотоэлектронов

Таблица 2. - Относительные флуктуации CL300 для $E_0= 30-100$ ТэВ, %

	ЧС, фотоны	ЧС+ФНН, фэл	ЧС+ФНН>200, фэл
60 ТэВ p	18	20	18
100 ТэВ p	13	20	18
30 ТэВ γ	5	10	6
50 ТэВ γ	2	9	7

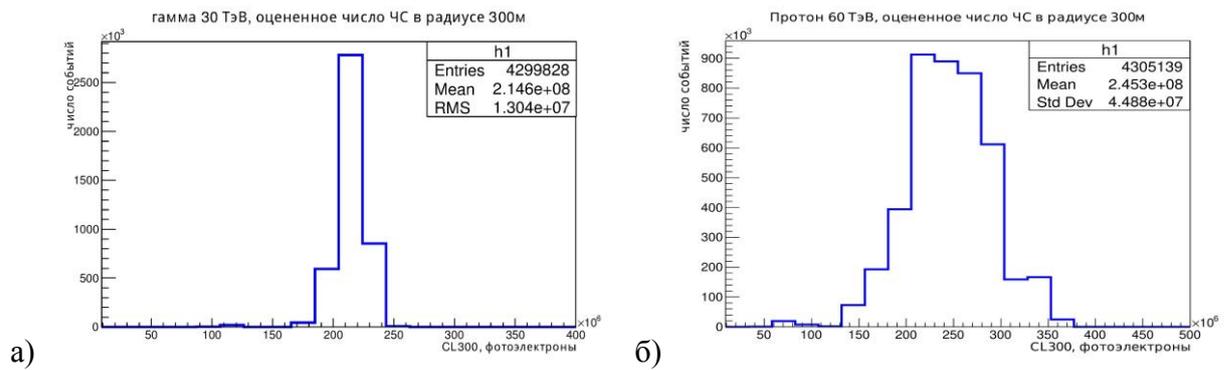


Рисунок 5. - Полное число фотоэлектронов в круге радиуса 300 м а) для γ -квантов 30 ТэВ и б) для протонов 60 ТэВ с учетом фона ночного неба при пороге в 200 фотоэлектронов

Иногда обычные ливни тоже идентифицируются как проскочившие, количество таких ливней составляет порядка 9%, для чистоты эксперимента допустимо пойти на такие потери событий. Около 40% из этих ливней, являются ливни с большими зенитными углами (около 10°) и их пятно выходит за пределами угла обзора телескопа. Для протонов этот показатель равен 10%.

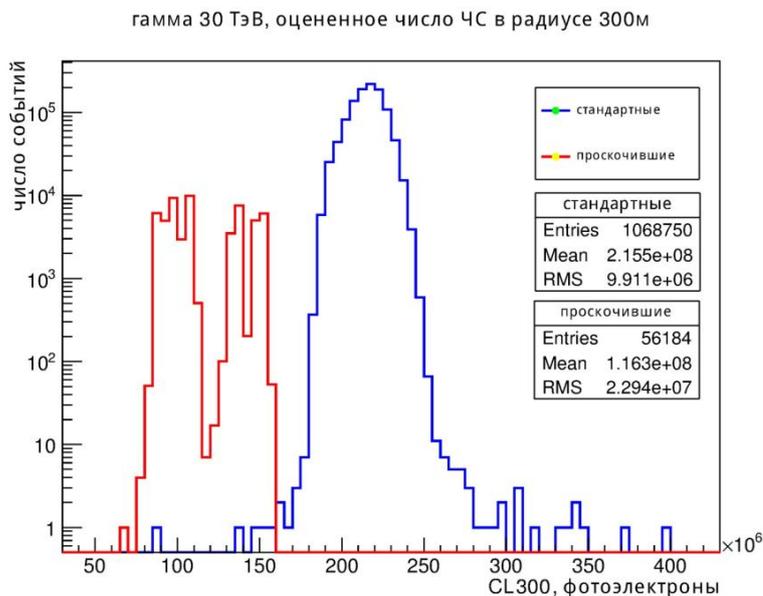


Рисунок 6. - Оценка энергий для стандартных и проскочивших (красный цвет) ливней

Разделение событий ШАЛ от гамма-квантов и протонов является одной из важнейших задач наблюдательной гамма-астрономии сверхвысоких энергий, совершенствование критериев отбора гамма-ливней напрямую связано с чувствительностью экспериментальных установок, что позволяет уточнять характеристики известных объектов и находить новые.

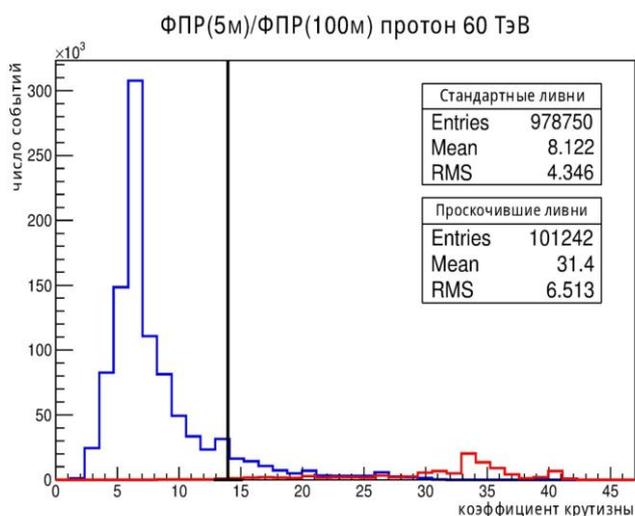


Рисунок 7. - Распределение коэффициентов крутизны ФПР обычных (синим цветом) и проскочивших (красным цветом) ливней для протонов. Черная линия показывает границу между ними

Выделение гамма-квантов на фоне адронных ливней является важной задачей гамма-астрономии. Для этого используют различия между структурой ШАЛ от адронов и ливень от гамма-квантов. Впервые Хиллас предложил схему параметризации изображения ливня, на основе которых можно было выделить ливни от гамма-квантов. Он предложил подогнать эллипс к изображению после вычитания фона ночного неба (Рисунок 8 б). Оказывается, две главные оси эллипса, смещение эллипса, концентрация света, расстояние от центра эллипса до источника и др. являются хорошими параметрами для различия гамма-квантов от адронов.

Схема наблюдения ливней атмосферным черенковским телескопом (АЧТ) в стереорежиме и способы их обработки параметрами Хилласа приведена на рисунке 8 на примере эксперимента MAGIC.

АЧТ в основном нацелены на изучения гамма-квантов до 10–30 ТэВ и они должны работать в стереоскопическом режиме, но из-за уменьшения потока гамма-квантов более высоких энергий небольшие площади этих установок не позволяют набирать большую статистику. Для достижения хорошей чувствительности при более высоких энергиях необходимо увеличить площадь установок, увеличивая количество АЧТ, например эксперимент СТА, но это приводит к большим ресурсным затратам. Начиная с энергией 20–30 ТэВ уже могут эффективно работать временные (NON-IMAGING) телескопы.

Пространственно-угловое распределение (ПУР) ЧС ШАЛ - одна из самых информативных характеристик атмосферного ливня - весьма чувствительно к различиям каскадов, обусловленных типом первичной частицы. Одним из общеизвестных подтверждений этого тезиса может служить замечательный успех черенковской гамма-астрономии: поток гамма-квантов высокой энергии от точечного источника выделяется на фоне потока ядер космических лучей, превосходящем сигнал на 3-4 порядка. Ранее делались попытки перенести методику черенковской гамма-астрономии на задачу изучения массового состава ПКЛ в диапазоне первичных энергий 1 ТэВ - 1 ПэВ. Позднее появились работы [20, 21] в которых на основании детального моделирование рассматривались критерии разделения событий на основе как традиционных, так и вновь определенных параметров угловых образов. Также были исследованы чувствительность этих критериев к массе первичного ядра А.

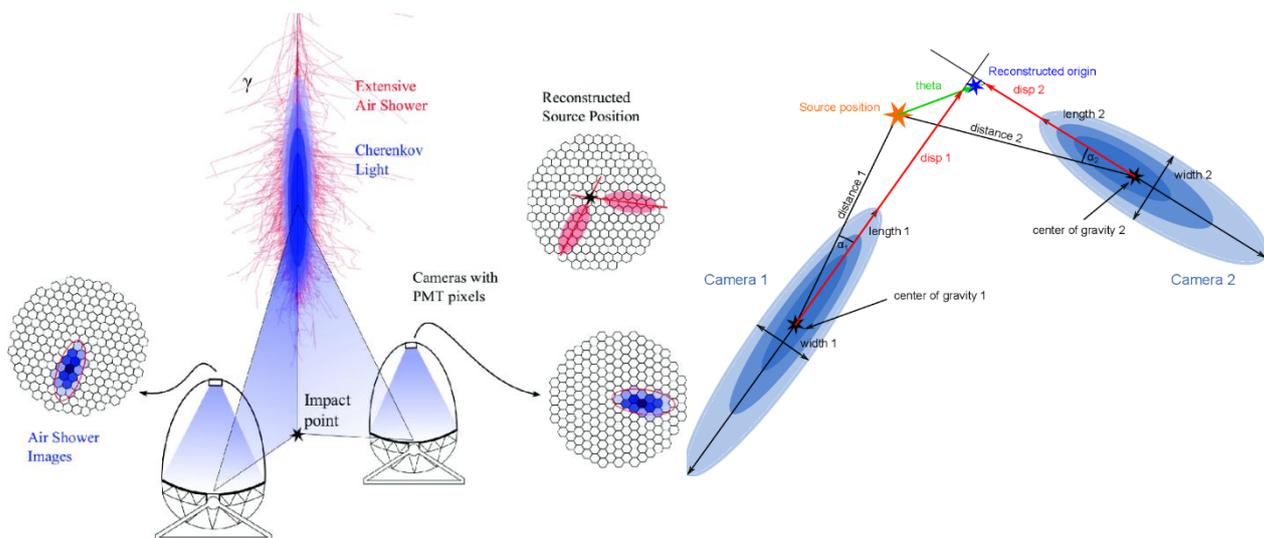


Рисунок 8. - а) Иллюстрация способа наблюдения АЧТ в стереорежиме. Телескопы находятся внутри черенковского конуса. Свет, собираемый зеркалами отображаются на быстрых и чувствительных камерах с фотоумножителями в пикселях. б) Схема стереопараметризации, используемая в анализе данных MAGIC

На уровне Памира размеры углового распределения ЧС гамма-ливней с энергией 30 ТэВ и выше могут быть несколько градусов в длину, что позволяет исследовать форму пятна более детально, чем это делают параметры Хилласа, поэтому было решено использовать интегральные характеристики пятна. В нашем случае в качестве критериев, характеризующих события, используются отношения интегралов по прямоугольным областям, расположенным вдоль длинной оси пятна. Интегралы по прямоугольникам, перпендикулярным длинной оси, представляют продольный профиль черенковского образа, отражающий продольное развитие широкого атмосферного ливня (ШАЛ). В качестве критериев берутся отношения $t_{ij} = S_i/S_j$ интегралов ЧС по долям S_i , $i=1, \dots, 4$. Ширины прямоугольников варьируются до достижения максимального разделения типов частиц. На Рисунке 9 показана геометрия обработки изображения.

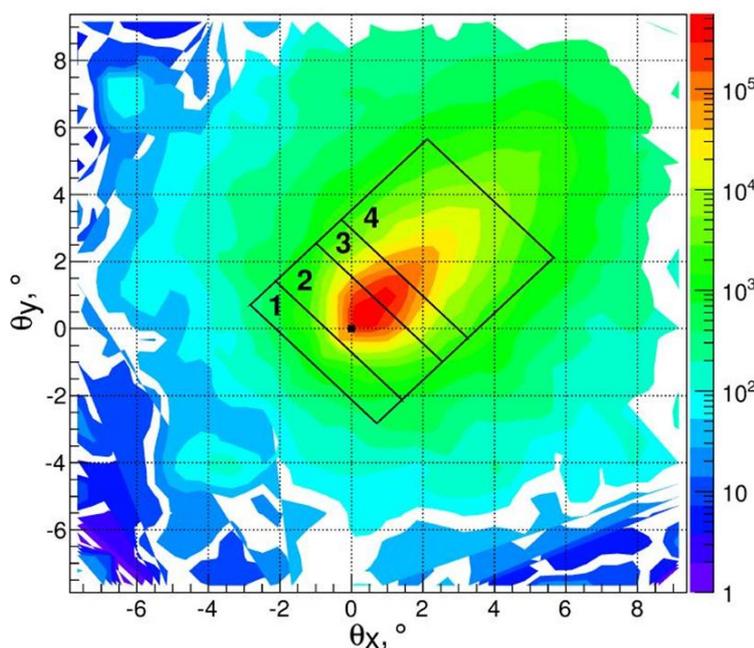


Рисунок 9. - Изображение ливня и прямоугольные области интегрирования, перпендикулярные длинной оси пятна. Черный квадрат в центре поле зрения указывает на направление прихода ливня. Пятно от ЧС разделено на прямоугольники 1,2,3,4. Ширина большого прямоугольника составляет 5°. Внешняя сторона прямоугольника 1 отстоит на -1,5° от направления прихода вдоль длинной оси пятна

Оптимальные критерии выделения γ -событий на фоне протонных были найдены для пар 30 ТэВ γ / 60 ТэВ p и 50 ТэВ γ / 100 ТэВ p и для двух расстояний R=50м, 100м. Оптимальное значение r_{ij} зависит от пары и R. Эти критерии r_{ij} были преобразованы в cri_{ij} с помощью следующей формулы:

$$cri_{ij} = \frac{(r_{ij} - \overline{r_{ijp}})^2}{\sigma_{ijp}^2} - \frac{(r_{ij} - \overline{r_{ij\gamma}})^2}{\sigma_{ij\gamma}^2} + 2 \ln \frac{\sigma_{ijp}}{\sigma_{ij\gamma}}, \quad (3)$$

где, $\overline{r_{ijp}}, \sigma_{ijp}$ и $\overline{r_{ij\gamma}}, \sigma_{ij\gamma}$ среднее значение выборки и стандартное отклонение для протонов и гамма-квантов соответственно. Такое преобразование не влияет на разделение p- γ , оно используется только для стандартизации внешнего вида графика. Значение критерия отрегулировано таким образом, чтобы оставить только один протон в области гамма. Такой подход к обработке изображений ЧС способен подавлять по меньшей мере 99% ядерного фона при регистрации гамма-лучей 30-100 ТэВ. Наилучшие результаты показаны в таблицах 3 и 4. На рисунке 10 а,б,в,г представлены распределения оптимальных критериев для пар γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ и γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ на расстояниях 50 и 100 м от оси ливня.

Таблица 3. - Вероятности ошибки классификации для пары γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ (2400 событий)

Расстояние от оси ливня	$P\{p \rightarrow \gamma\}/P\{\gamma \rightarrow p\}$	Ширины прямоугольников 1-4, градусы
50 м	0.0004355/0.4052	<u>0.62</u> 0.33 0.51 0.55
100 м	0.0004441/0.6488	0.40 <u>0.35</u> 0.36 0.51

Таблица 4. - Вероятности ошибки классификации для пары γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ (2400 событий)

Расстояние от оси ливня	$P\{p \rightarrow \gamma\}/P\{\gamma \rightarrow p\}$	Ширины прямоугольников 1-4, градусы
50 м	0.0004325/0.3564	<u>0.62</u> 0.33 0.51 0.55
100 м	0.0004378/0.5751	0.40 <u>0.35</u> 0.36 0.51

Третья графа в таблице показывает оптимальные ширины маленьких прямоугольников. Подчеркнутые цифры показывают ширину прямоугольника, интеграл по которому стоит в числителе критерия, жирные цифры – ширину прямоугольника-области интегрирования знаменателя. Из таблицы можно увидеть, что на расстоянии 50 м критерии совпадают.

Для того, чтобы показать преимущества предлагаемого метода были анализированы образы искусственных событий с помощью традиционной методики, основанной на параметрах Хилласа. Анализ показал, что разделение не получится. Далее на основе этих параметров было построено 4-хмерный нормальный Байесов критерий. После этого результаты разделение стали лучше.

Если границу между классами поставить так же, как делается в настоящей работе (граница на самом правом протонном событии), то получается:

вероятность принять протон за гамма = $1/788 = 0.00127$,

вероятность принять гамма за протон = 0.96.

То есть, при режекции протонного фона почти на три порядка от гамма-сигнала почти ничего не остается. При предлагаемом в диссертации методе обработки ситуация радикально лучше: 0.00044 и 0.41.

