НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени С.У. УМАРОВА

На правах рукописи

УДК: 524.1

РУСТАМЗОДА АЪЗАМ РУСТАМ
(МУКУМОВ АЪЗАМ РУСТАМОВИЧ)

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКОГОРНЫХ УСТАНОВОК

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.00 – Физика
(01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики)

Душанбе-2025

Работа выполнена в Международном центре ядерно-физических исследований Физико-технического институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

Научный руководитель:	**Галкин Владимир Игоревич,** доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики космоса физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова
Официальные оппоненты:	**Махсуд Барот Исломзода,** доктор физико-математических наук, профессор кафедры ядерной физики физического факультета Таджикского национального университета
	Пятовский Сергей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент, высококвалифицированный научный сотрудник лаборатории астрофизики космических лучей Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук
Ведущая организация:	**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт ядерных исследований Российской академии наук"**

Защита диссертации состоится 02 октября 2025 г. в 14^{00} часов на заседании 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 «_____» _____2025 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор философии (PhD) **Каюмов М.М**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Изучение первичных космических лучей (ПКЛ) — одно из фундаментальных направлений современной астрофизики и физики высоких энергий. Вопросы их происхождения, механизмов ускорения и химического состава продолжают оставаться открытыми, несмотря на многолетние экспериментальные усилия. Массовый состав ПКЛ, в особенности в энергетической области 10^{17}–10^{18} эВ, где предполагается переход от галактического к внегалактическому компоненту, представляет собой ключ к пониманию природы космического излучения. Однако, при энергиях выше 10^{15} эВ прямая регистрация первичных частиц невозможна, и единственным источником информации остаются характеристики широких атмосферных ливней (ШАЛ), индуцированных этими частицами при их взаимодействии с атмосферой Земли. Современные методы определения массы первичной частицы основаны на косвенных параметрах: глубине максимума развития каскада X_{max}, числе мюонов N_μ и их соотношении с электронно-фотонной компонентой. Тем не менее, в диапазоне энергий 10^{17}–10^{18} эВ данные параметры демонстрируют ограниченную чувствительность и высокую степень неопределённости. Например, различие средних значений X_{max} между протонными и железными ливнями составляет около 100 г/см², но стандартное отклонение для протонных событий достигает 60–70 г/см², что ведёт к значительному перекрытию распределений. Как следствие, вероятность ошибочной классификации массы события на основе X_{max} может превышать 35–40 % даже в условиях современных обсерваторий, таких как обсерватории Пьера Оже [1] и Telescope Array (TA) [2]. Дополнительные сложности возникают из-за сильной зависимости указанных параметров от выбора модели адронного взаимодействия. Переход от одной модели к другой (например, от QGSJET01 к QGSJET-II-04) может привести к изменению среднего значения $\langle \ln A \rangle$ на величину до 1.0, что

эквивалентно смещению между классами ядер (например, от азота к железу). Кроме того, существует так называемая «проблема мюонного дефицита»: расчётные значения N_μ, полученные на основе существующих моделей, систематически недооцениваются по сравнению с экспериментальными данными, причём расхождения могут достигать 30–50 %. Совокупная неопределённость при определении массы первичной частицы, обусловленная как флуктуациями развития ливня, так и модельной зависимостью, остаётся на уровне 30–40 %, что ограничивает точность восстановления химического состава ПКЛ. Указанные обстоятельства актуализируют необходимость разработки новых подходов к задаче идентификации массы первичных частиц, обладающих следующими качествами:

- высокой чувствительностью к массовому числу ядра;
- устойчивостью к выбору модели адронных взаимодействий;
- применимостью в реальных условиях наземных и высокогорных установок;
- низкой зависимостью от абсолютной калибровки числа частиц.

Особый интерес представляет использование пространственно-угловой структуры мюонной компоненты ШАЛ — одного из наименее флуктуирующих и наиболее информативных индикаторов природы первичной частицы. В условиях высокогорья, где ливни регистрируются на более ранних стадиях развития, возможна реализация подхода, основанного на анализе формы углового распределения мюонов. Разработка такого подхода отвечает не только задачам идентификации массы ПКЛ, но и способствует улучшению энергетической реконструкции, уточнению модели распространения и ускорения частиц, а также служит необходимым элементом для построения гибридных экспериментальных комплексов нового поколения (в том числе в рамках проекта «Памир-XXI» [3] [4]). Решение данной задачи

требует объединения методов численного моделирования, анализа экспериментальных данных и оптимизации параметров установки. В данной работе предложен и реализован метод классификации первичных частиц на основе анализа формы углового распределения мюонов, формирующегося в процессе развития широкого атмосферного ливня. В отличие от традиционных методов, ориентированных на абсолютное количество мюонов, данный подход использует информацию о пространственной структуре потока мюонов, которая обусловлена особенностями развития каскада начиная с первого взаимодействия первичной частицы и сохраняется благодаря высокой проникающей способности мюонов. Это позволяет минимизировать влияние модельных и каскадных флуктуаций и получить новый информативный параметр, пригодный для массовой идентификации первичных частиц в диапазоне энергий 10^{17}–10^{18} эВ.

Степень изученности исследуемой темы. Исследование массового состава ПКЛ представляет собой одну из наиболее продолжительных и активно развивающихся задач астрофизики высоких энергий. Уже с середины XX века (эксперименты Volcano Ranch, Якутская установка, Haverah Park) стало очевидно, что знание элементного состава ПКЛ критично для понимания природы их происхождения и механизмов ускорения. Однако, несмотря на существенный прогресс в технологиях регистрации и обработки данных, данный вопрос по-прежнему остаётся открытым в диапазоне энергий выше ~10^{15} эВ. Современные подходы к определению массы первичной частицы ШАЛ базируются преимущественно на двух основных признаках: глубине максимума развития X_{max} и общем числе мюонов N_{μ}. Использование этих параметров реализовано в крупнейших действующих экспериментах, таких как обсерватории Пьера Оже [5], TA [6], KASCADE-Grande [7] и других. Однако результаты, полученные с применением этих признаков, демонстрируют значительные расхождения при

использовании различных моделей адронных взаимодействий (например, QGSJET01, QGSJET-II-04, EPOS-LHC), что указывает на методологическую уязвимость [8].

Основные источники неопределённостей включают:

– флуктуации развития каскада, приводящие к наложению распределений X_{max} для различных ядер;
– слабую чувствительность параметров (особенно X_{max}) при переходе от средних к тяжёлым ядрам;
– высокую модельную зависимость предсказаний, особенно в области ультравысоких энергий (UHECR), где экспериментальных данных о ядерных взаимодействиях нет.

При энергиях порядка 10^{17}–10^{18} эВ, где предполагается переход от галактических к внегалактическим компонентам, текущие методы классификации по массе демонстрируют ошибки порядка 30–40 % [9] [10]. Даже при оптимизации по модели классификаторы, основанные на X_{max} и N_{μ}, обеспечивают достоверность не выше 65–70 %, а при переходе между моделями точность резко падает. Это существенно ограничивает возможности по восстановлению состава потока, а также приводит к неоднозначным интерпретациям положения спектральных особенностей, таких как "колено" и "лодыжка". Отдельные работы рассматривают альтернативные признаки, включая распределения плотности мюонов по радиусу, угловое распределение на уровне моря [11], а также коррелированные признаки, полученные в рамках методов машинного обучения [12]. Однако большинство из них либо требуют масштабных данных, либо страдают от низкой интерпретируемости результата. Кроме того, систематические погрешности, связанные с модельной зависимостью, сохраняются. В этой связи особую актуальность приобретают признаки, обладающие высокой устойчивостью к выбору модели адронных взаимодействий. Одним из перспективных направлений является анализ формы углового распределения мюонов — параметра, отражающего пространственную структуру мюонной

компоненты, формирующуюся в ходе развития каскада начиная с первого взаимодействия первичной частицы. Несмотря на теоретическое обоснование чувствительности угловых характеристик к глубине развития и, следовательно, к массе ядра, систематическое применение этого признака в задаче массовой классификации ранее не реализовывалось. Имеющиеся работы носят фрагментарный характер и ограничиваются качественным анализом распределений [13]. Предлагаемая в настоящем исследовании методика использует интегральные характеристики углового распределения мюонов, что позволяет построить масштабно-инвариантные признаки (отношения интегралов), минимизирующие модельную зависимость. Проведённое численное моделирование показало, что даже при смене модели (QGSJET01 → QGSJET-II-04) точность классификации по таким признакам снижается не более чем на 3–5 %., что существенно ниже, чем при использовании X_{max} или N_{μ}. Разработка признаков, основанных на угловой структуре мюонного фронта, представляет собой новое направление в области ШАЛ-методов, которое имеет потенциал для повышения достоверности выводов о составе космических лучей в критически важной области энергий.

Связь исследования с государственными программами и научной тематикой. Работа ориентирована на выполнение мероприятий, предусмотренных Планом действий на 2020–2025 годы, в рамках объявленного периода 2020–2040 годов как «Двадцатилетие изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере образования и науки», утверждённого Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июля 2020 года №427.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является разработка и численное обоснование оптимальных методик восстановления первичных параметров ШАЛ в условиях высокогорных установок, с особым акцентом на определение энергии,

направления прихода и массы первичной космической частицы на основе анализа пространственно-временной структуры фронта заряженных частиц, а также углового распределения мюонов.

Задачи исследования:

1. Провести численное моделирование ШАЛ в диапазоне энергий $E_0 \sim 1$ ПэВ – 1 ЭэВ в условиях высокогорной установки с использованием современных адронных моделей (QGSJET01, QGSJET-II-04).
2. Оценить точность восстановления первичных параметров (энергии, направления, координат оси) на основе данных от сети детекторов заряженных частиц, включая анализ влияния конфигурации сетки и порогов регистрации.
3. Разработать процедуру определения первичной энергии ливня на основе интегральных характеристик плотности заряженных частиц, с учётом пространственно-временной структуры ливня и флуктуаций развития.
4. Исследовать чувствительность углового распределения мюонов к массе первичной частицы и определить наиболее информативные диапазоны углов регистрации мюонов для задач классификации.
5. Построить классифицирующие признаки, основанные на интегралах от углового распределения мюонов по выделенным угловым интервалам, и оценить их эффективность для разделения пар первичных ядер (p–N, N–Fe) в заданных конфигурациях.
6. Сравнить эффективность предложенных признаков при использовании различных адронных моделей, установить степень их устойчивости к модельным неопределённостям и определить диапазон энергий и расстояний от оси, при которых достигается наименьшая вероятность ошибочной классификации.
7. Разработать универсальные критерии, позволяющие классифицировать события без подбора параметров под

конкретную модель или конфигурацию, и провести их тестирование на независимых выборках.

Объектом исследования являются ШАЛ, инициируемые первичными космическими лучами в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 1 ЭэВ, и регистрируемые средствами наземных установок в условиях высокогорья.

Предметом исследования являются методики и алгоритмы определения первичных параметров ШАЛ — в первую очередь, энергии, направления прихода и массы первичной частицы — на основе анализа пространственно-временной структуры фронта заряженных частиц и углового распределения мюонов, регистрируемых специализированными детекторами. Особое внимание уделяется построению модельно-устойчивых признаков, чувствительных к массе первичной частицы и пригодных к использованию в реальных установках при наличии экспериментальных и теоретических неопределённостей.

Научная новизна исследования

1. Разработана новая методика реконструкции параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня, основанная на моделировании поперечного распределения и временного фронта заряженных частиц, регистрируемых сетями детекторов в условиях высокогорных установок. Метод обеспечивает повышенную точность восстановления энергии, направления прихода и координат оси ливня при энергиях $E_0 \geq 1$ ПэВ.
2. Предложен и обоснован новый классифицирующий признак для оценки массы первичной частицы на основе интегральных характеристик углового распределения мюонов, что позволило впервые реализовать устойчивое разделение ядер по массе на три группы (лёгкие, средние, тяжёлые) в энергетическом диапазоне 100 ПэВ – 1 ЭэВ.
3. Показана устойчивость разработанных признаков к выбору модели адронного взаимодействия. Проведённое сравнение на моделях QGSJET01 и QGSJET-II-04 показало, что изменение

модели приводит к отклонению вероятности классификационной ошибки не более чем на 3–5 процентных пунктов, что подтверждает универсальность метода в рамках существующих теоретических подходов.

4. Впервые построены универсальные критерии классификации событий, обеспечивающие разделение протон-азот и азот-железо при одном и том же пороговом значении признака, без необходимости адаптации под конкретную модель или расстояние до оси ливня. Это обеспечивает практическую применимость метода в условиях неопределённости конфигурации установки.
5. Разработаны рекомендации для проектирования высокогорных детекторных систем, включая оптимальные расстояния до трекеров (>100 м), угловое разрешение (не хуже 0.2°) и площадь мюонного трекера (не менее 400 м²), необходимые для реализации предложенного подхода на практике.

Основные положения, вносимые на защиту:

1. Методика реконструкции энергии, направления и положения оси ШАЛ на основе параметризации поперечного распределения плотности и временного фронта заряженных частиц, адаптированная к условиям высокогорных установок (высота наблюдения ~4250 м), с учётом флуктуаций развития ливня и порогов регистрации.
2. Оптимальная конфигурация сети детекторов заряженных частиц (сетка 11×11 с шагом 15м), обеспечивающая высокую точность восстановления первичных параметров ШАЛ при энергии $E_0 \geq 1$ ПэВ, с учётом порогов регистрации ≥5 частиц и энерговыделения ≥20 МэВ в каждом детекторе.
3. Принципиально новый метод оценки массы первичной частицы на основе анализа углового распределения мюонов, зарегистрированных трекером, включая вычисление интегралов по угловым интервалам α и построение

классифицирующих признаков вида $k_{ij} = S_i/S_j$, инвариантных к нормировке распределения.

4. Классификация первичных частиц по массе (p–N, N–Fe) в диапазоне энергий 10^{17}–10^{18} эВ с точностью до 65–70 % при разделении на смежные классы, а также с возможностью трёхгруппового разделения (лёгкие, средние, тяжёлые ядра), основанного на параметрах формы мюонного фронта.
5. Универсальные критерии классификации, независимые от модели адронного взаимодействия и расстояния до оси, обеспечивающие минимальную вероятность ошибки ($P_{err} \approx$ 30–35 %) при одновременном применении к событиям, сгенерированным на моделях QGSJET01 и QGSJET-II-04.
6. Рекомендации по реализации метода в экспериментальных условиях, включая требования к площади мюонного трекера (≥400 м²), угловому разрешению (≤0.2°) и положению трекера (R = 100–150 м от оси ливня), обеспечивающие необходимую точность классификации при практическом применении.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке и обосновании новых подходов к анализу данных ШАЛ, направленных на более точное восстановление параметров первичной космической частицы. Предложенная методика реконструкции энергии, направления и координат оси ливня основана на параметризации поперечного распределения плотности заряженных частиц и временного фронта, что позволяет учитывать физические особенности развития каскада в условиях высокогорных станций. Разработанная модель обладает высокой степенью обобщённости и может быть адаптирована к различным типам детекторных установок. Впервые разработан и реализован метод классификации массы первичных частиц на основе анализа формы углового распределения мюонов. Использование относительных параметров — интегралов по угловым диапазонам и их отношений — позволяет существенно снизить влияние систематических погрешностей, связанных с выбором

модели адронных взаимодействий. Это открывает возможность более надёжного выделения групп частиц (лёгкие, средние, тяжёлые ядра) в диапазоне энергий 10^{17}–10^{18} эВ — в ключевой области перехода от галактического к внегалактическому компоненту космического излучения.

