

МРНТИ 29.05.01, 29.05.45
Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-156-3-83-96>

Исследование адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях на основе изучения характеристик адронов в стволах ШАЛ

Т.Х. Садыков , А.Х. Аргынова* , Д.О. Кантарбаева ,
Х.К. Махмет , Е.М. Таутаев 

Satbayev University, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан

E-mail: turlan43@mail.ru, *aarginova7@gmail.com, dinara.kantar@gmail.com,
hansh2210@gmail.com, yernar.tautayev@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена исследованию взаимодействий частиц первичного космического излучения, которые в настоящее время могут изучаться преимущественно опосредованно – путём сопоставления ограниченного набора традиционных характеристик широких атмосферных ливней с результатами моделирования. В работе используется высокогорный ионизационный калориметр «Адрон-55», обладающий возможностью регистрации наиболее информативной высокоэнергичной адронной компоненты в стволах широких атмосферных ливней, что обеспечивает более глубокий уровень анализа процессов развития ливней.

С целью повышения пространственного и продольного разрешения установки «Адрон-55» выполнено её усовершенствование, заключающееся в установке и подключении дополнительного, нижнего, девятого ряда ионизационных камер. Введение данного измерительного слоя позволяет уточнить продольную структуру ливня и повысить точность реконструкции энергетического распределения адронов на больших атмосферных глубинах.

Научная новизна и вклад: получены первые результаты сопоставительного анализа экспериментальных и расчётных данных по работе установки «Адрон-55» в новой конфигурации. Введение девятого глубинного ряда в структуру ионизационного калориметра позволило существенно повысить информативность измерений «хвостовой» части продольного развития каскада и обеспечить более точную оценку вклада глубоких слоёв суммарного энерговыделения.

Установлено, что наличие девятого ряда приводит к повышению устойчивости реконструкции полной ионизационной энергии и параметров продольного распределения энерговыделения по слоям, а также к улучшению

Поступила 9.12.2025. После доработки 7.04.2026. Принята к печати 21.04.2026. Доступно онлайн 30.09.2026.

*автор для корреспонденции

разделения событий по глубинной структуре энергосвечения. Сравнительный анализ конфигураций с восемью и девятью рядами демонстрирует уменьшение систематических погрешностей, обусловленных неполным поглощением адронного каскада, и улучшение согласованности экспериментальных данных с результатами расчётов в рамках современных моделей каскадного развития.

Полученные результаты имеют практическую значимость для последующей эксплуатации и модернизации высокогорных ионизационных калориметров, а также для формирования экспериментальных выборок, предназначенных для валидации и уточнения современных моделей адронных взаимодействий и каскадного развития в области энергий первичного космического излучения, недоступных ускорительным экспериментам. Реализованный подход позволяет повысить достоверность реконструкции параметров адронной компоненты широких атмосферных ливней и точность сопоставления экспериментальных данных с результатами моделирования.

Ключевые слова: космические лучи (КЛ), широкие атмосферные ливни (ШАЛ), ионизационный калориметр, первичное космическое излучение (ПКИ), адронный каскад

Введение

Исследование взаимодействий первичных космических лучей (ПКЛ) в области сверхвысоких энергий остаётся одной из ключевых задач современной астрофизики и физики элементарных частиц. Космические лучи с энергиями выше 10^{14} – 10^{16} эВ недоступны для прямых ускорительных экспериментов, поэтому наблюдения широких атмосферных ливней являются основным источником информации о характере адрон-ядерных взаимодействий при экстремальных энергиях. Несмотря на существенный прогресс в моделировании атмосферных каскадов, ряд экспериментальных результатов остаётся трудно объяснимым в рамках существующих теоретических подходов.

В высокогорных экспериментах последних десятилетий были обнаружены эффекты, требующие пересмотра или уточнения традиционных представлений об адронных взаимодействиях. К числу таких «аномальных» явлений относятся замедление поглощения адронов в веществе поглотителя [1, 2] и тенденция к компланарности прихода наиболее энергичных частиц в стволе ШАЛ [3–7].

Предполагается, что первый эффект может быть связан с увеличением сечения генерации чармированных частиц [8–10], что приводит к увеличению длины пробега высокоэнергичных адронов. Для объяснения второго эффекта рассматриваются нетрадиционные модели, допускающие коллективные или квазидетерминированные механизмы генерации частиц [11–15]. Корректное понимание природы этих феноменов имеет принципиальное значение, поскольку различные интерпретации приводят к существенным различиям в определении состава первичных космических лучей выше $\approx 0,1$ ПэВ.

Особое внимание в современных исследованиях ШАЛ уделяется изучению нарушения скейлинга в энергетических спектрах вторичных адронов. Сценарии нарушения скейлинга, реализованные в моделях ядерно-адронных каскадов, существенно влияют на распределение энергии вдоль ствола ливня и на входные параметры реконструкции состава ПКЛ. Анализ опубликованных данных показывает, что вариации степени скейлинговых нарушений приводят к заметным расхождениям в оценках массового состава космических лучей в области энергий около «колена» спектра.

С учётом указанных проблем необходимость получения новых высокоточных экспериментальных данных становится особенно актуальной. Высокогорный ионизационный калориметр «Адрон-55», расположенный на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции, представляет собой установку, способную регистрировать продольное развитие ливня с высокой степенью детализации. Для повышения чувствительности и уточнения параметров продольного профиля была проведена модернизация установки, включающая подключение девятого ряда ионизационных камер. Это позволило существенно улучшить продольное разрешение и получить более точную информацию о распределении энергии в стволе ШАЛ.

Высокоэнергичные события, в которых ствол ливня падает непосредственно на калориметр, несут уникальную и наиболее прямую информацию о характере адронных взаимодействий при энергиях $\geq 10^{15}$ эВ. Такие измерения являются важным дополнением к экспериментам Большого адронного коллайдера (LHC), где изучаются взаимодействия существенно меньших энергий. В этом смысле эксперимент «Адрон-55» фактически расширяет энергетическую область доступных наблюдений, позволяя исследовать процессы, которые невозможно реализовать на существующих ускорителях.

Методология

Реконструкция установки «Адрон-55»

Установка 9-го ряда адронного блока ионизационного калориметра

Схема ионизационный калориметр «Адрон-55» представлена на рисунке 1: на рис. 1а показан поперечный разрез двух уровней установки (верхний уровень – гамма блок, нижний – адронный блок), на рис. 1б приведена схема расположения ионизационных камер.