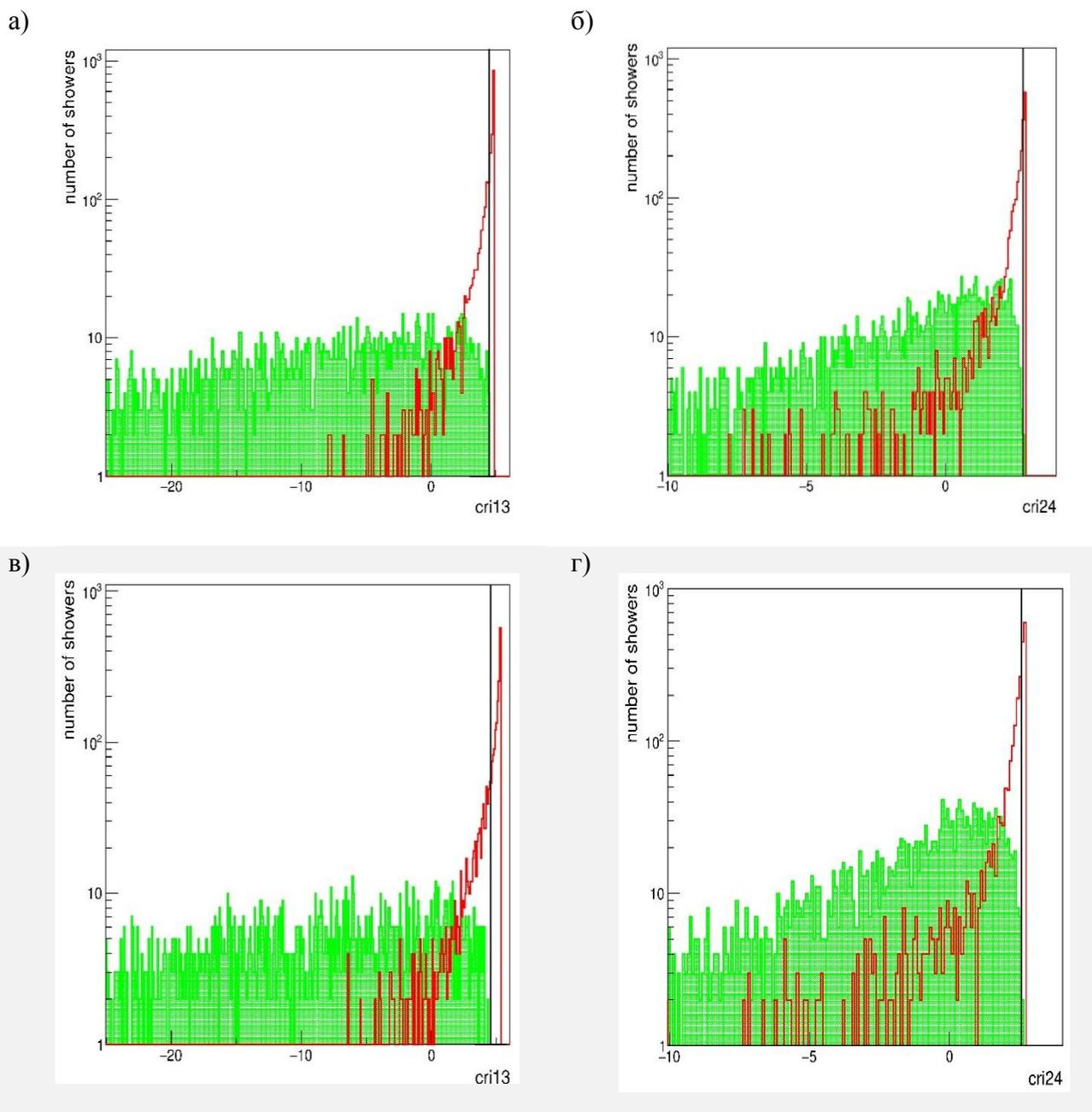


Рисунок 10. - Распределения оптимальных критериев для пар γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ и γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ на расстояниях 50 и 100 м от оси ливня. Вертикальная черная линия указывает на границу между гамма-квантами и протонами, и проведена таким образом, чтобы в области гамма-квантов оставался только один протон. Зелёное распределение – протоны, красное – гамма-кванты

Чтобы выяснить механизм действия критериев, было принято решение исследовать связи используемых в критериях характеристик пятна ЧС с характеристиками продольного

развития ШАЛ. Были проанализированы высоты излучения черенковских фотонов, которые приходят в описанные выше области интегрирования.

Было смоделировано по 60 искусственных вертикальных событий ШАЛ от гамма-квантов и протонов с энергиями 30 и 60 ТэВ, соответственно, для уровня наблюдения 4250 м над уровнем моря с помощью кода CORSIKA6.990/QGSJET01. Результатами расчёта стали пятна ЧС – оптические образы ШАЛ в поле зрения черенковского телескопа с размерами пикселя $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ – и карты высот излучения света с усреднением по тем же пикселям для каждого из разыгранных событий (Рисунки 11 и 12).

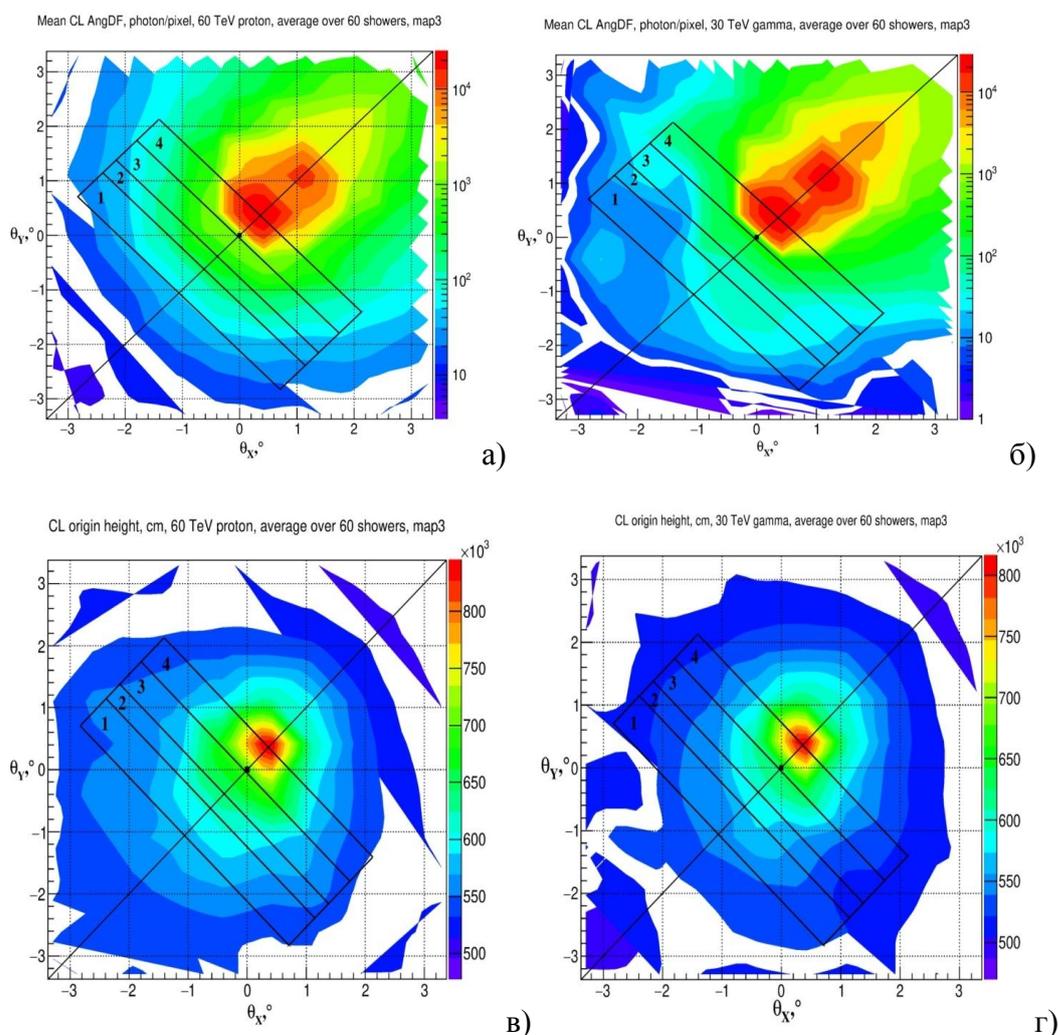


Рисунок 11. - а) усредненный образ ЧС от протонов 60 ТэВ; б) усредненный образ от гамма-квантов 30 ТэВ. в) усредненная высота излучения ЧС от протонов 60 ТэВ; г) усредненная высота излучения ЧС от гамма-квантов 30 ТэВ. Для всех случаев расстояние от оси ливня до телескопа 50 м. Прямоугольники показывают область интегрирования. В данном случае, отношение интеграла по прямоугольнику 1 к интегралу по прямоугольнику 3 является критерием, дающим максимальное разделение

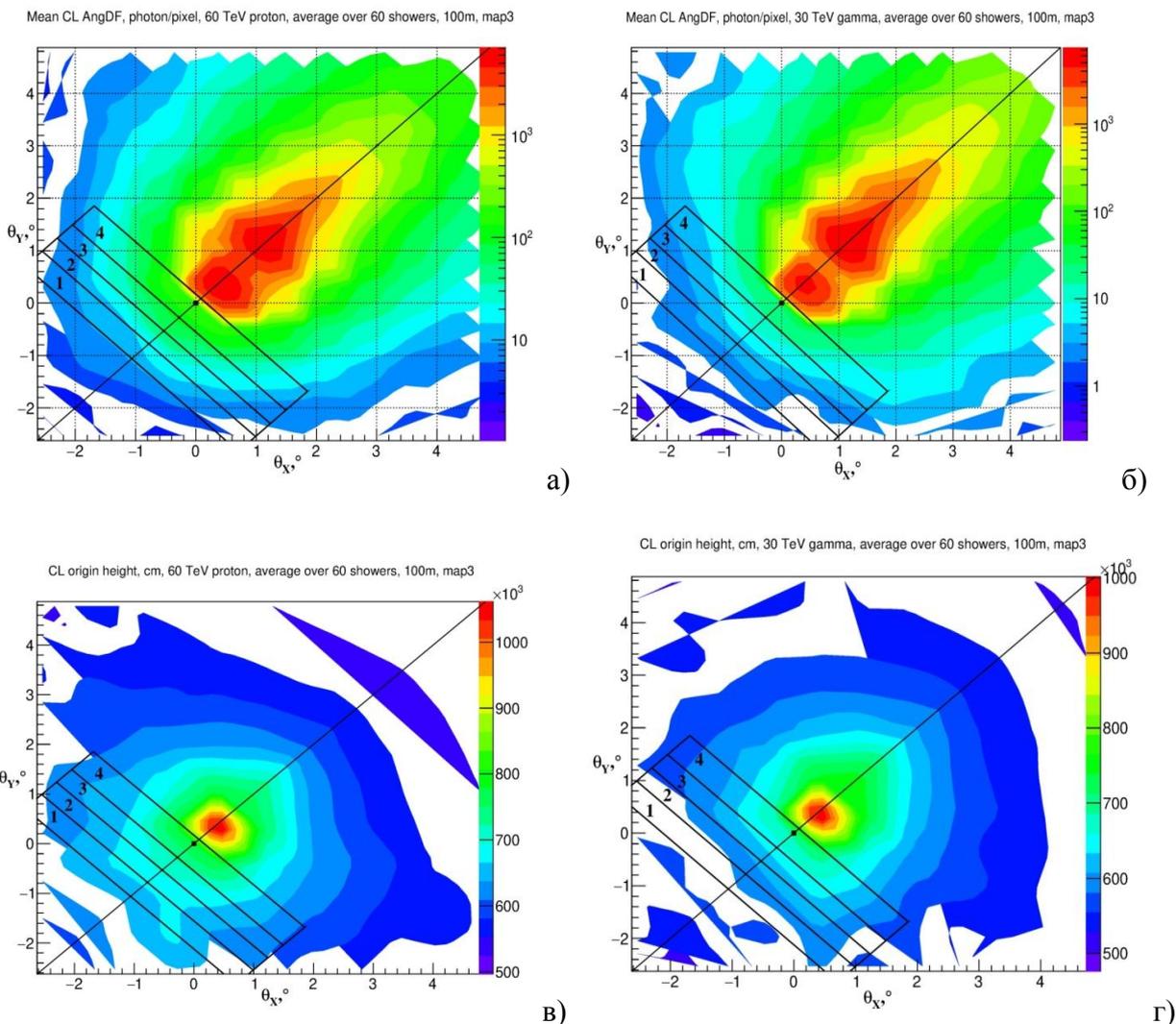


Рисунок 12. - а) усредненный образ ЧС от протонов 60 ТэВ; б) усредненный образ от гамма-квантов 30 ТэВ. в) усредненная высота излучения ЧС от протонов 60 ТэВ; г) усредненная высота излучения ЧС от гамма-квантов 30 ТэВ. Для всех случаев расстояние от оси ливня до телескопа 100 м. Прямоугольники показывают область интегрирования. В данном случае, отношение интеграла по прямоугольнику 2 к интегралу по прямоугольнику 4 является критерием, дающим максимальное разделение

Наша интерпретация причин эффективности оптимального критерия такова: области интегрирования черенковского пятна в результате автоматического поиска были выбраны таким образом, что числитель и знаменатель критерия получают свет от существенно разных стадий развития ливня, поэтому различия каскадных кривых ливней разной природы в среднем приводят к разным значениям критерия. Поскольку каскадные флуктуации велики, велики и флуктуации образов, и даже оптимизированные критерии не могут полностью разделить классы событий.

В конце третьей главы приведены оценки времени наблюдения некоторых γ -источников оптической частью «Памир-XXI» в случае использования предлагаемого метода обработки экспериментальных данных.

На **параграфе 3.4** устройство оптической части «Памир-XXI» и возможности предлагаемой методики обработки ее данных сравнивается с опубликованными данными по проекту «ТАЙГА». Приведены основные отличия между детекторами установок и их расположением. Сравнение факторов Q режекции адронного фона и углового разрешения $\delta\theta$ свидетельствует в пользу «Памир-XXI»: $Q=200-500$ и $\delta\theta < 0.1^\circ$ против $Q=2-100$ и $\delta\theta > 0.1^\circ$ у оптической части «ТАЙГА». В этой главе также приведена таблица с сравнительными данными разных гамма-астрономических установок.

В **заклучении** диссертации изложены основные результаты и выводы проделанной работы:

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Предложенный вариант оптической части «Памир-XXI» при использовании разработанного нами метода обработки данных имеет: точность определения положения оси составляет 1-2 метра при энергиях 30 ТэВ и более; точность определения направления прихода лучше 0,1 градуса для всех типов частиц и энергий 30 ТэВ и более; точность оценки энергии для γ -квантов составляет порядка 10%, для протонов – 20% [1-А, 2-А, 3-А, 8-А, 9-А].
2. Добавление фона звездного неба и переход к фотоэлектронам не ухудшают оценок первичных параметров [2-А, 3-А, 4-А, 9-А].
3. Подавление протонного фона по результатам анализа углового распределения черенковского света составляет более 99%, при этом сохраняются: для пары γ 30 ТэВ — протон 60 ТэВ 60% γ на расстоянии 50м, 35% γ на расстоянии 100м; для пары γ 50 ТэВ — протон 100 ТэВ 65% γ на расстоянии 50м, 42% γ на расстоянии 100м от оси ливня; дополнительное подавление фона адронных ливней для точечных источников можно получить за счет высокого углового разрешения, обеспеченного сетью быстрых детекторов. Возможно построить критерии для разных энергий, которые зависят только от расстояний [1-А, 2-А, 4-А, 7-А, 8-А, 10-А].
4. Анализ высот излучения черенковских квантов позволяет объяснить механизм работы найденного нами ранее критерия отбора γ -ливней на фоне протонных событий: критерий сравнивает интенсивности черенковского излучения, приходящего с разных высот [2-А, 4-А].
5. Для проскочивших ливней первое взаимодействие первичной частицы с атомами атмосферы обычно происходят на высотах от 9 до 17 км н. у. м. Высота первого взаимодействия для стандартных ливней от γ -квантов в среднем составляет 25-26 км, для протонных ливней 22-23 км [5-А].
6. Предлагаемый способ анализа черенковского света ШАЛ может быть использован как для совершенствования критерия отбора γ -ливней в черенковской γ -астрономии, так и для улучшения разделения ШАЛ по массам первичных ядер при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий [2-А, 7-А, 10-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов:

Результаты данного исследования могут быть полезны при планировании, проектированию и создании высокогорных установок по изучению космических лучей высоких и сверхвысоких энергий. Методика выделения γ -квантов высоких энергий будет полезна для решения γ -астрономических задач в современных экспериментальных установках.

Созданный банк искусственных событий можно использовать в процессе учебы и проведения НИР среди студентов и аспирантов высших учебных заведений.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю профессору В. И. Галкину за постановку столь актуальной темы, за постоянное внимание, советы и наставления настоящей работы; Президенту НАН Таджикистана Ф. Рахими за всестороннюю поддержку во время учебы в аспирантуре и проведение исследования, ныне покойному академику Х. Х. Муминову, профессорам Д. К. Солихову и Б. И. Махсудову за поддержку и внимания к настоящей работе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

[1-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. – 2017. – Vol. 145. – P. 15004. DOI: [10.1051/epjconf/201614515004](https://doi.org/10.1051/epjconf/201614515004) – Impact factor: 0.347 (2018);

[https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85021894200&origin=inward&txGid=eb559fbc82e55138e54d1653b6827e1a)

[85021894200&origin=inward&txGid=eb559fbc82e55138e54d1653b6827e1a](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85021894200&origin=inward&txGid=eb559fbc82e55138e54d1653b6827e1a)

[2-A] **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. – Vol. 1018. – P. 165842. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165842](https://doi.org/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-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048585998&origin=inward&txGid=59ac8beccf1a2b12b10487fcbfc5a363)

[85048585998&origin=inward&txGid=59ac8beccf1a2b12b10487fcbfc5a363](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048585998&origin=inward&txGid=59ac8beccf1a2b12b10487fcbfc5a363)

[3-A] **Бахромзод, Р.** Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от γ -квантов / Р. Бахромзод, В.И. Галкин // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2018. – № 3. – 1830203.

[4-A] **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.

[5-A] **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.

[6-A] Галкин, В.И. Анализ возможностей выделения событий от первичных гамма-квантов сверхвысокой энергии по показаниям оптических детекторов и угловых черенковских телескопов установки Памир-XXI / В.И. Галкин, **Р. Бахромзод** // Материалы республиканской конференции по ядерно-физическим методам анализа состава биологических, геологических,

химических и медицинских объектов, Душанбе: издательство Таджикский национальный университет. – с. 157-167. 2014. – 271 с.

[7-А] Галкин, В.И. Оценка параметров первичной частицы шал комплексной установкой Памир-XXI / В.И. Галкин, А.С. Борисов, **Р. Бахромзод**, В.В. Батраев, С.З. Латипова, А.Р. Мукумов // Материалы V Международной конференции «Современные проблемы физики», посвящённой 25-летию государственной независимости Республики Таджикистан. Душанбе: Дониш, с. 69-74. 2016.