Практическая значимость заключается в возможности прямого применения предложенных методов в составе будущих высокогорных экспериментов по регистрации ШАЛ, таких как установка «Памир-XXI». Разработанные алгоритмы реконструкции и классификации позволяют повысить точность оценки энергии, направления и массового состава первичных частиц без существенного увеличения числа детекторов. Кроме того, критерии, устойчивые к модельным неопределённостям, обеспечивают надёжность интерпретации данных в условиях ограниченной калибровочной информации.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых детекторных систем, в том числе мюонных трекеров, при создании методических основ для анализа данных космических экспериментов, а также в образовательных и научных целях для подготовки специалистов в области астрофизики высоких энергий и физики элементарных частиц.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием проверенных программных средств моделирования (CORSIKA, Geant4), актуальных моделей адронных взаимодействий (QGSJET01, QGSJET-II-04), статистически значимых выборок (не менее 200–300 событий на класс) и перекрёстной валидацией на различных моделях. Устойчивость классифицирующих признаков подтверждена сравнением между моделями и повторяемостью результатов на независимых данных. Стандартная погрешность оценки вероятностей ошибок классификации не превышает ± 0.02.

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. Вся обработка искусственных событий ШАЛ, оптимизация алгоритмов, поиск и оптимизация критериев отбора событий оценки неопределенностей восстановления первичных параметров ливней выбор оптимальных параметров сетки детекторов заряженных частиц и критериев, процедура оценки первичной энергии выполнены лично автором.

Апробация и реализация результатов диссертации. Результаты диссертационного исследования апробированы на ряде международных, всероссийских и республиканских конференций, включая International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (Москва, Россия, август 2016 г.), XXIV Международную научную конференцию студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов 2017» (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, апрель 2017 г.), Ломоносовские чтения

– 2017 (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, апрель 2017 г.), International Cosmic Ray Conference (Пусан, Республика Корея, июль 2017 г.), Международную школу молодых учёных стран СНГ «Смежные проблемы физики и астрофизики частиц сверхвысоких энергий» (Алматы, Казахстан, сентябрь 2017 г.), Международную научную конференцию студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, апрель 2018 г.), International Workshop on Air Shower Detection at High Altitudes (Институт ядерных исследований РАН, Россия, сентябрь 2018 г.), Международную школу молодых учёных стран СНГ «Смежные проблемы физики и астрофизики частиц сверхвысоких энергий» (Бишкек, Киргизия, сентябрь 2019 г.), Симпозиум физиков Таджикистана, посвящённый 85-летию академика Р. Марупова (Душанбе, Таджикистан, ноябрь 2022 г.), и Республиканскую научно-практическую конференцию «Развитие и достижения физической науки в годы независимости», посвящённую 32-летию Государственной независимости Республики Таджикистан (Душанбе, Таджикистан, август 2023 г.), а также на семинаре «Нейтринная и ядерная астрофизика» имени Г.Т. Зацепина (ИЯИ РАН, Россия, октябрь 2018 г.).

Публикации по теме диссертации. По результатам выполненных исследований по теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе: 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК при Президенте Республики Таджикистан, 2 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Scopus, а также 4 статьи в сборниках докладов и материалах республиканских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы. Объем работы составляет 145 страниц текста, включая 41 рисунок и 6 таблиц. Список литературы включает 170 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность исследования массового состава первичных космических лучей (ПКЛ) в диапазоне энергий выше 10^{15} эВ.

В первой главе представлено современное состояние исследований по изучению ПКЛ в сверхвысоком энергетическом диапазоне (от 10^{15} до 10^{20} эВ) с акцентом на определение их массового состава. Рассмотрены основные экспериментальные подходы к исследованию ПКЛ, включая методы регистрации ШАЛ и флуоресцентной спектроскопии. Особое внимание уделено ограничениям традиционных параметров, таких как глубина максимума развития ливня X_{max} и общее число мюонов N_μ, которые, несмотря на широкое использование в установках TA, Pierre Auger и KASCADE-Grande, демонстрируют значительную модельную зависимость и флуктуационную неопределённость. Анализируются перспективы высокогорных экспериментов, в контексте повышения точности восстановления параметров ПКЛ благодаря ранней регистрации ливня и увеличенной плотности вторичных частиц. Обобщаются данные, указывающие на важность разработки новых признаков, обладающих устойчивостью к выбору модели и высокой чувствительностью к массе первичной частицы, что формирует основу для методического подхода, изложенного в последующих главах.

Во **второй главе** решается задача реконструкции параметров ШАЛ по данным сети сцинтилляционных детекторов, расположенных на высокогорной установке (4250 м). Основное внимание уделено точному восстановлению первичной энергии E_0, углового вектора направления прихода $\vec{\theta}$ и положения оси ливня $\vec{x}_{core}$**.**

Предложенный подход включает два этапа обработки данных. На первом этапе координаты оси ливня восстанавливаются предварительно методом «центра масс», основанным на сигналах детекторов. На втором этапе проводится детальная минимизация

функции $\boldsymbol{\chi^2}$ между экспериментальными данными и модельными распределениями:

– продольного (латерального) распределения плотности частиц, описываемого аналогом функции Нишимуры–Каматы–Грейзена:

$$F_{LD}(R) = \frac{a_0}{R^{a_1}\left(1+\frac{R}{a_2}\right)^{a_3}} \qquad (1)$$

– временного фронта частиц ливня:

$$F_{TF}(R) = R(a_0 + a_1 R + a_2 R^2) \qquad (2)$$

Рассматривались два подхода к обработке пространственно-временных характеристик зарегистрированных частиц в детекторах установки:

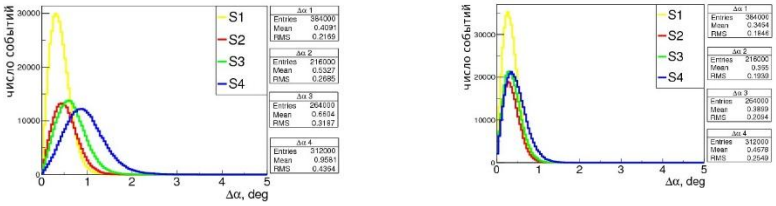
1. Без учёта влияния детектора. В данном случае исходными экспериментальными данными являлись непосредственно число заряженных частиц, попавших в детектор, и моменты прихода фронта частиц в каждый из детекторов.
2. С учётом взаимодействия частиц в детекторе. В данном варианте моделировалось прохождение частиц через материальные слои детектора (алюминиевая крышка толщиной 2 мм и слой полистирола толщиной 2 см) с помощью пакета GEANT4 [103].

Для изучения влияния структуры детекторной сети на точность восстановления рассматривались шаги сетки 10 м, 15 м и 20 м. На основе численного анализа и суммарных погрешностей установлено, что оптимальным является шаг 15 м. Для дальнейшего анализа сетка детекторов (11×11 детекторов, рис. 1) была условно разделена на четыре зоны (S1–S4), характеризующиеся разными плотностями зарегистрированных частиц и влиянием флуктуаций. В каждой зоне применялись два условия регистрации частиц: с порогом ≥1 и ≥5 частиц (энерговыделение ≥20 МэВ**),** позволяющие соответственно регистрировать все срабатывания либо уменьшить шумовые события. Результаты подтверждают эффективность предложенных пороговых условий для реконструкции

пространственно-временных характеристик ливня, демонстрируя минимизацию влияния флуктуаций и шума при сохранении необходимой статистической полноты (рис. 2-3)**.**

А) Б)

Рисунок 1. -Схематическое разделение детекторной сети на четыре зоны (S1–S4) в области 300 м × 300 м: (а) **условная модель «ковра» детекторов и зонами S1–S4, чёрные квадратики означают сработавшие детекторы, зарегистрировавшие не менее одной частицы (активные), тогда как белые точки остаются «неактивными».** (б) **фактическая конфигурация расположения детекторов (150 м × 150 м) с выделением тех же зон.**

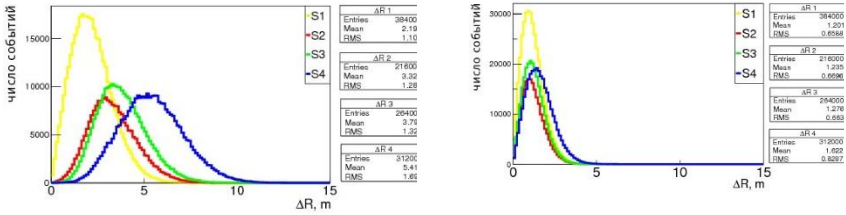


А) Б)

Рисунок 2.-Неопределённости оценки направления δ_{dir} оси сетью из 11 x 11 детекторов частиц для ШАЛ от протона 1 ПэВ: а) при *пороге ≥1 частица* **б) при** *пороге ≥5 частица*

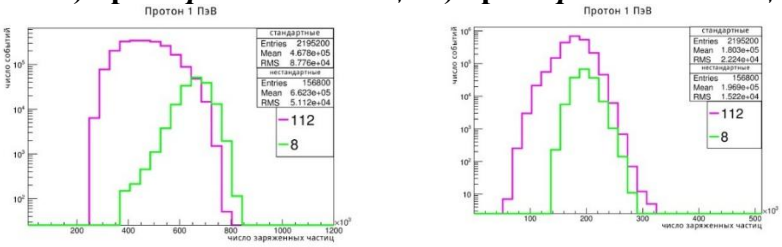
Анализ неопределённостей восстановления параметров ШАЛ выявил значительное возрастание систематической погрешности оценки энергии при интегрировании в полном круге радиусом 100 м (рис. 4а). Это связано с усилением центральной плотности вторичных частиц при глубоком развитии ливней. Было

показано, что интегрирование плотности частиц в кольце с внутренним радиусом 40 м и внешним радиусом 100 м значительно снижает систематическую погрешность оценки первичной энергии (рис. 4б, Таблица 1).



А) Б)

Рисунок 3.-Неопределённости оценки положения δ_{loc} оси сетью из 11 х 11 детекторов частиц для ШАЛ от протона 1 ПэВ: а) при *пороге ≥1 частица* б) при *пороге ≥5 частица*



А) Б)

Рисунок 4.-Оценка E_0 по интегралу от ПР 112 нормальных ливней и 8 глубоко развывшихся ливней: А) интегрирование в круге радиуса 100 м Б) интегрирование в кольце с радиусами 40м/100 м.

С целью коррекции на глубину развития ливня был введён эмпирический параметр крутизны K:

$$K = N_{70} / (N_{150} - N_{70}) \qquad (3)$$

Здесь N_{70} и N_{150} — число заряженных частиц в интервалах до 70 м и 70–150 м соответственно. Чем выше значение K, тем ближе ливень к своему максимуму развития, что указывает на большую глубину взаимодействия первичной частицы с атмосферой.

Таблица 1.-Неопределённости оценки направления δ_{dir} и положения δ_{loc} оси и первичной энергии δE_0,% сетью из 11 х 11 детекторов частиц для ШАЛ от протона 1 и 10 ПэВ.

E_0,ПэВ	Без учета детектора			С учетом детектора		
	δdir,°	δloc,м	δE_0,%	δdir,°	δloc,м	δE_0,%
1	0.39	1.3	12	0.46	1.2	10
10	0.15	0.6	12	0.18	0.3	12

Поправка к интегралу Nch в кольце 40 м-100 м вводится умножением его на коэффициент Со. Начиная с некоторого порогового значения крутизны Кр:

$C_0 = 1$, если $К \leqslant 1$

$C_0 = 1 + a*(К-Кр)$, если $К > 1$

где, a=0.42 и Кр = 7.2

Первичная энергия частицы оценивается по формуле

$$\log_{10}(E_0 \,/\, 10GeV) = 0.957 * \log_{10}\left(C_0 * Nch_{(40м-100м)}\right) \qquad (4)$$

Полученные численные результаты показывают, что предлагаемая методика обеспечивает точность определения координат оси ливня порядка 1 м, направления прихода не хуже 0.5°, а также первичной энергии с неопределённостью не более 15% в диапазоне 1 ПэВ–1 ЭэВ (рис. 5, Таблица 2). Предложенная конфигурация сетки и адаптированная процедура обработки данных позволили минимизировать влияние детекторных флуктуаций и продемонстрировали устойчивость к систематическим ошибкам, возникающим из-за различий в моделях взаимодействий и особенностей развития ливня.

Таблица 2. -Неопределённости оценки первичной энергии δE_0,% сетью из 11×11 детекторов частиц для ШАЛ от протона 1ПэВ -1ЭэВ.

Энергия первичной частицы	Ошибка оценки энергии первичной частицы, δE_0,%
1 ПэВ	14
10 ПэВ	13
100 ПэВ	15
0.1-1ЭэВ y=-2.7	15

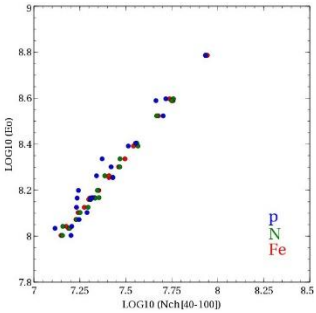


Рисунок 5.-Зависимость логарифма первичной энергии частицы $\log_{10} E_0$ от логарифма числа зарегистрированных детекторов $\log_{10} Nch_{[40-100]}$ для частиц в энергетическом диапазоне от 100 ПэВ до 1 ЭэВ на ядро.

В **третьей главе** диссертации разработан метод классификации первичных частиц ШАЛ на основе анализа формы углового распределения мюонов в диапазоне энергий 10^{17}–10^{18} эВ. Для практической реализации предложенного метода был рассмотрен мюонный трекер общей площадью около 400 м², размещаемый на расстоянии 100–400 м от оси ливня (Рис 6).

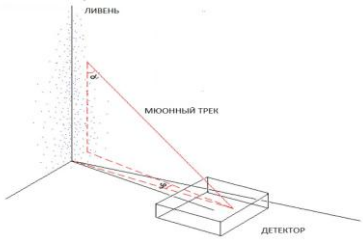


Рисунок 6.-Геометрия регистрации ШАЛ с помощью мюонного трекера.

