

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФТИ им. С. У. Умарова НАНТ
Ф. ШОКИР
(26) января 2023 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

расширенного семинара Физико-технического института им С. У. Умарова
Национальной академии наук Таджикистана

Диссертация Ризои Бахромзод выполнена в Международном центре ядерных исследований Физико-технического института им С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

В период подготовки диссертации Р. Бахромзод являлся младшим научным сотрудником (2014), и. о. ведущего (12.2018–03.2019) и ведущим научным сотрудником (с 04.2019) Международного центра ядерных исследований Физико-технического института им С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

В 2014 году соискатель окончил факультет физики Таджикского национального университета по специальности «астрономия» и в период 2014–2018 гг. обучался в аспирантуре кафедры физики космоса физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова по специальности «Физика высоких энергий».

Научный руководитель:

Галкин Владимир Игоревич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики космоса физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

По результатам рассмотрения диссертации **«Развитие методов выделения ливней от γ -квантов очень высокой энергии по данным черенковских детекторов высокогорных установок»** принято следующее заключение:

Ризои Бахромзод в своей научной диссертации разработал новый метод выделения гамма-квантов на фоне ядерных ливней на основании детального моделирования черенковского света ШАЛ, построил конкретный вариант этого метода для практического применения в эксперименте «Памир-XXI», оценил чувствительность оптической части установки и время наблюдения источников гамма-квантов очень высокой энергии.

Работа диссертанта связана с проектом «Памир-XXI», предполагающего создание комплексной установки для регистрации космических лучей сверхвысоких энергий 30 ТэВ — 1 ЭэВ методом ШАЛ на уровне наблюдения

4250 м над уровнем моря в горах Восточного Памира. В составе комплексной установки предусмотрена оптическая часть, состоящая из сети быстрых оптических детекторов и нескольких угловых (растровых) телескопов и позволяющая осуществлять гибридную регистрацию ШАЛ по его черенковскому свету. В частности, благодаря созданной автором новой методике имеется возможность выделять события от гамма-квантов с энергиями 30 – 1000 ТэВ. Регистрация квантов с энергией выше 100 ТэВ является прямым указанием на ускорение космических лучей в галактических источниках до энергий 1 ПэВ и выше. Такие события уже были зарегистрированы несколькими экспериментальными группами. Новая установка будет иметь чувствительность в указанном диапазоне энергий на уровне детекторов проекта СТА при условии применения новой методики детектирования и обработки данных.

Цели диссертационной работы:

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

Задачи исследования:

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

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

Предметом исследования являлись способы регистрации и оптимальной обработки этих характеристик (ПВР, ПУР) для получения эффективных оценок

параметров первичной частицы ШАЛ (первичная энергия E_0 , направление прихода Θ , положение оси x_0 и y_0).

Научная новизна исследования:

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

Теоретическая и научно-практическая значимость исследования:

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

Положения, выносимые на защиту:

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

Степень достоверности результатов. Для генерации искусственных событий использовался признанный во всем мире код CORSIKA, для каждого события сохранялась детальная информация о пространственно-временном и

пространственно-угловом распределении черенковского света, а также полные стандартные файлы с информацией о вторичных частицах. При обработке использовались данные о фоне ночного неба в горах Восточного Памира. В работе использовались стандартные программные инструменты CERN и процедуры, реализующие общепризнанные численные методы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

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

1. Изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики.
2. Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений. Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики.
8. Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов. Моделирование физических явлений и процессов.

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

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

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

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов. Основные результаты исследований докладывались на

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

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

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

[2-А] Bakhromzod, R. The search and analysis of optimal criteria for the selection of extensive air showers from - quanta by Cherenkov telescopes / R.Bakhromzod, V.I.Galkin // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. – 2021. – Vol. 1018. – P. 165842.

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

[4-А] Бахромзод, Р. Анализ критерия отбора гамма-квантов по угловому распределению черенковского света установкой „Памир-XXI“ / Бахромзод Р.,

Галкин В.И. // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2019. – № 6. – 1960201.

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

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

Работа соответствует специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате. Опубликованные автором работы достаточно полно раскрывают содержание диссертационного исследования.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям Положения ВАК Таджикистана, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации Ризои Бахромзод заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики» в диссертационном совете 6D.KOA-055 при Физико-техническом институте им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

Заключение принято на заседании расширенного семинара Физико-технического института им С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

Присутствовало на заседании 57 человек. Результаты голосования: «за» – 57 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 2 от 26 января 2023 г.

Председатель расширенного семинара,
к. ф.-м. н.



Ф. Холмуродов

Секретарь расширенного семинара,
к. ф.-м. н.



С. Юнусова