[8-А] **Бахромзод, Р.** Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от γ -квантов / Р. Бахромзод, В.И. Галкин // Материалы VI Международной конференции «Современные проблемы физики», посвящённой 110-летию академика Академии наук Республики Таджикистан С.У. Умарова и 90-летию академика Академии наук Республики Таджикистан А.А. Адхамова. Душанбе, «Эр-граф», с. 36-38, 2018. – 320 стр.

[9-А] **Бахромзод Р.** Поиск оптимальных критериев для выделения событий от гамма-квантов на фоне протонных ливней // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2018. ISBN 978-5-317-05800-5

[10-А] **Бахромзод Р.** Метод изучения космических лучей очень высокой энергии // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2017. ISBN 978-5-317-05504-2

[11-А] Бобочонов, И. Эксперименти Помир: таърихи 50 сола ва дурнамои он / И.Бобочонов, **Р. Бахромзод**, А. Мукумов, Қ. // Маводҳои Симпозиуми физикони тоҷикистон бахшида ба 85-солагии академик Р. Марупов. Душанбе: нашриёти «Дониш». 2022. – 201 с.

Список использованных источников

- [1] Rieger, Frank M. TeV astronomy / Frank M. Rieger, Emma de ONa-Wilhelmi, Felix A. Aharonian // Frontiers of Physics, – 2013. – V. 8. № 6, – P. 714-747.
- [2] Chadwick, P.M. TeV gamma-ray astronomy / P.M. Chadwick, I.J. Latham and S.J. Nolan // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, т. 35, № 3, 2008.
- [3] Sinitsyna, V.G. Very High Energy Astrophysics with the SHALON Cherenkov Telescopes / V.G. Sinitsyna, V.Y. Sinitsyna, S.S. Borisov, A.I. Klimov, R.M. Mirzafatikhov, N.I. Moseiko // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, –2020. –V. 952 – 161775.
- [4] Weekes, T.C. Observation of TeV gamma rays from the Crab nebula using the atmospheric Cerenkov imaging technique / T.C. Weekes at all. // The Astrophysical Journal. – 1989. – V. 342, – № 1, – P. 379-395.
- [5] Bartoli, B. Observation of TeV gamma rays from the Cygnus region with the ARGO-YBJ experiment / B. Bartoli at all. // The Astrophysical Journal, –2012. – V. 745, – № 2, – P. L22.
- [6] Konopelko, A. The TeV energy spectrum of Markarian 421 measured in a high flaring state / A. Konopelko et all. // The Astrophysical Journal. – 2008. –V. 679. – № 1, – P. L13-L15.
- [7] Dzhappuev, D.D. Search for astrophysical PeV gamma rays from point sources with Carpet-2 / D.D. Dzhappuev, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, I.S. Karpikov at al // EPJ Web of Conf. – 2019. – V. 207. – 03004.

- [8] Falcone, A. D. A search for tev gamma-ray emission from high-peaked flat-spectrum radio quasars using the Whipple Air Cerenkov Telescope / A. D. Falcone et al. // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – V. 613. – № 2. – P. 710-715.
- [9] Aharonian, F.A. A new population of very high energy gamma-ray sources in the Milky Way / F.A. Aharonian (for the H.E.S.S. Collaboration) // *Science*. – 2005. — V. 307. – P. 1938-1942.
- [10] Aharonian, F. Discovery of very-high-energy γ -ray emission from the vicinity of PSR J1913+1011 with HESS / F. Aharonian, et al. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2008. – V. 484. – № 2, – P. 435-440.
- [11] Гинзбург, В. Л. Гамма-астрономия и космические лучи / В. Л. Гинзбург // *УФН*. – 1972. – Т. 108. – № 2.
- [12] Atwood, W. B. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission / W. B. Atwood et al. // *The Astrophysical Journal*. – 2009. – V. 697. – № 2. – P. 1071-1102.
- [13] Di Mauro, M., Deriving the Contribution of Blazars to the Fermi-LAT Extragalactic γ -ray Background at $E > 10$ GeV with Efficiency Corrections and Photon Statistics / Di Mauro, M., Manconi, S., Zechlin, H.-S., Ajello, M., Charles, E., Donato, F. // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – V. 856. – № 2. – P. 106-118.
- [14] Tanada, K. The origins of the gamma-ray flux variations of NGC 1275 based on 8 years of Fermi-LAT observations / K. Tanada, J. Kataoka, M. Arimoto, M. Akita, C. C. Cheung, S. W. Digel, Y. Fukazawa // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – V. 860. – № 1. – P. 74-84.
- [15] Мурзин, В.С. Астрофизика космических лучей / В.С. Мурзин. – М.: Логос, 2007. – 488 с.
- [16] Auger, P. Extensive Cosmic-Ray Showers / P. Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, Robley A. Fréon // *Reviews of Modern Physics*. – 1939. – No. 11. – Pp. 288-291.
- [17] Добротин, Н.А. Широкие атмосферные ливни космических лучей / Н.А. Добротин, Г.Т. Зацепин, И.Л. Розенталь, Л.И. Сарычева, Г.Б. Христиансен, Л.Х. Эйдус // *УФН*. – 1953. – Т. 49. – № 2. – С. 185-242.
- [18] Borisov, A.S. Modern status of the PAMIR-XXI Project / A.S. Borisov, V.I. Galkin, M.I. Polov, R.A. Mukhamedshin, H.H. Muminov, V.S. Puchkov, O. Saavedra // *33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2013*. – Pp. 0953.
- [19] 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.

ДОНИШГОҶИ ДАВЛАТИИ МАСКАВ ба номи М. В. ЛОМОНОСОВ

ИНСТИТУТИ ФИЗИКАЮ ТЕХНИКАИ ба номи С. У. УМАРОВ

Бо ҳуқуқи дастнавис

ВБД (УДК): 524.1(575.3)



Ризои Баҳромзод

**Рушди усулҳои чудосозии селҳо аз γ -квантҳои энергияшон беҳад баланд аз
рӯи маълумоти детекторҳои черенковии таҷҳизоти баландкӯҳӣ**

01.04.01 – «Асбобҳо ва методҳои физикаи таҷрибавӣ»

АВТОРЕФЕРАТИ

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои
физикаю математика

Душанбе – 2023

Диссертатсия дар кафедраи физикаи кайҳони факултети физикаи Донишгоҳи давлатии Маскав ба номи М. В. Ломоносов ва Маркази байналмиллалӣ таҳқиқоти физикию ҳастаии Институти физикаю техникаи ба номи С. У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон омода гардидааст.

Роҳбари илмӣ:

- **Галкин Владимир Игоревич,**
Доктори илмҳои физикаю математика, дотсент,
профессори кафедраи физикаи кайҳони факултети
физикаи ДДМ ба номи М. В. Ломоносов

Муқарризони расмӣ:

- **Махсудов Барот Исломович,**
Доктори илмҳои физикаю математика, профессори
кафедраи физикаи ҳастаи факултети физикаи
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Синицина Вера Георгиевна,
Номзади илмҳои физикаю математика,
Институти физикаи ба номи П. Н. Лебедев,
Шӯъбаи физикаи ҳаста ва астрономия, мудири
лаборатория, ходими пешбари илмӣ.

Муассисаи пешбар:

- Институти таҳқиқоти ҳастаии Академияи илмҳои
Русия

Ҳимояи диссертатсия санаи «б» июли соли 2023 соати 15⁰⁰ дар чаласаи Шӯрои муштараки диссертатсионии 6D.KOA-055 назди Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон баргузор мегардад. Суроға: 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёбони Айнӣ, 299/1, факс (+992-372) 25-79-14. Толори Шӯрои олимони ИФТ ба номи С.У.Умарови АМИТ. E-mail: shuro.ift@gmail.com.

Бо матни пурраи рисола дар китобхонаи Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон ва дар сомонаи www.phiti.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферат санаи «__» _____ соли 2023 ирсол гардидааст.

Котиби илмӣ

шӯрои диссертатсионӣ,

номзади илмҳои физикаю математика, дотсент

Низомов З

САРСУХАН

Муҳимияти мавзӯ. Ба қайд гирифтани гамма-афканишоти баландэнергия (зиёда аз 1 ТэВ) яке аз дастовардҳои муҳими солҳои охир дар астрофизика буда, назди олимони саволҳои наво дар бораи механизми тавлиди ва манбаи ин нурҳо, дар бораи паҳншавӣ ва маъсири мутақобилаи гамма-квантҳо бо модда ва майдонҳои байниситораӣ гузоштааст. Омӯзиши гамма-квантҳои баландэнергия ба саволҳои пайдоиш ва шитобгирии нурҳои кайҳонии фавкулбаландэнергия ҷавоб дода, ба манбаи онҳо ва соҳаи шитобгириашон ишора мекунад ва ба проблемаҳои, аз қабилҳои материяи торик, вайроншавии инвариантнокии Лоренс, таҳқиқи оғози Коинот ва ғ. равшанӣ меандозад [1-10].

Гамма-астрономия – қисми муҳими астрофизика ва физикаи зарраҳои бунёди муосир буда, ба омӯзиши гамма-афканишоти кайҳонӣ машғул аст.

Ҷанӯз дар соли 1972 В. Л. Гинзбург навишта буд, ки «гамма-астрономияи навтавлидгашта дар маркази таваҷҷӯҳи олимони қарор гирифта, на танҳо астрономияи рентгениро пурра мекунад, балки имкон медиҳад, ки маълумоти тамоми нав гирифта шавад, ки барои астрофизикаи энергияи баланд (бо шумули астрофизикаи нурҳои кайҳонӣ ва мушкилоти пайдоиши онҳо) арзиши бениҳоят муҳим хоҳад дошт» [11].

Ин интизориҳо амалӣ гардида, гамма-астрономия аз далелҳои парешон, дар қатори қисми оптикӣ, радио ва раентгенӣ ба қисми комилҳуқуқи астрономия мубаддал гаштааст. Гамма-астрономия усулҳои гуногуни астрономияи анъанавиро қабул кардааст, аз ҷумла – таҳлили муқоисавии қитъаҳои гуногуни афканиши электромагнитӣ.

Душвории таҳқиқи гамма квантҳои баландэнергия дар он аст, ки аз сабаби сели кам доштан ва ношаффоф будани атмосфера онҳоро мустақиман мушоҳида карда намешавад. Дар паҳноии энергияи аз 20 МэВ то 300 ГэВ гамма-телескопи кайҳонии Fermi-LAT бомуваффақона кор карда истодааст [12-14]. Вале зарраҳои кайҳонӣ ва гамма квантҳо бо сабаби таъсири мутақобила бо атомҳои атмосфера то замин намеоянд ва мушоҳидаи бевоситаи онҳо ғайриимкон аст. Барои омӯзиши чунин гамма-квантҳо усули селҳои васеи атмосферӣ (СВА) – ба қайд гирифтани каскади зарраҳои, ки аз тарафи онҳо дар атмосфераи Замин ба вучуд меоянд, истифода мешавад. Чунин селҳои атмосферӣ масоҳати то садҳо км квадратиро ишғол мекунанд, ки имкон медиҳад, ки тавассути детекторҳои аз ҳамдигар дар масофаҳои дур дар масоҳати бо андозаи сел муқоисашаванда ҷойгиршуда ба қайд гирифта шаванд [15].

Аз охири солҳои 30-юми асри XX ҳосиятҳои селҳои атмосферӣ аз тарафи олимони ва гурӯҳҳои илмӣ зиёде таҳқиқ шуда истодаанд [16, 17]. Моҳияти ҳодиса дар он аст, ки зарраи ибтидоии баландэнергия бо атомҳои атмосфера таъсири мутақобила карда, каскади ҳастаиву электромагнитӣ тавлиди месозад, ки дар он энергияи ибтидоӣ байни зарраҳои баъдӣ тақсим мешавад. Адади зарраҳои баъдӣ ба мисли сел зиёд шуда, дар сатҳи баҳр миллионҳо ва миллиардҳо ташкил медиҳад. Ин ҳодисаро селҳои васеи атмосферӣ меноманд [15]. СВА аз зарраҳои гуногун таркиб ёфтааст: қисмати электронию фотонӣ, адронӣ, мюонӣ, афканиши Вавилов-Черенков, афканиши ионишӣ ва радиой.

Таркиби гуногуни СВА-ро ба қайд гирифта, мушаххасаҳои ибтидоии зарраеро, ки ин селро ба вучуд овардааст муайян кардан мумкин аст: самти омадани он, энергия ва навъи он (масса). Зарраҳои заряднок аз сабаби майл хӯрдан дар майдони магнитии фазои кайҳонӣ самти аввалаи ҳаракати худро гум мекунанд ва аз рӯи онҳо самти манбаъро муайян кардан ғайриимкон аст. Гамма-квантҳо бошанд дар ин росто бартарият доранд, зеро дар майдонҳои магнитӣ майл намехӯранд ва самти манбаъро нишон медиҳанд. Дар ин доира вазифаи гамма-

астрономия муайян намудани мушаххасаҳои гамма-кванти ибтидоӣ мебошад. Ин имкон медиҳад, ки равандҳои тавлиди гамма-квантҳо ва ҳолати физикии манбаи ин афканишоти баландэнергия омӯхта шаванд. Барои он бояд СВА-ро бо тамоми ҷузъиёташ омӯхта, бо ба қайд гирифтани таркиби гуногун мушаххасаҳои ибтидоиро барқарор кардан лозим аст.

Дарачаи азхуднамоии масъалаи илмӣ ва заминаҳои назариявӣ методологии таҳқиқот. Мушаххасаҳои СВА дар баландии кӯҳ нисбат ба сатҳи баҳр фарқ мекунанд: объекти таҳқиқот ба сатҳи мушоҳида наздиктар буда, андозаҳои кунҷии он зиёд мешаванд, тақсимои нишондиҳандаҳои он дигар мешаванд, ки ҳангоми сохтани усулҳои баҳодиҳии нишондиҳандаҳои зарраи аввала бояд ба назар гирифт. Ин чиз махсусан дар ҳолати беҳтарсозии усулҳои мавҷудаи бақайдгирӣ ва коркарди усулҳои нав, ки дар асосии амсиласозии пурраи рушди СВА ва истифодаи детекторҳои навӣ гуногун бисёр муҳим аст.

Чунин масъала дар доираи лоиҳаи «Помир-XXI» ба миён монда шуд. Дар доираи ин лоиҳа бояд дар кӯҳҳои Помири Шарқӣ дар баландии ~4250 м аз сатҳи баҳр дастгоҳҳои маҷмаавии насли нав сохта шаванд [18, 19]. Имрӯз дурнамои амалишавии ин лоиҳа номуайян аст, вале корҳои ҳисобу китоб ва методологӣ идома доранд. Натиҷаҳои он барои дигар таҷрибаҳои баландкӯҳӣ ва умуман барои усули СВА муҳим ҳастанд.

Дар қори мазкур диққати асосӣ баарои бақайдгирии СВА аз протонҳо ва гамма-квантҳои энергияшон аз 30 ТэВ то 100 ТэВ, усули баҳододи мушаххасаҳои онҳо ва алгоритми ҷудосозии гамма-квантҳо аз байни протонҳо равона карда шудааст.

29 августи соли 2008 байни Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Ҳукумати Федератсияи Руссия дар бораи таъсис ва фаъолияти Маркази байналмиллалии илмию таҳқиқоти “Помир-Чақалтой” Созишнома ба имзо расид. Дар доираи фаъолияти ин марказ сохтани дастгоҳи омехтаи бузурги «Помир-XXI» ба нақша гирифта шуд. Лоиҳаи «Помир-XXI» ҳамчун маркази таҳқиқи маҷмӯии афканиши ибтидоии кайҳонӣ дар паҳноии васеи энергияи 30 ТэВ – 1 ЭэВ ва таҳқиқи мушаххасаҳои таъсири мутақобилаи ҳастай, ки барои омӯзиш дар суръатфизоҳо дастнорасанд пешниҳод шуда буд. Баландии зиёди мушоҳида (4250-4260 м аз сатҳи баҳр) барои ҳалли масъалаҳои астрофизикӣ бартарӣ дорад: омӯзиши тайфи энергетикӣ ва таркиби массавии НКИ ва бақайдгирии γ -квантҳои фавқулбаландэнергия ҳам аз манбаъҳои нуқтавӣ ва ҳам аз диффузӣ. Сабаби асосӣ он аст, ки баландии сатҳи мушоҳида ба максимуми хати қасқади гамма-квантҳои энергияшон аз 100 ТэВ боло наздик аст. Ба статуси номуайяни имрӯзаи «Помир-XXI» нигоҳ накарда, мо усули коркарди сигнал ва муайян намудани мушаххасаҳои ибтидоии зарраҳоро бо нияти эҳёи «Помир-XXI» идома додем. Барои банақшагирӣ, лоиҳакашӣ ва сохтани таҷҳизоти таҷрибавӣ бояд моделсозии дақиқ сурат гирад ва усулҳои коркарди натиҷаҳои таҷрибавӣ таҳия шаванд. Таҳқиқоти мазкур барои ҳалли ин масъалаҳо равонанд.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо), мавзӯҳои илмӣ. Мавзуи таҳқиқоти диссертатсионӣ асосан бо Самтҳои афзалиятноки таҳқиқоти имӣ ва (ё) илмию техникӣ мувофиқ буда, дар доираи лоиҳаи «Помир-XXI» анҷом шудааст. Таҳқиқот барои амалисозии Нақшаи чорабинӣҳо барои солҳои 2020–2025 барои амалисозии эълони гардидани солҳои 2020–2040 «Бистсолаи омӯзиш ва рушди фанҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илму маориф», ки бо Қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон таҳти рақами №427 аз 30 июли 2020 тасдиқ шудааст.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади кори диссертатсионӣ:

- Коркард ва асосноксозии физикии усули нави чудосозии гамма-квантҳо дар фони селҳои протонӣ дар эксперименти ададӣ;
- Дида баромадани варианти аниқи усул барои истифодаи амалӣ дар таҷрибаи «Помир-XXI».