Методологически предложенный подход основывается на вычислении интегральных характеристик мюонного потока в различных угловых диапазонах относительно оси ливня. Введены интегральные признаки S_i, вычисляемые по формуле:

$$S_i = \int_{-0.2}^{0.2} d\varphi \int_{\alpha_{i_{min}}}^{\alpha_{i_{max}}} \Phi(\alpha, \varphi) d\alpha \quad i = 1,2,3,4 \quad (5)$$

где $\Phi(\alpha, \varphi)$— плотность мюонного потока, α — угол падения мюона относительно вертикали, φ — азимутальный угол. Признаки $k_{ij} = S_i/S_j$ являющиеся отношениями интегральных значений S_i, были оптимизированы с целью достижения минимальной ошибки классификации (Рис 7).

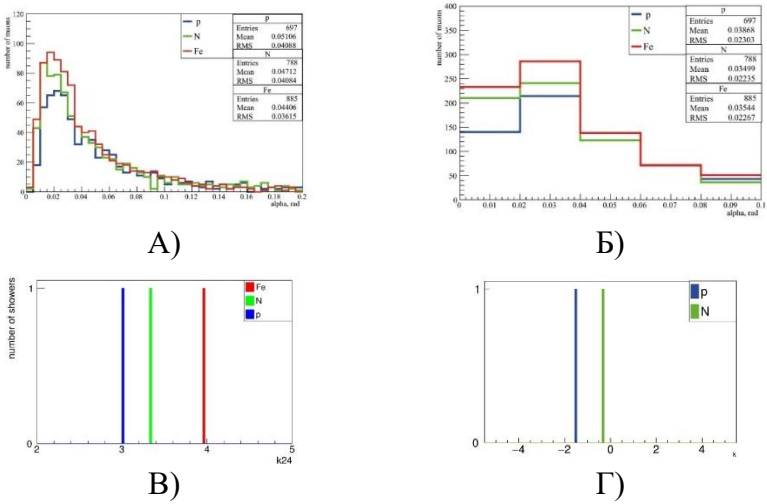


Рисунок 7.-Примеры угловых распределений мюонов и соответствующих классифицирующих признаков для различных типов первичных частиц ШАЛ: а) Дифференциальное угловое распределение мюонов (по углу α); б) Интегральное угловое распределение мюонов по бинам; в) Классифицирующий признак (отношение интегралов по 2-му и 4-му бинам) для разделения на три группы (p, N, Fe); г) Классифицирующий признак для разделения пары p–N.

В качестве критерия использовалось отношение интегралов распределения мюонов в специально подобранных угловых интервалах (S_2 и S_4), обеспечивающих минимальную вероятность ошибочной классификации P_{err}. (табл. 3).

Таблица 3.-Вероятности ошибочной классификации для пар p–N и N–Fe (модельно-зависимые оптимальные критерии, $E_0 = 100$ПэВ и 1ЭэВ)

E_0	R,м	P_{err}(p-N), QGSJET01	P_{err}(N-Fe), QGSJET01	P_{err}(p-N), QGSJETII	P_{err}(N-Fe), QGSJETII
100 ПэВ	100	0.34	0.34	0.33	0.33
	120	0.33	0.31	0.32	0.32
	150	0.31	0.31	0.32	0.34
1 ЭэВ	100	0.35	0.32	0.28	0.28
	150	0.36	0.31	0.28	0.31
	200	0.34	0.32	0.27	0.32
	250	0.36	0.33	0.27	0.3
	300	0.33	0.33	0.27	0.33
	400	0.35	0.35	0.29	0.32

Примечание. *Вероятности представлены в долях. Погрешность оценки составляет ±0.02. Объём выборки: 300 событий на класс для QGSJET-01, 200 событий на класс для QGSJET-II.3*

Для повышения устойчивости метода и удобства его практического применения разработаны универсальные критерии, не требующие дополнительной настройки под конкретную модель адронного взаимодействия (табл. 4). При этом точность классификации остаётся на уровне 60–65%, а различие между моделями не превышает статистическую погрешность (1–2%). Предложен также единый (унифицированный) признак, пригодный для одновременного разделения обеих пар первичных частиц (p–N и N–Fe) при одинаковой конфигурации угловых интервалов интегрирования. Вероятность ошибочной классификации при использовании данного подхода составляет 30–40% (табл. 5). Для оценки степени разделения классов на уровне индивидуальных событий были построены гистограммы распределений значений критерия $k_{24} = S_2/S_4$. На рис. 8 представлен пример такой распределений, где вертикальная линия обозначает оптимальный порог, разделяющий два класса.

Таблица 4.-Вероятности ошибочной классификации для пар p–N и N–Fe (модельно-независимые критерии, $E_0 =$ 100ПэВ и 1ЭэВ)

E_0	R,м	P_{err}(p-N), QGSJET01	P_{err}(N-Fe), QGSJET01	P_{err}(p-N), QGSJETII	P_{err}(N-Fe), QGSJETII
100 ПэВ	100	0.34	0.34	0.39	0.37
	120	0.33	0.31	0.4	0.37
	150	0.31	0.31	0.35	0.38
1 ЭэВ	100	0.35	0.32	0.33	0.32
	150	0.36	0.31	0.34	0.37
	200	0.34	0.32	0.32	0.34
	250	0.36	0.33	0.32	0.35
	300	0.33	0.33	0.34	0.35
	400	0.35	0.35	0.39	0.39

Таблица 5.-Вероятности ошибочной классификации при использовании универсального критерия, одинакового для пар p–N и N–Fe.

E_0	R,м	P_{err}(p-N), QGSJET01	P_{err}(N-Fe), QGSJET01	P_{err}(p-N), QGSJETII	P_{err}(N-Fe), QGSJETII
100 ПэВ	100	0.4	0.34	0.39	0.34
	120	0.35	0.3	0.37	0.36
	150	0.34	0.34	0.32	0.37

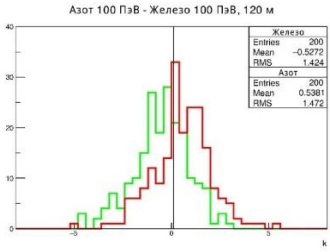


Рисунок 8.-Распределения оптимальных критериев для пар N-Fe на расстоянии 120 м от оси ливня. Ширина бинов 0.020; 0.015; 0.013; 0.025 в радианах (вероятность ошибок классификации 31%.)

Заключние

В настоящей диссертационной работе рассмотрены теоретические и прикладные аспекты регистрации и анализа ШАЛ с целью восстановления параметров ПКЧ в условиях высокогорных установок. Особое внимание уделено разработке и обоснованию новых методов, направленных на повышение точности оценки энергии, направления и массы первичных частиц при регистрации ШАЛ в диапазоне энергий 1 ПэВ – 1 ЭэВ.

Работа опирается на актуальные задачи современной астрофизики высоких энергий и продолжающиеся международные исследования по изучению состава и происхождения космических лучей сверхвысоких энергий. Основное внимание сосредоточено на двух взаимосвязанных задачах:

- оптимизации параметров регистрации событий ШАЛ с использованием сетки детекторов заряженных частиц;
- разработке метода классификации первичных частиц по массе на основе анализа углового распределения мюонов.

На основе моделирования и анализа большого объёма данных (несколько тысяч смоделированных событий) получены следующие основные научные результаты:

1. Разработана методика восстановления энергии и направления ШАЛ на основе параметризации ФПР и ВФ заряженных частиц. Проведена оценка неопределённостей метода в условиях реальной установки (высота 4250 м), показано, что точность определения энергии может достигать ≈15%, направления — до 1° [1-А, 2-А, 4-А, 5-А, 7-А, 8-А].
2. Впервые предложен метод классификации ПКЧ по массе на основе анализа формы углового распределения мюонов, зарегистрированных мюонным трекером. Установлено, что интегральные признаки углового распределения (отношения S_2/S_4 и др.) позволяют разделять протоны, азот и железо с вероятностью правильной классификации ~65–70% [3-А, 5-А, 6-А, 9-А].

3. Доказана устойчивость метода к выбору модели адронного взаимодействия. Признаки, полученные на модели QGSJET01, оказались эффективными и при использовании QGSJET-II-04. Варьирование модели приводило к изменению вероятности классификации не более чем на 3–5%, что указывает на универсальность предложенного подхода [3-А, 5-А, 6-А, 9-А].

4. Найдены универсальные (модельно-независимые) и геометрически стабильные критерии классификации, применимые в широком диапазоне расстояний от оси (100–200 м). Это особенно важно для реальных установок, в которых не всегда известна точная геометрия ливня [3-А, 5-А, 6-А, 9-А].

5. Предложена оптимальная конфигурация сетки СЦД и мюонного трекера для реализации комплексной установки в условиях высогорья. Определены требования к угловому разрешению (не хуже 0.2°) и площади мюонного детектора (~400 м²) для достижения приемлемой точности массового анализа [3-А, 5-А, 6-А, 9-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов исследования

1. Разработанные критерии классификации первичных частиц, основанные на интегральных характеристиках углового распределения мюонов, целесообразно использовать в качестве базовых при проектировании новых высокогорных экспериментальных комплексов.

2. Разработанные алгоритмы могут быть интегрированы в программное обеспечение анализа событий ШАЛ. Предлагается внедрение универсальных признаков, инвариантных к нормировке, таких как отношение интегралов по угловым интервалам ($k_{ij} = S_i / S_j$), что обеспечивает интерпретируемость результатов и позволяет осуществлять классификацию ядер на лёгкие, средние и тяжёлые без необходимости привязки к конкретной модели взаимодействия или конфигурации детекторов.

3. Материалы диссертации могут быть использованы при создании учебных курсов и лабораторных практикумов, посвящённых методам Монте-Карло, анализу данных и реконструкции параметров событий в физике космических лучей.

4. Предлагаемые методы могут быть реализованы в составе многоуровневых детекторных систем нового поколения. Комбинирование регистрации фронта заряженных частиц с мюонными трекерами и оптическими средствами (флуоресцентными и черенковскими детекторами) позволит существенно повысить точность реконструкции параметров ПКЛ. Настоящее исследование закладывает основу для методического сопровождения таких платформ, включая установку «Памир-XXI».

Список литературы

1. Aab, A., et al. Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory: Measurements at energies above 10^17.2 eV // Phys. Rev. D, Vol. 90, 2014. P. 122005.
2. Abbasi R.U., et al. (Telescope Array Collaboration). Mass Composition of Ultra-High-Energy Cosmic Rays with Telescope Array Surface Detector Data // Astroparticle Physics, Vol. 64, 2015. pp. 49-62.
3. Borisov A.S. and Galkin V.I. // J. Phys.: Conf. Ser, Vol. 409, No. 1, 2013. P. 012089.
4. Tamada, M.; Inoue, N.; Misaki, A.; Ohsawa, A.. Detection of high energy electromagnetic and hadron components of air-shower cores in the new hybrid experiment "Pamir-XXI" // EPJ Web of Conferences, Vol. 145. P. 15001.
5. Aab, A., et al. (Pierre Auger Collaboration). Measurement of the cosmic ray spectrum above 4x10^18 eV using inclined events detected by the Pierre Auger Observatory // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP), Vol. 8, 2015. P. 049.
6. Abbasi R.U., et al.. Cosmic Ray Energy Spectrum and Composition from TALE and TA Combined Fit // Proceedings of Science (PoS) ICRC2017, Vol. 562, 2018.
7. Apel W.D., et al.. Cosmic ray mass composition in the 10^15–10^17 eV energy range obtained with KASCADE-Grande // Astroparticle Physics, Vol. 36, 2012. P. 183.
8. Pravdin, M.I., et al. (Yakutsk Array). Energy spectrum of cosmic rays with $E_0 \geq 10^{17}$ eV by Yakutsk array data // JETP Letters, Vol. 96, 2012. P. 789.
9. S. O. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron

scheme: QGSJET-II model // EPJ Web of Conferences, Vol. 52, 2013. P. 02001.
10. Kampert K.-H., Unger M. Measurements of the Cosmic Ray Composition with Air Shower Experiments // Astroparticle Physics, Vol. 35, 2012. P. 660.
11. Apel, W.D., et al. Lateral distribution of electrons in air showers measured with KASCADE // Astroparticle Physics, Vol. 29, 2008. pp. 412–419.
12. Bertaina, M., et al.. Development of cosmic ray detection techniques: contributions from KASCADE-Grande and other experiments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A., Vol. 845, 2017. pp. 196–199.
13. Grieder P.K.F. Extensive Air Showers. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемые в международной базе данных (*Web of Science* и *Scopus* и иностранные издания)

[1-A] Muqumov A.R. Designing of a comprehensive high altitude EAS array for primary particle determination within the PAMIR-XXI project / Topchiev N.P., Borisov A.S., Galkin V.I., Bakhromzod R., Batraev V.V., Latipova S.Z., Muqumov A.R. // Proceedings of Science. 2018. Vol. 301. P. 475. DOI: 10.22323/1.301.0475.

[2-A] A.R. Muqumov. A Method for Estimation of the Parameters of the Primary Particle of an Extensive Air Shower by a High-Altitude Detector / V.I. Galkin, A.S. Borisov, R. Bakhromzod, V.V. Batraev, S.Z. Latipova, A.R. Muqumov // *Moscow University Physics Bulletin*. – New York, N.Y., United States: Allerton Press, 2018. – Vol. 73, No. 2. – P. 179–186.

Статьи, опубликованные в других изданиях, рекомендуемых ВАК при Президенте Республики Таджикистан

[**3**-A] **Мукумов, А.Р.** Разделение широких атмосферных ливней по массам в диапазоне энергий 10^{17} эВ - 10^{18} эВ с использованием мюонного трекера в условиях высокогорий/ **Мукумов, А.Р.** // Доклады НАНТ. – 2025. – Т., № 1 – С.52-57.

[**4**-A] **Мукумов, А.Р.** Способ определения энергии первичных космических лучей для высокогорных установок / **Мукумов, А.Р.** // Известия НАНТ. – 2025. –№1. – С.62-68.

[5-A] **Мукумов, А.Р.** Оценка первичных параметров широкого атмосферного ливня по данным детекторов частиц высокогорных установок / А.Р. Мукумов, В.И. Галкин // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. – 2018. – № 3. – С. 1830801-1–1830801-7.

Список работ в материалах международных конференций

[6-A] Мукумов, А.Р. Разделение атмосферных ливней по массам с помощью мюонного треккера на высокогорной установке / Мукумов, А.Р. // 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.

[7-А] Мукумов, А.Р. Оценки параметров первичных протонов широкого атмосферного ливня для высокогорной установки с помощью детекторов заряженных частиц / Мукумов, А.Р. // 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.

Список работ в материалах республиканских конференций

[8-А] Мукумов, А.Р. Способ определения энергии первичных космических лучей для высокогорных установок / Мукумов, А.Р. // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Развитие и достижения физической науки в годы независимости», посвященной 32-летию Государственной независимости Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, 25–26 августа 2023 г. – Душанбе, 2023. – С 203-205.

[9-А] Мукумов, А.Р. Разделение атмосферных ливней по массам в диапазоне энергий 100 ПэВ–1 ЭэВ с помощью мюонного треккера для высокогорных условий / Мукумов, А.Р. // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Развитие и достижения физической науки в годы независимости», посвященной 32-летию Государственной независимости Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, 25–26 августа 2023 г. – Душанбе, 2023. – С 218-221.