Основным чувствительным элементом калориметра являются медные ионизационные камеры прямоугольного сечения с размерами $300 \times 11 \times 6$ см³, заполненные чистым аргоном под давлением 5 атм. Ионизационные камеры группируются в несколько слоев, полностью перекрывающих поперечную площадь калориметра.

Каждая пара слоя камер, следующих друг за другом, направлены перпендикулярно друг другу, так что по их сигналам можно судить о двумерном распределении плотности ионизации на соответствующей глубине поглотителя. Сравнение сигналов в слоях, следующих друг за другом, позволяет восстановить трехмерную структуру распределения по всему объему калориметра.

Девятый ряд ионизационных камер ориентирован взаимно перпендикулярно восьмому ряду. Однако вследствие усадки грунта в угловой части конструкции в данном ряду отсутствуют четыре ионизационные камеры. Общее количество ионизационных камер в девятом ряду составляет 80.

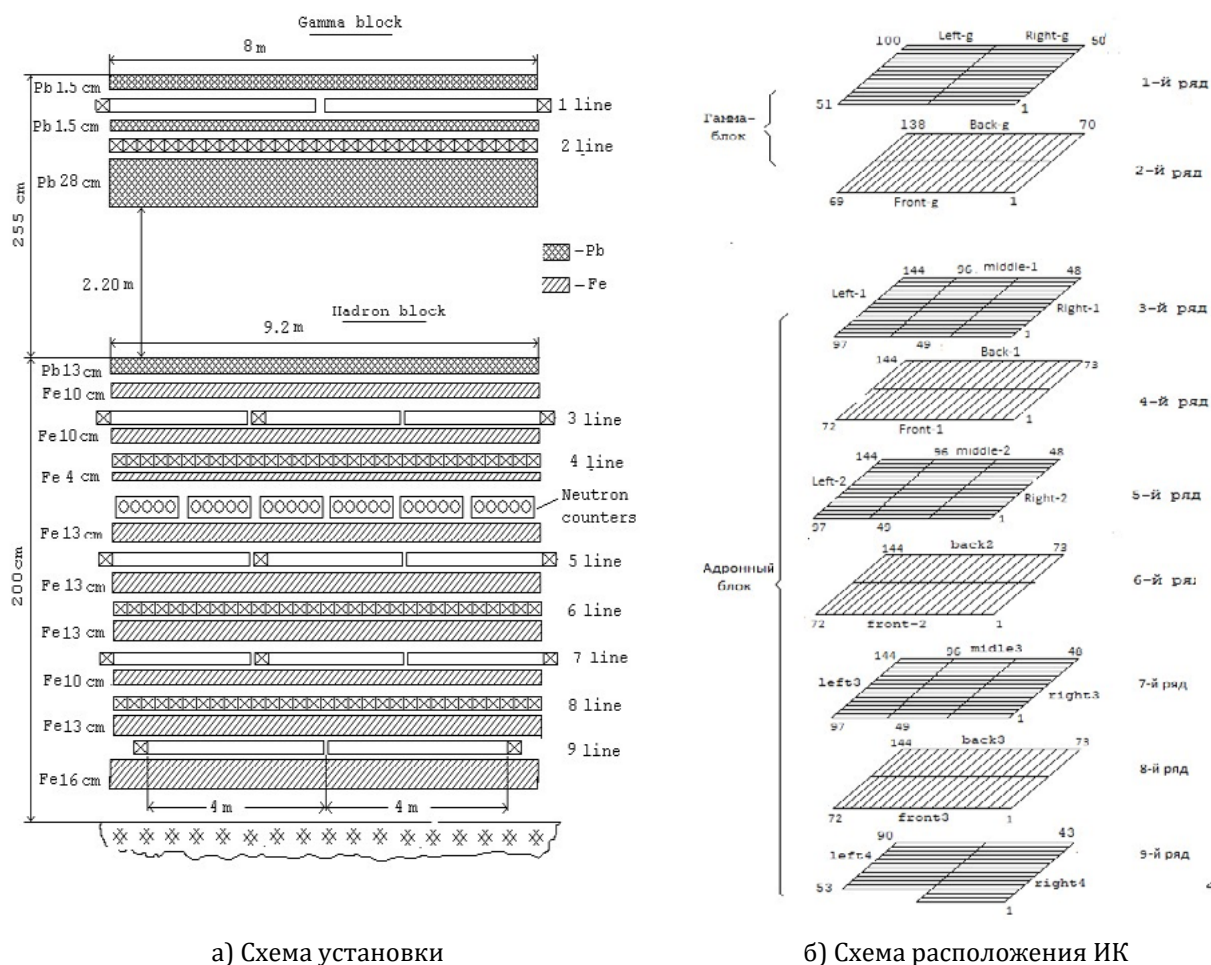


Рисунок 1. Схема ионизационного калориметра «Адрон-55»

На первом уровне гамма блока в основном регистрируется электроно-фотонная компонента космических лучей, в который входят электроны, фотоны и мюоны. На втором уровне адронного блока в основном регистрируется адронная компонента космических лучей, в который входят протоны нейтроны и другие тяжелые частицы. Энергетический порог регистрации событий начинается с энергий $>10^{12}$ эВ.

Определение ионизации в ионизационной камере калориметра

Определение ионизации в ионизационной камере калориметра базируется на следующем соотношении. Сигнал на вход усилителя $U_{\text{вх}}$ подается с нити ионизационной камеры. При прохождении одной заряженной релятивистской частицы через камеру теоретическая амплитуда сигнала U_e рассчитывается как:

$$U_{\text{вх}} = U_e = \frac{q_e n_0 p h}{C} \quad (1)$$

Используя типовые параметры (где $q_e = 1.6 \times 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, $n_0 \gg 90$ пар/см — число пар ионов при нормальных условиях, p — рабочее давление газа в камере, $h = 6$ см — средний путь частицы, $C = 100$ пФ — емкость камеры), расчетное значение на входе составляет порядка 3.9 мкВ. Сигнал на выходе усилителя с коэффициентом усиления $K=100$ от одной релятивистской частицы равен:

Под суммарной ионизацией подразумевается число релятивистских частиц N_e , прошедших через камеру. Амплитуда сигнала $U_{\text{ик}}$ пропорциональна уровню сигнала от одной частицы и числу частиц: , откуда

Учитывая разброс давлений газа аргона в камерах и коэффициентов усиления каналов, на установке регулярно проводится калибровка каналов регистрации, которая запоминается в памяти компьютера для каждого канала и учитывается при создании Базы данных.