Вазифаҳои таҳқиқот:

- Сохтани бонки ҳодисаҳои сунъӣ барои гамма-квантҳо ва протонҳо барои паҳноии энергияи аз 30 ТэВ то 100 ТэВ;
- Ҷустуҷӯи критерияҳо барои чудосозии селҳои ҷаҳишхӯрда аз раванди таҳқиқот;
- Коркарди усули чудосозии гамма-квантҳо дар фони протонҳо;
- Асосноксозии принципҳои физикии коршоямии усули коркардшуда;
- Санчиши усул дар ҳодисаҳои сунъӣ аз гамма-квантҳо ва протонҳои энергияшон аз 30 ТэВ то 100 ТэВ;
- Ба назар гирифтани флукуатсияи рӯшноии черенковӣ ва фони осмони ситоразор;
- Баҳододи ҳассосияти қисми оптикӣ таҷҳизоти «Помир-XXI» ва ҳисоби вақти интизории мушоҳидаи манбаъҳои гамма-квантҳои баландэнергия.

Объекти таҳқиқоти кори мазкур мушаххасаҳои гуногуни рӯшноии черенковии СВА (ТФВ, ТКВ) дар баландии ~ 4250 м аз сатҳи баҳр мебошад.

Предмет (мавзӯ)-и таҳқиқот усулҳои бақайдгирӣ ва коркарди қулайи ин мушаххасаҳо (ТФВ, ТКВ) барои ба даст овардани баҳододи самараноки мушаххасаҳои зарраи ибтидоии СВА (энергияи ибтидоӣ E_0 , самти омадан θ ва мавқеи меҳвар x_0 ва y_0); мебошад.

Навгони илмӣ таҳқиқот:

- Дар асоси таҳлили моделсозии статистикӣ усули нав барои бақайдгирии рӯшноии черенковӣ тавассути таҷҳизоти омехта пешниҳод шудааст, ки имкон медиҳад, ки мушаххасаҳои ибтидоии СВА муайян карда шаванд (энергияи ибтидоӣ E_0 , самти омадан θ ва мавқеи меҳвар x_0 ва y_0);
- Механизми фаъолияти критерияҳои чудосозии гамма-селҳо дар байни фони протонӣ муайян карда шуд;
- Алгоритми чудосозии селҳои ҷаҳишхӯрда дар асоси хосияти рӯшноии черенковӣ ва бо тақия ба нишондодҳои детекторҳои оптикӣ дарёфт гардид.

Аҳамияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот:

- Усули пешниҳоднамудаи таҳқиқи рӯшноии черенковии СВА-ро метавон ҳам барои беҳтарсозии критерияи чудосозии селҳои гамма дар гамма-астрономияи черенковӣ ва ҳам барои беҳтарсозии чудосозии СВА аз рӯи массаи ҳастаҳои ибтидоӣ ҳангоми таҳқиқи нурҳои кайҳонии фавқулбаландэнергия истифода бурд;
- Таҳлили омилҳои коршоямии критерияҳои дарёфтгардида барои беҳтарсозии критерияҳои чудосозии гамма-ҳодисаҳо замина месозанд;
- Усули омехтаи аниқи таҳлили тақсмоти кунҷӣ ва фазоиву вақтии рӯшноии черенковии СВА барои таҷҳизоти баландкӯҳ коркард гардид (аҳамияти амалӣ).

Нуқтаҳои ҷимояшавандаи диссертатсия:

- Критерияҳои аз нигоҳи физикӣ асоснокшудаи чудосозии гамма-селҳо дар фони ҳодисаҳои протонӣ интензивияти афканиши черенковиро, ки аз баландии гуногун меоянд муқоиса мекунад.
- Дақиқияти муайянсозии мавқеи меҳвари сели энергияшон 30 ТэВ ва аз он боло 1-2 метр аст;
- Дақиқияти муайянсозии самти омадани сели энергияшон 30 ТэВ ва аз он боло барои тамоми намуди зарраҳо аз 0,1 градус болост;
- Алгоритми коркардшудаи чудосозии селҳои чаҳишхӯрда имкон медиҳанд, ки саҳеҳияти баҳододи энергия барои гамма-квантҳо тақрибан 10% ва барои протонҳо 20% бошад;
- Иловаи фони осмони ситоразор ва гузариш ба фотоэлектронҳо баҳододи мушаххасаҳои ибтидоиро бад намекунад;
- Фурӯсозии фони протонӣ аз рӯи таҳлили тақсимоти кунҷии рӯшноии черенковӣ зиёда аз 99% буда, дар ин ҳол 50% ҳодисаҳои гамма дар масофаи 100 м ва 65% дар масофаи 50 м нигоҳ дошта мешаванд; Фурӯсозии иловагии фони селҳои адрониро барои манбаъҳои нуқтавӣ дар асоси чудосозии баланди кунҷии детекторҳои босуръат ба даст овардан мумкин аст.

Эътимоднокии натиҷаҳои диссертатсионӣ.

Дурустии натиҷаҳои таҳқиқот ба истифодаи воситаҳои барномавии моделсозии маъруф ва ба таври васеъ истифодашаванда асос ёфтааст. Ҳангоми тавлиди ҳодисаҳои сунъӣ бо ёрии коди CORSIKA барои ҳар як ҳодиса маълумоти мукамал дар бораи тақсимоти фазоиву вақтӣ ва кунҷии рӯшноии черенковӣ, инчунин файлҳои стандартӣ дар бораи зарраҳои баъдӣ ҳифз карда шудаанд. Ҳангоми коркарди натиҷаҳо маълумот дар бораи фони осмони шабонаи кӯҳҳои Помири Шарқӣ истифода шудааст.

Натиҷаҳои ба дастмада бо ҳисобҳои нашршуда ва маълумоти таҷрибавии вобаста ба мавзӯи диссертатсия, дар ҳолати мавҷуд будани чунин маълумот, мутобиқат мекунад.

Мувофиқати диссертатсия бо шиносномаи ихтисосҳои илмӣ.

Мавзӯи таҳқиқоти диссертатсионӣ ба Паспорти ихтисосҳои КОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон аз рӯи ихтисоси 01.04.01 – «Асбобҳо ва методҳои физикаи таҷрибавӣ», аз ҷумла ба бандҳои зерин мувофиқат мекунад:

1. Омӯзиши падидаҳо ва равандҳои физикӣ, ки метавонанд барои сохтани дастгоҳҳо ва усулҳои принсипан нави физикаи таҷрибавӣ истифода шаванд.
2. Таҳияи принсипҳо ва усулҳои нави андозагирии миқдорӣ физикӣ дар асоси дастовардҳои муосир дар соҳаҳои гуногуни физика ва ба таври назаррас баланд бардоштани дақиқӣ, ҳассосият ва суръати ченкуниҳо. Таҳия ва эҷоди таҷҳизот ва асбобҳои илмӣ барои таҳқиқоти таҷрибавӣ дар соҳаҳои гуногуни физика.
8. Таҳияи усулҳои коркарди математикии натиҷаҳои таҷрибавӣ. Моделсозии падидаҳо ва равандҳои физикӣ.

Саҳми шахсии муаллиф. Муаллиф дар ҳамаи марҳилаи эксперименти ададӣ: тавлиди ҳодисаҳои сунъӣ, ташкили тасвирҳои кунҷӣ ва фазоиву вақтии черенковӣ ва коркарди онҳо бевосита иштирок кардааст.

Тамоми коркарди ҳодисаҳои сунъии СВА, оптимизатсияи алгоритмҳо, ҷустуҷӯ ва оптимизатсияи критерияҳои чудосозии ҳодисаҳо аз рӯи маълумоти қисми оптикӣ таҷҳизот, баҳододи номуайяниҳои барқарорсоҳии мушаххасаҳои ибтидоии селҳо ва ҳассосияти таҷҳизот ба манбаъҳои гамма-квантҳо бевосита аз тарафи муаллиф анҷом дода шудаанд.

Марҳилаҳои таҳқиқот муайянсозии мушаххасҳои ибтидоӣ барои моделсозӣ, моделсозии СВА дар атмосфера барои зарраҳо ва энергияҳои интихобшуда, сохтани бонки ҳодисаҳои сунъӣ, интихоби модел барои аппроксиматсияи функцияи тақсимои арзӣ ва функцияи фронт, муайянсозии конфигуратсияи таҷҳизот, коркарди усули бақайдгирӣ ва чудосозии гамма-квантҳо ва санчиши коршоёмии усули коркардшударо дарбар мегирад.

Таъйиди диссертатсия ва иттилоот доир ба истифодаи натиҷаҳои он

Натиҷаҳои асосии таҳқиқот дар конференсияҳои ҷумҳуриявӣ, умумироссиягӣ ва байналмиллалӣ зерин маъруза шудаанд:

Республиканская конференция по ядерно-физическим методам анализа состава биологических, геологических химических и медицинских объектов, Душанбе, Таджикистан, 2014; 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Москва, Россия, 22-27 августа 2016; Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017; 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Республика Корея, 12-20 июля 2017; 4-я Международная школа молодых ученых стран СНГ «Смежные проблемы физики и астрофизики частиц сверхвысоких энергий», Алматы, Казахстан, 24-30 сентября 2017; XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018». Секция «Физика», Москва, Россия, 9-13 апреля 2018; XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов – 2017", МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 20 апреля 2017; V Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ», ФТИ им. С.У. Умарова АН РТ, Душанбе, Таджикистан, 18-19 ноября 2016; VI Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ», ФТИ им. С.У. Умарова АН РТ, Душанбе, Таджикистан, 29-30 июня 2018; Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики», ТНУ, Душанбе, Таджикистан, 19 февраля 2020.

Муаллиф дар семинарҳои илмӣ зерин низ баромад кардааст: Семинарҳои илмӣ факултети физикаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон (09.01.2018), Институти физикаю техникаи ба номи С. У. Умарови АМИТ (10.01.2018 ва 02.04.2019), “Научный семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т.Зацепина”, ИЯИ РАН (19.10.2018), “Научный семинар «Астрофизика космических лучей и физика космоса» им. М.И. Панасюк НИИЯФ МГУ (28.04.2021)”

Натиҷаҳои нашришудаи таҳқиқот. Аз рӯи маводи кори диссертатсионӣ 11 қор нашр шудааст, ки аз он 2 мақола дар маҷаллаҳои илмӣ тақризшавандаи пойгоҳҳои Web of Science ва Scopus ва 3 мақола дар маҷаллаҳои илмӣ тақризшавандаи КОА-и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ба нашр расидаанд.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия

Кори диссертатсионӣ дар 130 саҳифа навишта шуда, аз сарсухан, 3 боби дорои зерфасл, хулосаҳо ва рӯйхати адабиёти истифодашуда иборат аст. Дар кори мазкур 39 расм ва 12 ҷадвал оварда шудааст. Рӯйхати адабиёт дорои 214 манбаи библиографӣ мебошад.

МАЗМУНИ АСОСИИ ДИССЕРТАТСИЯ

Дар **сарсухан** мубрамияти мавзӯи рисола асоснок карда шудааст, ҳадаф ва вазифаҳои таҳқиқот ифода ёфтаанд, мӯҳтавои асосии ба Ҳимоя пешниҳодшаванда баён шуда, навгониҳои илмӣ ва аҳамияти илмӣ ва амалии таҳқиқот нишон дода шуда, сохтори кори диссертатсионӣ нишон дода шудааст. Ҳамчунин нуқтаҳои Ҳимояшаванда, мавод ва маърузаҳои нашршуда ва нақши муаллиф дар ба даст овардани натиҷаҳо нишон дода шудааст.

Дар **бобҳои якум** дар бораи гамма астрономия ва таърихи рушди он маълумот дода шудааст. Гамма астрономия соҳаи аз ҳама баландэнергияи астрономия аст, зеро маҳз бо гамма квантҳо паҳноии энергетикӣ мавҷи электромагнитӣ ба анҷом мерасад. Вобаста ба энергияи γ -квантҳо усули бақайдгирии онҳо фарқ мекунад. Масалан, барои энергияҳои нисбатан пасттар таҷрибаҳои кайҳонӣ мавҷуданд [20-25]. Азбаски атмосфера барои γ -квантҳо ғайришаффоф аст, мушоҳидаи мустақими онҳо танҳо баъди ба кайҳон фиристодани дастгоҳҳои кайҳонӣ имконпазир гардид. Бо афзоиши энергия сели γ -квантҳо кам мешавад ва барои ба қайд гирифтани онҳо масоҳати зиёди дастгоҳҳои эксперименталӣ зарур аст, вале фиристодани чунин дастгоҳҳо ба кайҳон, дар ҳоли ҳозир, ғайриимкон аст. Бинобар ин дар энергияҳои баланд (зиёда аз ~ 100 ГэВ) усули ғайримустақими γ -квантҳо истифода бурда мешавад. Онҳо ба атмосфера афтода СВА тавлид мекунад ва ин селҳоро ба қайд гирифта, мушаххасаҳои гамма-кванти ибтидоиро барқарор кардан мумкин аст.

Ҳамчунин мушкилоти марбут ба гамма астрономия дида баромада шудааст: материяи торик, вайроншавии инвариантнокии Лоренс, мушкилоти шитобгирии нурҳои кайҳонӣ, таҳқиқи Коиноти ибтидоӣ. Ин мушкилот бо усулҳои гамма-астрономия омӯхта мешаванд.

Дар идома усули омехтаи бақайдгирии гамма-квантҳо оварда шудааст.

Боби дуюм ба таҷрибаи «Помир-XXI» ва қисми оптикӣ он бахшида шудааст. Лоихаи «Помир-XXI» ҳамчун таҳқиқи маҷмӯии нури кайҳонӣ ибтидоӣ (НКИ) дар паҳноии васеи энергияҳо 30 ТэВ – 1 ЭэВ ва хarakterистикаи таъсири мутақобилаи ҳастай, ки барои омӯзиш дар суръатфизоҳо дастнорас аст пешниҳод шуда буд. Баландии зиёди мушоҳида (4250-4260 м аз сатҳи баҳр) барои ҳалли масъалаҳои астрофизикӣ бартарӣ дорад: омӯзиши тайфи энергетикӣ ва таркиби массавии НКИ ва бақайдгирии γ -квантҳои фавқулбаландэнергия ҳам аз манбаҳои нуқтавӣ ва ҳам аз диффузӣ. Сабаби асосӣ он аст, ки баландии сатҳи мушоҳида ба максимуми хати қаскадии гамма-квантҳои энергияшон аз 100 ТэВ боло наздик аст. Ба статуси номуайяни имрӯзаи «Помир-XXI» нигоҳ накарда, мо усули коркарди сигнал ва муайян намудани мушаххасаҳои ибтидоии зарраҳоро бо нияти эҳёи «Помир-XXI» идома додем.

Дар идома ҳадафҳо ва вазифаҳои асосии таҷрибаи «Помир-XXI» ба таври муфассал оварда шудаанд.

Қисми дуюми **боби дуюм** ба қисмати гамма-астрономии таҷрибаи «Помир-XXI» бахшида шудааст.

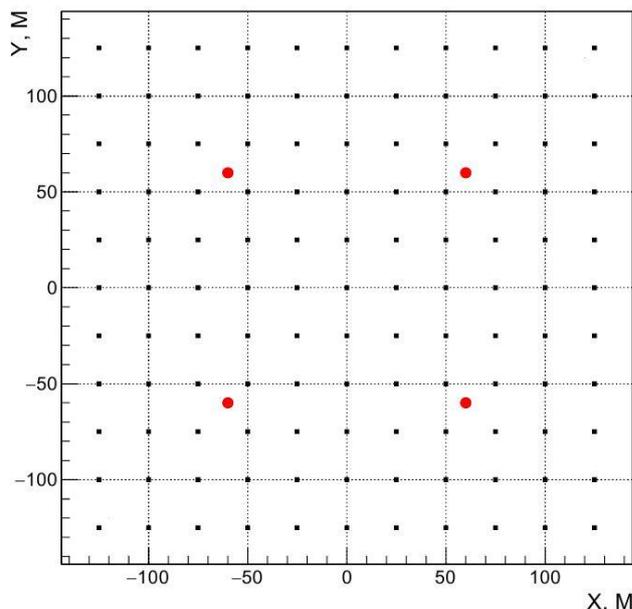
Барои вазифаҳои гамма-астрономӣ дар таҷрибаи «Помир-XXI» дастгоҳи оптикӣ истифода мешавад (Расми 1), ки аз чунин қисмҳо иборат аст:

1. Шабаки чоркунҷаи иборат аз 11×11 детекторҳои босуръати васеъзовия бо масоҳати ~ 1 м² ва апертураи ~ 1 ср, ки бо қадами 25 м ҷойгиранд. Масофа байни детекторҳо баъди санҷиши баҳододи мушаххасаҳои ибтидоӣ муайян карда шуд.

2. Телескопҳои кунҷии черенковӣ бо оинаҳои масоҳаташон ~ 4 м², диаметри майдони бинишашон тақрибан 30° ва диаметри пиксел $\sim 0.8^\circ$, ки аз ҳамдигар дар масофаи ~ 100 м

ҷойгир шуда, таҳлили тақсимои фазоиву кунҷии рӯшноии черенковиро таъмин мекунад ба массаи нурҳои кайҳони ҳассос мебошанд. Барои муайянсозии андозаи оптималии пикселҳо 4 вариант дида баромада шуд: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, $1.0^\circ \times 1.0^\circ$. Коркарди натиҷаҳо нишон дод, ки андозаи беҳтарини пиксел $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ мебошад.

Чунин комбинатсияи детекторҳо имкон медиҳад, ки гамма-квантҳо аз манбаъҳои нуқтавӣ ва диффузионӣ ба қайд гирифта шаванд. Ба фарқ аз дигар таҷрибаҳо, ба қайд гирифтани манбаъҳои диффузӣ на танҳо дар асоси маълумоти тақсимои кунҷию фазой, балки дар асоси тақсимои фазой ва вақтии рӯшноии черенковӣ сураат мегирад.



Расми 1. - Қисми оптикӣ таҷҳизоти «Помир-XXI». Квадратҳои сиёҳ – детекторҳои босуръати оптикӣ, доираҳои сурх – телескопҳои кунҷии черенковӣ

Барои санҷиши коршоямии усули пешниҳодшуда бонки ҳодисаҳои сунъӣ сохта шуд. Ҳодисаҳои сунъӣ барои баланди мушоҳида 4250 м аз сатҳи баҳр бо ёрии CORSIKA6.990/QGSJET01 барои энергияҳои аз 30 ТэВ то 100 ТэВ ва барои ду навъи зарраҳо: протонҳо ва гамма квантҳо моделсозӣ шуданд.