АКАДЕМИЯИ МИЛЛИИ ИЛМҲОИ ТОҶИКИСТОН
ИНСТИТУТИ ФИЗИКАЮ ТЕХНИКАИ ба номи С. У. УМАРОВ

Бо ҳуқуқи дастнавис

ВБД: 524.1

РУСТАМЗОДА АЪЗАМ РУСТАМ
(МУҚУМОВ АЪЗАМ РУСТАМОВИЧ)

РУШДИ УСУЛҲОИ МУАЙЯНСОЗИИ МУШАХАССАҲОИ ЗАРРАИ ИБТИДОИИ СЕЛҲОИ ВАСЕИ АТМОСФЕРӢ АЗ РӮИ МАЪЛУМОТИ ДЕТЕКТОРҲОИ ЗАРРАҲОИ ЗАРЯДНОКИ ТАҶҲИЗОТИ БАЛАНДКӮҲӢ

АВТОРЕФЕРАТИ
диссертатсия барои дарёфти дараҷаи
илмии номзади илмҳои физикаю математика
аз руйи ихтисоси 01.04.00 – Физика
(01.04.01 - Асбобҳо ва методҳои физикаи таҷрибавӣ)

Душанбе-2025

Кор дар Маркази байналмиллалии 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, профессори кафедраи физикаи кайҳони факултети физикаи ДДМ ба номи М. В. Ломоносов
Муқарризони расмӣ:	**Махсуд Барот Исломзода,** доктори илмҳои физикаю математика, профессори кафедраи физикаи ҳастаи факултети физикаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон **Пятовский Сергей Евгеневич,** номзади илмҳои физикаю математика, дотсент, ходими илмии дараҷаи баланди лабораторияи астрофизикаи нурҳои кайҳонии Институти физикаи ба номи П. Н. Лебедеви Академияи илмҳои Россия
Муассисаи пешбар:	**Муассисаи федералии илмии буҷетии давлатии "Институти тадқиқоти ҳастаии Академияи илмҳои Россия"**

Ҳимояи диссертатсия санаи 02 октябри соли 2025 соати 14:00 дар ҷаласаи шурои 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 шурои олимони ИФТ ба номи С.У.Умарови АМИТ. E-mail: shuro.ift@gmail.com.

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

Автореферат санаи «__ » _____ соли 2025 ирсол гардидааст

Котиби илмии шурои диссертатсионӣ,
доктори фалсафа (PhD) **Каюмов М.М**

САРСУХАН

Муҳиммияти мавзӯъ. Омӯзиши нурҳои кайҳонии ибтидоӣ (НКИ) яке аз самтҳои асосии астрофизика ва физикаи муосири энергияҳои баланд мебошад. Саволҳо дар бораи пайдоиш, механизмҳои шитобгирӣ ва таркиби кимиёвии онҳо, бо вуҷуди талошҳои зиёди таҷрибавӣ, то ҳол кушода боқӣ мондаанд. Таркиби массавии НКИ, махсусан дар минтақаи энергияи 10^{17}–1018 эВ, ки дар он гузариш аз ҷузъи галактикӣ ба берунгалактикӣ пешбинӣ мешавад, калиди фаҳмиши табиати нурҳои кайҳонӣ ба ҳисоб меравад. Аммо дар энергияи аз 1015 эВ боло бақайдгирии мустақими зарраҳои ибтидоӣ номумкин аст ва ягона манбаи иттилоот хусусиятҳои селҳои васеи атмосферӣ (СВА) мебошанд, ки ҳангоми таъсири мутақобилаи ин зарраҳо бо атмосфераи Замин ба вуҷуд меоянд. Усулҳои муосири муайян намудани массаи зарраи ибтидоӣ ба параметрҳои ғайримустақим асос ёфтаанд: амиқии нуқтаи максималии инкишофи каскад Xmax, шумораи мюонҳо Nμ ва таносуби онҳо бо компоненти электронию фотонӣ. Бо вуҷуди ин, дар минтақаи энергияи 10^{17}–1018 эВ, ин параметрҳо ҳассосияти маҳдуд ва дараҷаи баланди номуайяниро нишон медиҳанд. Масалан, фарқияти миёнаи Xmax байни селҳои протонӣ ва оҳанӣ тақрибан 100 г/см²-ро ташкил медиҳад, вале инҳирофи стандартӣ барои ҳодисаҳои протонӣ ба 60–70 г/см² мерасад, ки боиси ҳампӯшии назарраси тақсимот мегардад. Дар натиҷа, эҳтимолияти иштибоҳи таснифи массаи ҳодиса дар асоси Xmax метавонад аз 35–40% ҳам бештар бошад, ҳатто дар шароити расадхонаҳои муосир, ба монанди расадхонаи Пйер Оже [1] ва Telescope Array (TA) [2]. Мушкилиҳои иловагӣ дар робита бо вобастагии қавии ин параметрҳо аз интихоби модели таъсири мутақобилаи адронӣ ба вуҷуд меоянд. Гузариш аз як модел ба дигаре (масалан, аз QGSJET01 ба QGSJET-II-04)

метавонад ба тағйири қимати миёнаи ⟨ln A⟩ ба андозаи то 1 воҳид оварда расонад, ки ин ба гузариш аз як гурӯҳи ҳастаҳо ба дигаре (масалан, аз нитроген ба оҳан) баробар аст. Ғайр аз ин, мушкили «камбуди мюонӣ» вуҷуд дорад: қиматҳои ҳисобшудаи Nμ, ки аз рӯйи моделҳои мавҷуда ба даст оварда мешаванд, мунтазам дар муқоиса бо маълумоти таҷрибавӣ пасттар ҳастанд, ки фарқият метавонад ба 30–50% бирасад. Номуайянии умумӣ ҳангоми муайян намудани массаи зарраи ибтидоӣ, ки аз флуктатсияҳои рушди сел ва вобастагии моделӣ ба вуҷуд меояд, дар сатҳи 30–40% боқӣ мемонад, ки ин дақиқияти барқароркунии таркиби кимиёвии НКИ-ро маҳдуд мекунад. Ин ҳолатҳо зарурати таҳияи усулҳои навро барои муайян кардани массаи зарраҳои ибтидоӣ ба вуҷуд меоранд, ки дорои хосиятҳои зерин бошанд:

– ҳассосияти баланд нисбат ба рақами массавии ҳаста;
– устуворӣ нисбат ба интихоби модели таъсири мутақобилаи адронӣ;
– қобили татбиқ дар шароити воқеии таҷҳизоти заминӣ ва баландкӯҳӣ;
– вобастагии паст аз калибронии мутлақи шумораи зарраҳо.

Диққати махсусро истифодаи сохтори фазоиву кунҷии компоненти мюонии СВА ба вуҷуд меорад, ки яке аз нишондиҳандаҳои аз ҳама камфлуктатсия ва пурмаълумот оид ба табиати зарраи ибтидоӣ мебошад. Дар шароити баландкӯҳ, ки дар он ҷо селҳо дар марҳилаҳои ибтидоии рушдашон ба қайд гирифта мешаванд, татбиқи усуле имконпазир мегардад, ки ба таҳлили шакли тақсимоти кунҷии мюонҳо асос ёфтааст. Таҳияи чунин усул на танҳо масъалаҳои муайянсозии массаи НКИ-ро ҳал мекунад, балки ба беҳтар шудани барқароркунии энергия, аниқ намудани модели паҳншавӣ ва суръатбахшии зарраҳо мусоидат мекунад ва унсури зарурӣ барои бунёди маҷмааҳои гибридии таҷрибавии насли нав мебошад (аз ҷумла, дар доираи лоиҳаи «Помир-XXI» [3] [4]). Ҳалли ин масъала омезиши усулҳои

моделсозии рақамӣ, таҳлили додаҳои таҷрибавӣ ва оптимизатсияи параметрҳои таҷҳизотро талаб мекунад. Дар ин кор усули нави таснифи зарраҳои ибтидоӣ пешниҳод ва амалӣ гардидааст, ки ба таҳлили шакли тақсимоти кунҷии мюонҳо, ки дар ҷараёни инкишофи ливни атмосфери васеъ ташаккул меёбад, асос ёфтааст. Бар хилофи усулҳои анъанавӣ, ки ба шумораи мутлақи мюонҳо такя мекунанд, ин усул сохтори фазоии ҷараёни мюонҳоро истифода мебарад, ки хусусиятҳои рушди каскадро аз лаҳзаи аввалини таъсири зарраи ибтидоӣ инъикос мекунад ва ба туфайли қобилияти баланди даррангии мюонҳо нигоҳ дошта мешавад. Ин имкон медиҳад, ки таъсири флуктуатсияҳои моделӣ ва каскадӣ коҳиш дода шуда, параметри иттилоотии нав ба даст оварда шавад, ки барои муайян кардани оммавии зарраҳои ибтидоӣ дар диапазони энергияҳои 10^{17}–10^{18} эВ мувофиқ аст.

Дараҷаи азхуднамоии мавзӯи таҳқиқшаванда. Таҳқиқи таркиби массавии нурҳои кайҳонии ибтидоӣ (НКИ) яке аз масъалаҳои давомноктарин ва фаъолона инкишофёбандаи астрофизикаи энергияҳои баланд ба ҳисоб меравад. Ҳанӯз аз миёнаи асри XX (таҷрибаҳои Volcano Ranch, Дастгоҳи Якутск, Haverah Park) маълум гардид, ки донистани таркиби унсурии НКИ барои фаҳмиши пайдоиш ва механизмҳои шитобгирии онҳо аҳамияти ҳалкунанда дорад. Аммо, сарфи назар аз пешрафти назарраси технологияҳои бақайдгирӣ ва коркарди додаҳо, ин масъала дар паҳноии энергияи болотар аз 10^{15} эВ ҳанӯз ҳам боз боқӣ мондааст. Усулҳои муосири муайянсозии массаи зарраҳои ибтидоӣ дар селҳои васеи атмосферӣ (СВА) асосан ба ду нишондиҳандаи асосӣ: амиқи нуқтаи максималии рушди каскад Xmax ва шумораи умумии мюонҳо Nμ такя мекунанд. Истифодаи ин параметрҳо дар таҷрибаҳои бузургтарини амалкунанда, ба монанди расадхонаи Пйер Оже [5], TA [6], KASCADE-Grande [7] ва ғайраҳо татбиқ шудааст. Бо вуҷуди ин, натиҷаҳои аз рӯйи ин параметрҳо бадастомада ҳангоми истифодаи моделҳои гуногуни таъсири мутақобилаи адронӣ (масалан, QGSJET01, QGSJET-II-

04, EPOS-LHC) фарқияти назаррас нишон медиҳанд, ки ба осебпазирии методологӣ ишора мекунанд [8].

Манбаъҳои асосии номуайяниҳо иборатанд аз:

– флуктатсияҳои рушди каскад, ки ба ҳампӯшии тақсимоти Xmax барои ҳастаҳои гуногун оварда мерасонанд;
– пасти параметрҳо (махсусан Xmax) ҳангоми гузариш аз ҳастаҳои миёна ба вазнин;
– вобастагии баланди натиҷаҳо аз модели истифодашаванда, махсусан дар минтақаи энергияи фавқулбаланд (НКФБЭ), ки дар он иттилооти таҷрибавӣ оид ба таъсири мутақобилаи ҳастаӣ вуҷуд надорад.

Дар энергияҳои тақрибан 10^{17}–10^{18} эВ, ки дар он гузариш аз ҷузъи галактикӣ ба берунгалактикӣ пешбинӣ мешавад, усулҳои мавҷудаи таснифоти масса иштибоҳҳои сатҳи 30–40%-ро нишон медиҳанд [9][10]. Ҳатто дар ҳолати оптимизатсия аз рӯйи модел, таснифоте, ки ба Xmax ва Nμ асос ёфтааст, дурустиро аз 65–70% бештар таъмин намекунад ва ҳангоми гузариш аз як модел ба дигаре дурустии натиҷаҳо ба таври назаррас коҳиш меёбад. Ин ҳолат имкониятҳои барқароркунии таркиби ҷараёнро маҳдуд сохта, ба тафсири дучандонаи мавқеи хусусиятҳои спектралӣ, монанди «зону» (колено) ва «бучулак» (лодыжка) оварда мерасонад. Як қатор корҳои дигар нишондодҳои алтернативиро баррасӣ мекунанд, аз ҷумла тақсимоти зичии мюонҳо дар радиус, тақсимоти кунҷӣ дар сатҳи баҳр [11], инчунин нишондодҳои ба ҳам робитадошта, ки тавассути усулҳои омӯзиши мошинӣ ба даст оварда мешаванд [12]. Бо вуҷуди ин, аксари онҳо ё ба миқдори зиёди маълумот эҳтиёҷ доранд, ё аз паст будани қобилияти тафсири натиҷаҳо зарар мебинанд. Ғайр аз ин, хатоҳои систематикӣ, ки бо вобастагӣ аз моделҳо алоқаманданд, ҳанӯз ҳам боқӣ мемонанд. Дар ин замина, нишондодҳое, ки устуворӣ нисбат ба интихоби модели таъсири мутақобилаи адрониро доранд, аҳамияти махсус пайдо мекунанд. Яке аз роҳҳои дурнамодор таҳлили шакли тақсимоти кунҷии мюонҳо мебошад, ки сохтори фазоиву кунҷии ҷузъи мюонии селро дар марҳилаҳои

охирини каскад инъикос мекунад. Новобаста аз асоснокшавии назариявии ҳассосияти нишондодҳои кунҷӣ ба амиқи рушди сел ва, ба ин восита, ба массаи ҳаста, татбиқи мунтазами ин нишондод барои вазифаи таснифи массавӣ қаблан амалӣ нашудааст. Корҳои мавҷуда хусусияти пароканда дошта, ба таҳлили сифатии тақсимот маҳдуданд [13]. Дар таҳқиқоти мазкур усуле пешниҳод шудааст, ки аз рӯйи нишондодҳои интегралии тақсимоти кунҷии мюонҳо истифода шуда, имкон медиҳад нишондодҳои миқёсан тағйирнопазир (таносуби интегралҳо) сохта шаванд, ки вобастагӣ аз моделро кам мекунанд. Моделсозии рақамии анҷомшуда нишон дод, ки ҳатто дар ҳолати тағйири модел (QGSJET01 → QGSJET-II-04) саҳеҳияти таснифот бо истифодаи чунин нишондодҳо на бештар аз 3–5% кам мешавад, ки ба таври назаррас аз истифодаи нишондодҳои Xmax ё Nμ камтар аст. Таҳияи нишондодҳое, ки ба сохтори кунҷии фронти мюонӣ асос ёфтаанд, самти нав дар соҳаи усулҳои СВА мебошад, ки дорои иқтидори баланд барои баланд бардоштани саҳеҳияти хулосаҳо оид ба таркиби нурҳои кайҳонӣ дар минтақаи энергияи муҳим мебошад.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо), мавзуҳои илмӣ. Таҳқиқот барои амалисозии Нақшаи чорабиниҳо 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

Ҳадафи таҳқиқоти мазкур таҳияи усулҳои оптималии барқарорсозӣ ва асосноккунии шумории параметрҳои ибтидоии СВА дар шароити кор дар мавзеъҳои баландкӯҳ мебошад. ки махсусан ба муайянсозии энергия, самти омадан ва массаи зарраи кайҳонии ибтидоӣ тавассути таҳлили сохтори фазоиву замонии фронти зарраҳои заряднок ва тақсимоти кунҷии мюонҳо равона шудааст.