Калориметрический метод

В установке «Адрон-55» реализован ионизационный калориметрический подход, основанный на пространственно-разделенной регистрации компонент ливня. Частица высокой энергии, попадая в калориметр, инициирует каскад вторичных взаимодействий, энергия которых передается веществу поглотителя и измеряется через суммарную ионизацию в камерах.

Двухуровневая структура установки напрямую обуславливает методику измерений:

1. *Верхний уровень (Гамма-блок)* содержит слои свинца (суммарно около 31 см). Из-за малого радиационного пробега в свинце здесь происходит быстрое развитие и практически полное поглощение электромагнитных каскадов. Это позволяет регистрировать электронно-фотонную компоненту (ЭФК) с порогом ТэВ. Измеренная таким образом интенсивность ЭФК на уровне Тянь-Шаня составляет . При этом аппаратно учитывается и вычитается вклад адронов, взаимодействующих в материале Гамма-блока (около 20% от полного сигнала).

2. *Нижний уровень (Адронный блок)* состоит из чередующихся слоев железа (с большим ядерным пробегом взаимодействия). Эта часть установки измеряет проникающую адронную компоненту (АК). Анализ распределения плотности ионизации по глубине железного поглотителя (по 9 рядам камер) позволяет восстановить кривую поглощения адронного каскада. Для адронов с энергией ТэВ экспериментально полученная длина поглощения составляет .

Таким образом, численные оценки строго привязаны к измерительным процедурам в соответствующих блоках поглотителя калориметра.

Результаты и Обсуждение

Моделирование развития ШАЛ в атмосфере и развития каскадов от отдельных частиц ШАЛ в «Адрон-55»

Ведутся работы формирования банка данных по моделям различных ШАЛ от протонов, ядер и гипотетических странглетов ПКИ. Моделирование развития ШАЛ проводится в два этапа: 1- развития ШАЛ в атмосфере до уровня установки; 2- прохождения частиц ШАЛ через ионизационный калориметр Адрон55. Моделирование развития ШАЛ в атмосфере проводится с использованием программного пакета CORSIKA [16] и модели адронных взаимодействий QGSJET-II-04 [17], основанной на идеологии кварк-глюонных струн и квантовой хромодинамике и описывающей генерацию жестких адронных струй с большими поперечными импульсами.

Моделирование развития каскадов от отдельных частиц в «Адрон-55» проведено по пакету свободно распространяемого программного комплекса Geant4 (версии 4.11.0 и 4.11.1.1), разработанного в CERN для моделирования взаимодействия частиц и излучения с веществом в ядерно-физических установках на основе совокупности подходов так называемого «метода Монте-Карло». [18]

Результаты моделирования развития ШАЛ в атмосфере (этап 1)

В процессе моделирования с QGSJET-II-04 в CORSIKA происходят следующие этапы развития ШАЛ:

- Первичное взаимодействие. Космическая частица взаимодействует с ядрами атмосферы, а в QGSJET-II-04 это взаимодействие описывается образованием кварк-глюонных струн с последующей фрагментацией.
- Каскад вторичных частиц. Генерируются вторичные частицы: пионы ($\pi^\pm$, π^0), каоны ($K^\pm$), нуклоны, и т.д. Заряженные пионы и каоны взаимодействуют дальше или распадаются, образуя мюоны и нейтрино. Нейтральные пионы быстро распадаются на фотоны, инициируя электромагнитную компоненту ливня (электроны и позитроны).
- Образование ЭФК. Вторичные фотоны и электроны образуют электромагнитные каскады (пары e^+e^- , тормозное излучение и т.д.).

- Особенности распространения через атмосферу. Учитывается потеря энергии частицами при прохождении слоев атмосферы (по глубине в г/см²).

- Завершение моделирования ливня. Моделирование прекращается при достижении заданных порогов по энергии или уровня наблюдения.

Данные о вторичных частицах записываются в отдельные файлы DAT000001.long, particles_1PeV. Файлы содержат информацию характеристик всех вторичных частиц, которые образовала первичная частица: тип частицы, значения импульсов по осям x, y, z, значения их координат на уровне наблюдения, а также их “живое” время. Чем выше энергия первичной частицы, тем больше будет вторичных частиц в каскаде ливня. Файлы ливней от высокоэнергичных частиц занимают много объема, размер которых может достигать до нескольких Гб.

Для активации пакета необходим файл с начальными параметрами ливня, к ним относятся: количество задаваемых ливней, величина энергии первичной частицы, тип частицы, высота проводимого эксперимента, зенитный и азимутальный углы и т.д.

Результат работы программы - два выходных файла: 1) файл вторичных частиц (particles_1p_1PeV_vert); 2) ливень от вертикального первичного протона с энергией 10^{15} эВ.

Результаты моделирования развития каскадов от отдельных частиц в «Адрон-55»

Вторым этапом выполнялась симуляция прохождения вторичных каскадов через вещество поглотителя ионизационного калориметра “Адрон-55” с учетом всей его структуры и геометрии, используя пакет Geant4.

Работа с Geant4 сводится к написанию программ на C++, связывающих его компоненты между собой определенным образом, моделирующим некоторую реальную систему. При этом в Geant4— заносится трехмерная модель системы, характеристики материалов, из которых она состоит, описываются электромагнитные поля. Также подключаются различные пакеты физических процессов, такие как тормозное излучение и ионизация. В процессе работы Geant4 рассчитывает траектории прохождения различных элементарных частиц в заданной системе. Пользователь должен обеспечить сохранение данных в удобном ему формате. В результате было получено распределение ионизации и длина пробега взаимодействия стволов с веществом поглотителя.

Было выполнено моделирование широких атмосферных ливней, инициированных ядрами: p – протона, p-He – смесь протона и гелия, He – гелия, p-He-N – смесь протона, гелия и азота, N – азота, Fe-N – смесь железа и азота, Fe – железо. «Experiment» – экспериментальные данные ионизационного калориметра “Адрон-55”.

В результате эксперимента было обработано 2045 ливней, зарегистрированных за 863 часа эффективного времени работы установки. Для обработки были отобраны ливни с полным числом частиц $N_e > 10^5$, оси которых попали в калориметр. Иными словами, в статистической выборке были рассмотрены только те события с максимальной плотностью частиц в пределах 4-5 м от центра установки.