Барои ҳар як ҳодиса тақсимои фазоиву вақтии рӯшноии черенковӣ дар масоҳати квадратии сатҳи мушоҳида бо андозаи $600 \text{ м} \times 600 \text{ м}$, ки марказаш бо маркази сел мутобиқ аст, тақсимои фазоиву кунҷии рӯшноии черенковӣ дар масоҳати квадратии андозааш $500 \text{ м} \times 500 \text{ м}$ ва файли стандартии зарраҳои CORSIKA ҳифз карда шуданд. Массиви тақсимои фазоиву вақтии рӯшноии черенковӣ ченаки $600 \times 600 \times 300$ дорад, ки дутои аввал квадратро ба 360000 квадратҳои хурди масоҳаташон 1 м^2 тақсим мекунад, охирӣ бошад шакли импулсро дар паҳноии замони 0-300 нс бо қадами 1 нс ифода мекунад. Ҳамин тариқ, тамоми иттилооти зарурии сатҳи мушоҳида бо чудосозии фазоиву вақтӣ нигоҳ дошта мешавад. Ба ин монанд, массиви тақсимои фазоиву кунҷии рӯшноии черенковӣ ченаки $250 \times 250 \times 108 \times 108$ дорад, ки ду қимати аввал квадрати $500 \text{ м} \times 500 \text{ м}$ ба 62500 квадрати масоҳаташ 4 м^2 тақсим намуда, ду қимати охирӣ майдони биниши квадратии телескопи андозааш $27^\circ \times 27^\circ$ -ро ифода мекунад, ки ба қисматҳои квадратии андозааш $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ тақсим карда шудааст. Андозаи кунҷии хурди қисмат ба он хотир интиҳоб шуда буд, ки баъдтар тавонем бо роҳи яққоя қардани чанд қисмат андозаи оптималии пикселро муайян созем.

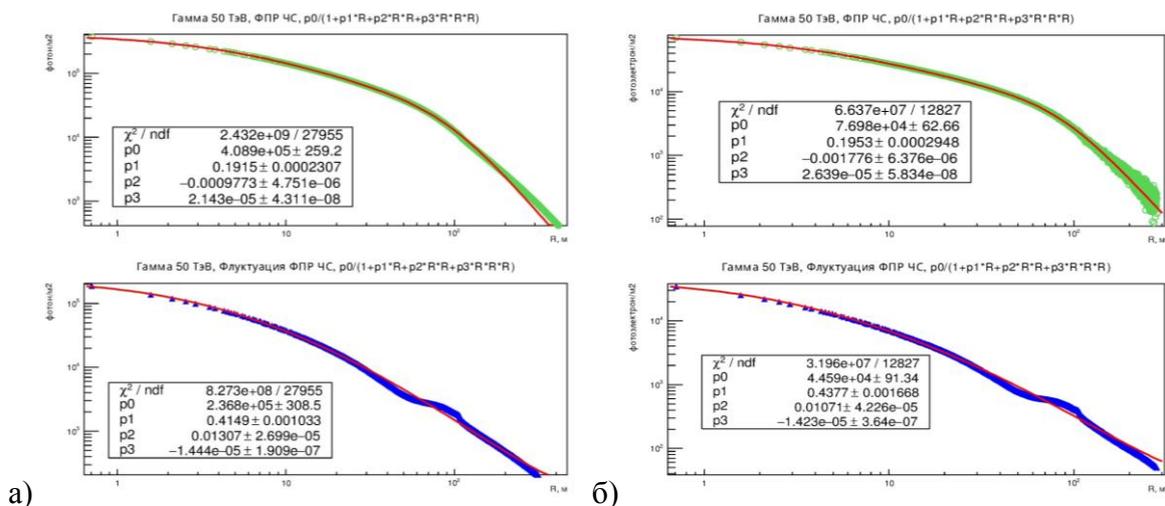
Барои коркарди маълумоти фазиову вақтии рӯшноии черенковӣ ва зарраҳо модели зерини тақсимои арзӣ ва fronti вақтӣ ва флукуатсияи онҳо интихоб шуданд:

$$F_{LD}(R) = \frac{a_0}{1+a_1R+a_2R^2+a_3R^3} \quad (1)$$

Ва барои функсияи фронт:

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

ки инҷо R – масофа аз меҳвари сел то детектор аст.



Расми 2. - Аппроксиматсияи миёнаи функсияи тақсимои арзии рӯшноии черенковӣ ва апроксиматсияи он барои γ -квантҳои 50 ТэВ: а) барои фотонҳо; б) баъди иловаи фони осмони шабона ва табдил додани фотон ба фотоэлектронҳо

Номуайянии баҳододи координатаҳо ва самти меҳвар бо ёрии детекторҳои босуръати оптикӣ ҳам бо роҳи коркарди тақсимои фазиову вақтии рӯшноии черенковӣ дар шакли “хом” дар шакли фотонҳо ва ҳам баъди илова кардани фони осмони шабона ($10^8 \text{ см}^{-2}\text{ср}^{-1}\text{с}^{-1}$) ва табдили фотонҳо ба фотоэлектронҳо ҳисоб карда шуд. Дар ҳолати охири фони шабона аз рӯи Пуассон флукуатсия мекунад, ба мисли фотоэлектронҳои кандашаванда. Номуайянии координатаҳо ва самти меҳвари сел ба талабот мувофиқ ҳастанд ($\sim 1 \text{ м}$ ва $< 0.1^\circ$) (Расми 4).

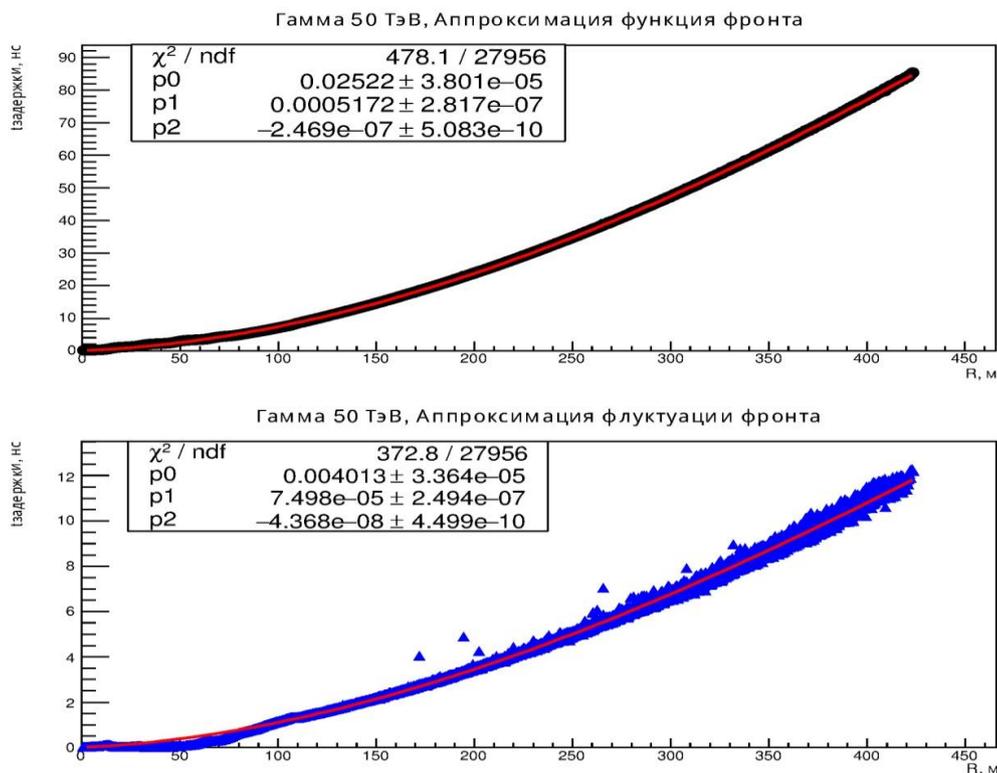
Моделҳои интихобшуда ҳангоми коркарди рӯшноии черенковӣ дурустии худро исбот намуданд (Расмҳои 2 ва 3).

Барои диапазони энергияи 30-100 ТэВ таъсири фон чашмас аз, вале дар ҳудуде меҳобад, ки барои бақайдгирии гамма квантҳо имкон медиҳад (Чадвали 1).

Энергияи ибтидоӣ E_0 аз рӯи интегралҳои CL300 аз тақсимои арзии рӯшноии черенковӣ дар доираи радиусаш 300 м, ки марказаш бо меҳвар мувофиқ аст гирифта мешавад. Мушаххасаҳои тақсимои арзӣ дар натиҷаи наздиксозии якҷоя ба модели тақсимои арзӣ ва fronti вақтии рӯшноии черенковӣ аз рӯи тақсимои фазиову вақтӣ дар ҳар як сел ба даст оварда мешавад.

Ҳангоми баҳододи энергия, ки фотонҳои фон ва черенковӣ якҷоя карда шуда, суммашон ба фотоэлектрон табдил дода мешавад, номуайяни меафзояд. Воридсозии сарҳади

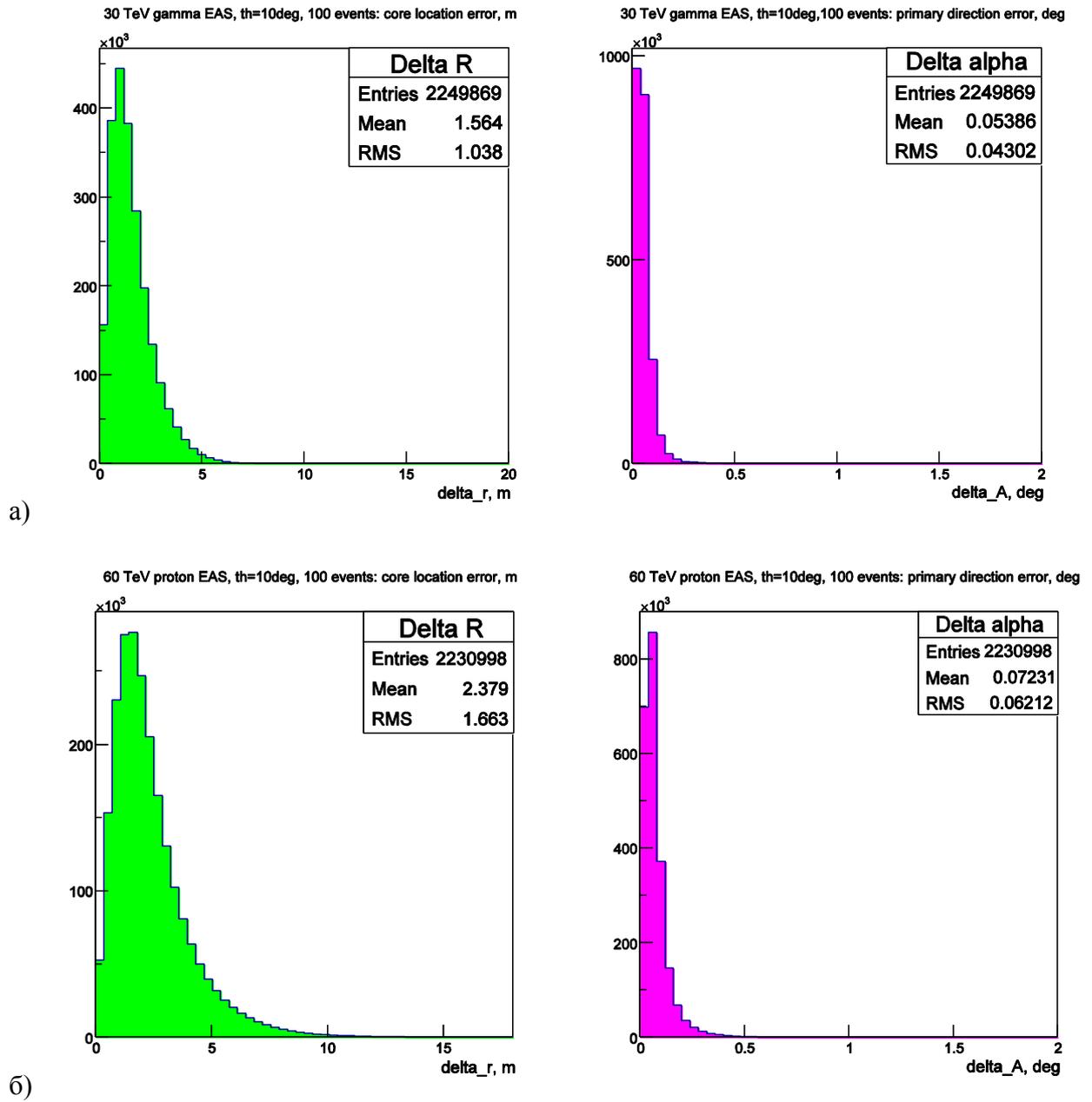
поёни (масалан, 200 фотозлектрон) аз рӯи сигнали натиҷавӣ барои ҳар як детектори босуръат номуайяниро камтар мекунад (Ҷадвали 2 ва Расмҳои 4 ва 5).



Расми 3. - Аппроксиматсияи функсияи fronti миёна ва аппроксиматсияи флуктуатсияи он барои γ -квантҳои 50 ТэВ

Ҷадвали 1. - Номуайянии мавқеи меҳвар, м, ва самти омадани зарраи ибтидоӣ, градусҳо

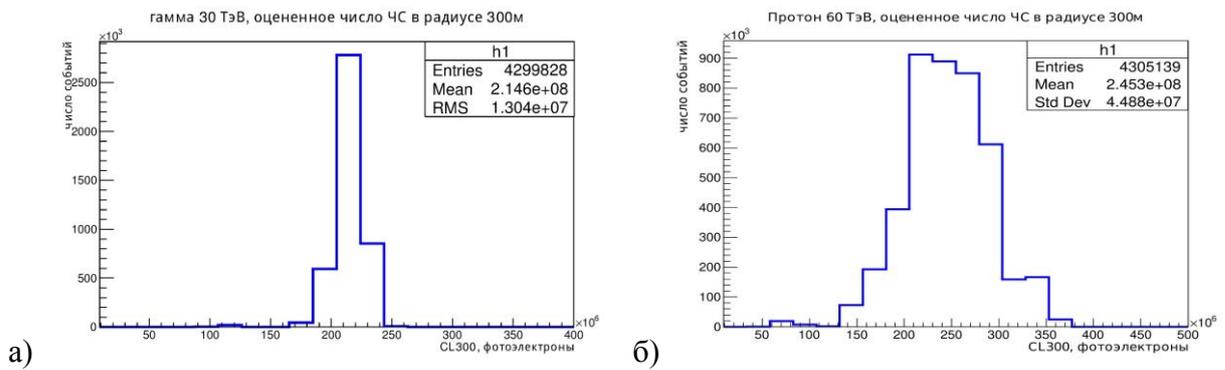
Ҳодиса/сигнал	Мавқеи меҳвар, миёна	Мавқеи меҳвар, тамоюли кв. миёна	Самти ибтидоӣ, миёна	Самти ибтидоӣ, тамоюли кв. миёна
60 ТэВ p, РЧ, фотонҳо	1.6	0.93	0.044	0.033
60 ТэВ p, РЧ+ФОШ	2.6	1.9	0.076	0.064
60 ТэВ p, РЧ+ФОШ >200, фэл	2.4	1.67	0.072	0.062
30 ТэВ γ , Чс, фотонҳо	1.0	0.59	0.030	0.020
30 ТэВ γ , РЧ+ФОШ	1.8	1.3	0.058	0.052
30 ТэВ γ , РЧ+ФОШ >200, фэл	1.6	1.04	0.054	0.043



Расми 4. - Номуайянии баҳододи координатаҳо ва самти мехвари сел барои а) γ -квантҳо 30 ТэВ ва б) протонҳо 60 ТэВ бо назардошти фони осмони шабона ва сарҳади поёнии 200 фотозэлектрон

Чадвали 2. - Флукуатсияи нисбии CL300 барои $E_0= 30-100$ ТэВ, %

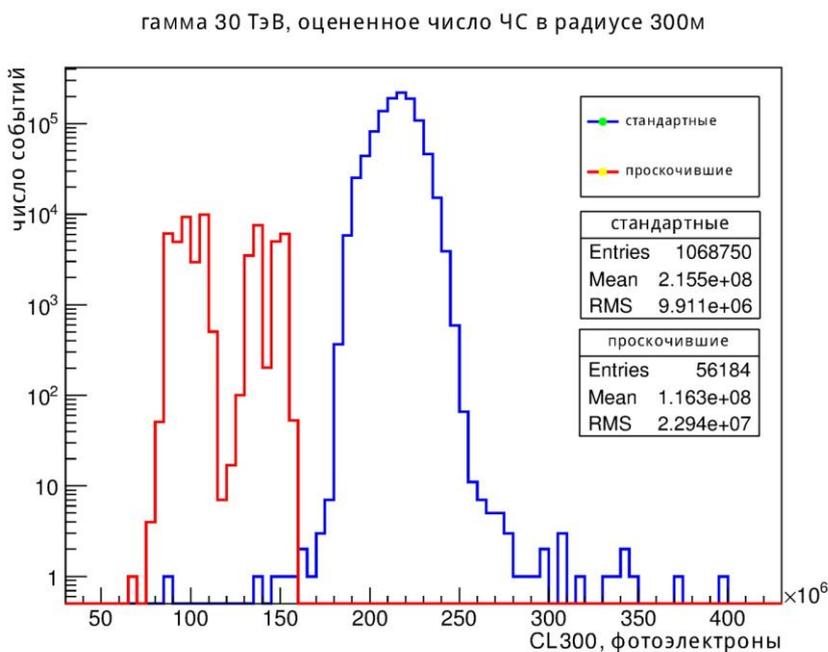
	РЧ, фотонҳо	РЧ+ФОШ, фэл	РЧ+ФОШ >200, фэл
60 ТэВ p	18	20	18
100 ТэВ p	13	20	18
30 ТэВ γ	5	10	6
50 ТэВ γ	2	9	7