Вазифаҳои таҳқиқот:

1. Гузаронидани моделсозии рақамии СВА дар минтақаи энергияи $E_0 \sim 1$ ПэВ – 1 ЭэВ дар шароити таҷҳизоти баландкӯҳӣ бо истифода аз моделҳои муосири адронӣ (QGSJET01, QGSJET-II-04).
2. Арзёбии дақиқии барқарорсозии параметрҳои ибтидоӣ (энергия, самти воридшавӣ, координатаҳои меҳвар) дар асоси додаҳои шабакаи детекторҳои зарраҳои барқдор, бо дарназардошти таъсири конфигуратсияи шабака ва порогҳои бақайдгирӣ.
3. Таҳияи тартиби муайян кардани энергияи ибтидоии сел дар асоси хусусиятҳои интегралии зичии зарраҳои барқдор бо ба ҳисоб гирифтани сохтори фазоиву замонии сел ва флуктатсияҳои рушд.
4. Омӯзиши ҳассосияти тақсимоти кунҷии мюонҳо нисбат ба массаи зарраи ибтидоӣ ва муайян кардани фосилаҳои кунҷии аз ҳама пурмаълумот барои вазифаҳои таснифот.
5. Сохтани нишондодҳои таснифкунанда дар асоси интегралҳои тақсимоти кунҷии мюонҳо дар фосилаҳои кунҷии ҷудошуда ва арзёбии самаранокии онҳо барои ҷудо кардани ҷуфтҳои ҳастаҳои ибтидоӣ (p–N, N–Fe) дар конфигуратсияҳои муайян.
6. Муқоисаи самаранокии нишондодҳои пешниҳодшуда дар шароити истифодаи моделҳои гуногуни адронӣ, муайян кардани дараҷаи устувории онҳо нисбат ба номуайяниҳои моделӣ ва муайян кардани минтақаи энергия ва фосилаи аз меҳваре, ки дар он хатогии таснифи ҳодисаҳо камтар мешавад.
7. Таҳияи меъёрҳои умумӣ, ки имкон медиҳанд ҳодисаҳоро бидуни мутобиқсозии параметрҳо ба модели мушаххас ё конфигуратсия тасниф намоянд, ва гузаронидани санҷишҳо бо намунаҳои мустақил.

Объекти таҳқиқот раванди ташаккул ва инкишофи селҳои васеи атмосферие мебошанд, ки аз ҷониби нурҳои кайҳонии ибтидоӣ дар минтақаи энергияи 1 ПэВ – 1 ЭэВ ба вуҷуд оварда

шудаанд ва дар шароити таҷҳизоти таҷрибавии баландкӯҳ моделсозӣ мешаванд.

Мавзӯи таҳқиқотро методикаҳо ва алгоритмҳои муайян кардани параметрҳои ибтидоии СВА — пеш аз ҳама, энергия, самти омадан ва массаи зарраи ибтидоӣ — ташкил медиҳанд, ки бар асоси таҳлили сохтори фазоиву замонии фронти зарраҳои заряднок ва тақсимоти кунҷии мюонҳо, ки тавассути детекторҳои махсус сабт карда мешаванд, анҷом дода мешаванд. Таваҷҷуҳи махсус ба сохтани аломатҳое равона шудааст, ки ба массаи зарраи ибтидоӣ ҳассос буда, ба ноустуворихои моделӣ устувор бошанд ва барои истифода дар таҷҳизоти воқеӣ дар шароити ноаниқии таҷрибавӣ ва назариявӣ муносиб бошанд.

Навгонии илмии таҳқиқот:

1. Усули нави барқарорсозии параметрҳои зарраи ибтидоии сели васеи атмосферӣ (СВА) таҳия шудааст, ки ба моделсозии тақсимоти паҳлӯӣ ва фронти замонии зарраҳои баркдор, ки тавассути шабакаи детекторҳо дар шароити таҷҳизоти баландкӯҳӣ ба қайд гирифта мешаванд, асос ёфтааст. Ин усул дақиқии баландтари барқарорсозии энергия, самти омадан ва координатҳои меҳвари селро дар минтақаи энергияҳои $E0 \geq 1$ ПэВ таъмин менамояд.
2. Нишондиҳандаи нави таснифкунанда барои муайян кардани массаи зарраи ибтидоӣ пешниҳод ва асоснок карда шудааст, ки ба хусусиятҳои интегралии тақсимоти кунҷии мюонҳо асос меёбад ва барои аввалин бор имкон дод, ки ҷудосозии устувори ҳастаҳо аз рӯйи масса ба се гурӯҳ (ҳастаҳои сабук, миёна, вазнин) дар минтақаи энергияи 100 ПэВ – 1 ЭэВ амалӣ карда шавад.
3. Устувории нишонаҳои таҳияшуда нисбат ба интихоби модели таъсири мутақобилаи адронӣ нишон дода шуд. Муқоисаи гузаронидашуда бо истифодаи моделҳои QGSJET01 ва QGSJET-II-04 муайян намуд, ки тағйири модел ба тағйирёбии эҳтимоли хатои таснифотӣ ба андозаи на бештар аз 3–5 банди

фоизӣ оварда мерасонад, ки универсалии усулро дар доираи равишҳои назариявии мавҷуда тасдиқ мекунад.

4. Бори аввал меъёрҳои универсалии таснифи ҳодисаҳо сохта шуданд, ки ҷудосозии протон–нитроген ва нитроген–оҳанро бо як арзиши остонаи нишондод, бидуни зарурати мутобиқсозӣ ба модели мушаххас ё фосилаи муайян аз меҳвари сел имкон медиҳанд. Ин истифодаи амалии усулро дар шароити номуайянии конфигуратсияи таҷҳизот таъмин мекунад.

5. Тавсияҳо барои тарҳрезии системаҳои детектории баландкӯҳӣ таҳия шудаанд, ки масофаҳои оптималӣ то трекерҳо (100–200 м), дақиқии кунҷӣ (на камтар аз 0.2°) ва масоҳати трекери мюонӣ (на камтар аз 400 м²)-ро дар бар мегиранд ва барои татбиқи амалии усули пешниҳодшуда зарур мебошанд.

Нуқтаҳои ҳимояшавандаи диссертатсия:

1. Методикаи барқарорсозии энергия, самти воридшавӣ ва ҷойгиршавии меҳвари селҳои васеи атмосферӣ (СВА), ки бар асоси параметрсозии тақсимоти паҳлӯии зичӣ ва фронти замонии зарраҳои барқдор таҳия шудааст, ба шароити таҷҳизоти баландкӯҳӣ (баландии мушоҳида ~4250 м) мутобиқ гардонида шудааст, ва дар он флуктатсияҳои рушди сел ва порогҳои бақайдгирӣ ба инобат гирифта мешаванд.
2. Конфигуратсияи оптималии шабакаи детекторҳои зарраҳои барқдор, ки ҳамчун шабакаи 11×11 бо қадами 15 м амалӣ мешавад, имконияти барқарорсозии дақиқи параметрҳои ибтидоии СВА-ро дар ҳолати энергияи $E_0 \geq 1$ ПэВ, таъмин менамояд, ба шарте ки порогҳои бақайдгирӣ барои ≥5 зарра ва сарфи энергия ≥20 МэВ дар ҳар як детектор риоя шаванд.
3. Усули комилан нав барои арзёбии массаи зарраи ибтидоӣ, ки ба таҳлили тақсимоти кунҷии мюонҳо асос ёфтааст ва тавассути трекер сабт мешавад, пешниҳод шудааст. Ин усул ҳисобкунии интегралҳоро аз рӯйи фосилаҳои кунҷии α ва сохтани нишондодҳои таснифкунанда дар шакли $k_{ij} = S_i/S_j$ -

ро дар бар мегирад, ки ба нормакунии тақсимот вобаста нестанд.

4. Таснифоти заррањои ибтидоӣ аз рӯйи масса (p–N, N–Fe) дар минтақаи энергияи 10^{17}–10^{18} эВ бо дақиқии то 65–70% барои ҷудосозии байни синфҳои ҳамсарҳад амалӣ мегардад, ва ҳамзамон имконияти ҷудосозии се гурӯҳи ҳастаҳо (сабук, миёна, вазнин) дар асоси параметрҳои шакли фронти мюонӣ таъмин карда мешавад.
5. Меъёрҳои универсалии таснифот, ки аз модели таъсири мутақобилаи адронӣ ва фосила то меҳвари сел вобаста нестанд, таҳия гардидаанд ва ҳангоми истифодаи яквақтаи онҳо ба рӯйдодҳое, ки дар асоси моделҳои QGSJET01 ва QGSJET-II-04 тавлид шудаанд, эҳтимоли хатои таснифотиро ба ҳудуди $P_{err} \approx 30$–35 % коҳиш медиҳанд.
6. Тавсияҳо барои татбиқи амалӣ шудани усул дар шароити таҷрибавӣ, ки дарбаргирандаи талабот ба масоҳати трекери мюонӣ (≥400 м²), дақиқии кунҷӣ (≤0.2°) ва ҷойгиршавии трекер (R = 100–150 м аз меҳвари сел) мебошанд, таҳия шудаанд. Ин параметрҳо дақиқии зарурии таснифотро дар татбиқи амалии усул таъмин мекунанд.

Аҳамияти назариявии кори рисола дар таҳияи равишҳои нав барои таҳлили додаҳои селҳои васеи атмосферӣ (СВА) ифода меёбад, ки ба барқарорсозии дақиқтари параметрҳои зарраи кайҳонии ибтидоӣ равона шудаанд. Методикаи пешниҳодшудаи барқарорсозии энергия, самти воридшавӣ ва координатаҳои меҳвари сел ба параметрсозии тақсимоти паҳлӯии зичии заррањои баркдор ва фронти замонӣ асос ёфтааст, ки имкон медиҳад хусусиятҳои физикии рушди каскад дар шароити расадгоҳҳои баландкӯҳ ба ҳисоб гирифта шаванд. Модели таҳияшуда дараҷаи баланди умумигардонӣ дошта, қобили мутобиқсозӣ ба намудҳои гуногуни таҷҳизоти детекторӣ мебошад. Бори аввал усули таснифи массаи заррањои ибтидоӣ дар асоси таҳлили шакли тақсимоти кунҷии мюонҳо таҳия ва татбиқ гардид. Истифодаи параметрҳои нисбӣ — яъне интегралҳо аз рӯйи фосилаҳои кунҷӣ

ва таносуби онҳо — ба таври назаррас таъсири хатогиҳои системавиро, ки бо интихоби модели таъсири мутақобилаи адронӣ вобастаанд, коҳиш медиҳад. Ин равиш имкони ҷудокунии боэътимоди гурӯҳҳои зарраҳо (ҳастаҳои сабук, миёна ва вазнин)-ро дар диапазони энергияи 10^{17}–10^{18} эВ — фароҳам меорад — минтақаи калидии гузариш аз унсурҳои галактикӣ ба унсурҳои берунигалактикӣ дар нурҳои кайҳонӣ.

Аҳамияти амалӣ дар имкони истифодаи мустақими усулҳои пешниҳодшуда дар таркиби таҷрибаҳои ояндаи баландкӯҳӣ оид ба бақайдгирии СВА, аз ҷумла дар доираи таҷҳизоти «Помир-XXI» ифода меёбад. Алгоритмҳои таҳияшудаи барқарорсозӣ ва таснифот имконият медиҳанд, ки дақиқии арзёбии энергия, самти воридшавӣ ва таркиби массаи зарраҳои ибтидоӣ бидуни зарурати зиёд кардани шумораи детекторҳо беҳтар гардонида шавад. Илова бар ин, меъёрҳое, ки ба номуайянии модели адронӣ устуворанд, имкон медиҳанд, ки шарҳҳои боэътимод аз маълумот дар шароити маҳдудияти иттилооти калибронӣ ба даст оварда шаванд.

Натиҷаҳои бадастомада метавонанд дар тарҳрезии системаҳои нави детекторӣ, аз ҷумла трекерҳои мюонӣ, дар асосгузории методии таҳлили маълумоти таҷрибаҳои кайҳонӣ ва инчунин дар самти таълимӣ ва илмӣ барои омода кардани мутахассисон дар соҳаи астрофизикаи энергияи баланд ва физикаи зарраҳои элементарӣ истифода шаванд.

Эътимоднокии натиҷаҳои диссертатсионӣ. Боэътимодии натиҷаҳо тавассути истифодаи василаҳои моделсозии исботшуда (CORSIKA, Geant4), моделҳои муосири таъсири мутақобилаи адронӣ (QGSJET01, QGSJET-II-04), интихоботи оморӣ бо аҳамияти баланд (на камтар аз 200–300 рӯйдод барои ҳар як синф) ва валидасияи салибӣ дар асоси моделҳои гуногун таъмин карда мешавад. Устувории нишондодҳои таснифкунанда тавассути муқоисаи байни моделҳо ва такроршавии натиҷаҳо дар рӯйдодҳои мустақил тасдиқ шудааст. Хатои стандартии арзёбии эҳтимоли хатои таснифотӣ аз ±0.02 зиёд нест.

Мувофиқатии 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 миқдории 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. Ҳамаи коркарди рӯйдодҳои сунъии СВА, оптимизатсияи алгоритмҳо, ҷустуҷӯ ва такмили меъёрҳои интихоби рӯйдодҳо, арзёбии номуайянии барқарорсозии параметрҳои ибтидоии ливнҳо, интихоби параметрҳои оптималии шабакаи детекторҳои зарраҳои барқдор ва меъёрҳо, инчунин тартиби баҳодиҳии энергияи ибтидоӣ шахсан аз ҷониби муаллиф иҷро шудааст.