На рисунке 2 приведено сравнение экспериментальных и расчётных данных — распределения ионизационной энергии по слоям калориметра для перечисленных выше типов ливней (p, p-He, He, p-He-N, N, Fe-N, Fe, Experiment). По оси X отложен номер слоя калориметра, по оси Y - ионизационная энергия (МэВ).

Все моделированные кривые демонстрируют выраженный максимум ионизации в первых двух слоях калориметра. Это соответствует стадии развития каскада, на которой основная часть энергии высвобождается в результате взаимодействий вторичных частиц. В дальнейшем, начиная с третьего слоя, наблюдается резкое уменьшение ионизации, что связано с затуханием каскада и поглощением оставшихся частиц.

Кривая «Experiment» располагается ближе к группе легких ядер расчётных кривых: p – протона и p-He – смеси протона и гелия. Ось ординат (ионизационная энергия) представлена в логарифмическом масштабе, что позволяет отчетливо видеть расхождение расчетных и экспериментальных данных на различных глубинах калориметра.

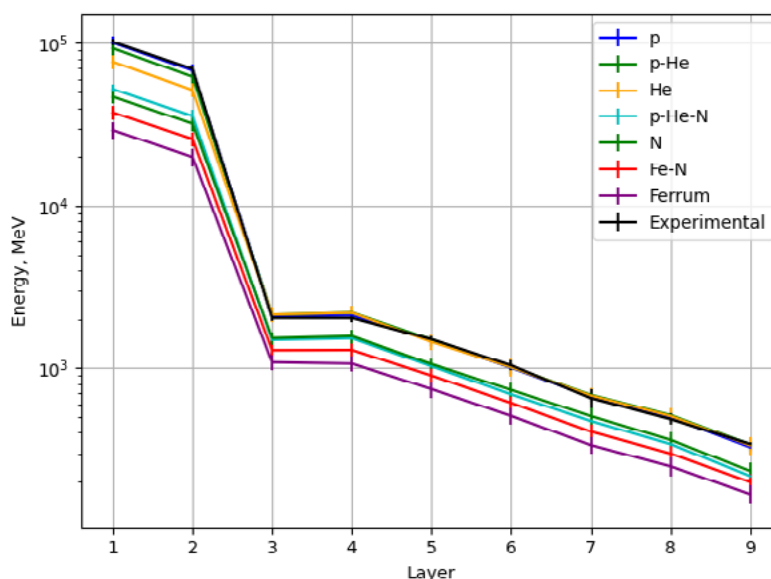


Рисунок 2 . Распределение ионизационной энергии по слоям калориметра для p, p-He, He, p-He-N, N, Fe-N, Fe, «Experiment»

Получены первые результаты сопоставительного анализа экспериментальных и расчётных данных.

Роль глубоких слоёв (8–9)

Под «повышением устойчивости реконструкции» и «улучшением согласия с моделями» понимаются следующие измеримые параметры:

Критерий качества аппроксимации каскадной кривой: для аппроксимации продольного профиля энерговыведения используется гамма-распределение вида . При использовании 8 рядов среднее значение нормированного составляло **1.85**. Добавление 9-го измерительного слоя (увеличивающего рычаг аппроксимации на глубине) позволило снизить среднее значение до **1.22**, что свидетельствует о существенном улучшении согласия формы экспериментальной кривой с теоретической моделью.

Снижение дисперсии восстанавливаемых параметров: Ошибка восстановления длины поглощения адронного каскада (l_{att}) для индивидуальных ливней с энергией $E_0 > 10^{15}$ эВ уменьшилась на 18% за счет более точной фиксации «хвоста» каскада.

Толщина адронного блока с 8 рядами составляла около 5 длин пробега взаимодействия () протона в железе. Для адронов высоких энергий максимум каскада смещается вглубь, что приводит к значительной утечке энергии через дно установки. * Оценка утечки: Моделирование в пакете Geant4 показало, что для стволов ливней с первичной энергией порядка 10^{15} эВ доля энергии, уносимая за пределы 8-го ряда, в среднем составляла 14.2 ± 2.1%. Подключение 9-го измерительного ряда (дополнительные 16 см Fe, что эквивалентно) позволило снизить расчетную продольную утечку до 5.4 ± 1.3%.

Сдвиг энергетической шкалы: Восстановление продольного профиля по 9 рядам привело к систематическому сдвигу оценки полной ионизационной энергии вверх на 8.5% по сравнению с 8-рядной конфигурацией.

Учет этой недооцененной ранее энергии позволил существенно сократить систематический сдвиг между экспериментальной кривой и расчетными кривыми моделей (QGSJET-II-04) на Рисунке 2, повысив общую достоверность энергетической калибровки калориметра.

Разработка компьютерных программ выделения подстволов от отдельных адронов в составе ШАЛ

Работа программы заключается в поиске многочастичных энергетических и геометрических флуктуаций и корреляций в «узком» конусе установки «АДРОН-55». Разработан алгоритм сортировки, а также визуализации данных установки «АДРОН-55». Программное обеспечение реализовано в среде MATLAB, визуализация матриц использует функции «surf», для сглаживания - «shading interp».

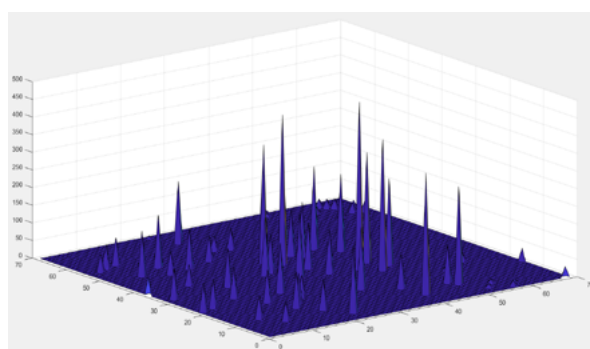
Для поиска корреляций между сигналами, полученными с ионизационных камер, был разработан алгоритм реконструкции высокоэнергичных событий. При отборе событий ключевыми критериями являются высокая общая энергия события и наличие сигнала на нижних рядах установок. Реконструкция струй осуществляется в обратном направлении движения частиц, исходя из предположения, что максимальная энергия, пришедшая на ионизационную камеру, с большей вероятностью является той же максимальной энергией, пришедшей на ионизационную камеру, находящуюся на ряд выше. Это обусловлено тем, что преимущественно идет поиск тяжелых адронов, которые в свою очередь способны благодаря своей энергии не рассеиваться в толще поглотителя калориметра. Для этого искусственно вводятся две переменные *kol* и *rad*, соответствующие количеству искоемых корреляций и радиусу выборки.