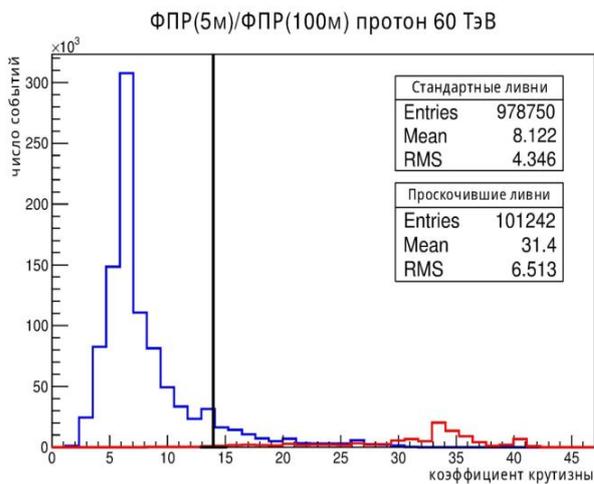
Расми 5. - Адади умумии фотоэлектронҳо дар доираи радиусаш 300 м а) барои γ -квантҳои 30 ТэВ ва б) барои протонҳои 60 ТэВ бо назардошти фони осмони шабона ва сарҳади поёнии 200 фотоэлектрон

Бояд қайд кард, ки ҳангоми таҳқиқи СВА аз γ -квантҳо ва протонҳо селҳои ба назар мерасанд, ки максимуми хати қасқадиашон ба сатҳи мушоҳида хеле наздик ҷойгир буда, адади пурраи фотонҳои черенковии онҳо дар сатҳи мушоҳида нисбат ба дигар селҳо камтар аст. Ин барои баҳододи дурусти энергияи онҳо ва шинохти онҳо ҳалал мерасонад. Аз расми 7 дидан мумкин аст, ки энергияи селҳои чаҳишхӯрда тақрибан 2 маротиба камтар баҳо дода мешавад. Ба мо муяссар гардид, ки селҳои чаҳишхӯрдаро аз дидабарой берун кунем. Барои он мо дараҷаи қачии функсияи тақсимоти арзии рӯшноии черенковиро истифода мебарем, яъне таносуби қимати функсияро дар масофаҳои гуногун аз меҳвари сел (Расми 8). Варианти аз ҳама муносиб таносуби қимати функсияи мазкур дар масофаҳои 5 м ва 100 м аст (Расми 9). Вариантиҳои дигар қисми зиёди селҳои стандартиро ҳамчун чаҳишхӯрда муайян мекунам ва селҳои чаҳишхӯрда чун селҳои оддӣ дида баромада мешавад.

Баъзан селҳои оддӣ низ чун чаҳишхӯрда муайян мешавад, ки миқдори ин селҳо тақрибан 9% аст, ки барои саҳеҳияти таҷриба чунин талафот ҷиддӣ нест. Тақрибан 40%-ин селҳо кунҷи зенитии бузург доранд (тақрибан 10°) ва доғи онҳо аз доираи майдони биниши телескоп берун мешавад. Барои протонҳо ин нишондиҳанда 10% аст.



Расми 6. - Баҳододи энергия барои селҳои стандартӣ ва чаҳишхӯрда (хати сурх)

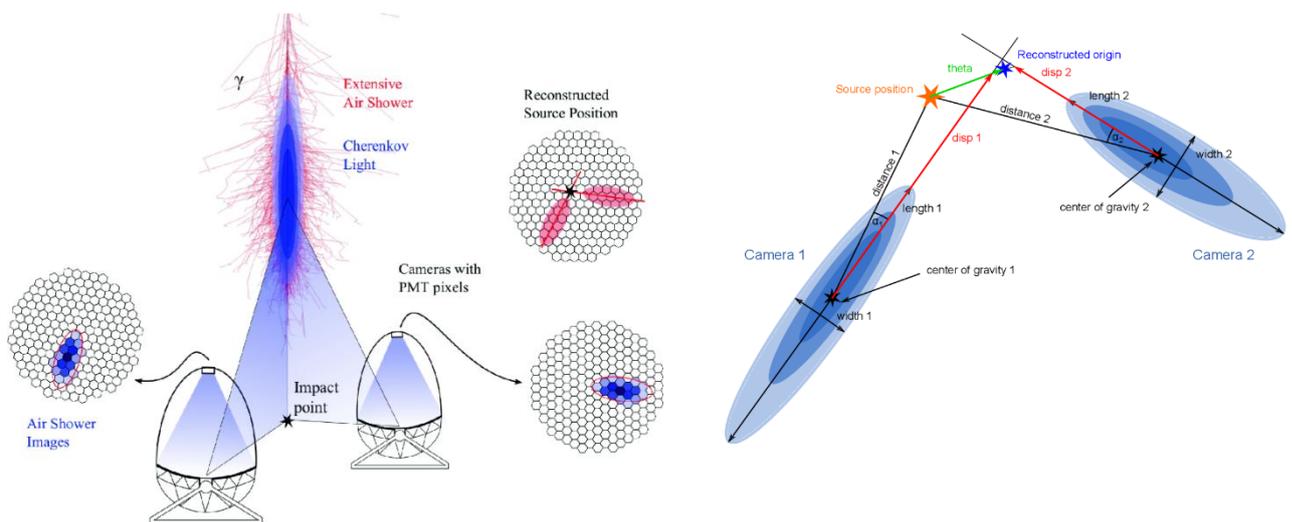


Расми 7. - Таксимоти зарибҳои дараҷаи қачии функсияи таксимоти арзии селҳои оддӣ (ранги кабуд) ва ҷаҳишхӯрда (ранги сурх) а) барои гамма-квантҳо б) барои протонҳо. Хати сиёҳ сарҳади байни онҳоро ифода мекунад

Ҷудосозии гамма-квантҳо аз байни селҳои адронӣ вазифаи муҳими гамма-астрономия мебошад. Барои ин фарқияти сохтори СВА аз адронҳо ва гамма-квантҳо истифода мебаранд. Бори аввал Ҳиллас нақшаи мушаххасосозии тасвири селро пешниҳод кард, ки дар асоси онҳо гамма-квантҳо ҷудо кардан мумкин аст.

Ӯ пешниҳод кард, ки тасвири баъди тарҳ кардани фони осмони шабона ба дохили эллипс бояд ҷойгир кард (Расми 9). Маълум гашт, ки ду тири асосии эллипс, ғеҷиши эллипс, концентратсияи рӯшноӣ, масофа аз маркази эллипс то манбаъ ва θ мушаххасҳои асосии фарқияти гамма-квантҳо аз адронҳо мебошад.

Нақшаи мушоҳидаи сел тавассути телескопҳои атмосферии черенковӣ (ТАЧ) дар речаи стерео ва роҳҳои коркарди онҳо бо ёрии мушаххасҳои Ҳиллас дар мисоли таҷрибаи MAGIC дар расми 1 оварда шудааст.



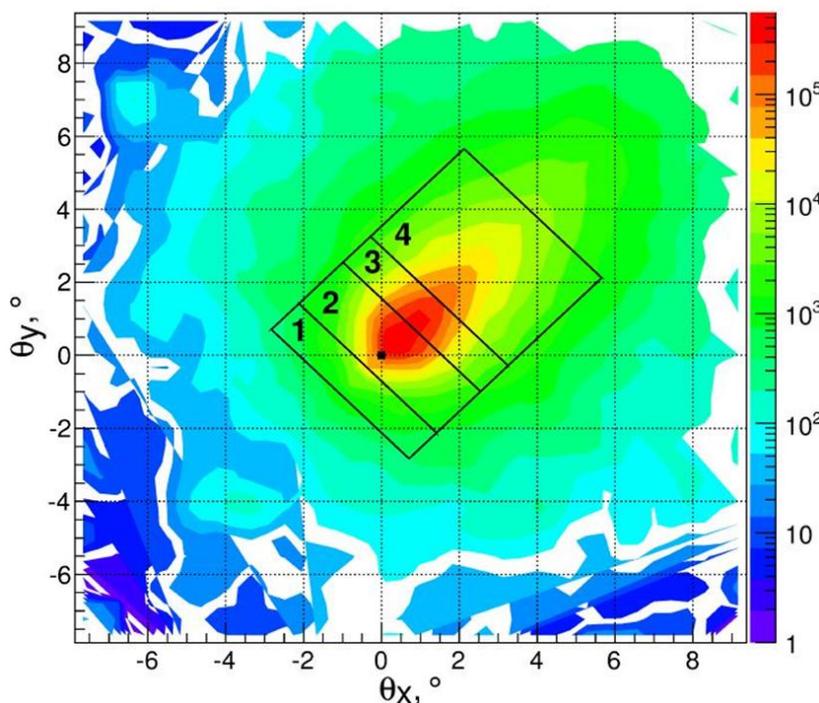
Расми 8. а) Намоиши усули мушоҳида бо ТАЧ дар речаи стерео. Телескопҳо лар дохили конуси черенковӣ қарор доранд. Рӯшноие, ки аз тарафи оинаҳо инъикос мешавад дар камераҳои ҳассос бо фотоумножителҳо дар пикселҳо ҷамъ мешавад. б) Нақшаи мушаххасҳои стерео, ки ҳангоми таҳлили маълумоти MAGIC истифода мешавад.

ТАЧ асосан барои омӯзиши гамма квантҳои энергияшон аз 10 то 30 ТэВ равона шуда, онҳо бояд дар речаи стерео кор кунанд, вале аз сабаби камшавии сели гамма квантҳои

нисбатан баландэнергия масоҳати наонқадар калони онҳо барои ҷамъовариҳои омили зиёд кофӣ нест. Ҳамчунин мушаххасаҳои Ҳиллас, ки дар асоси онҳо тасвири сел таҳлил карда мешавад, барои тасвирҳои нисбатан хурд, яъне энергияҳои пасттар мувофиқ аст. Барои ба даст овардани хассосияти хуб ҳангоми энергияҳои баландтар бояд масоҳати дастгоҳҳо афзоянд, бо зиёд кардани адади ТАЧ, масалан, дар эксперименти СТА, вале ин ба зиёд шудани хароҷот оварда мерасонад. Аз энергияи 20–30 ТэВ сар карда телескопҳои вақтӣ (NON-IMAGING) метавонанд самаранок фаъолият баранд.

Таксимоти фазоиву кунҷии рӯшноии черенковии СВЧ яке аз пурмаълумоттарин хосияти селҳои атмосферӣ мебошад, ки ба фарқияти каскадҳои гуногун аз зарраҳои гуногун хассос аст. Яке аз исботҳои маълуми ин тезис дастоварди ҷолиби гамма-астрономия мебошад: сели гамма-квантҳои баландэнергия аз манбаъҳои нуқтавӣ дар фони сели ҳастаҳои нурҳои кайҳонӣ, ки аз сигнал 3-4 тартиб зиёданд ҷудо карда мешавад. Қаблан кӯшиши интиқоли усули гамма-астрономия барои баҳододи таркиби массавии нурҳои кайҳонии энергияи ибтидоиашон 1 ТэВ – 1 ПэВ сурат гирифта буд. Баъдан, дар корҳои [20, 22] пешниҳод шуд буд, ки дар асоси моделсозии дақиқ критерияҳои ҷудосозии ҳодисаҳо ҳам дар асоси тасвирҳои анъанавӣ ва ҳам дар асоси мушаххасаҳои кунӣ амалӣ карда шавад. Ҳамчунин хассосияти ин критерияҳо ба массали ҳастаи ибтидоӣ таҳқиқ карда шуд.

Дар сатҳи Помир андозаи кунҷии таксимоти рӯшноии черенковии гамма-селҳо бо энергия 30 ТэВ ва аз он боло метавонанд якҷанд градус дарозӣ дошта бошад, ки шакли доғро метавон бо ҷузъиёти аз мушаххасаҳои Ҳиллас бештар таҳқиқ кард. Дар ҳолати мо ба сифати критерияҳои тавсифдиҳандаи ҳодиса таносуби интегралҳо аз соҳаҳои росткунҷаҳо, ки қадқади меҳвари дарозии доғ ҷойгир буда, профили тӯлии тасвири черенковиро ифода мекунанд истифода мешаванд. Ба сифати критерияҳо таносуби $r_{ij} = S_i/S_j$ интегралҳои рӯшноии черенковӣ аз рӯи ҳиссаҳо S_i , $i=1, \dots, 4$ мебошанд. Бари росткунҷаҳо то ба даст омадани натиҷаҳои беҳтарин тағйир дода мешаванд. Дар расми 10 геометрияи коркарди тасвир нишон дода шудааст.



Расми 9. - Тасвири сел ва соҳаи росткунҷаи интегронӣ, ки ба меҳвари дарозии доғ перпендикуляр аст. Квадрати сиёҳ дар марказ ба сами омадани сел ишора мекунанд. Доғ ба росткунҷаҳои 1,2,3,4 ҷудо карда шудааст. Паҳноии росткунҷа бузург 5° аст. Тарафи берунии росткунҷаи 1 аз самти омадани сел - $1,5^\circ$ ҷойгир аст

Критерияҳои оптималии чудосозии гамма-ходисаҳо аз фони протонӣ барои чуфтҳои 30 ТэВ γ / 60 ТэВ p ва 50 ТэВ γ / 100 ТэВ p ва барои ду масофа $R=50\text{м}$, 100м ҳисоб карда шуданд. Қимати оптималии r_{ij} аз чуфт ва масофа вобаста аст. Ин критерияҳо бо ёрии формулаи зер ба cri табдил дода шуданд:

$$cri_{ij} = \frac{(r_{ij} - \overline{r_{ijp}})^2}{\sigma_{ijp}^2} - \frac{(r_{ij} - \overline{r_{ij\gamma}})^2}{\sigma_{ij\gamma}^2} + 2 \ln \frac{\sigma_{ijp}}{\sigma_{ij\gamma}}, \quad (3)$$

ки инҷо $\overline{r_{ijp}}, \sigma_{ijp}$ и $\overline{r_{ij\gamma}}, \sigma_{ij\gamma}$ қимати миёнаи ҳодисот ва тамоюли стандартӣ барои протонҳо ва гамма-квантҳо мутаносибан мебошад. Чунин табдилдиҳӣ ба чудосозии p - γ таъсир намерасонад, танҳо барои стандартсозии шакли берунии график истифода мешавад. Қимати критерия тавре танзим шудааст, ки дар соҳаи гамма танҳо як дона протон боқӣ монаду тамом. Чунин усули коркарди тасвири рӯшноии черенковӣ имкон медиҳад, ки зиёда аз 99%-и фони ҳастай ҳангоми бақайдгирии гамма-нурҳои 30-100 ТэВ бартараф карда шаванд. Натиҷаҳои беҳтарин дар чадвалҳои 3 ва 4 оварда шудаанд. Дар расми 10 а, б, в, г тақсимооти критерияҳои оптималӣ барои чуфтҳои γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ ва γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ барои масофаҳои 50 ва 100 м оварда шудаанд.

Чадвали 3. - Эҳтимолияти иштибоҳи тасниф барои чуфтҳои γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ (2400 ҳодиса)

Масофа аз меҳвари сел	$P\{p \rightarrow \gamma\}/P\{\gamma \rightarrow p\}$	Паҳноии росткунҷаҳои 1-4, градусҳо
50 м	0.0004355/0.4052	<u>0.62</u> 0.33 0.51 0.55
100 м	0.0004441/0.6488	0.40 <u>0.35</u> 0.36 0.51

Таблица 4. - Эҳтимолияти иштибоҳи тасниф барои чуфтҳои γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ (2400 ҳодиса)

Масофа аз меҳвари сел	$P\{p \rightarrow \gamma\}/P\{\gamma \rightarrow p\}$	Паҳноии росткунҷаҳои 1-4, градусҳо
50 м	0.0004325/0.3564	<u>0.62</u> 0.33 0.51 0.55
100 м	0.0004378/0.5751	0.40 <u>0.35</u> 0.36 0.51

Сутуни сеюми чадвал паҳноии оптималии росткунҷаҳои хурдро ифода мекунад. Рақамҳои зерашон хаткашидашуда дар сурат ва рақамҳои ғафс дар маҳраҷ қарор мегиранд.

Аз чадвал дидан мумкин аст, ки критерияҳо дар масофаҳои 50 ва 100 м бо ҳам мувофиқат мекунанд.

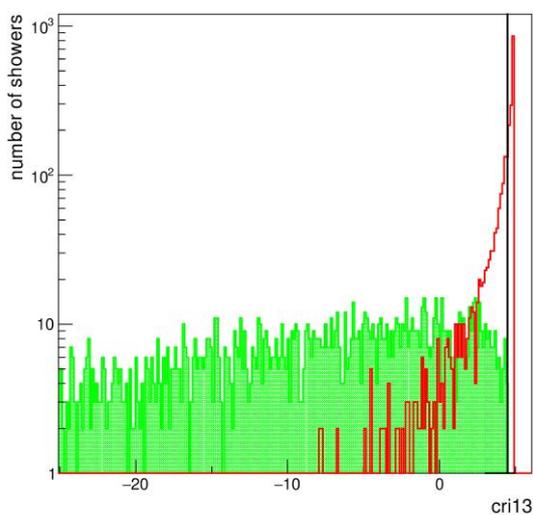
Барои бартарияти усули пешниҳодшударо нишон додан тасвири ходисаҳои сунъие, ки бо усули анъанавии ба мушаххасаҳои Ҳиллас асосёфтааст таҳлил карда шуданд. Таҳлил нишон дод, ки чудосозӣ ба даст намеояд. Баъдан дар асоси ин мушаххасаҳо критерияи Байесии нормалии 4-ченака сохта шуд, ки дар натиҷа чудосозӣ беҳтар гашт.