Таъйиди диссертатсия ва иттилоот доир ба истифодаи натиҷаҳои он. Натиҷаҳои асосии таҳқиқот дар конфронсҳои ҷумҳуриявӣ, умумироссиягӣ ва байналмиллалии зерин маърӯза шудаанд, аз ҷумла International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (Москва, Россия, августи соли 2016), XXIV Конфронси байналмилалии илмии донишҷӯён, аспирантҳо ва олимони ҷавон «Ломоносов-2017» (ДММ ба номи М.В. Ломоносов, Россия, апрели соли 2017), Хонишҳои Ломоносов – 2017 (ДММ ба номи М.В. Ломоносов, Россия, апрели соли 2017), International Cosmic Ray Conference (Пусан, Ҷумҳурии Корея,

июли соли 2017), Мактаби байналмилалии олимони ҷавони кишварҳои ИДМ «Масъалаҳои ҳаммарзи физика ва астрофизикаи зарраҳои энергияи ниҳоят баланд» (Алмато, Қазоқистон, сентябри соли 2017), Конфронси байналмилалии илмии донишҷӯён, аспирантҳо ва олимони ҷавон «Ломоносов-2018» (ДММ ба номи М.В. Ломоносов, Россия, апрели соли 2018), International Workshop on Air Shower Detection at High Altitudes (Институти таҳқиқоти ядроии АИ Россия, сентябри соли 2018), Мактаби байналмилалии олимони ҷавони кишварҳои ИДМ «Масъалаҳои ҳаммарзи физика ва астрофизикаи зарраҳои энергияи ниҳоят баланд» (Бишкек, Қирғизистон, сентябри соли 2019), Симпозиуми физикони Тоҷикистон бахшида ба 85-солагии академик Р. Марупов (Душанбе, Тоҷикистон, ноябри соли 2022), Конфронси ҷумҳуриявии илмӣ-амалии «Рушд ва дастовардҳои илми физика дар солҳои Истиқлолият», бахшида ба 32-солагии Истиқлоли давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон (Душанбе, Тоҷикистон, августи соли 2023), инчунин семинари илмии ба номи Г.Т. Зацепин «Нейтрино ва астрофизикаи ядроӣ» (Институти таҳқиқоти ядроии АИ Россия, октябри соли 2018).

Натиҷаҳои нашршудаи таҳқиқот. Дар асоси натиҷаҳои таҳқиқоти мазкур 9 кори чопӣ ба нашр расидаанд, аз ҷумла: 3 мақола дар маҷаллаҳои ба рӯйхати КОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон шомилшуда, 2 мақола дар маҷаллаҳои тақризшаванда, ки дар пойгоҳи додаҳои Scopus, 4 мақола дар маҷмӯаҳои маърӯзаҳо ва маводи конфронсҳои ҷумҳуриявӣ ва байналмилалӣ.

Сохтор ва ҳаҷми рисола. Рисола аз муқаддима, се боб, хулосаҳо ва рӯйхати адабиёт иборат аст. Ҳаҷми рисола 143 саҳифаи матнро дар бар мегирад ва дорои 41 расм ва 6 ҷадвал мебошад. Рӯйхати адабиёт 170 манбаъро дарбар мегирад..

МАЗМУНИ АСОСИИ ДИССЕРТАТСИЯ

Дар **муқаддима** аҳамияти таҳқиқоти таркиби массавии нурҳои кайҳонии ибтидоӣ (НКИ) дар минтақаи энергияи болотар аз 10^{15} эВ асоснок карда шудааст.

Дар **боби якум** ҳолати кунунии таҳқиқот оид ба омӯзиши НКИ дар минтақаи энергияҳои фавқулбаланд (10^{15} то 10^{20} эВ) бо таваҷҷуҳи хос ба муайянсозии таркиби массавии онҳо баррасӣ шудааст. Усулҳои асосии таҷрибавии таҳқиқи НКИ, аз ҷумла усулҳои бақайдгирии селҳои васеи атмосферӣ (СВА) ва спектроскопияи флуоресцентӣ дида баромада шудаанд. Диққати махсус ба маҳдудиятҳои параметрҳои анъанавӣ, ба монанди амиқи нуқтаи максималии рушди сел X_{max} ва шумораи умумии мюонҳо N_μ дода шудааст, ки бо вуҷуди истифодаи васеъ дар таҷҳизоти TA, Pierre Auger ва KASCADE-Grande, вобастагии баланди моделӣ ва номуайянии флуктуатсионӣ доранд. Дурнамои таҷрибаҳои баландкӯҳӣ дар заминаи баланд бардоштани дақиқии барқарорсозии параметрҳои НКИ дар натиҷаи бақайдгирии барвақти сел ва зиёд шудани зичии зарраҳои дуюмин таҳлил шудаанд. Маълумоти ҷамъбастшуда аҳамияти таҳияи нишонаҳои наверо, ки устувории моделӣ ва ҳассосияти баланд ба массаи зарраи ибтидоиро доро мебошанд, нишон медиҳад, ки асоси равиши методии дар бобҳои минбаъда пешниҳодшударо ташкил медиҳад.

Дар **боби дуюм** масъалаи барқарорсозии параметрҳои СВА аз рӯйи додаҳои шабакаи детекторҳои сцинтиллятсионӣ, ки дар таҷҳизоти баландкӯҳӣ (4250 м) ҷойгиранд, баррасӣ шудааст. Диққати асосӣ ба барқарорсозии дақиқи энергияи ибтидоӣ E_0, самти омадан $\vec{\Theta}$ ва координатҳои меҳвари сел $\vec{x}_{core}$ равона гардидааст. Равиши пешниҳодшуда ду марҳилаи коркарди додаҳоро дарбар мегирад. Дар марҳилаи аввал координатаҳои меҳвари сел бо усули пешакии «маркази масса», ки ба сигналҳои детекторҳо асос ёфтааст, барқарор карда мешаванд. Дар марҳилаи дуюм минимизатсияи муфассали функсияи χ^2 байни

додаҳои таҷрибавӣ ва тақсимоти моделӣ анҷом дода мешавад, ки иборатанд аз:

– тақсимоти паҳлуӣ (латералӣ)-и зичии зарраҳо, ки бо функсияи аналогии Нишимура–Камата–Грейзен ифода мешавад:

:

$$F_{LD}(R) = \frac{a_0}{R^{a_1}\left(1+\frac{R}{a_2}\right)^{a_3}} \qquad (1)$$

– фронти вақтии зарраҳои сел:

$$F_{TF}(R) = R(a_0 + a_1 R + a_2 R^2) \qquad (2)$$

Ду усули коркарди характиристикаҳои фазоӣ-вақтии зарраҳои дар детекторҳои таҷҳизот сабтшуда дида баромада шуданд:

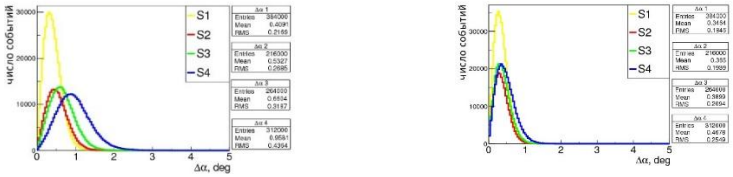
1. Бе ба назар гирифтани таъсири детектор. Дар ин ҳолат додаҳои аввалияи таҷрибавӣ мустақиман аз шумораи зарраҳои баркдори ба детектор воридшуда ва лаҳзаҳои замонии омадани фронти зарраҳо ба ҳар як детектор иборат буданд.
2. Бо ба назар гирифтани таъсири зарраҳо дар дохили детектор. Дар ин ҳолат таъсири мутақобилаи зарраҳо ҳангоми гузаштан аз қабатҳои моддии детектор (сарпӯши алюминии ғафсиаш 2 мм ва қабати полистирол бо ғафсии 2 см) бо ёрии бастаи GEANT4 моделсозӣ шудааст.

Барои таҳқиқи таъсири сохтори шабакаи детекторӣ ба дақиқии барқарорсозӣ қадамҳои шабака ба андозаҳои 10 м, 15 м ва 20 м баррасӣ шуданд. Дар асоси таҳлили рақамӣ ва хатоҳои ҷамъбастшуда муайян карда шуд, ки қадами оптималӣ 15 м мебошад. Барои таҳлили минбаъда шабакаи детекторӣ (11×11 детектор, расми 1) шартан ба чор минтақа (S1–S4) тақсим карда шуд, ки ҳар як минтақа бо зичии гуногуни зарраҳои бақайдгирифташуда ва таъсири флуктатсияҳо тавсиф мегардид. Дар ҳар минтақа ду шарти бақайдгирии зарраҳо истифода шуданд: бо остонаи бақайдгирии ≥1 ва ≥5 зарра (сарфи энергия ≥20 МэВ), ки мутаносибан имкон медоданд ҳамаи сигналҳоро ба қайд гиранд ё ҳодисаҳои садоӣ (шумӣ)-ро кам кунанд. Натиҷаҳо самаранокии шарти пешниҳодшудаи остонагиро барои барқарорсозии хусусиятҳои фазоиву замонии сел тасдиқ

мекунанд ва нишон медиҳанд, ки таъсири флуктатсияҳо ва сигналҳои садоӣ (шумҳо) кам мегардад ва дар айни ҳол пуррагии зарурии оморӣ ҳифз мешавад (расмҳои 2–3).

А) Б)

Расми 1.-Тақсимоти шартии шабакаи детекторӣ ба чор минтақа (S1–S4) дар майдони 300 м × 300 м: (а) намунаи шартии «қолини» детекторҳо бо минтақаҳои S1–S4, ки чоркунҷаҳои сиёҳ детекторҳои фаъолро, ки на камтар аз як зарра сабт кардаанд, нишон медиҳанд, дар ҳоле ки нуқтаҳои сафед детекторҳои ғайрифаъол мебошанд; (б) конфигуратсияи воқеии ҷойгиршавии детекторҳо (150 м × 150 м) бо ҳамон минтақаҳо.

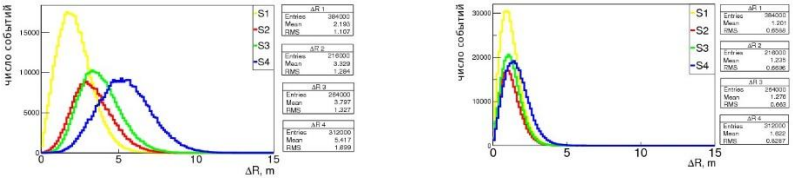


А) Б)

Расми 2.-Номуайяниҳои баҳодиҳии самти δdir -и меҳвар тавассути шабакаи 11×11 детектори зарраҳо барои СВА аз протони энергияи 1 ПэВ: (а) ҳангоми остонаи бақайдгирӣ ≥1 зарра; (б) ҳангоми остонаи бақайдгирӣ ≥5 зарра.

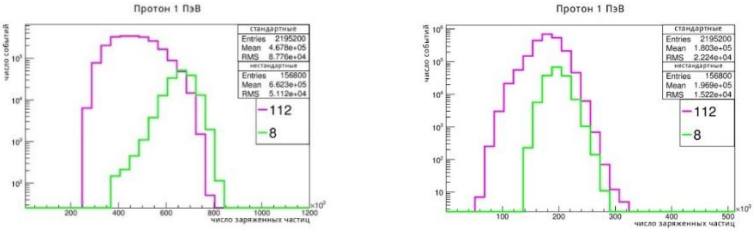
Таҳлили номуайяниҳои барқарорсозии параметрҳои СВА нишон дод, ки ҳангоми интегронӣ кардани зичии зарраҳо дар тамоми доираи радиуси 100 м хатои систематикии баҳодиҳии энергия ба таври назаррас меафзояд (расми 4а). Ин бо сабаби зиёд шудани зичии марказии зарраҳои дуюмдараҷа дар ҳолати амиқ

шудани рушди сел вобаста аст. Нишон дода шуд, ки интегронӣ кардани зичии зарраҳо дар ҳалқае бо радиусҳои дохилии 40 м ва берунаи 100 м хатои систематикии баҳодиҳии энергияи ибтидоиро ба таври назаррас коҳиш медиҳад (расми 4б, Ҷадвали 1).



А) Б)

Расми 3.-Номуайяниҳои баҳодиҳии ҷойгиршавии меҳвари сел δloc тавассути шабакаи 11×11 детектори зарраҳо барои СВА аз протони энергияи 1 ПэВ: (а) ҳангоми остонаи бақайдгирӣ ≥1 зарра; (б) ҳангоми остонаи бақайдгирӣ ≥5 зарра.



А) Б)

Расми 4.-Баҳодиҳии E_0 аз рӯи интеграли тақсимоти паҳлуӣ (ПР) барои 112 сели муқаррарӣ ва 8 сели амиқрушдкарда: (а) интегронӣ дар доираи радиусаш 100 м; (б) интегронӣ дар ҳалқаи байни радиусҳои 40 м ва 100 м.

Бо мақсади ислоҳ намудани таъсири амиқии рушди сел, параметри тачрибавии нишебии K ҷорӣ карда шуд:

$$K = N_{70} / (N_{150} - N_{70}) \qquad (3)$$

Ин ҷо N_{70} ва N_{150} шумораи зарраҳои баркдор дар фосилаи то 70 м ва 70–150 м мебошанд. Ҳар қадаре ки K бузургтар бошад, ҳамон андоза сел ба нуқтаи максималии рушди худ наздиктар аст, ки ин

ба умқи бештари таъсири зарраи ибтидоӣ бо атмосфера ишора мекунад.

Ҷадвали 1.-Номуайяниҳои баҳодиҳии самт δdir, ҷойгиршавии меҳвар δloc ва энергияи ибтидоӣ δE0,% тавассути шабакаи 11×11 детектор барои СВА аз протонҳои энергияҳои 1 ва 10 ПэВ.

E_0,ПэВ	Бе назардошти детектор			Бо назардошти детектор		
	δdir,°	δloc,м	δE_0,%	δdir,°	δloc,м	δE_0,%
1	0.39	1.3	12	0.46	1.2	10
10	0.15	0.6	12	0.18	0.3	12

Ислоҳи интегрални Nch дар ҳалқаи 40 м–100 м бо зарби он ба коэффисиенти C0 амалӣ мегардад. Аз арзиши муайяни остонаи нишебии Кр:

$C_0 = 1$, если $К \leqslant 1$

$C_0 = 1 + a*(К-Кр)$, если $К > 1$

где, a=0.42 и Кр = 7.2

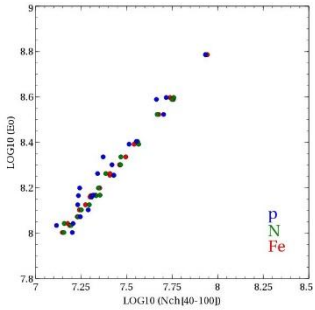
Энергияи ибтидоӣ аз рӯи формулаи зерин баҳодиҳӣ мешавад:

$$\log_{10}(E_0 \,/\, 10GeV) = 0.957 * \log_{10}\left(C_0 * Nch_{(40м-100м)}\right) \qquad (4)$$

Натиҷаҳои рақамии бадастомада нишон медиҳанд, ки методикаи пешниҳодшуда дақиқии муайян кардани координатаҳои меҳвари селро дар ҳудуди 1 м, самти омаданро на бадтар аз 0.5° ва энергияи ибтидоиро бо номуайянии на бештар аз 15% дар минтақаи энергияи 1 ПэВ – 1 ЭэВ таъмин менамояд (расми 5, Ҷадвали 2). Конфигуратсия ва коркарди мутобиқшуда устувории натиҷаҳоро таъмин мекунанд.