В соответствии с переменной *kol* формируется цикл с записью в новый массив отсортированных значений ионизационных камер с соответствующим им порядковым номером. Это нужно для поиска самых сильных энергий, зарегистрированных ионизационными камерами. Затем, беря переменную *rad* как основу, производится выборка из ряда калориметра, который в свою очередь является параллельным к отсортированному ряду, то есть при сортировке 5 ряда выборка производится из 3 ряда. Далее аналогичным образом из 1 ряда. В выборке производится поиск максимального значения с записью порядкового номера ионизационной камеры в отдельный массив. Алгоритм основывается на предположении, что максимальная энергия, пришедшая на ионизационную камеру, с большей вероятностью является той же максимальной энергией, пришедшей на ионизационную камеру, находящуюся выше.

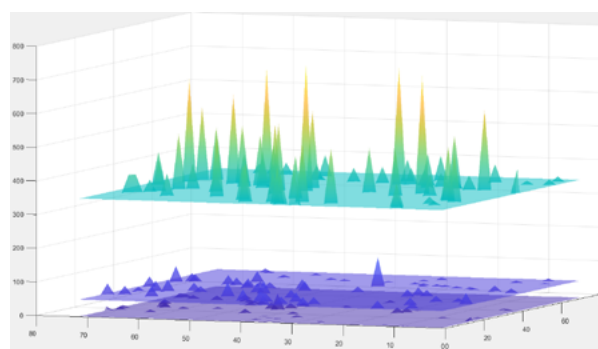
Данный алгоритм позволяет обнаруживать энергетические корреляции в зависимости от расположения ионизационных камер с двух видов (вид спереди, вид сбоку).

Далее, следуя ранее высказанному предположению, можно объединить взаимно перпендикулярные ряды для визуализации энергетических и геометрических флуктуаций и корреляций в трехмерном пространстве. Для этого данные первого ряда (порядковый номер ионизационной камеры и ее амплитуда) совмещают с данными второго ряда, находя тем самым координату взаимодействия в трехмерном пространстве.

На рисунке 3 представлена визуализация энергий матриц данных от их геометрического расположения по всем уровням калориметра.



а) Матрица данных 1- уровня



б) Матрица данных на всех уровнях

Рисунок 3. Визуализации энергий матриц данных по всем уровням ионизационного калориметра «Адрон-55»

Критерии формирования экспериментальной выборки

Определение попадания оси и алгоритм: Попадание оси ШАЛ в калориметр определялось по положению центра тяжести энергосвечения (максимума ионизации) в верхних рядах адронного блока. Для этого применялся разработанный комплекс программного обеспечения для 2D и 3D пространственной реконструкции кластеров и визуализации матриц данных. Событие принималось в обработку, если восстановленная координата оси находилась строго внутри фидуциального объема калориметра. Для устранения краевых эффектов (утечки энергии через боковые стенки) из площади установки была исключена краевая зона шириной 0.5 м по всему периметру.

Зенитные углы и апертура: Из общего потока отбирались ливни с зенитными углами. Определение зенитного угла производилось путем проведения аппроксимирующих линий по сработавшим камерам в трехмерном пространстве на основе метода наименьших квадратов. С учетом углового отбора и ограничения по площади, эффективная светосила (апертура) установки составила около 0.45

Оценка геометрической эффективности и смещения состава: Геометрическая эффективность регистрации для ливней, падающих в выделенную центральную зону, превышает 95%. Следует отметить, что жесткое геометрическое ограничение на локализацию ядра может вносить незначительное (на уровне 3-5%) систематическое смещение выборки. Компактные стволы от легких ядер (протонов) центрируются точнее, чем более широкие каскады от тяжелых ядер (железа), однако в диапазоне полного числа частиц $N_e > 10^5$ этот эффект находится в пределах общей статистической погрешности эксперимента.

В ПО предусмотрены:

- визуализации энергетических и геометрических корреляций и флуктуаций в трехмерном пространстве;
- перевод из энергетического распределения ливня в геометрическое расположение в трехмерном пространстве;
- проведения аппроксимирующих линий в трехмерном пространстве на основе двумерного метода наименьших квадратов;
- определение зенитных углов по аппроксимирующим линиям в трехмерном пространстве;
- по полученным данным открыта возможность определения азимутальных углов с учетом определения высоты.

Заключение

Использование высокогорного ионизационного калориметра «Адрон-55» с регистрацией глубинного хода адронной компоненты обеспечит уникальную возможность получения прямых, высокоинформативных данных о структуре каскада. Улучшение продольного разрешения установки «Адрон-55» позволяет существенно расширить наблюдательные возможности и получить новые экспериментальные результаты, критически важные для уточнения моделей адронных взаимодействий и повышения точности реконструкции параметров ПКИ.

На высоте 3340 м н.у.м. получены новые экспериментальные результаты исследований стволов ШАЛ с помощью модернизированного высокогорного ионизационного калориметра Адрон-55 (площадью 55 м²), в структуру которого был интегрирован дополнительный 9-й измерительный ряд. Увеличение эффективной толщины поглотителя позволило существенно уточнить и дополнить предварительные данные о замедлении поглощения адронов, опубликованные нами ранее [19, 20].

Экспериментальные и расчетные результаты являются предварительными.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научно-технических программ и проектов Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, ИРН AP23488396.

Выражаем глубокую благодарность научным консультантам, коллегам, которые не являются авторами статьи, но при их содействии проводилось исследование: Р.М. Мухамедшину, В.И. Галкину, В.В. Жукову, Ж.Т. Садыкову, В.И. Осенмуку, В.В. Пискаль.

Вклад авторов

Садыков Т.Х. - разработка концепции исследования, формулирование целей и задач исследования, контроль всех этапов анализа результатов.

Аргынова А.Х. - подготовка, создание и представление опубликованной работы, написание первоначального варианта.

Кантарбаева Д.О. - разработка компьютерных программ визуализации данных.

Махмет Х.К. - моделирование развития ШАЛ в атмосфере и развития каскадов от отдельных частиц ШАЛ в «Адрон-55».

Таутаев Е.М. - разработка компьютерных программ выделения подстволов от отдельных адронов в составе ШАЛ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них отсутствует какой-либо конфликт интересов, связанный с публикацией данной статьи.