Агар сарҳадро байни навъҳо тарзе гузорем, ки дар кори мазкур карда мешавад (сарҳад дар протони охирони тарафи рост), он гоҳ ин натиҷа ба даст меояд:

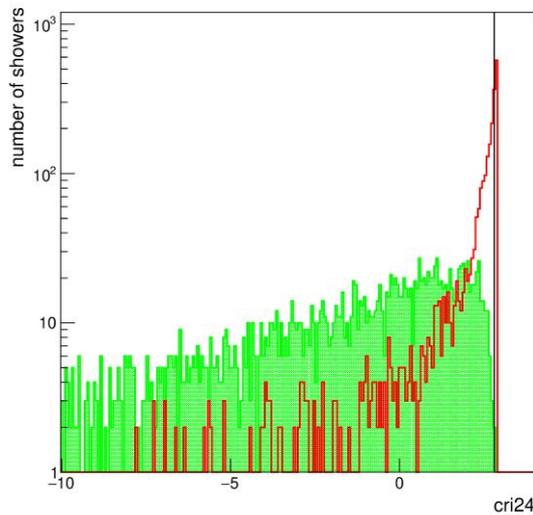
эҳтимолияти гамма қабул кардани протон = $1/788 = 0.00127$,

эҳтимолияти протон қабул кардани гамма = 0.96.

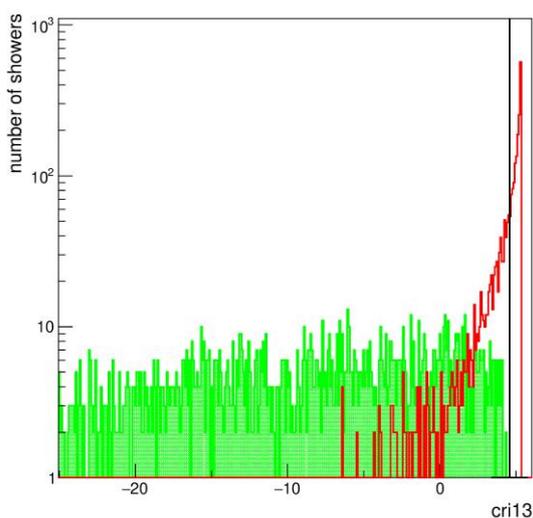
Яъне дар ҳолати фурӯнишони фон ба се тартиб аз сигнали гамма қариб, ки чизе намонанд. Барои усули дар дар диссертатсияи мазкур пешниҳодшаванда ин натиҷа бамаротиб беҳтар аст: 0.00044 и 0.41.



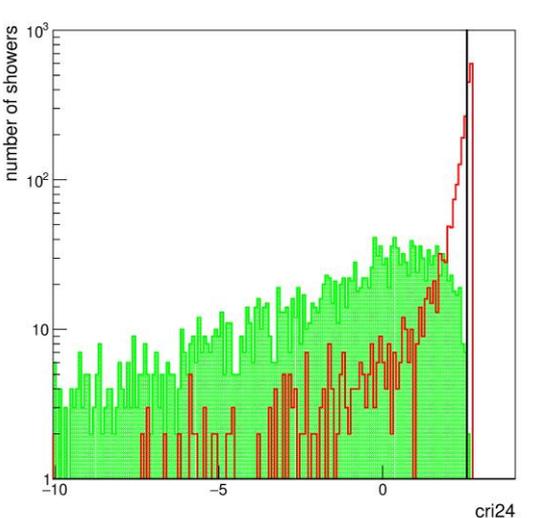
a)



б)



в)



г)

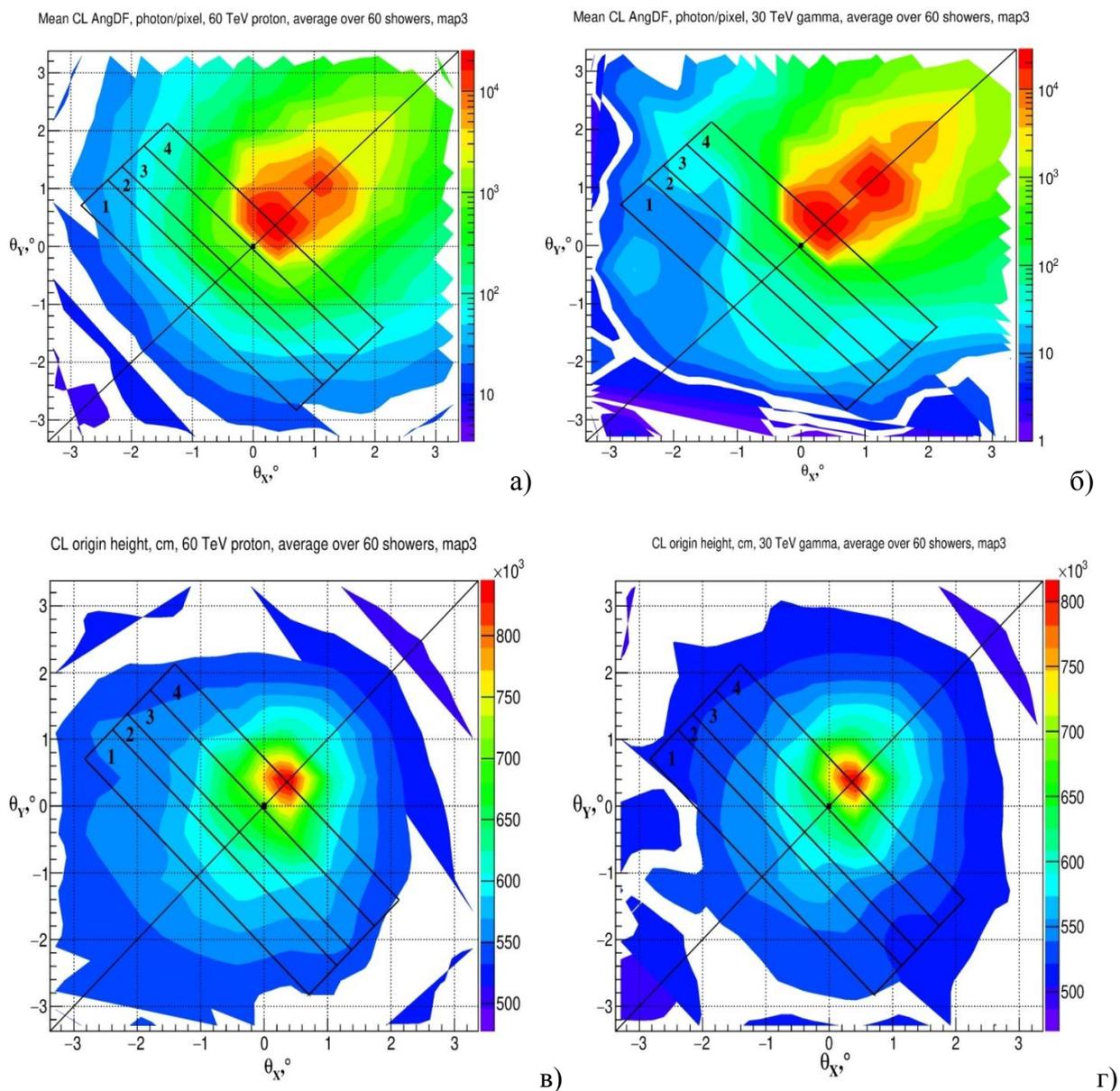
Расми 10. - Тақсимои критерияҳои оптималӣ барои чуфтҳои γ 30 ТэВ – р 60 ТэВ ва γ 50 ТэВ – р 100 ТэВ барои масофаҳои 50 и 100 м аз меҳвари сел. Хати сиёҳи амудӣ сарҳади байни гамма-квантҳо ва протонҳо ифода мекунад ва чунин гузаронида шудааст, ки дар тарафи гамма-квантҳо танҳо як дона протон боқӣ мемонад.. Тақсимои сабз – протонҳо, сурх – гамма-квантҳо

Барои дарк кардани механизми кори критерияҳо ба қароре омадем, ки робитаи байни мушаххасаҳои дар критерия истифодашавандаи доғи рӯшноии черенковӣ ва мушаххасаҳои рушди тӯлии СВА-ро таҳқиқ кунем. Баландиҳои афканиши фотонҳои черенковӣ, ки ба масоҳати интегрронӣ меоянд таҳқиқ карда шуданд.

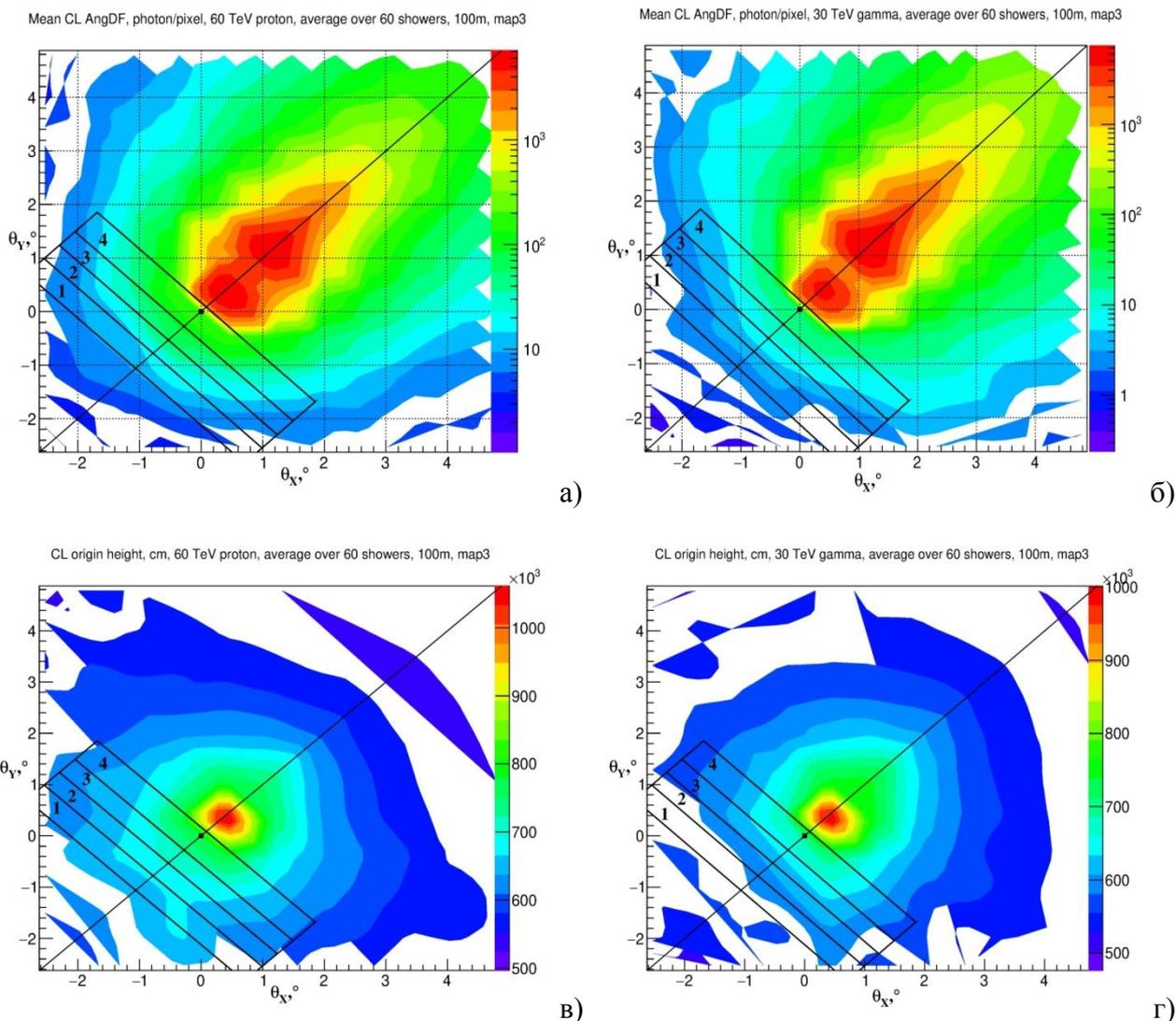
60 ҳодисаи амудӣ барои баландии 4250 м тавассути коди CORSIKA6.990/QGSJET01 барои гамма квантҳо ва протонҳои энергияшон мутаносибан 30 ва 60 ТэВ моделсозӣ гардиданд. Натиҷаи ҳисобҳо доғҳо рӯшноии черенковие гаштанл, ки ба майдони биниши

телескопи андозаи пикселаш $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ меафтанд ва харитаи баландии миёнаи афканишот ба ҳар як ҳамон пикселҳо гардиданд.

Тасвирҳои инфиродӣ ва харитаҳои баландии афканишот аз ҳад зиёд флукутуатсия доранд, баинобар ин тасвирҳои миёна ва харитаи миёнаи баландиҳои афканишот сохта шуданд, инчунин майли миёнаи квадрати ин бузургӣҳо низ ҳисоб карда шуд (Расмҳои 14 ва 15).



Расми 11. - а) тасвири миёнакардашудаи рӯшноии черенковии протонҳо 60 ТэВ; б) тасвири миёнакардашудаи рӯшноии черенковии гамма-квантҳои 30 ТэВ. в) баландии миёнаи афканиши рӯшноии черенковӣ барои протонҳои 60 ТэВ; г) баландии миёнаи афканиши рӯшноии черенковӣ барои гамма-квантҳо 30 ТэВ. Дар ҳама ҳолатҳо масофа аз меҳвари сел то телескоп 50 м аст. Росткунҷаҳо соҳаи интегронири нишон медиҳанд. Дар ҳолати мазкур, таносуби интегралҳои росткунҷаи 1 ба интегралҳои росткунҷаи 3 критерияе мебошад, ки чудосозии зиёдтаринро медиҳад



Расми 12. - а) тасвири миёнакардашудаи рӯшноии черенковии протонҳо 60 ТэВ; б) тасвири миёнакардашудаи рӯшноии черенковии гамма-квантҳои 30 ТэВ. в) баландии миёнаи афканиши рӯшноии черенковӣ барои протонҳои 60 ТэВ; г) баландии миёнаи афканиши рӯшноии черенковӣ барои гамма-квантҳо 30 ТэВ. Дар ҳама ҳолатҳо масофа аз меҳвари сел то телескоп 100 м аст. Росткунчаҳо соҳаи интегронино нишон медиҳанд. Дар ҳолати мазкур, таносуби интегралҳои росткунҷаи 2 ба интегралҳои росткунҷаи 4 критерияе мебошад, ки чудосозии зиёдтаринро медиҳад

Тафсири сабаби самаранокии критерияҳои оптималӣ аз нигоҳи мо чунин аст: соҳаҳои интегрони доғи черенковӣ дар натиҷаи ҷустуҷӯ чунин интиҳоб гардид, ки сурат ва маҳраҷи критерия рӯшноиро аз баландиҳои гуногун, аз ҳолати тамоман гуногуни инкишофи сел қабул мекунанд, бинобар ин фарқияти хати қасқадии табиаташон гуногун ба ҳисоби миёна ба қиматҳои гуногун меоранд. Азбаски флукуатсияҳои қасқадӣ бузург ҳастанд, флукуатсияи тасвирҳо низ бузург мешаванд ва ҳатто критерияҳои оптимизатсияшуда наметавонанд ҳодисаҳоро ба пуррагӣ ҷудо созанд.

Ба андешаи мо таҳлили минбаъдаи харитаи баландии афканиш аз нигоҳи ҷустуҷӯи соҳаи оптималии интегронӣ ва барои сохтани критерияҳо бо иштибоҳоти ками тасниф пурбор хоҳад буд. Ҳамчунин, критерияҳои ба ин монанд аз тарафи мо барои таҳлили таркиби

массавии нурҳои кайҳонии диапазони 1 — 100 ПэВ таҳия шуда буд. Барои беҳтар шудани ин усул роҳи пешниҳоднамудаи таҳлили харитаи баландиҳои афканиш манфиатнок хоҳад буд.

Дар **охири боби сеюм** баҳододи вақти мушоҳидаи баъзе гамма-манбаъҳо тавассути қисми оптикии «Помир-XXI» дар сурати истифодаи усули пешниҳодшуда оварда шудаанд.

Дар **фасли 3.4** таҷҳизоти оптикии «Помир-XXI» ва имкониятҳои усули пешниҳодшудаи коркарди маълумот бо маълумоти нашршудаи лоиҳаи «ТАЙГА» муқоиса карда мешавад. Фарқияти асосии байни детекторҳо ва тарчи ҷойгиршавии онҳо оварда шудааст. Муқоисаи омили фурӯнишони фони адронӣ Q ва чудосозии кунҷӣ ба манфиати «Помир-XXI» аст: $Q=200-500$ ва $\delta\theta < 0.1^\circ$ муқобили $Q=2-100$ ва $\delta\theta > 0.1^\circ$ дар қисмати оптикии «ТАЙГА». Ҳамчунин дар ин боб қадвали муқоиса бо маълумоти таҷҳизоти гамма астрономии дигар оварда шудааст.