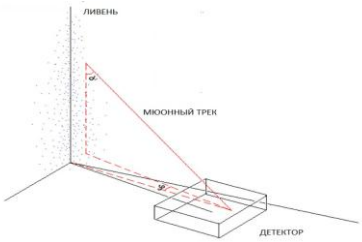
Ҷадвали 2.-Номуайянии баҳодиҳии энергияи ибтидоӣ δE0,% тавассути шабакаи 11×11 детектор барои СВА аз протон дар минтақаи энергияи 1 ПэВ–1 ЭэВ.

Энергияи зарраи ибтидоӣ	Хатои баҳодиҳии энергияи ибтидоӣ, δE_0,%
1 ПэВ	14
10 ПэВ	13
100 ПэВ	15
0.1-1ЭэВ y=-2.7	15



Расми 5.-Вобастагии логарифми энергияи ибтидоии зарра $\log_{10} E_0$ аз логарифми шумораи детекторҳои бақайдгирифташуда $\log_{10} Nch_{[40-100]}$ барои зарраҳо дар минтақаи энергияҳо аз 100 ПэВ то 1 ЭэВ барои як ҳаста.

Дар **боби сеюми** диссертатсия усули таснифи зарраҳои ибтидоии селҳои васеи атмосферӣ (СВА) дар асоси таҳлили шакли тақсимоти кунҷии мюонҳо дар минтақаи энергияҳои 10^{17}–10^{18} эВ таҳия шудааст. Барои татбиқи амалии усули пешниҳодшуда трекери мюонӣ бо масоҳати умумии тақрибан 400 м², ки дар масофаи 100–400 м аз меҳвари сел ҷойгир мешавад, дида баромада шуд (Расми 6).

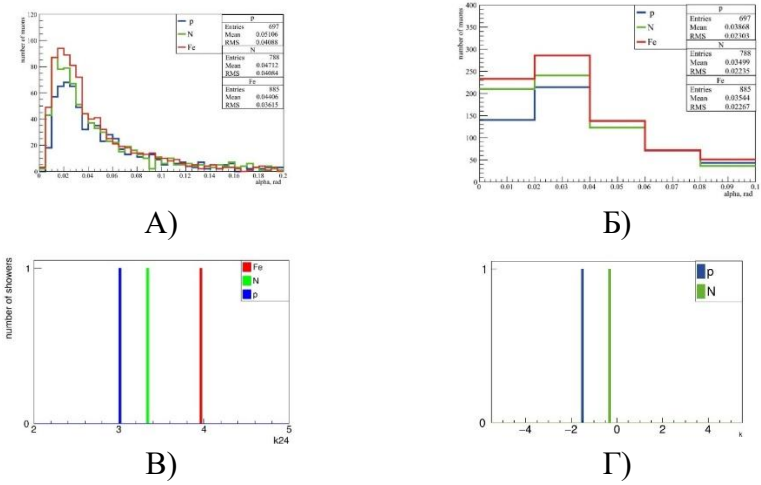


Расми 6.-Геометрияи бақайдгирии СВА бо ёрии трекери мюонӣ.

Аз нуқтаи назари методологӣ, равиши пешниҳодшуда ба ҳисоб кардани хосиятҳои интегралии ҷараёни мюонҳо дар минтақаҳои гуногуни кунҷӣ нисбат ба меҳвари сел асос ёфтааст. Нишонаҳои интегралии S_i, ки бо формулаи зерин ҳисоб мешаванд, ҷорӣ карда шудаанд:

$$S_i = \int_{-0.2}^{0.2} d\varphi \int_{\alpha_{i_{min}}}^{\alpha_{i_{max}}} \Phi(\alpha, \varphi) d\alpha \quad i = 1,2,3,4 \quad (5)$$

дар ин ҷо $\Phi(\alpha, \varphi)$ — зичии ҷараёни мюонӣ, α — кунҷи афтодани мюон нисбат ба амуд, φ — кунҷи азимутӣ. Нишонаҳои $k_{ij} = S_i/S_j$, ки нисбати қиматҳои интегралӣ S_i мебошанд, бо мақсади расидан ба хатои минималии тасниф оптимизатсия шудаанд (Расми 7).



А) Б)

В) Г)

Расми 8.-Намунаҳои тақсимоти кунҷии мюонҳо ва нишонаҳои таснифкунандаи мувофиқ барои навъҳои гуногуни зарраҳои ибтидоии СВА: а) Тақсимоти дифференсиалии кунҷии мюонҳо (аз рӯи кунҷи α); б) Тақсимоти интегралии кунҷии мюонҳо аз рӯи интервалҳо; в) Нишонаи таснифкунанда (таносуби интегралҳо аз интервалҳои 2-юм ва 4-ум) барои ҷудо кардан ба се гурӯҳ (p, N, Fe); г) Нишонаи таснифкунанда барои ҷудосозии ҷуфти p–N.

Ба сифати меъёр таносуби интегралҳои тақсимоти мюонҳо дар минтақаҳои махсус интихобшудаи кунҷӣ (S_2 ва S_4), ки эҳтимолияти минималии хатои таснифи P_{err}-ро таъмин менамоянд, истифода шуданд (Ҷадвали 3).

Таблица 3.-Вероятности ошибочной классификации для пар p–N и N–Fe (модельно-зависимые оптимальные критерии, $E_0 = 100$ПэВ и 1ЭэВ)

E_0	R,м	P_{err}(p-N), QGSJET01	P_{err}(N-Fe), QGSJET01	P_{err}(p-N), QGSJETII	P_{err}(N-Fe), QGSJETII
100 ПэВ	100	0.34	0.34	0.33	0.33
	120	0.33	0.31	0.32	0.32
	150	0.31	0.31	0.32	0.34
1 ЭэВ	100	0.35	0.32	0.28	0.28
	150	0.36	0.31	0.28	0.31
	200	0.34	0.32	0.27	0.32
	250	0.36	0.33	0.27	0.3
	300	0.33	0.33	0.27	0.33
	400	0.35	0.35	0.29	0.32

Эзоҳ. Эҳтимолиятҳо бо ҳиссаҳо нишон дода шудаанд. Хатои баҳодиҳӣ ±0.02 аст. Ҳаҷми додаҳо 300 ҳодиса барои ҳар як синф дар QGSJET-01, 200 ҳодиса барои ҳар синф дар QGSJET-II.

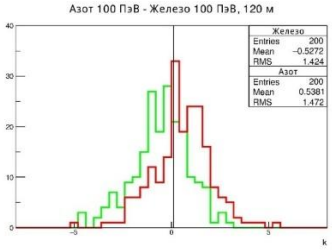
Барои баланд бардоштани устувории усул ва осонии истифодаи амалии он, меъёрҳои универсалие таҳия карда шудаанд, ки ба танзими иловагӣ барои модели мушаххаси таъсири адронӣ эҳтиёҷ надоранд (Ҷадвали 4). Ҳангоми ин, дақиқии тасниф дар сатҳи 60–65% боқӣ мемонад ва фарқият байни моделҳо аз хатои оморӣ (1–2%) зиёд нест. Ҳамчунин нишонаи ягона (универсалӣ) пешниҳод шудааст, ки барои ҳамзамон ҷудо кардани ҳарду ҷуфти зарраҳои ибтидоӣ (p–N ва N–Fe) бо конфигуратсияи якхелаи минтақаҳои кунҷии интегронӣ мувофиқ аст. Эҳтимолияти хатои тасниф бо истифодаи ин равиш 30–40% мебошад (Ҷадвали 5), ки онро воситаи самараноки тасниф дар шароити номуайянии таркиби нурҳои кайҳонӣ ва интихоби модели таъсири адронӣ мегардонад. Барои баҳодиҳии дараҷаи ҷудосозии синфҳо дар сатҳи ҳодисаҳои инфиродӣ гистограммаҳои тақсимоти қиматҳои меъёри $k_{24} = S_2/S_4$ сохта шуданд. Дар расми 8 намунаи чунин тақсимотҳо нишон дода шудааст, ки дар он хатти амудӣ ҳадди оптималиро, ки ду синфро ҷудо мекунад, ифода менамояд.

Ҷадвали 4.-Эҳтимолияти хатои тасниф барои ҷуфтҳои p–N ва N–Fe (меъёрҳои моделӣ-нобаста, E_0=100 ПэВ ва 1 ЭэВ)

E_0	R,м	P_{err}(p-N), QGSJET01	P_{err}(N-Fe), QGSJET01	P_{err}(p-N), QGSJETII	P_{err}(N-Fe), QGSJETII
100 ПэВ	100	0.34	0.34	0.39	0.37
	120	0.33	0.31	0.4	0.37
	150	0.31	0.31	0.35	0.38
1 ЭэВ	100	0.35	0.32	0.33	0.32
	150	0.36	0.31	0.34	0.37
	200	0.34	0.32	0.32	0.34
	250	0.36	0.33	0.32	0.35
	300	0.33	0.33	0.34	0.35
	400	0.35	0.35	0.39	0.39

Ҷадвали 5.-Эҳтимолияти хатои тасниф ҳангоми истифодаи меъёри универсалӣ, ки барои ҷуфтҳои p–N ва N–Fe якхела мебошад.

E_0	R,м	P_{err}(p-N), QGSJET01	P_{err}(N-Fe), QGSJET01	P_{err}(p-N), QGSJETII	P_{err}(N-Fe), QGSJETII
100 ПэВ	100	0.4	0.34	0.39	0.34
	120	0.35	0.3	0.37	0.36
	150	0.34	0.34	0.32	0.37



Расми 8.-Тақсимоти меъёрҳои оптималӣ барои ҷуфти N-Fe дар масофаи 120 м аз меҳвари сел. Бари бинҳо 0.020; 0.015; 0.013; 0.025 бо радианҳо (эҳтимолияти хатои тасниф 31%).

Хулоса

Дар ин кори диссертатсионӣ ҷанбаҳои назариявӣ ва амалии бақайдгирӣ ва таҳлили селҳои атмосферии васеъ (ШАЛ) бо мақсади барқарор намудани параметрҳои зарраҳои аввалия (ПКЧ) дар шароити таҷҳизоти баландкӯҳ мавриди баррасӣ қарор дода шудаанд. Таваҷҷуҳи асосӣ ба таҳия ва асосноккунии усулҳои нав равона шудааст, ки ҳадафи онҳо баланд бардоштани дақиқии арзёбии энергия, самт ва массаи зарраҳои аввалия ҳангоми бақайдгирии ШАЛ дар диапазони энергияи аз 1 ПэВ то 1 ЭэВ мебошад.

Ин таҳқиқот ба масъалаҳои мубрами астрофизикаи муосири энергияҳои баланд такя мекунад ва идомаи тадқиқотҳои байналмилалиро дар бораи таркиб ва манбаи шуоъҳои кайҳонии дорои энергияи аз ҳад зиёд дастгирӣ менамояд.

Таваҷҷуҳи асосии кор ба ду масъалаи бо ҳам зич алоқаманд равона шудааст:

– оптимизатсияи параметрҳои бақайдгирии рӯйдодҳои ШАЛ бо истифода аз шабакаи детекторҳои зарядашуда;

– таҳияи усули нави таснифоти зарраҳои аввалия аз рӯи масса, ки ба таҳлили тақсимоти кунҷии мюонҳо асос ёфтааст.

Дар асоси моделсозӣ ва таҳлили ҳаҷми бузурги маълумотҳо (якчанд ҳазор рӯйдоди моделшуда) натиҷаҳои асосии илмии зерин ба даст оварда шудаанд:

1. Усули барқарорсозии энергия ва самти СВА дар асоси параметризатсияи тақсимоти арзӣ ва фронти вақтии зарраҳои заряднок коркард шуд. Баҳодиҳии номуайянии усул дар шароити дастгоҳи воқеӣ (баландии 4250 м) гузаронида шуд, нишон дода шуд, ки дақиқии муайян кардани энергия метавонад ба ≈15%, самт — то 1° бирасад° [1-М, 2-М, 4-М, 5-М, 7-М, 8-М].

2. Бори аввал усули таснифсозии нурҳои кайҳонии ибтидоӣ (НКИ) аз рӯи масса дар асоси таҳлили шакли тақсимоти кунҷии мюонҳо, ки тавассути трекери мюонӣ ба қайд гирифта шудаанд, пешниҳод карда шуд. Муайян карда шуд, ки нишонаҳои интегралии тақсимоти кунҷӣ (таносуби S_2/S_4 ва ғайра) имкон

медиҳанд, ки протон, нитроген ва оҳан бо эҳтимолияти дурусти тасниф ~65–70% ҷудо карда шаванд [3-M, 5-M, 6-M, 9-M].

3. Устувории усул нисбат ба интихоби модели таъсири адронӣ исбот гардид. Нишонаҳое, ки дар модели QGSJET01 гирифта шудаанд, ҳангоми истифодаи QGSJET-II-04 низ самараноканд. Иваз кардани модел эҳтимолияти таснифро на бештар аз 3–5% тағйир медод, ки ин универсалии равиши пешниҳодшударо тасдиқ мекунад [3-M, 5-M, 6-M, 9-M].

4. Меъёрҳои универсалӣ (моделӣ-нобаста) ва геометрӣ-устувори тасниф, ки дар доираи васеи масофаҳо аз меҳвар (100–200 м) истифода мешаванд, пайдо шуданд. Ин барои дастгоҳҳои воқеӣ, ки на ҳамеша геометрияи дақиқи сел маълум аст, махсусан муҳим аст [3-M, 5-M, 6-M, 9-M].

5. Конфигуратсияи оптималии шабакаи детекторҳои сцинтиллятсионӣ (СЦД) ва трекери мюонӣ барои татбиқи дастгоҳи комплексӣ дар шароити баландкӯҳ пешниҳод шуд. Талаботҳо ба дақиқияти кунҷӣ (на бадтар аз 0.2°) ва масоҳати детектори мюонӣ (~400 м²) барои расидан ба дақиқии қобили қабули таҳлили массавӣ муайян карда шуданд [3-M, 5-M, 6-M, 9-M].

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳои таҳқиқот.

1. Критерияи таҳияшудаи таснифоти зарраҳои ибтидоӣ, ки ба хусусиятҳои интегралии тақсимоти кунҷии мюонҳо асос ёфтаанд, тавсия дода мешавад ҳамчун асос ҳангоми тарҳрезии маҷмуаҳои нави таҷрибавии баландкӯҳӣ истифода шаванд. Ин гуна муносибат ба имконияти беҳтари фарқгузории таркиби массаи зарраҳои ибтидоӣ дар шароити мушаххаси ченкунии кӯҳӣ замина мегузорад.

2. Алгоритмҳои таҳияшуда метавонанд ба нармафзори таҳлили рӯйдодҳои СВА ворид карда шаванд. Пешниҳод мешавад, ки нишонаҳои универсалӣ, ки ба нормасозӣ invariant мебошанд — ба мисли таносуби интегралҳо дар интервалҳои кунҷӣ ($k_{ij} = S_i / S_j$) — истифода бурда шаванд. Ин нишонаҳо интерпретатсияи натиҷаҳоро осон намуда, имконият медиҳанд,

ки таснифи ядроҳо ба гурӯҳҳои сабук, миёна ва вазнин бе вобастагӣ ба модели мушаххаси ҳамкорӣ ё конфигуратсияи детекторҳо анҷом дода шавад.