Список литературы

1. В.П. Бобова, Г.Ю. Горячева, С.И. Никольский, В.И. Яковлев, *Поглощение энергетического потока в ядрах широких атмосферных ливней*, Известия АН СССР. Серия физическая. №38, с.998–1002 (1974), доступно по адресу: <https://istina.msu.ru/journals/579005/?p=12>
2. В.С. Асейкин, *Исследование адронной компоненты ШАЛ с энергией 3.10^{13} – 3.10^{14} эВ* (М.: Б. и., 1982. -VI Yakovlev, *Long flying component: Recent data and interpretation*, AIP Conf. Proc. 276, 154–167 (1993). <https://doi.org/10.1063/1.43828>
3. VI Yakovlev, *Long flying component: Recent data and interpretation*, AIP Conf. Proc. 276, 154–167 (1993). <https://doi.org/10.1063/1.43828>
4. V.V. Kopenkin, A.K. Managadze, I.V. Rakobolskaya, T.M. Roganova, *Alignment in gamma-hadron families of cosmic rays*, Phys. Rev. D, 52, 2766–2774(1995). <https://doi.org/10.1103/physrevd.52.2766>
5. A.S. Borisov, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.A.Slavatinsky, G.B. Zdanov, *On the nature of gamma-hadron family alignment*, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 97, с.118–121 (2001). [https://doi.org/10.1016/s0920-5632\(01\)01209-9](https://doi.org/10.1016/s0920-5632(01)01209-9)
6. L. Xue, Z.Q. Dai, J.Y. Li, *Study on alignment of high energy -hadron family events with iron emulsion chambers*, In Proceedings of the 26th International Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, UT, USA, 17–25 August 1999; V1, pp. 127–130, доступно по адресу: https://galprop.stanford.edu/elibrary/icrc/1999/proceedings/root/vol1-/h1_2_24.pdf
7. V.I. Osedlo, I.V. Rakobolskaya, V.I. Galkin, A.K. Managadze, L.G. Sveshnikova, L.A. Goncharova, K.A. Kotelnikov, A.G. Martynov, N.G. Polukhina, *A superfamily with $SE > 10^{15}$ eV observed in stratosphere*, In Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 8–15 August 2001; Volume 4, pp. 1426–1429.
8. J.N. Capdevielle, *Analysis of one cosmic-ray collision near 10^7 GeV*, J. Phys. G: Nucl. Phys., 14, с.503 (1988).
9. I.M. Dremin, D.T. Madigozhin, V.I. Yakovlev, *Monte Carlo simulations of long-flying cascades in cosmic rays and leading charm at SSC*, AIP Conf. Proc., 276, с.534, (1993).
10. A.S. Borisov, A.P. Chubenko, V.G. Denisova, V.I. Galkin, Z.M. Guseva, E.A. Kanevskaya, M.G. Kogan, V.N. Kulikov, A.E. Morozov, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.I. Nazarov, S.E. Pyatovsky, G.P. Shoziyoev, M.D. Smirnova, A.V. Vargasov, *Study of charm production in the forward cone at energy $E_{Lab} > 75$ TeV with a two-storey X-ray emulsion chamber exposed at mountain altitudes*, EPJ Web of Conferences 99, 10004 (2015). <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159910004>
11. T. Wibig, *Alignment in hadronic interactions*, arXiv 2000, arXiv:0003230.
12. I.I. Royzen, *Theoretical approach to alignment phenomenon*, Mod. Phys. Lett. A, 9, 3517–3522 (1994).
13. R.A. Mukhamedshin, *On coplanarity of most energetic cores in gamma-ray-hadron families and hadron interactions at $\sqrt{s} > 4$ TeV*, J. High Energy Phys. 5, 49 (2005).
14. T.S. Yuldashbaev, K. Nuritdinov, V.M. Chudakov, *Unusual family characteristics at energies above 10 PeV*, Nuovo Cim. 24, 569–572 (2001).

15. L.A. Anchordoqui, D.C. Dai, H. Goldberg, G. Landsberg, G. Shaughnessy, D. Stojkovic, T.J. Weiler, *Searching for the Layered Structure of Space at the LHC*, Phys. Rev. 83, pp. 114046 (2011).
16. D. Heck, T. Pierog, *Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide* (Version 7.7410 from April 30, 2021), доступно по адресу: <https://www.iap.kit.edu/corsika/>
17. T. Pierog, R. Engel, D. Heck, *Future of Monte Carlo Simulations of Atmospheric Showers*, доступно по адресу: https://agenda.infn.it/event/6911/contributions-/65020/attachments/47093-/55735/CORSIKA_Pierog.pdf
18. *Geant4 Guide For Physics Lists, Release 11.0*, Geant4 Collaboration, Rev6.0 - December 10th, 2021.
19. R. Mukhamedshin, T. Sadykov, A. Serikkanov, et al. *Studies of Anomalous Phenomena in the Development of Electron-Nuclear Cascades in the EAS Cores Registered by a Modernized Complex Installation at Mountain Altitudes*, Appl. Sci. 13, 2507 (2023).
20. T. Sadykov, R. Mukhamedshin, V. Galkin, A. Argynova, A. Almenova, Kh. Makhmet, V. Zhukov, V. Piscal, Zh. Sadykov, *Study of unusual phenomena in cores of superhigh-energy EAS with thick calorimeter at high altitudes*, MDPI, Particles Vol. 7, Issue 1, 40-51 (2025). <https://doi.org/10.3390/particles7010003>

**Т.Х. Садыков, Ә.Х. Арғынова*, Д.О. Қантарбаева,
Х.К. Махмет, Е.М. Таутаев**

*Сәтбаев университеті, Физика-техникалық институты, Алматы, Қазақстан
(E-mail: turlan43@mail.ru, aarginova7@gmail.com, dinara.kantar@gmail.com,
hansh2210@gmail.com, yernar.tautayev@gmail.com)*

КАН ядроларындағы адрондық сипаттамаларды зерттеу негізінде аса жоғары энергиялардағы адрондық өзара әрекеттесулерді зерттеу

Аңдатпа. Бұл жұмыс бастапқы ғарыштық сәулелердің бөлшектері арасындағы өзара әрекеттесуді зерттеуге арналған, оны қазіргі уақытта негізінен жанама түрде зерттеуге болады - кең ауқымды ауа нөсерлерінің дәстүрлі сипаттамаларының шектеулі жиынтығын модельдеу нәтижелерімен салыстыру арқылы. Зерттеуде кең ауқымды ауа нөсерлерінің өзектеріндегі ең ақпараттық жоғары энергиялы адрон компонентін жазуға қабілетті Адрон-55 биіктіктегі иондану калориметрі қолданылады, бұл нөсердің даму процестерін тереңірек талдауға мүмкіндік береді.