Дар **хулосаи** диссертатсия натиҷаҳо ва хулосаҳои асосии кори анҷомшуда оварда шудааст:

Натиҷа ва хулосаҳои асосии кори диссертатсионӣ:

1. Барои варианти интихобшуда қисми оптикии «Помир-XXI» ҳангоми истифодаи усули пешниҳодшудаи коркарди маълумот: саҳеҳияти муайян кардани мавқеи меҳвари сел барои энергияҳои 30 ТэВ ва аз он зиёд 1-2 м аст; саҳеҳияти муайян кардани самти омадани сел барои тамоми навъи зарраҳо ва энергияҳои аз 30 ТэВ боло беҳтар аз 0,1 градус аст; саҳеҳияти баҳододи энергия барои гамма квантҳо 10% ва барои протонҳо 20% -ро ташкил медиҳад [1-М, 2-М, 3-М, 8-М, 9-М].
2. Иловаи фони осмони ситоразор ва гузариш ба фотоэлектронҳо сифати баҳодоро паст намекунанд [2-М, 3-М, 4-М, 9-М].
3. Фурӯнишони фони протонӣ дар натиҷаи таҳлили тақсимои кунҷии рӯшноии черенковӣ зиёда аз 99% буда, дар ин ҳол миқдори зерини ҳодисаҳо ҳифз мешаванд: барои чуфти гамма 30 ТэВ — протон 60 ТэВ 60% гамма дар масофаи 50м, 35% гамма дар масофаи 100м; барои чуфти гамма 50 ТэВ — протон 100 ТэВ 65% гамма дар масофаи 50м, 42% гамма дар масофаи 100м аз меҳвари сел; баратарафсозии иловагии фони селҳои адрониро аз манбаъҳои нуқтавӣ аз ҳисоби чудосозии кунҷӣ ба даст овардан мумкин аст [1-М, 2-М, 4-М, 7-М, 8-М, 10-А].
4. Таҳлили баландиҳои афканиши фотонҳои черенковӣ имкон медиҳад, ки механизми кори критерияҳои ёфташдаи чудосозии гамма селҳоро аз фони ҳодисаҳои протонӣ шарҳ диҳем: критерияҳо интенсивияти рӯшноии черенковии аз баландиҳои гуногун меомадаро муқоиса мекунанд [2-М, 4-М].
5. Усули пешниҳодшудаи таҳлили рӯшноии черенковии СВА-ро метавон ҳам барои беҳтарсозии критерияҳои чудосозии гамма селҳо дар гамма астрономияи черенковӣ ва ҳам барои беҳтар шудани чудосозии СВА аз рӯи массаи ҳастаҳои ибтидоии нурҳои кайҳонии фавқулбаландэнергия истифода бурдан мумкин аст [2-М, 7-М, 10-М].

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳо:

Натиҷаҳои таҳқиқоти мазкур барои банақшагири, лоиҳакашӣ ва сохтани дастгоҳҳои баландкӯҳӣ доир ба таҳқиқи нурҳои кайҳонии баланд ва фавқулбаландэнергия муфид аст.

Усули чудосозии гамма-квантҳои баландэнергия барои ҳалли масъалаҳои гамма-астрономӣ дар дастгоҳҳои таҷрибавии муосир манфиат дорад.

Ҳазинаи ҳодисаҳои сунъии сохташударо дар раванди таълим ва гузаронидани корҳои илмию таҳқиқотӣ байни донишҷӯён ва аспирантони муассисаҳои таҳсилоти олии истифода кардан мумкин аст.

Изҳори миннатдорӣ. Муаллиф ба роҳбари илмӣ профессор В. И. Галкин барои пешниҳоди мавзӯи муҳим, таваҷҷӯҳи доимӣ, машварат ва роҳнамоӣ барои таҳқиқот, ба Президенти АМИТ академик Ф. Раҳимӣ барои дастгирии ҳамачониба дар замони таҳсил ва раванди таҳқиқот, ба академики равоншод Х. Муминов, профессорон Д. Қ. Солиҳов ва Б. И. Махсудов барои дастгири ва таваҷҷӯҳ ба кори мазкур изҳори миннатдорӣ менамояд.

РҶҲАТИ ИНТИШОРОТИ МУАЛЛИФ ДОИР БА МАВЗҶИ ДИССЕРТАТСИЯ:

[1-М] 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. DOI: [10.1051/epjconf/201614515004](https://doi.org/10.1051/epjconf/201614515004) – Impact factor: 0.347 (2018);

<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85021894200&origin=inward&txGid=eb559fbc82e55138e54d1653b6827e1a>

[2-М] **Bakhromzod, R.** The search and analysis of optimal criteria for the selection of extensive air showers from γ -quanta by Cherenkov telescopes / R.Bakhromzod, V.I.Galkin // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. – 2021. – Vol. 1018. – P. 165842. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165842](https://doi.org/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-s2.0-85048585998&origin=inward&txGid=59ac8beccf1a2b12b10487fcbfc5a363>

[3-М] **Баҳромзод, Р.** Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от γ -квантов / Р. Баҳромзод, В.И. Галкин // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2018. – № 3. – 1830203.

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

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

[6-М] Галкин, В.И. Анализ возможностей выделения событий от первичных гамма-квантов сверхвысокой энергии по показаниям оптических детекторов и угловых черенковских телескопов установки Памир-XXI / В.И. Галкин, **Р. Баҳромзод** // Материалы республиканской конференции по ядерно-физическим методам анализа состава биологических, геологических, химических и медицинских объектов, Душанбе: издательство Таджикский национальный университет. – с. 157-167. 2014. – 271 с.

[7-М] Галкин, В.И. Оценка параметров первичной частицы шал комплексной установкой Памир-XXI / В.И. Галкин, А.С. Борисов, **Р. Баҳромзод**, В.В. Батраев, С.З. Латипова, А.Р.

Мукумов // Материалы V Международной конференции «Современные проблемы физики», посвящённой 25-летию государственной независимости Республики Таджикистан. Душанбе: Дониш, с. 69-74. 2016.

[8-М] Бахромзод, Р. Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от γ -квантов / Р. Бахромзод, В.И. Галкин // Материалы VI Международной конференции «Современные проблемы физики», посвящённой 110-летию академика Академии наук Республики Таджикистан С.У. Умарова и 90-летию академика Академии наук Республики Таджикистан А.А. Адхамова. Душанбе, «Эр-граф», с. 36-38, 2018. – 320 стр.

[9-М] Бахромзод Р. Поиск оптимальных критериев для выделения событий от гамма-квантов на фоне протонных ливней // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2018. ISBN 978-5-317-05800-5

[10-М] Бахромзод Р. Метод изучения космических лучей очень высокой энергии // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2017. ISBN 978-5-317-05504-2

[11-М] Бобочонов, И. Эксперименти Помир: таърихи 50 сола ва дурнамои он / И.Бобочонов, Р. Бахромзод, А. Мукумов, Қ. // Маводҳои Симпозиуми физикони тоҷикистон бахшида ба 85-солагии академик Р. Марупов. Душанбе: нашриёти «Дониш». 2022. – 201 с.

Рӯйхати адабиёти истифодашуда

- [1] Rieger, Frank M. TeV astronomy / Frank M. Rieger, Emma de Oña-Wilhelmi, Felix A. Aharonian // *Frontiers of Physics*, – 2013. – V. 8. № 6, – P. 714-747.
- [2] Chadwick, P.M. TeV gamma-ray astronomy / P.M. Chadwick, I.J. Latham and S.J. Nolan // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, т. 35, № 3, 2008.
- [3] Sinitsyna, V.G. Very High Energy Astrophysics with the SHALON Cherenkov Telescopes / V.G. Sinitsyna, V.Y. Sinitsyna, S.S. Borisov, A.I. Klimov, R.M. Mirzafatikhov, N.I. Moseiko // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, –2020. –V. 952 – 161775.
- [4] 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. 379-395.
- [5] Bartoli, B. Observation of TeV gamma rays from the Cygnus region with the ARGO-YBJ experiment / B. Bartoli et al. // *The Astrophysical Journal*, –2012. – V. 745, – № 2, – P. L22.
- [6] Konopelko, A. The TeV energy spectrum of Markarian 421 measured in a high flaring state / A. Konopelko et al. // *The Astrophysical Journal*. – 2008. –V. 679. – № 1, – P. L13-L15.
- [7] Dzhappuev, D.D. Search for astrophysical PeV gamma rays from point sources with Carpet-2 / D.D. Dzhappuev, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, I.S. Karpikov et al // *EPJ Web of Conf.* – 2019. – V. 207. – 03004.
- [8] Falcone, A. D. A search for TeV gamma-ray emission from high-peaked flat-spectrum radio quasars using the Whipple Air Cerenkov Telescope / A. D. Falcone et al. // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – V. 613. – № 2. – P. 710-715.
- [9] Aharonian, F.A. A new population of very high energy gamma-ray sources in the Milky Way / F.A. Aharonian (for the H.E.S.S. Collaboration) // *Science*. –2005. — V. 307. – P. 1938-1942.

- [10] Aharonian, F. Discovery of very-high-energy γ -ray emission from the vicinity of PSR J1913+1011 with HESS / F. Aharonian, et al. // *Astronomy and Astrophysics*. –2008. – V. 484. – № 2, – P. 435-440.
- [11] Гинзбург, В. Л. Гамма-астрономия и космические лучи / В. Л. Гинзбург // *УФН*. – 1972. – Т. 108. – № 2.
- [12] Atwood, W. B. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission / W. B. Atwood et al. // *The Astrophysical Journal*. –2009. – V. 697. – № 2. – P. 1071-1102.
- [13] Di Mauro, M., Deriving the Contribution of Blazars to the Fermi-LAT Extragalactic γ -ray Background at $E > 10$ GeV with Efficiency Corrections and Photon Statistics / Di Mauro, M., Manconi, S., Zechlin, H.-S., Ajello, M., Charles, E., Donato, F. // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – V. 856. – № 2. – P. 106-118.
- [14] Tanada, K. The origins of the gamma-ray flux variations of NGC 1275 based on 8 years of Fermi-LAT observations / K. Tanada, J. Kataoka, M. Arimoto, M. Akita, C. C. Cheung, S. W. Digel, Y. Fukazawa // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – V. 860. – № 1. – P. 74-84.
- [15] Мурзин, В.С. Астрофизика космических лучей / В.С. Мурзин. – М.: Логос, 2007. – 488 с.
- [16] Auger, P. Extensive Cosmic-Ray Showers / P. Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, Robley A. Fréon // *Reviews of Modern Physics*. – 1939. – No. 11. – Pp. 288-291.
- [17] Добротин, Н.А. Широкие атмосферные ливни космических лучей / Н.А. Добротин, Г.Т. Зацепин, И.Л. Розенталь, Л.И. Сарычева, Г.Б. Христиансен, Л.Х. Эйдус // *УФН*. – 1953. – Т. 49. – № 2. – С. 185-242.
- [18] Borisov, A.S. Modern status of the PAMIR-XXI Project / A.S. Borisov, V.I. Galkin, M.I. Polov, R.A. Mukhamedshin, H.H. Muminov, V.S. Puchkov, O. Saavedra // *33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2013*. – Pp. 0953.
- [19] 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.

АННОТАТСИЯИ

рисолаи илмии Ризои Баҳромзод дар мавзӯи «Рушди усулҳои чудосозии селҳо аз γ -квантҳои энергияшон беҳад баланд аз рӯи маълумоти детекторҳои черенковии таҷҳизоти баландкӯҳӣ» барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои физика ва математика аз рӯи ихтисоси 01.04.01 – «Асбобҳо ва методҳои физикаи таҷрибавӣ»

Калимаҳои калидӣ: нурҳои кайҳонӣ, гамма-астрономия, селҳои васеи атмосферӣ, нури черенковӣ, детектор ва телескопҳои черенковӣ, моделсозӣ, усули бақайдгирӣ.

Мақсади таҳқиқот: коркард ва асосноксозии физикии усули нави чудосозии гамма-квантҳо дар фони селҳои протонч дар эксперименти ададӣ; дида баромадани варианти аниқи усул барои истифодаи амалӣ дар таҷрибаи «Помир-XXI».

Объекти таҳқиқоти кори мазкур мушаххасаҳои гуногуни рӯшноии черенковии СВА дар баландии ~ 4250 м аз сатҳи баҳр мебошад.

Предмет (мавзӯ)-и таҳқиқот усулҳои бақайдгирӣ ва коркарди қулайи ин мушаххасаҳо барои ба даст овардани баҳододи самараноки мушаххасаҳои зарраи ибтидоии СВА мебошад.

Усулҳои таҳқиқот, дастгоҳҳои истифодашуда: натиҷаҳои асосии дар кори диссертатсион пешниҳодшуда бо ёрии усулҳои моделсозии статистикӣ ба даст омадаанд. Ҳангоми моделсозӣ пакети машҳури CORSIKA истифода шуда, ҳангоми коркарди маълумотҳо аз воситаҳои барномавии стандартии CERN (MINUIT, ROOT) ва усулҳои ададии эътирофшуда истифода шудаанд.

Натиҷаҳои ҳосилнамуда ва навгониҳои он:

- Дар асоси таҳлили моделсозии статистикӣ усули нав барои бақайдгирии рӯшноии черенковӣ тавассути таҷҳизоти омехта пешниҳод шудааст, ки имкон медиҳад, ки мушаххасаҳои ибтидоии СВА муайян карда шаванд (энергияи ибтидоӣ E_0 , самти омадан Θ ва мавқеи меҳвар x_0 ва y_0).
- Механизми фаъолияти критерияҳои чудосозии гамма-селҳо дар байни фони протонӣ муайян карда шуд.
- Алгоритми чудосозии селҳои чахишхӯрда дар асоси ҳосияти рӯшноии черенковӣ ва бо таъя ба нишондодҳои детекторҳои оптикӣ дарёфт гардид.

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳо:

- Усули пешниҳоднамудаи таҳқиқи рӯшноии черенковии СВА-ро метавон ҳам барои беҳтарсозии критерияи чудосозии селҳои гамма дар гамма-астрономияи черенковӣ ва ҳам барои беҳтарсозии чудосозии СВА аз рӯи массаи ҳастаҳои ибтидоӣ хангоми таҳқиқи нурҳои кайҳонии фавқулбаландэнергия истифода бурд;
- Таҳлили омилҳои коршоямии критерияҳои дарёфтгардида барои беҳтарсозии критерияҳои чудосозии гамма-ҳодисаҳо замина месозанд;
- Усули омехтаи аниқи таҳлили тақсмоти кунҷӣ ва фазоиву вақтии рӯшноии черенковии СВА барои таҷҳизоти баландкӯҳ коркард гардид.

Соҳаи истифодабарӣ: физикаи нурҳои кайҳонӣ, физикаи зарраҳои бунёдӣ, гамма-астрономия.

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Ризои Бахромзода, на тему
«Развитие методов выделения ливней от γ -квантов очень высокой энергии по данным черенковских детекторов высокогорных установок», представленной на соискание
ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Ключевые слова: космические лучи, гамма-астрономия, широкие атмосферные ливни, черенковский свет, черенковские детекторы и телескопы, моделирование, метод регистрации.

Цель исследования: разработка и физическое обоснование нового метода выделения гамма-квантов на фоне протонных ливней в численном эксперименте; рассмотрение конкретного варианта метода для практического применения в эксперименте Памир-XXI.

Объектом исследования в настоящей работе являлись различные характеристики черенковского света ШАЛ на высоте ~ 4250 м над уровнем моря.

Предметом исследования являлись способы регистрации и оптимальной обработки этих характеристик для получения эффективных оценок параметров первичной частицы ШАЛ.

Методы исследования, использованная аппаратура: основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены с помощью методов статистического моделирования. При моделировании использовался широко используемый пакет CORSIKA, при обработке результатов использовались стандартные программные инструменты CERN (MINUIT, ROOT) и процедуры, реализующие общепризнанные численные методы.

Полученные результаты и их новизна:

- Была предложена новая методика для гибридной установки, предназначенной для регистрации черенковского света, которая позволяет определять первичные параметры ШАЛ (первичная энергия E_0 , направление прихода Θ , положение оси x_0 и y_0) и эффективно выделять γ -кванты из фона протонных событий.
- Были найдены физические причины работоспособности методики отбора γ -квантов на основании анализа данных статистического моделирования;
- Был найден алгоритм исключения проскочивших ливней, использующий свойства черенковского света ШАЛ и основывающийся на данных оптических детекторов.

Рекомендации по практическому использованию результатов:

- предлагаемый способ анализа черенковского света ШАЛ может быть использован как для совершенствования критерия отбора гамма-ливней в черенковской гамма-астрономии, так и для улучшения разделения ШАЛ по массам первичных ядер при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий;
- анализ физических причин работы найденных критериев создает основу для дальнейшего совершенствования критериев отбора гамма-событий;
- разработана конкретная гибридная методика анализа угловых и пространственно-временных распределений ЧС ШАЛ для высокогорных установок.

Область применения: физика космических лучей, физика элементарных частиц, гамма-астрономия.

ANNOTATION

of the dissertation Rizoi Bakhromzod on theme «Development of methods for the selection of super high energy gamma-showers using the data of Cherenkov detectors of high mountain set-up», presented for the degree of candidate of physical and mathematical sciences on specialty as of 01.04.01 – «Instruments and methods of experimental physics»

Keywords: cosmic rays, gamma-ray astronomy, extensive air showers, Cherenkov light, Cherenkov detectors and telescopes, simulation, registration method.

Purpose of the work: development and physical justification of a new method for separating gamma quanta against the background of proton showers in a numerical experiment; consideration of a specific version of the method for practical application in the Pamir-XXI experiment.

Objects of research in this work was various characteristics of EAS Cherenkov light at an altitude of ~4250 m above sea level.

The subject of the study was the methods of recording and optimal processing of these characteristics in order to obtain effective estimates of the parameters of the EAS primary particle.

Research methods, equipment used: the main results presented in the dissertation work were obtained using statistical modeling methods. The widely used CORSIKA package was used in the simulation, while the results were processed using standard CERN software tools (MINUIT, ROOT) and procedures that implement generally recognized numerical methods.

The results obtained and their novelty:

- A new technique was proposed for a hybrid setup designed to detect Cherenkov light, which makes it possible to determine the primary parameters of EAS (primary energy E_0 , direction of arrival Θ , position of the x_0 and y_0 axes) and efficiently extract γ -quanta from the background of proton events.
- The physical reasons for the efficiency of the γ -quantum selection technique were found based on the analysis of statistical modeling data;
- An algorithm was found to eliminate the overhead showers, which uses the properties of EAS Cherenkov light and is based on data from optical detectors.

Recommendations about practical use of results:

- The proposed method for analyzing EAS Cherenkov light can be used both to improve the selection criterion for gamma showers in Cherenkov gamma astronomy, and to improve the separation of EASs by the masses of primary nuclei in the study of ultrahigh-energy cosmic rays;
- analysis of the physical reasons for the work of the found criteria creates the basis for further improvement of the criteria for selecting gamma events;
- a specific hybrid method for analyzing the angular and spatiotemporal distributions of EAS CR for high-mountain installations has been developed.

Application area: cosmic ray physics, elementary particle physics, gamma astronomy.