3. Маводи рисола метавонад ҳангоми таҳияи курсҳои таълимӣ ва машқҳои озмоишгоҳӣ, ки ба методҳои Монте-Карло, таҳлили маълумот ва бозсозии параметрҳои рӯйдодҳо дар физикаи шуоъҳои кайҳонӣ бахшида шудаанд, истифода гардад.

4. Методҳои пешниҳодшуда метавонанд дар таркиби системаҳои бисёрсатҳаии детектории насли нав амалӣ карда шаванд. Омезиши бақайдгирии ҷабҳаи зарраҳои барқнок бо трекерҳои мюонӣ ва воситаҳои оптикӣ (детекторҳои флуоресцентӣ ва черенковӣ) имкон медиҳад, ки дақиқии бозсозии параметрҳои НКИ ба таври назаррас беҳтар карда шавад. Тадқиқоти мазкур асоси методологии татбиқи чунин платформаҳоро, аз ҷумла таҷҳизоти «Помир-XXI», фароҳам месозад.

Руйхати адабиёт

1. Aab, A., et al. Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory: Measurements at energies above 10^17.2 eV // Phys. Rev. D, Vol. 90, 2014. P. 122005.
2. Abbasi R.U., et al. (Telescope Array Collaboration). Mass Composition of Ultra-High-Energy Cosmic Rays with Telescope Array Surface Detector Data // Astroparticle Physics, Vol. 64, 2015. pp. 49-62.
3. Borisov A.S. and Galkin V.I. // J. Phys.: Conf. Ser, Vol. 409, No. 1, 2013. P. 012089.
4. Tamada, M.; Inoue, N.; Misaki, A.; Ohsawa, A.. Detection of high energy electromagnetic and hadron components of air-shower cores in the new hybrid experiment "Pamir-XXI" // EPJ Web of Conferences, Vol. 145. P. 15001.
5. Aab, A., et al. (Pierre Auger Collaboration). Measurement of the cosmic ray spectrum above 4x10^18 eV using inclined events detected by the Pierre Auger Observatory // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP), Vol. 8, 2015. P. 049.
6. Abbasi R.U., et al.. Cosmic Ray Energy Spectrum and Composition from TALE and TA Combined Fit // Proceedings of Science (PoS) ICRC2017, Vol. 562, 2018.
7. Apel W.D., et al.. Cosmic ray mass composition in the 10^15–10^17 eV energy range obtained with KASCADE-Grande // Astroparticle Physics, Vol.

36, 2012. P. 183.
8. Pravdin, M.I., et al. (Yakutsk Array). Energy spectrum of cosmic rays with $E_0 \geq 10^{17}$ eV by Yakutsk array data // JETP Letters, Vol. 96, 2012. P. 789.
9. S. O. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: QGSJET-II model // EPJ Web of Conferences, Vol. 52, 2013. P. 02001.
10. Kampert K.-H., Unger M. Measurements of the Cosmic Ray Composition with Air Shower Experiments // Astroparticle Physics, Vol. 35, 2012. P. 660.
11. Apel, W.D., et al. Lateral distribution of electrons in air showers measured with KASCADE // Astroparticle Physics, Vol. 29, 2008. pp. 412–419.
12. Bertaina, M., et al.. Development of cosmic ray detection techniques: contributions from KASCADE-Grande and other experiments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A., Vol. 845, 2017. pp. 196–199.
13. Grieder P.K.F. Extensive Air Showers. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010.

РӮЙХАТИ ИНТИШОРОТИ МУАЛЛИФ ДОИР БА МАВЗӮИ ДИССЕРТАТСИЯ

I. Мақолаҳо дар маҷаллаҳои байналмилалӣ (индексшуда дар Scopus/Web of Science)

[1-M] **Muqumov A.R.** Designing of a comprehensive high altitude EAS array for primary particle determination within the PAMIR-XXI project / Topchiev N.P., Borisov A.S., Galkin V.I., Bakhromzod R., Batraev V.V., Latipova S.Z., **Muqumov A.R.** // Proceedings of Science. 2018. Vol. 301. P. 475. DOI: 10.22323/1.301.0475.

[2-M] **A.R. Muqumov**. A Method for Estimation of the Parameters of the Primary Particle of an Extensive Air Shower by a High-Altitude Detector / V.I. Galkin, A.S. Borisov, R. Bakhromzod, V.V. Batraev, S.Z. Latipova, **A.R. Muqumov** // *Moscow University Physics Bulletin*. – New York, N.Y., United States: Allerton Press, 2018. – Vol. 73, No. 2. – P. 179–186.

II. Мақолаҳо дар маҷаллаҳои тавсияшудаи КОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон

[**3**-M] **Мукумов, А.Р.** Разделение широких атмосферных ливней по массам в диапазоне энергий 10^{17} эВ - 10^{18} эВ с использованием мюонного трекера в условиях высокогорий/ **Мукумов, А.Р.** // Доклады НАНТ. – 2025. – Т., № 1 – С.52-57.

[**4**-M] **Мукумов, А.Р.** Способ определения энергии первичных космических лучей для высокогорных установок / **Мукумов, А.Р.** // Известия НАНТ. – 2025. –№1. – С.62-68.

[5-M] **Мукумов, А.Р.** Оценка первичных параметров широкого атмосферного ливня по данным детекторов частиц высокогорных установок /

А.Р. Мукумов, В.И. Галкин // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. – 2018. – № 3. – С. 1830801-1–1830801-7.

III. Рӯйхати корҳои нашршуда дар маводи конфронсҳои байналмилалӣ

[6-М] **Мукумов, А.Р.** Разделение атмосферных ливней по массам с помощью мюонного треккера на высокогорной установке / **Мукумов, А.Р.** // 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.

[7-М] **Мукумов, А.Р.** Оценки параметров первичных протонов широкого атмосферного ливня для высокогорной установки с помощью детекторов заряженных частиц / **Мукумов, А.Р.** // 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.

IV. Рӯйхати корҳои нашршуда дар маводи конфронсҳои чумҳуриявӣ

[8-М] **Мукумов, А.Р.** Способ определения энергии первичных космических лучей для высокогорных установок / **Мукумов, А.Р.** // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Развитие и достижения физической науки в годы независимости», посвященной 32-летию Государственной независимости Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, 25–26 августа 2023 г. – Душанбе, 2023. – С 203-205.

[9-М] **Мукумов, А.Р.** Разделение атмосферных ливней по массам в диапазоне энергий 100 ПэВ–1 ЭэВ с помощью мюонного треккера для высокогорных условий / **Мукумов, А.Р.** // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Развитие и достижения физической науки в годы независимости», посвященной 32-летию Государственной независимости Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, 25–26 августа 2023 г. – Душанбе, 2023. – С 218-221.

АННОТАТСИЯ
РУСТАМЗОДА АЪЗАМ РУСТАМ
РУШДИ УСУЛҲОИ МУАЙЯНСОЗИИ МУШАХАССАҲОИ ЗАРРАИ ИБТИДОИИ СЕЛҲОИ ВАСЕИ АТМОСФЕРӢ АЗ РӮИ МАЪЛУМОТИ ДЕТЕКТОРҲОИ ЗАРРАҲОИ ЗАРЯДНОКИ ТАҶҲИЗОТИ БАЛАНДКӮҲӢ

Калидвожаҳо: нурҳои кайҳонӣ, сели васеъи атмосферӣ (СВА), барқарорсозии параметрҳои СВА, тақсимоти кунҷии мюонҳо.

Ҳадафи тадқиқот: таҳия ва асосноккунии ададии усулҳои оптималии барқарорсозии параметрҳои ибтидоии БВА дар шароити дастгоҳҳои баландкӯҳӣ, бо таваҷҷуҳи махсус ба муайян намудани энергия, самти омадан ва массаи зарраи ибтидоии нурҳои кайҳонӣ дар асоси таҳлили сохтори фазоӣ-вақтии фронти зарраҳои заряднок ва тақсимоти кунҷии мюонҳо.

Усулҳои тадқиқот ва таҷҳизоти истифодашуда: натиҷаҳои асосии рисола тавассути усулҳои моделсозии омории СВА бо истифодаи бастаи барномавии CORSIKA (моделҳои QGSJET01 ва QGSJET-II-04), таҳлили додаҳо бо истифодаи китобхонаҳои ROOT ва MINUIT, инчунин моделсозии вокуниши детекторҳои сцинтиллятсионӣ тавассути бастаи барномавии GEANT4 ба даст омадаанд.

Натиҷаҳои бадастомада ва навовариҳои онҳо: усули нави барқарорсозии параметрҳои зарраи ибтидоии СВА дар асоси тақсимоти паҳноӣ ва фронти вақтии зарраҳои заряднок таҳия шудааст, ки дақиқияти муайян кардани энергия, самти омадан ва координатаҳои меҳвари СВА-ро дар энергияи $E_0 \geq 1$ ПэВ ба таври назаррас баланд мекунад; аломати нави таснифкунанда дар асоси хусусиятҳои интегралии тақсимоти кунҷии мюонҳо барои бори аввал пешниҳод ва асоснок шудааст, ки имкон медиҳад ядроҳоро ба гурӯҳҳои сабук, миёна ва вазнин дар диапазони энергияи 100 ПэВ – 1 ЭэВ бо эътимоднокии баланд ҷудо кард; устувории аломатҳои пешниҳодшуда нисбат ба интихоби моделҳои таъсири адронӣ (QGSJET01, QGSJET-II-04) собит шудааст: эҳтимоли хато дар таснифот аз 3–5 нуқтаи фоизӣ зиёд тағйир намеёбад, ки универсалии усулро тасдиқ мекунад; бори аввал меъёрҳои универсалии таснифоти рӯйдодҳо барои ҷудокунии протон-нитроген ва нитроген-оҳан бо як арзиши ягонаи порогии аломат пешниҳод шудаанд, ки ба шароитҳои мухталифи моделӣ ва дурӣ аз меҳвари сел мутобиқсозӣ талаб намекунад.

Тавсияҳо оид ба татбиқи амалии натиҷаҳо: натиҷаҳои тадқиқот метавонанд дар лоиҳакашӣ ва рушди дастгоҳҳои детектории баландкӯҳӣ барои омӯзиши нурҳои кайҳонии диапазони энергияи 1 ПэВ – 1 ЭэВ истифода шаванд..

Самти татбиқ: физикаи нурҳои кайҳонӣ, физикаи зарраҳои элементарӣ, астрофизикаи таҷрибавии энергияҳои баланд.

АННОТАЦИЯ
РУСТАМЗОДА АЪЗАМ РУСТАМ
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКОГОРНЫХ УСТАНОВОК

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, восстановление параметров ШАЛ, угловое распределение мюонов.

Цель исследования: разработка и численное обоснование оптимальных методик восстановления первичных параметров ШАЛ в условиях высокогорных установок, с особым акцентом на определение энергии, направления прихода и массы первичной космической частицы на основе анализа пространственно-временной структуры фронта заряженных частиц, а также углового распределения мюонов.

Методы исследования, использованная аппаратура: Основные результаты диссертации получены методом статистического моделирования широких атмосферных ливней (ШАЛ) с применением пакета CORSIKA (модели QGSJET01 и QGSJET-II-04), анализа данных с помощью библиотек ROOT и MINUIT, а также моделирования отклика сцинтилляционных детекторов с использованием GEANT4.

Полученные результаты и их новизна: разработана новая методика реконструкции параметров первичной частицы ШАЛ по поперечному распределению и временному фронту заряженных частиц, повышающая точность оценки энергии, направления и координат оси ливня при энергиях $E_0 \geq 1$ ПэВ; предложен новый классифицирующий признак для оценки массы первичной частицы по интегральным характеристикам углового распределения мюонов, впервые обеспечивающий устойчивое разделение ядер на лёгкие, средние и тяжёлые в диапазоне энергий 100 ПэВ–1 ЭэВ.; показано, что предложенные признаки устойчивы к выбору модели адронного взаимодействия (QGSJET01, QGSJET-II-04): вероятность ошибки классификации меняется не более чем на 3–5 п.п., что подтверждает универсальность метода; впервые построены универсальные критерии классификации событий для разделения протон-азот и азот-железо с единым порогом признака, не требующие адаптации под модель или расстояние до оси ливня, что расширяет практическую применимость метода.

Рекомендации по практическому использованию результатов: Результаты исследования могут быть использованы при проектировании высокогорных детекторных установок для изучения космических лучей энергий 1 ПэВ – 1 ЭэВ.

Область применения: Физика космических лучей, физика элементарных частиц, экспериментальная астрофизика высоких энергий.

ANNOTATION
RUSTAMZODA AZAM RUSTAM
DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETERMINING PRIMARY PARTICLE PARAMETERS OF EXTENSIVE AIR SHOWERS FROM CHARGED PARTICLE DETECTORS AT HIGH-ALTITUDE INSTALLATIONS

Keywords: cosmic rays, extensive air showers (EAS), reconstruction of EAS parameters, angular distribution of muons.

Research objective: Development and numerical justification of optimal methods for reconstructing primary EAS parameters at high-altitude experimental installations, with special emphasis on determining the energy, arrival direction, and mass of the primary cosmic-ray particle based on the spatio-temporal structure of the charged-particle front and the angular distribution of muons.

Research methods and equipment used: The main results were obtained through statistical modeling of extensive air showers (EAS) using the CORSIKA simulation package with hadronic interaction models QGSJET01 and QGSJET-II-04. Data analysis and shower parameter reconstruction were performed using standard analysis tools, including ROOT and MINUIT libraries. Detector response modeling was carried out using the GEANT4 software framework.

Results and scientific novelty:a new method for reconstructing the primary particle parameters of EAS based on the lateral distribution and temporal front of charged particles has been developed, significantly improving the accuracy of reconstructing the shower energy, arrival direction, and core position for energies $E_0 \geq 1$ PeV; a novel classification criterion based on integral characteristics of the angular distribution of muons was proposed and justified, enabling, for the first time, stable separation of nuclei into light, intermediate, and heavy groups within the energy range of 100 PeV–1 EeV; the robustness of the developed classification criteria with respect to different hadronic interaction models (QGSJET01 and QGSJET-II-04) was demonstrated. The probability of classification error varied by no more than 3–5 percentage points, confirming the universality of the proposed approach; universal event classification criteria were introduced for proton-nitrogen and nitrogen-iron separation using a single threshold, eliminating the need for adaptation to specific models or distances to the shower axis, thus enhancing practical applicability.

Practical recommendations: The results obtained can be used for designing high-altitude detector installations aimed at investigating cosmic rays in the energy range 1 PeV–1 EeV.

Field of application: Cosmic ray physics, particle physics, experimental high-energy astrophysics.