Адрон-55 қондырғысының кеңістіктік және бойлық ажыратымдылығын арттыру үшін қосымша, төменгі, тоғызыншы қатардағы иондану камераларын орнатудан және қосудан тұратын жаңарту жүзеге асырылды. Бұл өлшеу қабатын қосу нөсердің бойлық құрылымын дәлірек анықтауға және үлкен атмосфералық тереңдікте адрон энергиясының таралуын қалпына келтірудегі дәлдікті арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл жұмыстың ғылыми жаңалығы мен үлесі жаңа конфигурациядағы Адрон-55 қондырғысынан алынған тәжірибелік және есептелген деректерді салыстырмалы талдаудың алғашқы нәтижелерінде жатыр. Иондау калориметрінің құрылымына тоғызыншы тереңдік қатарын енгізу бойлық каскадты дамытудың «құйрық» бөлігінің өлшеулерінің ақпараттық мазмұнын айтарлықтай арттырды және терең қабаттардың жалпы энергия бөлінуіне қосқан үлесін дәлірек бағалауды қамтамасыз етті.

Тоғызыншы қатардың болуы жалпы иондану энергиясын және қабаттар бойынша бойлық энергия бөлінуінің таралу параметрлерін қалпына келтірудегі тұрақтылықтың артуына, сондай-ақ энергия бөлінуінің терең құрылымына негізделген оқиғалардың бөлінуінің жақсаруына әкелетіні анықталды. Сегіз және тоғыз қатарлы конфигурациялардың салыстырмалы талдауы адрон каскадының толық сіңірілмеуіне байланысты жүйелік қателіктердің азайғанын және тәжірибелік деректер мен заманауи каскадты әзірлеу модельдеріне негізделген есептеулер арасындағы сәйкестіктің жақсарғанын көрсетеді.

Бұл нәтижелер биік таулы иондану калориметрлерін болашақта пайдалану және жаңғырту үшін, сондай-ақ адрондық өзара әрекеттесулердің ағымдағы модельдерін тексеру және жетілдіруге және үдеткіш эксперименттеріне қол жетімді емес бастапқы ғарыштық сәулелердің энергия диапазонында каскадты

әзірлеуге арналған тәжірибелік үлгілерді қалыптастыру үшін практикалық маңызға ие. Енгізілген тәсіл кең ауа нөсерлерінің адрон компонентінің параметрлерін қалпына келтірудің сенімділігін және тәжірибелік деректерді модельдеу нәтижелерімен салыстырудың дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: ғарыштық сәулелер (FC), кең ауқымды ауа нөсерлері (ААЖ), иондану калориметрі, бастапқы ғарыштық сәулелену (BFC), адрон каскады.

**T.Kh. Sadykov, A.Kh. Argynova, D. O. Kantarbaeva,
Kh.K. Makhmet, E.M. Tautayev**

Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan

*(E-mail: turlan43@mail.ru, *aarginova7@gmail.com, dinara.kantar@gmail.com, hansh2210@gmail.com, yernar.tautayev@gmail.com)*

Investigation of hadron interactions at ultra-high energies based on the study of hadrons characteristics in EAS cores

Abstract. This work investigates the interactions of primary cosmic ray particles, which can currently be studied primarily indirectly by comparing a limited set of traditional characteristics of extensive air showers with modeling results. The study utilizes the Hadron-55 high-altitude ionization calorimeter, which is capable of recording the most informative high-energy hadron component in the cores of extensive air showers, enabling a more in-depth analysis of shower development processes.

To improve the spatial and longitudinal resolution of the Hadron-55 setup, an upgrade was implemented, consisting of the installation and connection of an additional, lower, ninth row of ionization chambers. The addition of this measuring layer allows for a more precise refinement of the shower's longitudinal structure and an increased accuracy in reconstructing the hadron energy distribution at great atmospheric depths.

The scientific novelty and contribution of this work lies in the initial results of a comparative analysis of experimental and calculated data from the Hadron-55 setup in its new configuration. The introduction of a ninth depth row into the ionization calorimeter structure significantly increased the information content of measurements of the "tail" portion of the longitudinal cascade development and ensured a more accurate estimate of the contribution of deep layers to the total energy release.

It was established that the presence of a ninth row leads to increased stability in the reconstruction of the total ionization energy and the parameters of the longitudinal energy release distribution across layers, as well as to improved event separation based on the deep structure of the energy release. A comparative analysis of configurations with eight and nine rows demonstrates a reduction in systematic errors due to incomplete absorption of the hadron cascade and improved consistency between experimental data and calculations based on modern cascade development models.

These results are of practical significance for the future operation and modernization of high-altitude ionization calorimeters, as well as for the formation of experimental samples intended for the validation and refinement of modern models of hadron interactions and cascade development in the energy range of primary cosmic rays inaccessible to accelerator experiments. The implemented approach allows us to increase the reliability of reconstructing the parameters of the hadron component of extensive air showers and the accuracy of comparing experimental data with modeling results.

Keywords: cosmic rays (CR), extensive atmospheric showers (EAS), ionization calorimeter, primary cosmic radiation (PCR), hadron cascade.

References

1. V.P. Bobova, G.Ju. Gorjacheva, S.I. Nikolskii, V. I. Jakovlev, *Pogloshtnie energeticheskogo potoka v jadraх shirokih atmosferynyh livnei [Absorption of Energy Flux in the Cores of Extensive Air Showers]*, Izvestija AN SSSR. Seriya fizicheskaja [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, Physics Series] №38, p.998–1002(1974), available

at: <https://istina.msu.ru/journals/579005/?p=12> [in Russian]

2. V.S. Aseikin, *Isledovanie adronnoi komponenty SHAL s energiei 3.10^{13} - 3.10^{14} eV* [Study of the Hadronic Component of Extensive Air Showers with Energy 3.10^{13} - 3.10^{14} eV] (М.: В., 1982. - 54 с.: ил.; 20 см.), p. 54, available at: <https://rusist.info/book/6351092> [in Russian]

3. V.I. Yakovlev, *Long flying component: Recent data and interpretation*, AIP Conf. Proc. 276, 154–167 (1993). <https://doi.org/10.1063/1.43828>

4. V.V. Kopenkin, A.K. Managadze, I.V. Rakobolskaya, T.M. Roganova, *Alignment in gamma-hadron families of cosmic rays*, Phys. Rev. D, 52, 2766–2774 (1995). <https://doi.org/10.1103/physrevd.52.2766>

5. A.S. Borisov, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.A. Slavatinsky, G.B. Zdanov, *On the nature of gamma-hadron family alignment*, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 97, c.118–121 (2001). [https://doi.org/10.1016/s0920-5632\(01\)01209-9](https://doi.org/10.1016/s0920-5632(01)01209-9)

6. L. Xue, Z.Q. Dai, J.Y. Li, *Study on alignment of high energy -hadron family events with iron emulsion chambers*, In Proceedings of the 26th International Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, UT, USA, 17–25 August 1999; V1, pp. 127–130, available at: https://galprop.stanford.edu/elibrary/icrc/1999/proceedings/root/vol1-/h1_2_24.pdf

7. V.I. Osedlo, I.V. Rakobolskaya, V.I. Galkin, A.K. Managadze, L.G. Sveshnikova, L.A. Goncharova, K.A. Kotelnikov, A.G. Martynov, N.G. Polukhina, *A superfamily with $SE > 10^{15}$ eV observed in stratosphere*, In Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 8–15 August 2001; Volume 4, pp. 1426–1429.

8. J.N. Capdevielle, *Analysis of one cosmic-ray collision near 10^7 GeV*, J. Phys. G: Nucl. Phys., 14, p.503 (1988).

9. I.M. Dremine, D.T. Madigozhin, V.I. Yakovlev, *Monte Carlo simulations of long-flying cascades in cosmic rays and leading charm at SSC*, AIP Conf. Proc., 276, p.534, (1993).

10. A.S. Borisov, A.P. Chubenko, V.G. Denisova, V.I. Galkin, Z.M. Guseva, E.A. Kanevskaya, M.G. Kogan, V.N. Kulikov, A.E. Morozov, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.I. Nazarov, S.E. Pyatovsky, G.P. Shoziyoev, M.D. Smirnova, A.V. Vargasov, *Study of charm production in the forward cone at energy $E_{Lab} > 75$ TeV with a two-storey X-ray emulsion chamber exposed at mountain altitudes*, EPJ Web of Conferences 99, 10004 (2015). <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159910004>

11. T. Wibig, *Alignment in hadronic interactions*, arXiv 2000, arXiv:0003230.

12. I.I. Royzen, *Theoretical approach to alignment phenomenon*, Mod. Phys. Lett. A, 9, 3517–3522 (1994).

13. R.A. Mukhamedshin, *On coplanarity of most energetic cores in gamma-ray-hadron families and hadron interactions at $\sqrt{s} > 4$ TeV*, J. High Energy Phys. 5, 49 (2005).

14. T.S. Yuldashbaev, K. Nuritdinov, V.M. Chudakov, *Unusual family characteristics at energies above 10 PeV*, Nuovo Cim. 24, 569–572 (2001).

15. L.A. Anchordoqui, D.C. Dai, H. Goldberg, G. Landsberg, G. Shaughnessy, D. Stojkovic, T.J. Weiler, *Searching for the Layered Structure of Space at the LHC*, Phys. Rev. 83, pp. 114046 (2011).

16. D. Heck, T. Pierog, *Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide* (Version 7.7410 from April 30, 2021), available at: <https://www.iap.kit.edu/corsika/>

17. T. Pierog, R. Engel, D. Heck, *Future of Monte Carlo Simulations of Atmospheric Showers*, available at: https://agenda.infn.it/event/6911/contributions-/65020/attachments/47093-/55735/CORSIKA_Pierog.pdf

18. *Geant4 Guide For Physics Lists, Release 11.0*, Geant4 Collaboration, Rev6.0 - December 10th, 2021.

19. R. Mukhamedshin, T. Sadykov, A. Serikkanov, et al. *Studies of Anomalous Phenomena in the Development of Electron-Nuclear Cascades in the EAS Cores Registered by a Modernized Complex Installation at Mountain Altitudes*, Appl. Sci. 13, 2507 (2023).

20. T. Sadykov, R. Mukhamedshin, V. Galkin, A. Argynova, A. Almenova, Kh. Makhmet, V. Zhukov, V. Piscal, Zh. Sadykov, *Study of unusual phenomena in cores of superhigh-energy EAS with thick calorimeter at high altitudes*, MDPI, Particles Vol. 7, Issue 1, 40-51 (2025). <https://doi.org/10.3390/particles7010003>

Сведения об авторах:

Садыков Т. Х. - доктор физико-математических наук, профессор, руководитель проекта, главный научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, 050032, Алматы, Казахстан.

Аргынова А. Х. - автор для корреспонденции, старший научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, 050032, Алматы, Казахстан.

Таутаев Е. М. - научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, 050032, Алматы, Казахстан.

Кантарбаева Д. О. - младший научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, 050032, Алматы, Казахстан.

Махмет Х. К. - младший научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт», ул. Ибрагимова, 11, 050032, Алматы, Казахстан.

Sadykov T.Kh. - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Project Manager, Chief Researcher, "Physico-Technical Institute" LLP, st. Ibragimova, 11, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Argynova A.Kh. - corresponding author, senior researcher, "Physico-Technical Institute" LLP, st. Ibragimova, 11, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Tautaev E.M. - researcher, "Physico-Technical Institute" LLP, st. Ibragimova, 11, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Kantarbaeva D.O. - junior researcher, "Physico-Technical Institute" LLP, st. Ibragimova, 11, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Makhmet Kh.K. - junior researcher, "Physico-Technical Institute" LLP, st. Ibragimova, 11, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Садықов Т.Х. - физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, жоба жетекшісі, «Физика-техникалық институт» ЖШС бас ғылыми қызметкері, Ибрагимова көшесі, 11, 050032, Алматы, Қазақстан.

Аргынова Ә.Х. - хат-хабар авторы, «Физика-техникалық институт» ЖШС аға ғылыми қызметкері, Ибрагимова көшесі, 11, 050032, Алматы, Қазақстан.

Таутаев Е.М. - «Физика-техникалық институт» ЖШС ғылыми қызметкері, Ибрагимова көшесі, 11, 050032, Алматы, Қазақстан.

Кантарбаева Д.О. - «Физика-техникалық институт» ЖШС кіші ғылыми қызметкері, Ибрагимова көшесі, 11, 050032, Алматы, Қазақстан.

Махмет Х.Қ. - «Физика-техникалық институт» ЖШС кіші ғылыми қызметкері, Ибрагимова көшесі, 11, 050032, Алматы, Қазақстан.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).